



HAL
open science

Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité. Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes.

Ryma Hachi

► To cite this version:

Ryma Hachi. Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité. Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes.. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 2020. Français. NNT: . tel-03130688

HAL Id: tel-03130688

<https://shs.hal.science/tel-03130688>

Submitted on 3 Feb 2021

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.

THÈSE DE DOCTORAT
UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE

École Doctorale de Géographie de Paris

Présentée par
Ryma HACHI

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN GÉOGRAPHIE

**Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs
conditions d'accessibilité**

Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes

Réalisée sous la direction de Lena SANDERS

Soutenue publiquement le 30 novembre 2020, devant le jury composé de :

Jean-Philippe ANTONI, Professeur, Université de Bourgogne – Examineur

Dominique BADARIOTTI, Professeur, Faculté de géographie et d'aménagement,
Université de Strasbourg – Rapporteur

Sabine BARLES, Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne – Présidente

Laurent CHAPELON, Professeur, Université Paul-Valéry Montpellier 3 – Rapporteur

Laurent COUDROY DE LILLE, Maître de conférences, Institut d'urbanisme de Paris,
Université Paris-Est Créteil – Examineur

Lena SANDERS, Directrice de recherche, CNRS – Directrice de thèse

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à ma directrice de thèse, Lena Sanders pour son encadrement, sa rigueur et sa bienveillance. Je remercie également les membres de mon comité de thèse, Sandrine Robert et Thomas Louail, pour leur aide précieuse notamment pendant la phase de rédaction. Merci également aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie vivement les chercheurs du projet GeoHistoricalData, Maurizio Gribaudo, Benoit Costes et Bertrand Dumenieu, pour les données sur Paris auxquelles ils m'ont donné accès, et les échanges que nous avons eus. Je remercie également les chercheurs rencontrés lors du séminaire annuel de *Space Syntax*, Conrad Kickert et Ioanna Kolovou, qui ont partagé avec moi leurs données sur Détroit et Athènes.

Je tiens aussi à remercier Christian Grataloup qui, suite à nos échanges par mail un certain été 2014, m'a orientée vers le laboratoire Géographie-cités et vers celle qui deviendra ma directrice de thèse. Je remercie également l'Université Paris pour m'avoir permis d'enseigner.

Ma reconnaissance va aussi à l'ensemble des collègues et amis de Géographie-cités pour ces belles années passées ensemble : Martine, Véronique, Antoine, Saber, Hadrien, Edwige, Arnaud, Sophie ; *l'équipe fmr* Laurent, Serge, Marion, César, Paul et Romain ; *les « anciens » doctorants* Eugenia, Dilruba, Matthieu, Robin, Lucie, Julie, Juste, Pierre-Olivier, Anne-Cécile, Brenda, Solène et Olivier, Elfie et Paola ; je n'oublie pas *la « nouvelle vague » de doctorants* Clément, Milan, Marion, Mathilde, et *les ingénieurs d'étude* Pierre, Justin, Constance et Oscar. Ca a été un réel plaisir d'échanger avec chacun de vous. J'espère n'avoir oublié personne.

J'adresse mes sincères remerciements à Natalia, pour nos après-midi tennis, à Anaïs, pour nos après-midi au quatrième étage de la rue du Four, à Antonin, pour nos après-midi rédaction. Plus sérieusement, je les remercie chaleureusement pour leurs conseils, relectures, et pour leur soutien ces derniers mois.

J'ai également une pensée pour toutes les personnes à qui j'ai dû dire tant de fois « j'peux pas, j'écris ma thèse », mon frère et ma sœur, ma nièce Sofia, Lotfi et Lilya, Rym. Enfin, je dédis ce travail à mes parents, ma mère pour sa présence chaleureuse et son amour, mon père pour son soutien indéfectible qui traverse la méditerranée.

Sommaire

Introduction Générale	19
Chapitre 1 : La conception des réseaux viaires en urbanisme, objet de multiples préconisations	29
Chapitre 2 : Croisement de regards sur la circulation, entre urbanisme et études de la mobilité urbaine	81
Chapitre 3 : Relation entre la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers : quelles préconisations en urbanisme ?	113
Chapitre 4 : Cadre méthodologique : L'analyse des réseaux viaires au moyen de la théorie des graphes.....	173
Chapitre 5 : Des données pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité	233
Chapitre 6 : Traduction des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe.....	291
Chapitre 7 : Traduction des conditions d'accessibilité des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe	333
Chapitre 8 : Des tendances de relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité	383
Conclusion Générale.....	421
Annexe A : Les études de la mobilité urbaine, par qui et comment ?.....	429
Annexe B : Analyser un réseau viaire avec le plugin <i>Spatial Design Network Analysis</i> (sDNA)	441
Annexe C : Graphiques des descripteurs morphologiques et des descripteurs d'accessibilité résumés par leur moyenne, pour les deux corpus	449
Annexe D : Etat de l'art sur les relations entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité	453
Bibliographie	457
Liste des tableaux.....	475
Table des figures.....	477

Table des matières

Introduction Générale	19
Contexte	19
Un statut complexe de l'urbanisme	21
Urbanisme et conception des réseaux viaires	23
Une volonté de « scientificité »	24
Précision du questionnement	25
Démarche méthodologique	26
Structure de la thèse	27
Chapitre 1 : La conception des réseaux viaires en urbanisme, objet de multiples préconisations	29
Introduction	29
Présentation de quelques textes utilisés.....	32
I. Premier paradigme, le réseau viaire comme image de la ville	33
I.1. Une image ordonnée.....	33
I.1.1. A l'Antiquité	33
I.1.2. A la Renaissance.....	34
I.1.3. Les utopies sociales du XVIIe et XVIIIe siècle en Europe	35
I.2. Une image de contrastes.....	37
I.2.1. L'art des jardins, XVIIIe siècle	37
I.2.2. Fin XVIIIe – début XIXe siècle.....	39
I.3. Une image bucolique : les lotissements romantiques du XIXe siècle aux Etats-Unis	40
I.4. Une image empruntée au passé : l'urbanisme culturaliste, XIXe siècle	43
Synthèse du premier paradigme, le réseau viaire comme image de la ville.....	45
II. Deuxième paradigme, le réseau viaire comme lieu de vie	45
II.1. L'urbanisme culturaliste, XIXe siècle.....	47
II.2. Le XXe siècle, de nouveaux espaces publics	47
II.3. Des contre-solutions à l'urbanisme « pour la voiture ».....	50
II.3.1. Jane Jacobs et la théorie de la ville compacte	50
II.3.2. Le Nouvel Urbanisme	51
Synthèse du deuxième paradigme, le réseau viaire comme lieu de vie.....	52
III. Le réseau viaire comme support de la circulation	53
III.1. Antiquité et XVIIe siècle.....	54
III.2. Le XVIIIe siècle : améliorer l'hygiène et la circulation dans la ville	54
III.3. XIXe siècle, des réponses aux problèmes de la ville industrielle	57
III.3.1. L'hygiénisme d'Haussmann à Paris, tout doit circuler	57
III.3.2. Cerdà à Barcelone, la circulation généralisée	58
III.3.3. Le début de l'urbanisme progressiste, XIXe siècle	60
III.4. Le XXe siècle, introduction de l'automobile en ville	60
III.4.1. La « ville-machine » de Le Corbusier	61
III.4.2. Broadacre City, de Franck Lloyd Wright	65
III.5. Des réseaux pour la voiture à l'échelle du quartier	66
III.5.1. De la Cité jardin de Howard	67
III.5.2. ... à la banlieue-jardin conçue pour la voiture	69
III.5.3. Diffusion et adaptation du modèle Radburn après la seconde guerre mondiale	70
III.5.4. Les Grands Ensembles français	72

Synthèse du troisième paradigme, le réseau viaire comme support de la circulation ...	74
Conclusion du chapitre.....	74
Focus sur la question circulaire.....	75
Chapitre 2 : Croisement de regards sur la circulation, entre urbanisme et études de la mobilité urbaine.....	81
Introduction.....	81
I. L'accessibilité, définitions, enjeux et méthodes.....	83
I.1. Définition de l'accessibilité.....	83
I.1.1. Définitions générales	83
I.1.2. L'accessibilité comme offre de mobilité	84
I.1.3. Définition choisie.....	84
I.2. Les enjeux de l'accessibilité.....	84
I.2.1. L'accessibilité comme projet politique	85
I.2.2. L'accessibilité comme condition d'insertion sociale	86
I.2.3. Accessibilité et structuration de l'espace.....	87
I.3. Les méthodes d'évaluation de l'accessibilité	88
I.3.1. Les approches classiques d'évaluation de l'accessibilité	88
I.3.2. L'approche gravitaire d'évaluation de l'accessibilité.....	89
I.3.3. L'approche de la <i>Time Geography</i> pour l'évaluation de l'accessibilité	90
I.3.4. Une évaluation de plus en plus précise de l'accessibilité.....	91
Conclusion de la partie I.....	92
II. Un croisement de regard sur la circulation.....	92
II.1. Des conditions de circulation décrites en urbanisme	93
II.2. Les conditions d'accessibilité, apport des études de la mobilité urbaine.....	94
II.2.1. Des conditions qui reflètent les besoins des usagers mobiles	94
II.3. Passage des conditions de circulation aux conditions d'accessibilité	95
II.3.1. Permettre la commodité du déplacement, le soulagement de l'utilisateur, son plaisir, sa satisfaction	95
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	96
II.3.2. Faciliter l'orientation, éviter l'égarement	97
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	97
II.3.3. Permettre une circulation généralisée et uniforme.....	98
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	98
II.3.4. Permettre des communications courtes.....	99
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	100
II.3.5. Garantir une perméabilité et une communicativité du réseau viaire	101
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	102
II.3.6. Permettre une accessibilité rapide, une fluidité maximale	102
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	103
La fluidité des déplacements	103
La rapidité des déplacements.....	104
II.3.7. Garantir la sécurité des usagers	106
Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine	106
Conclusion de la partie II.....	108
Conclusion du chapitre.....	109
Chapitre 3 : Relation entre la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers : quelles préconisations en urbanisme ?	113
Introduction.....	113

I. La relation entre la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité chez les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.....	115
I.1. Morphologie du réseau viaire et confort des déplacements.....	116
I.2. Morphologie du réseau viaire et sécurité des déplacements.....	117
I.3. Morphologie du réseau viaire et simplicité des déplacements.....	119
I.4. Morphologie du réseau viaire et continuité des déplacements.....	121
I.5. Morphologie du réseau viaire et isotropie des déplacements.....	124
I.6. Morphologie du réseau viaire et proximité des déplacements.....	125
I.7. Morphologie du réseau viaire et fluidité des déplacements.....	126
I.8. Morphologie du réseau viaire et rapidité des déplacements.....	128
Conclusion de la partie I.....	128
II. Quelle évaluation du lien entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité ?.....	129
II.1. L'argumentaire des théoriciens et praticiens de l'urbanisme.....	129
II.1.1. Des préconisations peu précises.....	129
II.1.2. Une argumentation par le discours.....	130
II.1.3. Des contradictions pour les mêmes caractéristiques morphologiques.....	131
II.1.4. Une argumentation par le chiffre.....	133
II.2. La relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité dans la littérature scientifique.....	136
II.2.1. Le rôle de la morphologie négligé par les chercheurs ?.....	136
II.2.2. Quelques tentatives d'exploration de la relation entre morphologie du réseau viaire et conditions d'accessibilité.....	138
II.2.2.1. L'approche par la comparaison.....	138
II.2.2.2. L'approche par la modélisation des déplacements.....	139
II.2.2.3. Décrire les caractéristiques des chemins sur le réseau.....	140
Conclusion de la partie II.....	141
III. Proposition pour explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers.....	142
IV. Choix d'un ensemble de préconisations.....	144
IV.1. Des préconisations typiques.....	145
IV.1.1. Une définition souple du « type ».....	145
IV.1.2. Quatre préconisations typiques.....	146
IV.2. Les réseaux organiques.....	147
IV.2.1. Présentation.....	147
IV.2.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux organiques.....	149
IV.2.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux organiques.....	151
IV.3. Le réseau quadrillé.....	152
IV.3.1. Présentation.....	152
IV.3.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux quadrillés.....	155
IV.3.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux quadrillés.....	155
IV.4. Le réseau arborescent.....	158
IV.4.1. Présentation.....	158
IV.4.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux arborescents.....	160
IV.4.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux arborescents.....	161
IV.5. Les percées configurées en étoile.....	163
IV.5.1. Présentation.....	164
Des percées en étoile à la période classique (1550-1750).....	164
Des percées en étoile au Siècle des Lumières (1715-1789).....	164

Des préconisations communes	167
IV.5.2. Les caractéristiques morphologiques des percées en étoile	167
IV.5.3. Les conditions d'accessibilité des percées en étoile	168
Conclusion de la partie IV	169
Conclusion du chapitre.....	170
Chapitre 4 : Cadre méthodologique : L'analyse des réseaux viaires au moyen de la théorie des graphes	173
Introduction	173
I. Passage d'un objet empirique à un objet mathématique, du réseau au graphe..	174
I.1. Quelques définitions.....	174
I.1.1. Qu'est-ce qu'un réseau ?	174
I.1.2. Qu'est-ce qu'un graphe ?	175
I.1.3. Quelques propriétés des graphes.....	176
I.2. Le cas des réseaux viaires	177
I.2.1. Comment convertir un réseau viaire en graphe ?	177
Le graphe topologique.....	178
L'approche Space Syntax : la carte axiale	180
Le graphe géométrique	181
Une approche mixte.....	182
Le graphe dual.....	184
I.2.2. Quel type de représentation choisir ?	186
I.2.3. Décrire le réseau converti en graphe.....	187
Conclusion de la partie I.....	188
II. La description morphologique	189
II.1. Quelles caractéristiques morphologiques ?	189
II.2. Quels descripteurs ?	190
II.3. Les descripteurs topologiques.....	190
II.3.1. Quantifier la taille du réseau.....	190
II.3.2. Quantifier la connectivité du réseau.....	191
Alpha, le coefficient de maillage	192
II.3.3. Quantifier le type d'intersections	194
Le degré des tronçons.....	194
Définition	194
La distribution statistique du degré	195
Le degré moyen d'un réseau viaire	197
II.4. Les descripteurs géométriques	197
II.4.1. Quantifier la rectitude des voies	197
La courbure des tronçons	197
II.4.2. Quantifier l'orientation des voies	198
L'orientation cardinale des tronçons	198
II.4.3. Quantifier l'espacement des voies.....	200
La longueur des tronçons.....	201
Définition.....	201
La distribution statistique de la longueur des tronçons	201
Longueur totale et longueur moyenne des tronçons	202
L'espacement des tronçons	203
Conclusion de la partie II	204
III. La description des conditions d'accessibilité.....	204
III.1. Le concept de plus court chemin	205

III.1.1. Divers types de plus courts chemins.....	205
III.1.2. Quel type de plus courts chemins choisir ?	207
III.2. Les caractéristiques des chemins comme révélateurs des conditions d'accessibilité des réseaux	207
III.2.1. Réinterprétation des caractéristiques des chemins.....	207
III.2.2. Focus sur cinq conditions d'accessibilité	208
III.3. Présentation des descripteurs d'accessibilité	208
III.3.1. Quantifier la proximité des déplacements permise par le réseau	209
Le concept de longueur des chemins	209
L'éloignement métrique pour évaluer la longueur des plus courts chemins	209
Distribution statistique et résumé numérique de l'éloignement métrique.....	210
Distribution spatiale de l'éloignement métrique	211
III.3.2. Quantifier la simplicité des déplacements permise par le réseau	213
Le concept de linéarité des chemins.....	213
L'éloignement angulaire pour évaluer la linéarité des plus courts chemins	213
Distribution statistique et résumé numérique de l'éloignement angulaire	214
Distribution spatiale de l'éloignement angulaire.....	215
III.3.3. Quantifier la continuité des déplacements permise par le réseau.....	216
Le concept de continuité des chemins	216
L'indice de détour pour évaluer la continuité des plus courts chemins	216
Distribution statistique et résumé numérique de l'indice de détour	217
Distribution spatiale de l'indice de détour	218
III.3.4. Quantifier l'isotropie et la fluidité des déplacements permises par le réseau.....	219
Le concept de concentration des déplacements.....	219
De la concentration des déplacements à la concentration des chemins.....	220
La centralité d'intermédiation pour évaluer la concentration des plus courts chemins....	220
Une centralité d'intermédiation simplifiée.....	222
Distribution statistique et résumé numérique de la centralité d'intermédiation	223
Des formes de distribution variées	223
La répartition de la centralité d'intermédiation.....	223
Distribution spatiale de la centralité d'intermédiation.....	225
Conclusion de la partie III.....	226
Conclusion du chapitre.....	226
Encadré : Critique d'un champ scientifique.....	229

Chapitre 5 : Des données pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité	233
Introduction	233
I. Présentation du type de données requis pour l'analyse des réseaux.....	235
I.1. Les données filaires	235
I.1.1. Présentation.....	235
I.1.2. Comprendre la construction des données filaires.....	236
Des données filaires construites à partir de données cartographiques.....	236
La construction des données cartographiques	236
Le plan n'est pas le réseau.....	238
La conversion des données cartographiques en données filaires	239
Des données filaires construites à partir d'images satellites	240
Synthèse.....	240
I.2. Des données filaires aux graphes viaires	241
I.2.1. Création des graphes viaires	241
I.2.2. Analyse des graphes viaires.....	241

Quel outil ?	241
I.3. Choix des standards cartographiques considérés	242
Conclusion de la partie I.....	243
II. Construction d'un corpus de cas d'étude représentatifs des préconisations faites en urbanisme.....	244
II.1. Corpus 1 : Les réseaux à la morphologie typique.....	245
II.1.1. Des préconisations théoriques aux cas d'étude empiriques.....	245
Du type à sa mise en œuvre	245
Des types altérés par le temps	246
II.1.2. Les réseaux choisis.....	247
Deux réseaux de type organique.....	247
Le réseau viaire de Paris au Moyen Âge	247
Le réseau viaire de Chester au Moyen Age	249
Deux réseaux de type quadrillé	251
La grille de Manhattan	251
La grille de Détroit.....	253
Deux réseaux de type arborescent.....	256
Le réseau viaire de la banlieue de Waterloo	256
Le réseau viaire de la banlieue de Raleigh.....	259
II.2. Corpus 2 : Des réseaux où ont été menées des interventions typiques	263
II.2.1. Des préconisations théoriques aux cas d'étude empiriques.....	263
II.2.2. Paris comme terrain d'application de préconisations typiques.....	263
La première moitié du XIXe siècle, une croissance par fragments	264
L'œuvre d'Hausmann.....	265
Des interventions sous influence.....	266
II.2.3. Le choix de Paris à la période haussmannienne.....	269
Conclusion de la partie II	270
III. Des corpus de cas d'étude aux corpus de données.....	270
III.1. Choix des données filaires utilisées.....	271
III.1.1. Les données du corpus 1.....	271
III.1.2. Les données du corpus 2.....	271
Précautions sur les données servant à des comparaisons diachroniques.....	272
III.1.3. La délimitation des filaires.....	273
III.2. Présentation des données filaires utilisées.....	274
III.2.1. Paris en 1300	274
III.2.2. Chester en 1500	275
III.2.3. Manhattan en 1930	277
III.2.4. Détroit en 1837.....	278
III.2.5. Banlieue de Waterloo en 2016	279
III.2.6. Banlieue de Raleigh en 1999	280
III.2.7. Paris au XIXe siècle.....	281
Le projet GeoHistoricalData.....	282
Présentation.....	282
Des données filaires sur le réseau viaire ancien de Paris	282
Justification du choix des données.....	283
Filaire de Paris en 1790	284
Filaire de Paris en 1854	284
Filaire de Paris en 1871	285
Filaire de Paris en 1888	285
Conclusion de la partie III.....	286

Conclusion du chapitre.....	288
Chapitre 6 : Traduction des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe.....	291
Introduction.....	291
I. Des caractéristiques morphologiques aux descripteurs morphologiques.....	294
I.1. Rappel des descripteurs morphologiques	294
I.2. Une description basée sur la comparaison.....	296
I.3. D'une description des tronçons à une description du réseau	297
I.4. Quelques précautions à prendre dans l'interprétation des résultats	298
II. Description des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires des deux corpus.....	299
II.1. Résultats sur les réseaux viaires typiques (corpus 1).....	299
II.1.1. Le coefficient de maillage	299
II.1.2. Le degré des tronçons.....	300
II.1.3. La courbure des tronçons.....	304
II.1.4. L'orientation cardinale des tronçons	305
II.1.5. La longueur des tronçons	308
II.1.6. L'espacement des tronçons	311
II.2. Résultats sur le réseau parisien entre 1790 et 1888 (corpus 2)	312
II.2.1. Le coefficient de maillage	313
II.2.2. Le degré des tronçons.....	313
II.2.3. La courbure des tronçons.....	316
II.2.4. L'orientation cardinale des tronçons	318
II.2.5. Longueur des tronçons.....	321
II.2.6. Espacement des tronçons.....	322
Conclusion de la partie II	323
III. Une description des réseaux viaires par type.....	324
III.1. Les caractéristiques morphologiques de chaque type de réseau du corpus 1	325
III.2. L'évolution des caractéristiques morphologiques suite à l'intervention d'Hausmann.....	327
Synthèse	329
Conclusion du chapitre.....	331
Chapitre 7 : Traduction des conditions d'accessibilité des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe	333
Introduction.....	333
I. Des conditions d'accessibilité aux descripteurs d'accessibilité	335
I.1. Rappel des descripteurs d'accessibilité utilisés	335
I.1.1. Des descripteurs de « plus courts chemins ».....	335
I.1.2. Présentation des descripteurs	336
L'éloignement angulaire	336
L'indice de détour	337
La centralité d'intermédiarité	337
L'éloignement métrique.....	338
I.2. Une description basée sur la comparaison.....	338
I.3. D'une description des tronçons à une description du réseau	339
I.4. Quelques précautions à prendre dans l'interprétation des résultats	340

II. Description des conditions d'accessibilité calculées sur les deux corpus de cas d'étude	341
II.1. Résultats sur les réseaux viaires typiques (corpus 1).....	341
II.1.1. Eloignement angulaire.....	341
Distribution statistique et valeurs de référence	341
Distribution spatiale de l'éloignement angulaire	343
II.1.2. Indice de détour	346
Distribution statistique et valeurs de référence	346
Distribution spatiale de l'indice de détour	347
II.1.3. Centralité d'intermédiarité.....	352
Distribution statistique et valeurs de référence	352
Distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité	355
II.1.4. Eloignement métrique.....	358
Distribution statistique et valeurs de référence	358
II.2. Résultats sur le réseau parisien entre 1790 et 1888 (corpus 2).....	361
II.2.1. Eloignement angulaire.....	361
Distribution statistique et valeurs de référence	361
Distribution spatiale de l'éloignement angulaire	362
II.2.2. Indice de détour	364
Distribution statistique et valeurs de référence	364
Distribution spatiale de l'indice de détour	365
II.2.3. Centralité d'intermédiarité.....	366
Distribution statistique et valeurs de référence	366
Distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité	368
II.2.4. Eloignement métrique.....	370
Distribution statistique et valeurs de référence	370
Conclusion de la partie II	371
III. Une description par type	373
III.1. Les conditions d'accessibilité de chaque type de réseau du corpus 1	374
III.2. L'évolution des conditions d'accessibilité suite à l'intervention d'Hausmann ...	377
Synthèse	379
Conclusion du chapitre	380
Retour critique sur les cas d'étude choisis.....	381
Retour critique sur la définition des conditions d'accessibilité.....	381
Retour critique sur les valeurs de référence choisies pour résumer les conditions d'accessibilité.....	382
Retour critique sur les connaissances thématiques.....	382
 Chapitre 8 : Des tendances de relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité	 383
Introduction	383
I. Rappel des descripteurs morphologiques et d'accessibilité mobilisés	386
I.1. Différents types de descripteurs	386
I.1.1. Les descripteurs morphologiques.....	386
I.1.2. Les descripteurs d'accessibilité.....	387
I.2. Une analyse principalement basée sur la médiane des descripteurs	389
I.3. Synthèse des descripteurs utilisés	390
I.4. Valeurs prises par les descripteurs.....	391

II. Exploration de la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité	393
II.1. Hypothèses concernant la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité.....	393
II.2. Des tendances observées grâce aux nuages de points formés par les dix cas d'étude	397
II.3. Identification des tendances de relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité.....	399
II.3.1. La linéarité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau	400
II.3.2. La continuité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau.....	406
II.3.3. La concentration des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau.....	411
II.3.4. La longueur des plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau	415
Conclusion de la partie II	417
Conclusion du chapitre.....	418
Conclusion Générale.....	421
Un dialogue entre Urbanisme et Science des réseaux	423
Quel impact des analyses de réseaux sur la pratique de l'urbanisme ?.....	425
Futures pistes	426
Annexe A : Les études de la mobilité urbaine, par qui et comment ?.....	429
I. Début des études de la mobilité urbaine en Europe et aux Etats-Unis.....	429
I.1. Jusqu'au début du XXe siècle	429
I.2. L'ingénierie du trafic automobile, un sujet d'étude dès 1920 aux États-Unis.....	430
I.3. Une prise de conscience « à reculons » en France ?.....	431
II. L'étude de la mobilité en socio-économie des transports : prédire la mobilité future et y répondre	432
II.1. Des développements méthodologiques conséquents.....	432
II.2. La planification des transports.....	432
II.2.1. Modéliser la demande de déplacement prévisionnelle.....	433
II.2.2. Les modèles de demande de déplacement de deuxième et troisième génération	435
II.2.3. Mise en place de l'offre de déplacement	435
Conclusion	436
III. L'étude de la mobilité en sciences humaines et sociales : connaître la mobilité actuelle et l'expliquer	436
III.1. Introduction de la mobilité en sciences humaines et sociales	436
III.1.1. Le <i>Mobility turn</i>	436
III.1.2. Le paradigme de la « ville en réseau ».....	437
III.1.3. Une mobilité illimitée	437
III.2. L'étude de la mobilité quotidienne	438
III.2.1. Expliquer la mobilité quotidienne	438
Conclusion	439
Annexe B : Analyser un réseau viaire avec le plugin <i>Spatial Design Network Analysis (sDNA)</i>	441
I. Présentation du plugin	441
I.1. Parenthèse sur les plus courts chemins topologiques.....	442
II. Nettoyage des données filaires.....	442
III. Les descripteurs calculés avec sDNA	444

III.1. Abréviations.....	444
III.2. Les descripteurs d'éloignement	445
III.3. L'indice de détour	446
III.4. La centralité d'intermédiarité	446
Annexe C : Graphiques des descripteurs morphologiques et des descripteurs d'accessibilité résumés par leur moyenne, pour les deux corpus	449
I. Graphiques des descripteurs morphologiques	449
II. Graphiques des descripteurs d'accessibilité	450
Annexe D : Etat de l'art sur les relations entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité.....	453
I. Les relations entre caractéristiques morphologiques et indice de détour moyen	453
II. Les relations entre caractéristiques morphologiques et centralité d'intermédiarité	453
III. Les relations entre caractéristiques morphologiques et éloignement métrique moyen.....	454
III.1. Une normalisation de l'éloignement métrique moyen.....	454
Bibliographie.....	457
Liste des tableaux	475
Table des figures	477

Contexte

« Ce qui paraît alors recherché est l'effet d'autorité que procure l'usage combiné, systématique et répétitif, de la carte et du chiffre, indépendamment de la pertinence des calculs effectués (...). L'étude constitue une réserve de données, plans ou cartes statistiques, dans laquelle « l'homme de l'art » puise librement et de façon sélective pour justifier les choix qu'il propose » (Bentayou et Benbouzid 2009).

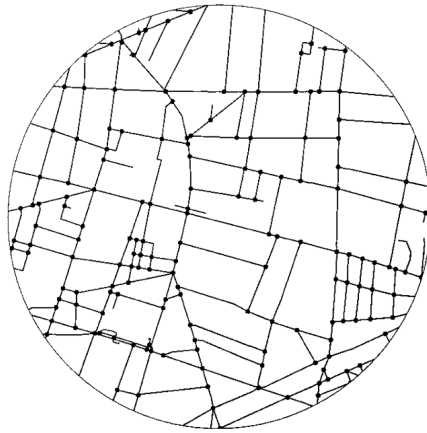
L'usage du chiffre en urbanisme fait parfois réagir. Dans cette citation, le géographe Gilles Bentayou et le sociologue Bilel Benbouzid (2009) portent un regard critique sur cet usage, en particulier lorsqu'il se fait de manière systématique et répétitive. Il s'agit pourtant là d'une tendance forte en urbanisme : l'objectivation¹ par un recours à des mesures quantitatives.

L'une des principales motivations de cette thèse est d'explorer cette tendance. Celle-ci m'est apparue clairement lors de la visite de l'exposition « Paris Haussmann » consacrée à l'œuvre du baron, en 2017 au Pavillon de l'Arsenal (Paris). Parmi les illustrations présentées figurait un plan du réseau viaire du quartier de l'Opéra à Paris, accompagné de la mesure du nombre d'intersections au km² (208 en l'occurrence) (cf figure 1). Au-dessus du plan était indiqué « marchable », que l'on pourrait définir comme « favorable à la marche ». La mesure semblait ici servir à justifier le choix du qualificatif « marchable ». Ce type d'illustrations, très parlantes, a soulevé divers questionnements : comment s'est effectué le passage de la densité d'intersections au qualificatif « marchable » ? Quel est le statut du chiffre présenté, 208 intersections au km² ? Constitue-t-il un argument d'autorité ? Une preuve de « marchabilité » ? Quelles répercussions ce type d'illustration avait-il sur la réflexion des architectes et urbanistes présents à l'exposition ? Enfin, lorsque Haussmann a transformé le quartier de l'Opéra à Paris, avait-il *l'intention* de créer un réseau viaire « marchable » ? Plusieurs de ces questionnements se sont avérés être au cœur de mon travail de thèse. Cette figure en elle-même illustre d'une certaine manière mon travail : **évaluer les conditions de circulation dans un réseau viaire, grâce à des mesures calculées sur le plan de ce réseau.**

¹ Selon le CNRTL, l'objectivation désigne depuis 1925 le « processus par lequel la connaissance tend vers l'objectivité, prend une valeur universelle ».

MARCHABLE

Urbanisme de longues et de courtes distances



Nombre d'intersections au km² (i./km²)

208

Figure 1 : Illustration présentée à l'exposition Paris Haussmann, visant à montrer que le réseau viaire du quartier de l'Opéra à Paris est « marchable ». Source : Exposition « Paris Haussmann », Pavillon de l'Arsenal, 2017.

Une autre motivation a guidé l'orientation de cette thèse : la volonté d'explorer plus en détail les textes des architectes, urbanistes, paysagistes, et autres professionnels qui se sont intéressés à la construction des villes². Ces textes sont intéressants à double titre. D'une part parce qu'ils rendent compte des réflexions de professionnels qui ont contribué à donner aux villes l'aspect qu'elles ont aujourd'hui. D'autre part parce que ces textes sont souvent utilisés comme source d'inspiration par d'autres professionnels, et enseignés aux étudiants en architecture et en urbanisme. Ces textes ont donc une influence sur les réflexions et les pratiques à venir dans ces domaines. Parmi les plus célèbres, citons *De re Aedificatoria* de Leon Battista Alberti (1485), *Teoría General de la Urbanización* de Ildefons Cerdà (1867), *Garden Cities of Tomorrow* de Ebenezer Howard (1902), *Urbanisme* de Le Corbusier (1929), ou encore *The Death and Life of Great American Cities*, de Jane Jacobs (1961). Aujourd'hui, le support de ces textes s'est diversifié, avec le développement de blog et sites spécialisés en architecture et en urbanisme³.

² Françoise Choay a consacré plusieurs de ses travaux à ces textes, notamment dans *L'urbanisme : utopies et réalités, une anthologie* (1965) et *La règle et le Modèle, sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme* (1996).

³ Citons notamment *Archdaily*, *UrbanVista*, ou encore *UrbaNews*.

Un statut complexe de l'urbanisme

Les deux motivations mentionnées ci-dessus nous conduisent à nous intéresser au statut de l'urbanisme, s'agit-il d'une science ? d'un art ? Selon Pierre Merlin et Françoise Choay (1996), l'urbanisme est alternativement défini depuis le XXe siècle comme « science, art et/ou technique de l'organisation spatiale des établissements humains ». Cette définition illustre l'ambivalence du terme.

Le fait de considérer l'urbanisme comme une science est souvent associé dans la littérature au catalan Ildefons Cerdà (Bentayou & Benbouzid, 2009; Laterrasse, 2018; Merlin & Choay, 1996). Cerdà avait pour ambition dès 1867 de fonder une « nouvelle *science* urbanisatrice ». Il prônait un lien indispensable entre **l'action**, volontaire et planifiée sur l'espace urbain, et la **connaissance** préalable, qui s'appuie sur divers types de savoirs venant de disciplines scientifiques⁴. Sa proposition pour l'extension du plan de Barcelone s'appuie notamment sur une analyse statistique minutieuse des conditions de logement des populations modestes de la ville (Bentayou & Benbouzid, 2009). Cet urbanisme vu comme une synthèse entre connaissance et action va donner lieu au début du XXe siècle à un mouvement de professionnalisation de l'urbanisme, notamment grâce à la création de formations universitaires dédiées⁵. Toutefois, **la définition de l'urbanisme comme science continue de faire débat**. En effet, un siècle après Cerdà, l'historienne de l'urbanisme Françoise Choay (1965) soutenait que les textes d'urbanisme n'avaient pas droit à un statut scientifique, car ils n'utilisent les sciences de la nature et de « l'homme » que pour servir des idéologies, parfois non-dites et non-assumées. Plus récemment, l'urbaniste Stephen Marshall (2012) déplorait que l'urbanisme⁶ avait pour fondation soit des hypothèses non testées, soit des découvertes scientifiques ponctuelles non incorporées dans un « corpus de connaissance » bien établi. De son côté, l'architecte Wowo Ding soutient en 2013 qu'il faudrait incorporer plus de *scientificité* en urbanisme⁷, notamment grâce à une assimilation des connaissances scientifiques venant d'autres disciplines comme l'histoire, la géographie, ou les sciences de la nature.

Ce débat illustre la **complexité du statut de l'urbanisme**. Un autre terme du débat relève de la date à partir de laquelle il est possible de parler d'urbanisme. Le mot « urbanisme » apparaît avec Cerdà. Toutefois, comme le signale Jean Laterrasse, « si

⁴ Cette idée de puiser dans les sciences pour éclairer l'action de l'urbanisme pourrait être antérieure à Cerdà, puisque les hygiénistes du XVIIIe siècle comme Pierre Patte s'appuyaient déjà sur des sciences savantes (celles de l'hygiène) dans leurs propositions pour la conception des villes.

⁵ La création des Instituts d'urbanisme de Paris et de Bruxelles remonte aux années 1920. Elle marque le début de la formation universitaire en urbanisme. En France, la section *Aménagement de l'espace, Urbanisme* est créée en 1992 au Conseil National des Universités.

⁶ Marshall utilise plus précisément le terme *Urban design*, que nous définissons plus loin.

⁷ Ding utilise elle aussi le terme *Urban design*.

on ne parlait pas d'urbanisme dans l'Antiquité ou au Moyen Âge, cela ne signifie pas pour autant que l'édification des villes n'obéissait pas à certaines règles ». Par ailleurs, selon Choay (1965), plusieurs textes et réalisations dus à des penseurs politiques ou sociaux ont posé, dès le début du XIXe siècle, les fondements de ce qui allait devenir l'urbanisme.

La définition de l'urbanisme comprend une autre ambivalence, relative cette fois à la nature de ses productions. Bien qu'elles aient toujours un lien avec l'action, les productions de l'urbanisme peuvent être des textes théoriques, portant sur la manière de concevoir les villes, sans que cela ne donne lieu à des réalisations concrètes. Il peut également s'agir de projets concrets, liés à la pratique professionnelle de leurs auteurs.

Dans ce travail, nous choisissons une définition souple de l'urbanisme. Celui-ci ne sera pas associé à une catégorie professionnelle particulière, ni à un contexte temporel particulier, ni à un type de production (théorique ou pratique). L'urbanisme sera défini comme un **ensemble de travaux théoriques et pratiques, remontant au moins à l'apparition des villes, et qui se proposent de guider la construction de celles-ci**. Cet urbanisme est le fait d'urbanistes professionnels, mais aussi d'architectes, de paysagistes, d'ingénieurs, d'aménageurs, de juristes, de philosophes, ou encore d'hommes politiques. Dans la suite, nous regroupons ces professionnels sous l'expression « **théoriciens et praticiens de l'urbanisme** ». Ces théoriciens et praticiens font des **préconisations** sur la manière de concevoir les villes, en agissant sur des aspects aussi divers que l'usage du sol, les densités, l'architecture des bâtiments, le traitement des espaces publics, les circulations, et bien d'autres aspects. Toutefois, ces théoriciens et praticiens n'ont pas les pleins pouvoirs pour agir. Dans les faits, ils doivent souvent composer avec un état préexistant de la ville, et avec les décisions et actions d'une multitude d'autres professionnels et acteurs de la ville. De plus, parallèlement à leur action, des processus d'auto-organisation ont lieu, avec leur logique propre. Comme le signalent Marcus & Colding (2011), les villes et le développement urbain existeraient même s'il n'y avait pas d'interventions professionnelles de la part des théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

La définition de l'urbanisme choisie dans le cadre de ce travail est proche de celle donnée dans la littérature anglo-saxonne à l'expression *Urban Design*, ou « design urbain ». Cette expression est devenue courante en Amérique du Nord et en Angleterre à partir de la Seconde guerre mondiale. Il s'agit d'une **activité multidisciplinaire de conception et de gestion des environnements urbains** (Ding, 2013). Cette activité concerne aussi bien les éléments bâtis que non bâtis. Pour Ding (2013), le design urbain a pour rôle d'améliorer la « qualité de l'urbain »

(*urban quality*). Il diffère en ce sens du *Urban Planning* (planification urbaine)⁸, qui lui porte en particulier sur des questions fonctionnelles et économiques⁹.

Urbanisme et conception des réseaux viaires

Parmi les « ingrédients » dont disposent les théoriciens et praticiens de l'urbanisme pour construire les villes figure la conception des réseaux viaires. Le réseau viaire d'une ville ou d'un quartier par exemple est le réseau formé par les voies de circulation qui permettent de s'y déplacer (autoroutes urbaines, boulevards, avenues, rues, ruelles, impasses, passages, ...)¹⁰.

La conception des réseaux viaires en urbanisme est un procédé chargé d'intentions. A différents moments de l'Histoire, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont *instrumentalisé* les réseaux viaires, pour faire émerger des qualités jugées désirables à leur époque. Ils ont par exemple conçu des réseaux viaires au plan régulier pour produire une image d'ordre dans la ville, des réseaux aux voies courbes pour produire une image bucolique. **Dans ce travail, nous nous concentrons sur la manière dont les réseaux viaires ont été instrumentalisés pour offrir des conditions de circulation favorables pour les individus.** Nous incluons dans le terme circulation la circulation à pied (la marche) et la circulation à bord d'un véhicule individuel (charrette, voiture à cheval, bicyclette, automobile, motocyclette, trottinette, ...). La circulation en transports collectifs n'est pas abordée car elle porte des enjeux particuliers¹¹.

La création de conditions de circulation favorables est l'une des principales intentions des théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaires. Elle est présente dans leurs écrits et leurs projets, au moins depuis le XVIIIe siècle. L'architecte Jean-Nicolas-Louis Durand, lors d'un cours d'architecture qu'il dispensait à l'École Polytechnique en 1794, soutenait que les communications en ville devaient être les plus courtes et les plus commodes possible, et que pour ce faire, il fallait concevoir des rues en lignes droites. Autre exemple, les percées tracées par Haussmann à Paris dans la seconde moitié du XIXe siècle avaient notamment pour objectif d'améliorer la circulation de l'air et des hommes. De son côté, Le Corbusier soutenait en 1925 que sa « ville-machine » devait être réticulée par « un autre type de rue », une « machine à circuler », une « usine

⁸ Pour Antoni (2016), le *Planning* correspond à ce que les français appellent « aménagement ». On pourrait donc aussi traduire *Urban Planning* par Aménagement urbain.

⁹ La différence entre *Urban Design* et *Urban Planning*, intéresse de nombreux auteurs, voir notamment Ewing (1996).

¹⁰ Le terme « réseau » est utilisé ici comme métaphore pour décrire un ensemble d'objets en relation, en l'occurrence, des voies de circulation reliées les unes aux autres.

¹¹ Les circulations qui reposent sur d'autres types de réseaux que le réseau viaire (réseaux souterrains, ferrés ...) ne sont pas non plus abordées.

dont l'outillage doit réaliser la circulation ». Enfin, l'architecte F. L. Wright prônait en 1934 une accessibilité généralisée, qui ne pouvait selon lui s'accomplir qu'avec un réseau viaire adapté, comprenant des autoroutes urbaines.

Ainsi, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme font des préconisations sur la manière de concevoir des réseaux viaires permettant de bonnes conditions de circulation pour les usagers. Ces préconisations ont souvent une dimension exemplaire, une visée reproductible. On peut néanmoins s'interroger sur le **processus de construction de ces préconisations**. Evoquant le cas très similaire de l'aménagement, Jean-Philippe Antoni (2016) soutient que les choix faits en matière d'aménagement et les politiques de transport qui en découlent, relèvent souvent du champ des convictions. Il évoque le cas de **l'utopie**, qui est apparue à travers l'Histoire comme une force de propositions importante, un moteur idéologique de l'action des aménageurs. Françoise Choay avait décrit cette tendance dès 1965, pour le cas de l'urbanisme. Pour elle, les préconisations faites en urbanisme sont subordonnées à **des choix éthiques et politiques, à des finalités qui n'appartiennent pas seulement à l'ordre du savoir**.

Une volonté de « scientificité »

Les convictions et les choix éthiques et politiques sont une partie intégrante des préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Plusieurs auteurs portent néanmoins un regard critique sur ce processus de construction des préconisations, car il nuit au statut scientifique de l'urbanisme (abordé plus haut dans cette introduction). Parmi ces auteurs, l'urbaniste Randall Crane (1996), qui examine un ensemble de propositions faites par le Nouvel Urbanisme¹² pour améliorer la circulation en agissant sur le réseau viaire des villes. Crane soutient que, bien que ces propositions puissent avoir des mérites dans certains cas, chacune de leurs composantes peut aussi avoir des effets négatifs sur la circulation. Il ajoute que cette éventualité est largement absente dans les textes décrivant ces propositions. Il conclut que :

*« L'important est que plus de connaissance soit développée (...) afin d'éviter les situations où le développement d'un nouveau style urbanistique engendre involontairement **plus de problèmes de circulation qu'il n'en règle** »¹³.*

Cette citation nous incite à formuler comme **problématique de départ** :

¹² Courant urbanistique apparu au début des années 1980, et visant à réintroduire la question de « l'humain » en urbanisme. Il promeut la réhabilitation de la marche à pied et favorise la compacité des villes (Ghorra-Gobin 2014).

¹³ Traduit par R. Hachi.

Comment peut-on évaluer l'effet des préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme sur les conditions de circulation offertes aux usagers ?

Le manque d'évaluation décrit par Crane (1996) pour certains travaux visant à améliorer les conditions de circulation, **contraste avec le fait que l'étude de la circulation soit un domaine scientifique et technique bien établi**. En effet, depuis les années 1920, plusieurs praticiens et chercheurs ont fait de la circulation intra-urbaine leur spécialité, forgeant des théories et des méthodes qui ont donné naissance à *l'étude de la mobilité urbaine*¹⁴ (Commenges, 2013). Nous reviendrons en particulier dans notre travail sur l'apport de la socio-économie des transports, et des études de la mobilité en sciences humaines et sociales. Ces disciplines scientifiques ont engendré une panoplie de méthodes, dans lesquelles il est possible de puiser pour évaluer le rapport entre les préconisations qu'ils font et les conditions de circulation offertes aux usagers. Notre travail prendra appui sur une de ces méthodes (*cf* section démarche méthodologique).

Précision du questionnement

Les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme concernant les réseaux viaires peuvent concerner différentes composantes de ces réseaux : leur morphologie, les aménagements à prévoir sur ces réseaux (trottoirs, mobilier urbain, ...), ou même la réglementation régissant leur usage (par exemple le type de véhicule autorisé sur chaque voie). Dans le cadre de ce travail, nous allons nous concentrer sur des préconisations portant sur la **morphologie à attribuer aux réseaux viaires**, autrement dit aux éléments pouvant être représentés sur un plan (les voies et leur agencement, et les jonctions entre ces voies). Ce choix est motivé par le fait que la morphologie est souvent au cœur du domaine de compétences des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, contrairement à l'aménagement du réseau, ou à la réglementation régissant son usage, qui dépendent souvent d'autres corps de métier.

Par ailleurs, nous choisissons de désigner les conditions de circulation offertes aux usagers par l'expression « **conditions d'accessibilité** », qui correspondent à un ensemble de potentialités offertes aux usagers lors de leurs déplacements, et qui leur permet un bon accès à leurs destinations. Ce concept d'accessibilité nous permet de préciser que notre intérêt porte sur l'offre de déplacement mise à disposition des individus, et pas sur les comportements de mobilité effectifs de ces

¹⁴ Dans son acception la plus générale, la mobilité désigne « un changement de lieu accompli par une ou des personnes » (Entrée « mobilité » sur Géoconfluences). *L'étude de la mobilité urbaine* correspond ici à l'ensemble des travaux traitant aussi bien de la demande de déplacement des individus dans l'espace urbain, que de l'offre de déplacement mise à leur disposition. Nous reviendrons sur cette ambivalence des études de la mobilité dans le chapitre 2.

individus. Dit autrement, notre intérêt porte sur les conditions d'accessibilité qu'offrent les réseaux viaires aux individus lors de leurs déplacements.

Les choix présentés ci-dessus nous mènent à préciser notre problématique : ***Comment peut-on évaluer l'effet que les préconisations faites en urbanisme, concernant la morphologie des réseaux viaires, ont sur les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux ?*** La figure 2 synthétise la relation entre les trois concepts mentionnés dans cette problématique : les préconisations faites en urbanisme, la morphologie des réseaux viaire, et leurs conditions d'accessibilité.

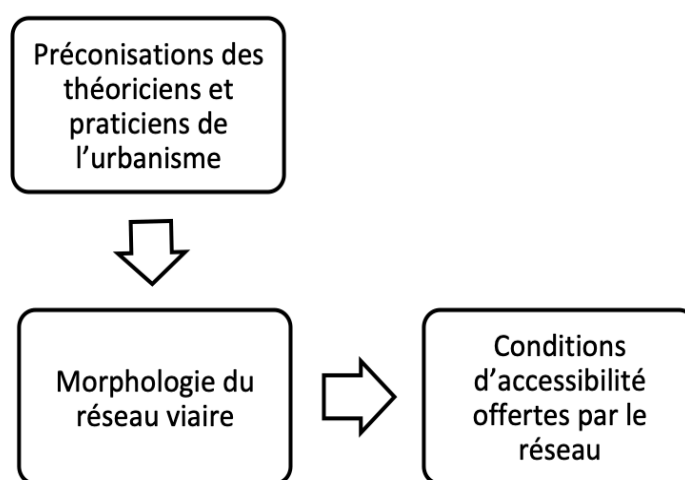


Figure 2 : Schéma synthétisant la relation entre les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, la morphologie des réseaux viaires, et les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux.

Démarche méthodologique

Les préconisations faites en urbanisme concernant la morphologie des réseaux viaires sont au cœur de ce travail. Pour cette raison, la première étape de notre démarche méthodologique va consister à construire un corpus de réseaux viaires représentatifs de ces préconisations. Nous choisissons des **réseaux viaires empiriques**, c'est-à-dire correspondant à des villes ou des quartiers existants (ou ayant existé), et pouvant être considérés comme la transcription concrète de préconisations identifiées dans les textes d'urbanisme.

Une fois ce corpus de réseaux viaires construit, il s'agira de mettre au point une méthode permettant d'évaluer l'effet de la morphologie de ces réseaux sur leurs conditions d'accessibilité. Pour ce faire, nous choisissons un outil issu des

mathématiques puis utilisé en socio-économie des transports (Dupuy, 1985; Garrison & Marble, 1962; Kansky, 1963; Xie & Levinson, 2007) pour l'étude des réseaux de transport. Il s'agit de la **théorie des graphes**, outil fondamental d'analyse de la structure des réseaux (Stransky, 1995). La théorie des graphes permet de représenter graphiquement un réseau, par des sommets et des arêtes qui les relient. Elle permet surtout de décrire, par diverses mesures quantitatives, les caractéristiques de la connexion que ce réseau assure entre les points qui le composent. Dans le cas d'un réseau servant de support à des déplacements (un réseau viaire par exemple), cela revient à décrire **l'accessibilité** que le réseau assure entre les points qui le composent.

La théorie des graphes a connu un transfert dans le champ de la recherche en architecture et en urbanisme à la fin des années 1980, grâce à l'apport des architectes anglais Bill Hillier et Julienne Hanson (Hillier & Hanson, 1989)¹⁵. Depuis, plusieurs chercheurs en architecture et en urbanisme ont utilisé cet outil pour analyser les réseaux viaires¹⁶. Ce transfert de la théorie des graphes dans le champ de l'architecture et de l'urbanisme suggère qu'il s'agit là d'un outil méthodologique dans lequel peuvent puiser les théoriciens et praticiens de l'urbanisme afin d'évaluer leur travail.

Ainsi, nous choisissons d'approfondir les possibilités d'un recours à la théorie des graphes pour **explorer la relation entre les préconisations faites en urbanisme concernant la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux**. Nous voulons montrer l'intérêt de ce transfert méthodologique, mais aussi ses limites. Notre travail s'inscrit dans un cadre exploratoire, il vise à montrer l'intérêt de faire dialoguer les théories et pratiques de l'urbanisme et les outils méthodologiques de l'étude de la circulation.

Structure de la thèse

En prenant appui sur un corpus de textes d'urbanisme, le chapitre 1 présente un aperçu des préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme concernant la conception des réseaux viaires. Il nous permet de parvenir à une synthèse des préconisations visant à améliorer les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Dans le chapitre 2, nous traitons de ces conditions d'accessibilité d'un point de vue

¹⁵ Ces derniers ont donné naissance à la *Space Syntax*, courant architectural et urbanistique prenant appui sur la théorie des graphes, notamment pour l'étude de l'espace intra-urbain. La *Space Syntax* représente le réseau viaire par des lignes considérées comme les « lignes de vue » que perçoit l'individu lorsqu'il se déplace dans le réseau. Cette approche applique donc le formalisme du graphe mais avec une approche centrée sur l'individu.

¹⁶ Citons notamment les travaux de Stephen Marshall (Marshall, 2005) et de Sergio Porta (Porta et al., 2009).

scientifique, en tant que concepts qui ont largement été explorés dans les études de la mobilité urbaine. Ce chapitre permet également de souligner les écarts et les convergences entre la manière dont est abordée la circulation en urbanisme, et celle dont elle est abordée dans les études de la mobilité urbaine.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons plus précisément aux préconisations concernant la morphologie à attribuer aux réseaux afin qu'ils aient un effet favorables sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Nous questionnons ensuite la possibilité d'évaluer, de manière formalisée et reproductible, la relation entre ces morphologies préconisées et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Dans le chapitre 4, nous présentons plus en détail la méthode choisie pour explorer cette relation, à savoir la théorie des graphes. Nous sélectionnons ensuite dans le chapitre 5 le corpus de réseaux viaires sur lequel sera appliquée cette méthode.

L'objet du chapitre 6 est la description, grâce à la théorie des graphes, de la morphologie des réseaux viaires de notre corpus. Suite à cela, nous décrivons dans le chapitre 7, aussi grâce à la théorie des graphes, les conditions d'accessibilité de ces réseaux. Enfin, nous explorons dans le chapitre 8 la relation entre morphologie et conditions d'accessibilité, pour les réseaux viaires de notre corpus. Plus généralement, cela nous permettra d'**explorer la relation entre les préconisations faites en urbanisme concernant la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux.**

Chapitre 1 : La conception des réseaux viaires en urbanisme, objet de multiples préconisations

Introduction

Une voie est « un espace aménagé pour se déplacer en ville (voie urbaine), entre les localités ou en milieu rural (routes) » (Merlin & Choay, 1996). Elle peut aussi être définie comme « le support concret aménagé pour recevoir la circulation des personnes à pied, à cheval ou sur des véhicules » (Alonzo, 2018, p. 17). Le réseau viaire correspond traditionnellement à l'ensemble de ces voies¹⁷. Toutefois, des auteurs comme l'architecte italien Leon Battista Alberti (1485) y incluent également tout le sol public servant à la circulation, tels que les ponts, places, et autres espaces libres. Pour lui, ces différents espaces sont autant de variantes, prolongements, et métamorphoses de la voie.

L'urbanisme fait partie des domaines à s'être intéressé à l'objet « réseau viaire ». Rappelons que nous définissons l'urbanisme comme **l'ensemble des travaux théoriques ou pratiques remontant au moins à l'apparition des villes, et qui se proposent de guider la construction de celles-ci**. Ces travaux sont l'œuvre d'un ensemble d'acteurs que nous avons regroupé sous l'expression « théoriciens et praticiens de l'urbanisme ». Il peut s'agir d'urbanistes reconnus en tant que tel, mais aussi d'architectes, d'aménageurs, de paysagistes, d'ingénieurs, de philosophes, ou même d'hommes politiques. Il s'agit donc d'acteurs très diversifiés dont les réflexions et les actions sont ancrées dans des domaines variés, et ont des portées très différentes. Il s'agit tout aussi bien d'architectes ayant développé des réflexions théoriques générales (comme Leon Alberti, Franck Lloyd Wright ou Le Corbusier), que d'acteurs *a priori* non professionnels de l'urbanisme, mais ayant porté un projet local d'envergure (comme Llewellyn Haskell par exemple). Aussi avons-nous fait le choix dans ce premier chapitre de préciser systématiquement la discipline ou le statut des théoriciens et praticiens de l'urbanisme mentionnés. Lorsque l'œuvre de ces acteurs a été diffusée dans des ouvrages, nous les qualifions de théoriciens (c'est le cas de la philosophe Jane Jacobs par exemple), lorsqu'ils ont conçu des projets concrets, réalisés au moins en partie, nous les qualifions de praticiens (c'est le cas du baron Haussmann)¹⁸.

¹⁷ Entrée « réseau viaire » sur le site de Géoconfluences.

¹⁸ Ces deux catégories ne sont pas disjointes, plusieurs auteurs sont à la fois théoriciens et praticiens.

Les théoriciens et praticiens de l'urbanisme se sont largement intéressés à la **conception des réseaux viaires**, entendue comme l'élaboration de leur morphologie, de leur aménagement, ou encore de la fonction qui doit leur être attribuée. En effet, la consultation des travaux de ces théoriciens et praticiens permet de constater la multitude de **préconisations qu'ils font pour la conception de ces réseaux**¹⁹. Cette citation de l'urbaniste Raymond Unwin permet de mieux comprendre comment sont construites les préconisations faites en urbanisme :

*« Celui qui est appelé à dessiner une ville doit d'abord parcourir en tous sens son terrain (...) peu à peu s'ébauche en son imagination une **vision** de la communauté future avec ses besoins et ses tendances »* (Unwin, 1922 cité dans Panerai et al. (1997))

Ainsi, selon Unwin, les préconisations faites en urbanisme reposent sur la vision de leurs auteurs, le dessein qu'ils élaborent. De son côté, Antoni (2016) explique que les choix faits en aménagement relèvent du champ des convictions. Choay (1965) dresse le même constat concernant l'urbanisme. Pour elle, les préconisations faites en urbanisme sont subordonnées à des choix éthiques et politiques, et à des finalités qui n'appartiennent pas seulement à l'ordre du savoir. Ces visions, convictions, choix éthiques et politiques, ou finalités peuvent être regroupés sous le terme de **paradigme**, entendu comme une vision du monde, une manière de voir les choses. Ces paradigmes sont intéressants car ils sont au cœur du processus de conception en urbanisme.

L'objectif de ce premier chapitre est de donner un aperçu des préconisations faites en urbanisme concernant la conception des réseaux viaires. Nous nous concentrons sur le contexte européen et nord-américain, de l'Antiquité à la fin du XXe siècle. Toutefois, **nous ne visons pas l'exhaustivité**, et n'adoptons pas un ordre chronologique dans la présentation de ces préconisations. Nous choisissons plutôt de présenter ces préconisations en fonction du **paradigme dans lequel elles s'inscrivent**. Cette approche nous permet notamment d'observer des préconisations similaires entre des théoriciens ou praticiens appartenant à des contextes spatiaux et temporels très différents. Elle nous permet surtout de souligner l'importance que prennent les visions, convictions, et choix des théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors du processus de conception des réseaux viaires.

Nous identifions trois principaux paradigmes de conception des réseaux viaires. Le premier est celui du réseau comme **image de la ville**, le second porte sur le réseau viaire comme **lieu de vie**, et le troisième le considère comme **support de la**

¹⁹ La plupart des théoriciens et praticiens consultés ne se prononcent pas uniquement sur la conception des réseaux viaires, mais aussi sur la conception de la ville, ou de la banlieue, dans son ensemble.

circulation. Ces trois paradigmes peuvent en réalité être considérés comme trois fonctions du réseau viaire, que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont voulu exacerber, à différents moments de l'Histoire et dans des contextes spatiaux différents. Ces trois paradigmes ne sont pas disjoints (cf figure 1.1). Certains théoriciens ou praticiens se sont intéressés à deux, voire trois de ces paradigmes (le réseau comme lieu de vie et comme image de la ville par exemple). Dans certains cas, nous mentionnons ces auteurs plusieurs fois (c'est le cas de Camillo Sitte). Dans d'autres cas, nous les classons dans un paradigme unique, parce que celui-ci a été particulièrement mis en avant dans leurs travaux.

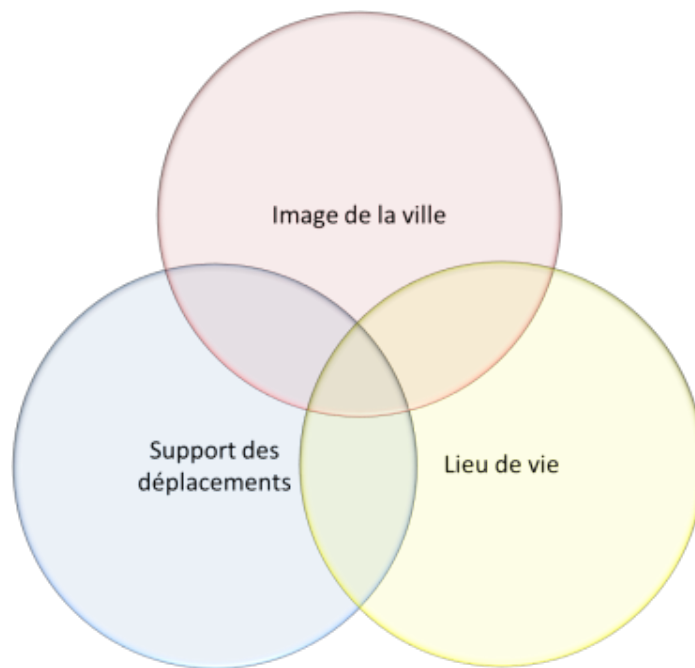


Figure 1.1 : Schéma représentant les trois principaux paradigmes dans lesquels nous classons les préconisations sur la conception des réseaux viaires en urbanisme. Ces paradigmes ne sont pas disjoints : certains théoriciens ou praticiens de l'urbanisme sont à la jonction de deux, voire trois paradigmes.

Comme nous l'avons signalé, notre présentation des préconisations faites en urbanisme sur la conception des réseaux viaires ne sera pas exhaustive. Nous voulons nous concentrer sur des préconisations majeures, ayant eu un écho au-delà du contexte spatial et temporel de leurs auteurs. Une manière d'identifier de telles préconisations est de s'appuyer, non pas sur les écrits originels des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, mais sur des sources secondaires qui décrivent leurs travaux *a posteriori*.

Présentation de quelques textes utilisés

Nous aurons principalement recours dans ce chapitre à des sources secondaires décrivant les travaux des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Ces sources secondaires sont l'œuvre d'historiens de l'architecture et de l'urbanisme, mais aussi de géographes, d'architectes, d'urbanistes, et d'aménageurs. Parmi elles figure *Architecture de la voie*, d'Eric Alonzo. Cet ouvrage est le plus adapté à notre objectif car il aborde spécifiquement les différentes manières dont a été considéré le réseau viaire en architecture, de l'Antiquité jusqu'à la période actuelle.

D'autres textes portant plus généralement sur la conception de la ville et de son plan nous seront également utiles. Parmi eux, celui de Françoise Choay, *L'urbanisme, utopies et réalités*, ouvrage qui retrace l'évolution de l'urbanisme au XIXe et au XXe siècles. Nous aurons également souvent recours à l'ouvrage *Concepts, méthodes et modèles pour l'aménagement et les mobilités*, de Jean-Philippe Antoni. Nous utiliserons en particulier le chapitre 2 où l'auteur évoque les utopies et idéologies qui ont guidé l'aménagement des villes à chaque époque, en les classant en trois temps : le temps du beau, le temps de la technique, et le temps du développement durable.

Le numéro 96 de la revue *Espaces et sociétés*, datant de 1999, intitulé « Infrastructures et formes urbaines, tome II architecture des réseaux » nous sera également utile. Nous nous appuyerons en particulier sur l'article de Pellegrino, Jeanneret et Kaufmann, intitulé « Infrastructures et modèles urbanistiques ».

Enfin, citons le rapport de recherche rédigé en 1989 par Malverti et Picard *Les villes coloniales fondées entre 1830 et 1870 en Algérie. Les tracés de ville et le savoir des ingénieurs du génie*. Même si le sujet du rapport semble *a priori* éloigné du nôtre, la partie portant sur « La ville dans les traités d'architecture » nous est d'une grande utilité car elle aborde comment étaient conçus les plans de ville en France entre 1754 et 1850. Les auteurs s'appuient en particulier sur quatre traités d'architecture importants parus à cette période : *Essai sur l'architecture* de M.A. Laugier, 1754 ; *Mémoire sur les objets les plus importants de l'architecture* de Patte, 1769 ; *Le cours d'architecture* de J.L.N Durand, 1802 ; *Traité d'architecture* de L. Raynaud, 1850. Comme nous aurons souvent recours à ce rapport de Malverti et Picard, pour alléger le texte, nous choisissons une abréviation pour cette référence : M.P, (1989).

Nous utilisons également de nombreux autres textes, qui seront signalés au fur et à mesure. Cela nous permet de rendre compte autant que possible de la diversité des préconisations portant sur la conception des réseaux viaires, qui varient selon les contextes spatiaux et temporels, ou qui coexistent dans un même espace et à une même période.

Les textes présentés ci-dessus offrent une description *a posteriori* des travaux des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, donc potentiellement une interprétation de ces travaux, les chargeant d'intentions qui n'étaient peut-être pas celles de leurs

auteurs. Toutefois, cette description *a posteriori* est intéressante dans la mesure où elle permet d'évaluer la manière dont **ces travaux ont été reçus et interprétés par la suite, et donc la manière dont les idées des théoriciens et praticiens de l'urbanisme se sont diffusées.**

I. Premier paradigme, le réseau viaire comme image de la ville

« *L'apparaître de la ville (...) change de substance. Comme si donc, au lieu de se présenter par ses pleins, elle advenait à distance d'elle-même, dans les écarts et les circulations* » (Bordreuil, 1995).

L'architecte Antoine Brès s'appuie sur cette citation de Bordreuil pour soutenir que le réseau viaire, donc le « vide » dans une ville, est ce qui en donne une image (Brès, 1998). Cette idée n'est pas récente. Plusieurs théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont, au cours de l'Histoire, instrumentalisé les réseaux viaires afin de produire une certaine *image de la ville*. Cette image vise pour eux à susciter chez le citadin ou le visiteur des représentations et des sentiments (ordre, bien-être, beauté, nostalgie, ...). Nous verrons que les visions sur ce que doit être *l'image de la ville* diffèrent selon les périodes historiques, voire au sein d'une même période.

I.1. Une image ordonnée

I.1.1. A l'Antiquité

Concevoir une ville selon un plan régulier est une pratique très ancienne. L'archéologue Jean Louis Huot (1997) montre par exemple que la ville « orientale » d'Haradum, en Mésopotamie antique, offrait dès le XVII^e siècle avant J.-C. toutes les caractéristiques d'une ville régulière : un quadrilatère de remparts, **des rues à peu près droites se recoupant à angle droit**, une place centrale bordée par la maison du maire et par un temple.

Cette régularité du plan peut avoir pour but de renvoyer une certaine image de la ville. Selon Jean-Philippe Antoni (2016), le géomètre et ingénieur Hippodamos de Milet (498-408 av. J.-C.) en concevant le plan de Milet (ancienne cité grecque d'Ionie) sous forme de **grille orthogonale**²⁰ (cf figure 1.2), voulait concevoir un découpage rationnel et géométrique censé **exprimer le système politique, en donner une**

²⁰ Ce plan a donné naissance à l'expression « plan hippodaméen ».

image ordonnée et garantir l'efficacité et la pérennité de l'ensemble. Antoni parle alors d'un lien étroit entre forme urbaine et organisation politique.

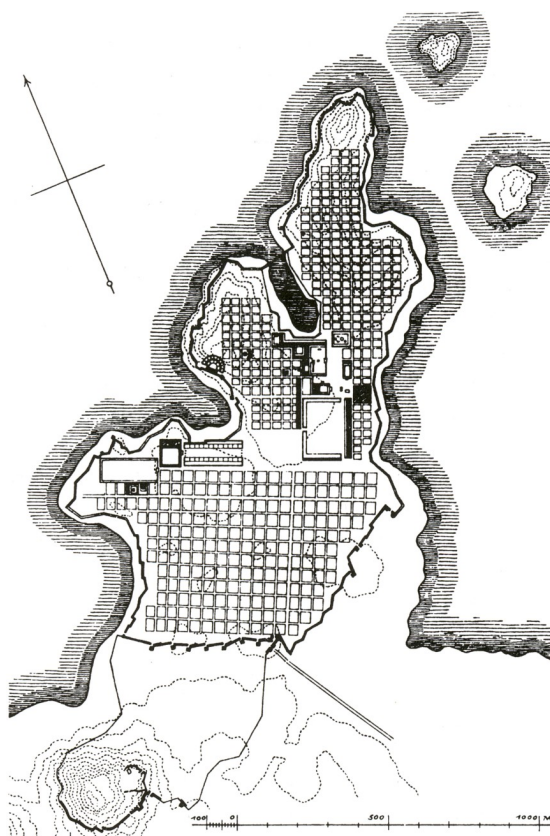


Figure 1.2 : Plan de la ville de Milet. Source : Entrée « Hippodamos » sur Wikipédia.

I.1.2. A la Renaissance

L'adoption de la perspective à la Renaissance (XVe-XVIe siècles) a produit des changements de grande ampleur dans la conception urbaine, faisant adopter la règle et le té comme principe de composition urbaine (Moreno 2009). A cette période, la rue est vue comme la **vitrine de la ville**.

De nombreux traités d'architecture ayant fait date sont rédigés durant la Renaissance. Selon (Alonzo 2018), ces traités préconisent des villes « **réglées et ordonnées** par un réseau de grandes rues rectilignes, composées selon les configurations géométriques – grille ou étoile –, obéissant en cela à un idéal à la fois esthétique et poliorcétique ». Parmi ces traités figure *De re aedificatoria* publié par l'architecte italien Leon Battista Alberti en 1485. Selon Alonzo, ce traité est celui qui a initié la prise en compte de la voie comme un des objets éminents de l'architecture. Plus tard, en 1570, Vicence Andrea Palladio publie *Les quatre livres de l'architecture*, traité dont les trois premiers chapitres sont consacrés à la voie. Dans le traité d'Alberti comme dans celui de Palladio, **la voie est considérée non pas uniquement comme un objet utilitaire, mais aussi comme un espace beau et**

divertissant. Palladio parle de « beauté viaire » produite par la vue sur le paysage traversé, et organisée par le déplacement. Pour lui, les voies doivent être **larges et droites**. Il affirme que la commodité des voies en lignes droites et l'assurance que donne une longue découverte du pays soulagent ceux qui marchent, « leur esprit trouve du plaisir et de la satisfaction dans la nouveauté continuelle des divers objets qui se présentent » (Alonzo 2018).

Prenant appui sur les écrits d'Alberti, de Palladio, et d'autres penseurs, des théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont imaginé tout au long de la Renaissance des projets urbains avec une forte dimension géométrique : les plans de ville étaient tracés de manière symétrique, selon une planification extrême, avec pour impératif esthétique celui de la perspective, et de la valorisation des monuments (en particulier les monuments antiques). Parmi les plans issus de cette tendance, celui de Rome conçu par le pape Sixte Quint²¹ en 1589 (cf figure 1.3). Dans ce plan, la basilique Sainte-Marie Majeure, située sur le point le plus haut de Rome, est placée au centre d'une composition qui associe les différents lieux de pèlerinage de la ville. De nouvelles rues droites et larges, des *percées*, sont tracées pour relier les sept basiliques de la vieille ville. Elles font de la ville un système sacré et une image de pouvoir spirituel.

Ainsi, les principes de conception des réseaux viaires à la Renaissance sont les formes géométriques, composées de rues larges et en lignes droites. Comme à l'Antiquité, ces rues donnent une image ordonnée de la ville. Cette image est motivée par des considérations esthétiques, et/ou par une volonté de marquer symboliquement le pouvoir de la religion.

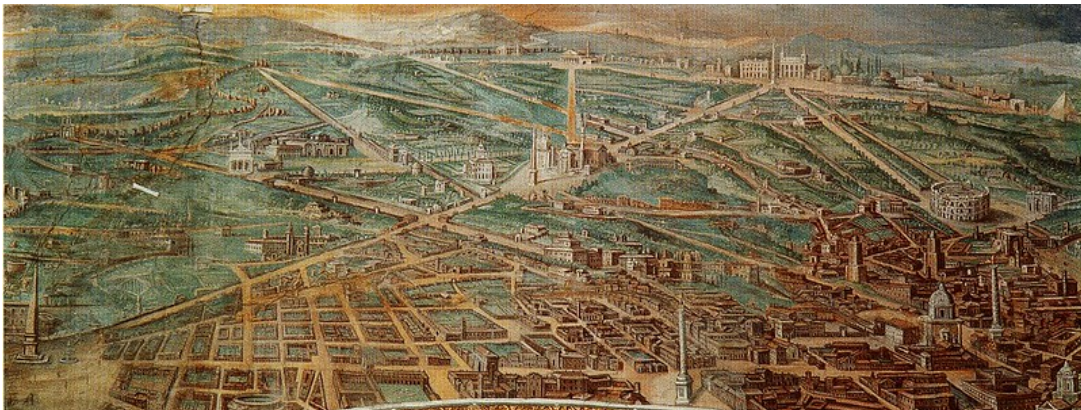


Figure 1.3 : Plan d'ensemble de la Rome de Sixte Quint, 1589, fresque de la Bibliothèque vaticane. Source : flickr.com.

1.1.3. Les utopies sociales du XVIIe et XVIIIe siècle en Europe

Durant les XVIIe et XVIIIe siècles, la conception des plans de ville, et donc de leur réseau viaire, trouve parfois sa source dans des utopies sociales. C'est le temps des «

²¹ Ce plan fait de Sixte Quint le créateur de la Rome moderne (Lavedan et al., 1982).

Cités idéales ». Antoni (2016) en donne plusieurs exemples, fondés sur des projets et textes utopiques publiés en France, en Angleterre, en Italie ou en Espagne, en particulier au XVIIe siècle. Il évoque notamment le plan de la Cité du Soleil (cf figure 1.4) qui devait permettre le passage de la théorie d'utopie sociale proposée par le philosophe italien Tommaso Campanella (1602) à la pratique. De son côté, le plan de Neuf-Brisach (cf figure 1.4) a été dessiné par l'architecte-ingénieur Vauban en 1697 selon un modèle très proche de la Cité du Soleil. Ce plan avait certes pour principe le réalisme de la guerre : une place forte dont la géométrie est destinée à mettre en difficulté l'artillerie des assaillants. Néanmoins, Vauban avait aussi à cœur le bien-être des populations et la justice sociale dans la ville (Antoni, 2016). Il conçoit le plan de Neuf-Brisach selon une géographie parfaitement rationnelle qui se traduit par un aménagement symétrique de l'espace urbain. Cet aménagement devait intégrer avec harmonie les espaces civils et les bâtiments militaires. Pour finir, Antoni évoque le plan de la Saline royale d'Arc-et-Senans (réalisée) et sa prolongation dans la « cité idéale » de Chaux (non réalisée) (cf figure 1.5). Ce plan dessiné par Claude-Nicolas Ledoux (1779) était lui aussi la concrétisation d'une utopie sociale visant à garantir aux ouvriers de meilleures conditions de vie, en les rapprochant de leur lieu de travail.

En résumé, **l'image ordonnée visible sur ces plans, et donc sur les réseaux viaires qu'ils représentent, est moins motivée par des considérations esthétiques que par la volonté de retranscrire une certaine vision utopique de la société.** En dehors de ces quelques exemples, les manifestations concrètes des utopies sociales sont assez peu nombreuses. Pour Alonzo (2018), cela s'explique du fait que « les occasions de création de ces cités idéales sont rares, comme le sont les transformations de la ville existante auxquelles résistent les structures physiques et sociales ».

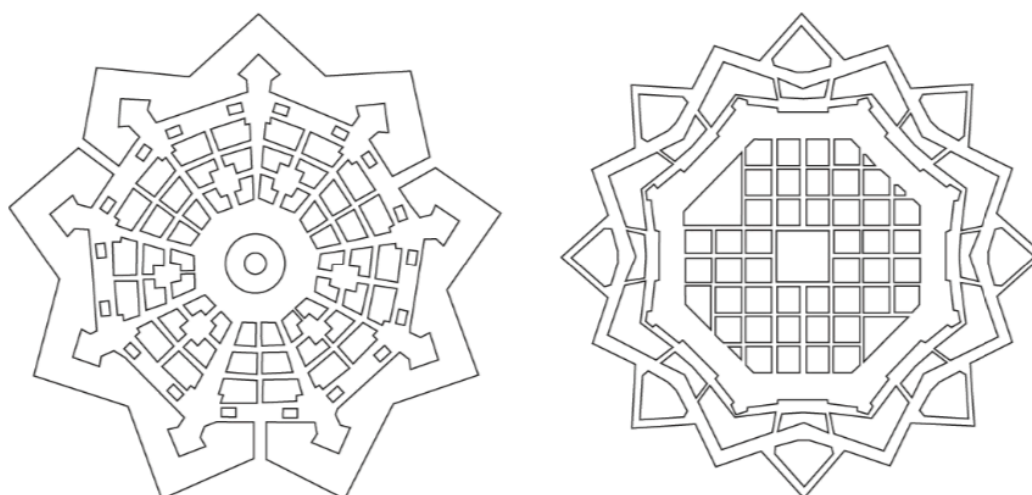


Figure 1.4 : Plans simplifiés de la Cité du Soleil (Campanella) à gauche, et de Neuf-Brisach (Vauban) à droite. Antoni (2016) décrit ces deux plans en ces termes « fondés sur des convictions totalement différentes, les deux plans partagent une symétrie et une géométrie censées caractériser une vision de l'espace et de la société, c'est-à-dire un ordre inscrit dans la géographie urbaine ». Source : (Antoni, 2016).

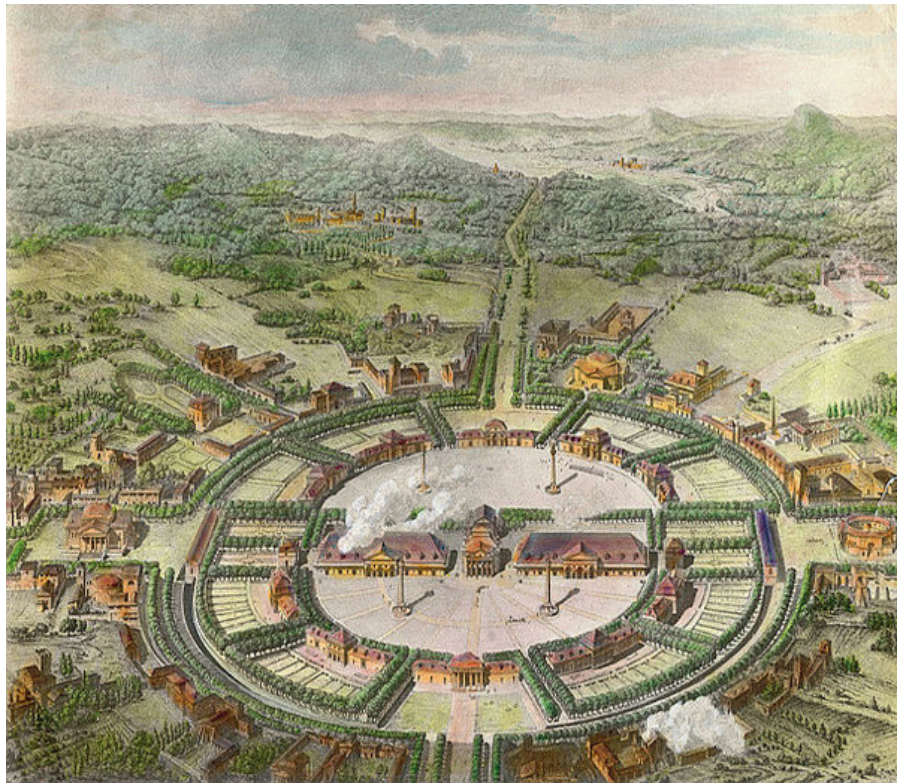


Figure 1.5 : Représentation de la Cité idéale de Chaux (par Ledoux 1779), qui devait prolonger la forme de la Saline royale pour former un cercle parfait. Seule la Saline sera réalisée. Source : la-croix.com.

I.2. Une image de contrastes

I.2.1. L'art des jardins, XVIIIe siècle

Au milieu du XVIIIe siècle, au moment où – selon Alonzo (2018), l'entreprise routière des Ponts et Chaussées commence à rivaliser en France avec celle des Anciens, un nouvel imaginaire nourrit la conception des voies : celui du jardin à la française. Pour Eric Alonzo, cet imaginaire marque aussi bien les plans de villes dessinés par les architectes que les cartes des élèves ingénieurs des Ponts et Chaussées. Il parle même de « figure obsédante du jardin à la française ».

Selon Alonzo, comme pour les utopies sociales du XVIIe et XVIIIe siècle, la mise en œuvre concrète de projets conçus selon l'art des jardins dans les villes est restée marginale. En revanche, cet art s'est largement déployé dans les forêts avoisinant les villes, et ce pour les besoins de la chasse : **de gigantesques réseaux viaires formés de faisceaux et de trames de voies rectilignes ont été tracés dans ces forêts. Le percement d'avenues en droite ligne y a produit des figures étoilées** (cf figure 1.6), motivées non pas par la recherche de l'idéal spatial de la Renaissance, mais par l'organisation de la chasse qui nécessite des lieux d'observation panoptique, des places de ralliement et des trajectoires directes. Ainsi, ces forêts ont servi de

laboratoires dans lesquels pouvaient se déployer les plans dont les architectes rêvaient à la même époque pour la ville (Alonzo 2018).

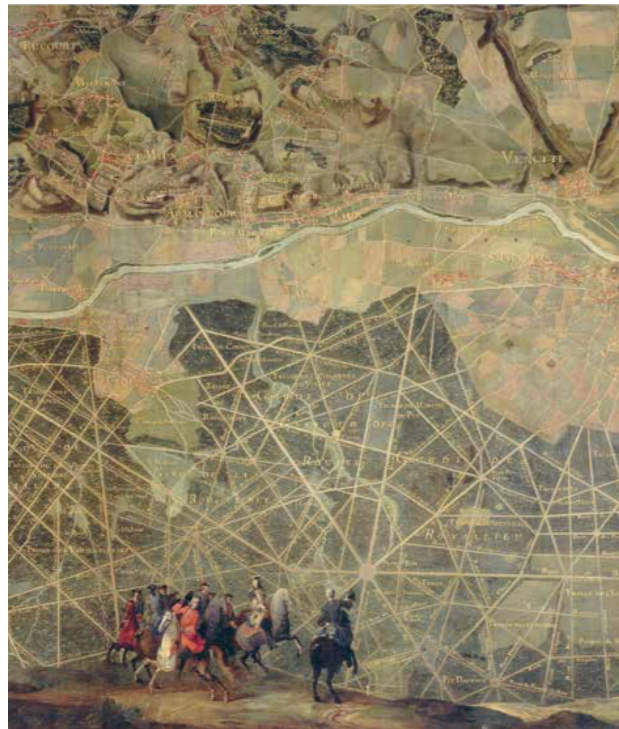


Figure 1.6 : Plan d'une partie de la forêt de Compiègne, montrant des réseaux formés de faisceaux et de trames de voies rectilignes, formant des figures étoilées. Source : Denis, 1739, « Salon des cartes : plan d'une partie de la capitainerie des chasses de Compiègne », dans (Alonzo, 2018).

Malgré le manque de réalisations concrètes à l'époque, l'art des jardins à la française devient, aux yeux des architectes, le savoir de référence en matière de conception des réseaux viaires intra-urbains (Alonzo 2018). Cet art prendra une telle importance au XVIII^e siècle que de nombreux historiens (Lavedan 1941; Bardet 1951; Mariage 1990) lui confèrent une influence fondamentale dans la genèse des savoirs et des pratiques de l'aménagement, qui se développent à partir du siècle suivant.

L'abbé Marc-Antoine Laugier est une des figures de cet intérêt pour l'art des jardins. Bien qu'il ne fût pas architecte, Laugier, avec son *Essai sur l'architecture* (1753) influença nombre de jeunes architectes de son époque. Il consacre une partie de son ouvrage à la manière de dessiner les plans de villes. Il écrit :

« Il faut regarder une ville comme une forêt. Les rues de celle-là sont les routes de celle-ci, ce qui fait la beauté d'un parc, c'est la multitude des routes, leur largeur, leur alignement. Il faut qu'un Le Nôtre en dessine le plan, qu'il y mette le goût et la pensée, qu'on y trouve tout à la fois l'ordre et la bizarrerie, la symétrie et la variété, qu'ici on aperçoive une étoile, là une patte d'oie, de ce

côté des routes en épis, de l'autre des routes en éventail, plus loin des parallèles, partout des carrefours, des dessins et figures différentes. Plus il y aura de choix, d'abondance, de contraste, de désordre – même dans cette composition, plus le parc aura de beautés piquantes et délicieuses. Que le dessin des parcs serve au dessin de nos villes » (Laugier, 1753 cité dans Malverti et Picard (1989)).

Outre la référence à l'art des jardins, cette citation illustre que la variété, l'absence de monotonie, est pour Laugier un aspect très important de la conception du plan de la ville, donc du plan du réseau viaire également. Selon Malverti et Picard (1989), **la plupart des architectes de cette époque, qu'ils fassent référence ou non à l'art des jardins, introduisent l'idée d'un compromis à respecter entre ordre et variété.** Laugier critique ainsi les plans trop réguliers, comme les grilles, dans lesquels « règne une fade exactitude, une froide uniformité qui fait regretter le désordre de nos villes. Tout est reporté à une figure unique, c'est un grand parallélogramme traversé en long et en large par des lignes à angles droits » (Laugier 1753, *cité dans* M.P, (1989)). Il ajoute « on ne voit partout qu'une ennuyeuse répétition des mêmes objets. Tous les quartiers se ressemblent si bien qu'on s'y méprend, on s'y perd, **évitons l'excès de la symétrie et de la régularité** ». Pour Laugier, les plans en grilles sont « fades », « froids », « ennuyeux », « répétitifs », et sont une source d'égarement pour les individus.

Ainsi, après que l'ordre et la régularité aient été, dès l'Antiquité et jusqu'au XVIIIe siècle, l'ingrédient fondamental pour produire l'image d'une ville, l'art des jardins introduit dès le milieu du XVIIIe siècle le gout du contraste, de la variété, l'absence de monotonie.

I.2.2. Fin XVIIIe – début XIXe siècle

Des architectes de la fin du XVIIIe siècle et du début du XIXe siècle vont reprendre la critique formulée par Laugier à l'égard des plans trop réguliers. Pierre Patte, architecte français du XVIIIe siècle, soutient qu'il faut éviter la monotonie et l'uniformité d'un plan trop régulier et géométrique. Il explique que pour la beauté d'une ville, il n'est pas nécessaire que les voies « soient percées avec l'exacte symétrie des villes du Japon ou de la Chine, et que ce soit toujours un assemblage de carrés et de parallélogrammes (...) il convient surtout d'éviter la monotonie et la trop grande uniformité dans la distribution totale de son plan, mais **d'affecter au contraire de la variété et du contraste dans les formes (...) il faut que le voyageur soit attiré par des spectacles intéressants, et par un mélange agréable de places, de bâtiments publics et de maisons particulières** » (Patte, 1769 *cité dans* M.P (1989)).

Citons également Léonce Reynaud, architecte et ingénieur, enseignant l'architecture à l'Ecole Polytechnique à partir de 1836. Comme Laugier et Patte, Reynaud critique

l'uniformité, les formes régulières de génération simple, les rues en ligne droite. Pour lui, ces formes engendrent la sécheresse et la monotonie, c'est « la convention substituée à l'esprit ». Reynaud **critique en particulier les plans en grille, dans lesquels de longues et larges rues parallèles ouvertes suivant deux directions se croisent à angles droits**, et sont bordées de maisons qu'il qualifie de monotones. Pour lui, ce plan en grille est irrationnel car il s'oppose à la conception des villes comme œuvre du temps. Il ajoute que les longues rues droites sont généralement « tristes » et font paraître la ville plus petite qu'elle ne l'est réellement, car faute de point de repère on ne peut se rendre compte de leurs dimensions (Reynaud, 1850 cité dans M.P (1989)). Il suggère qu'on y admette **des changements de direction, pour y faire apparaître de la variété**. Mais Reynaud critique également les rues « trop brisées » qui, au même titre que les rues trop longues, enlèvent tout caractère de grandeur et rendent la ville « triste » en la privant de toute longue perspective.

Citons enfin le théoricien socialiste Charles Fourier, qui compte lui aussi parmi les critiques de la régularité dans les plans de ville. Dans son *Traité de l'association domestique-agricole* publié en 1822, Fourier fait les préconisations suivantes pour la conception des réseaux viaires :

*« Les rues devront faire face à des points de vue champêtres, ou à des monuments d'architecture publique ou privée. **Le monotone échiquier en sera banni**. Quelques-unes seront cintrées (serpentées) pour éviter l'uniformité [et la] moitié des rues devront être plantées d'arbres variés dans chacune »* (Fourier, 1822, p. 565).

Les architectes mentionnés ci-dessus vont plus loin que l'art des jardins dans la critique de la régularité, puisqu'ils s'attaquent également à la symétrie et aux longues rues droites. L'idéal esthétique devient celui de l'irrégularité, ces architectes prônent des rues brisées (mais pas trop), voire serpentées. Cette esthétique vise à produire un spectacle varié pour le citadin ou le visiteur.

I.3. Une image bucolique : les lotissements romantiques du XIXe siècle aux Etats-Unis

Comme l'explique Jackson (1987), à partir de 1850 débute aux Etats Unis le développement de banlieues conçues comme des unités totalement planifiées et séparées de la ville, c'est-à-dire comme des communautés (*communities*) ayant une existence séparée. Selon Jackson, cela s'explique par la volonté d'une population aisée de s'établir loin de la ville industrielle du XIXe siècle, polluée et bruyante. Cela s'explique également par l'émergence de nouveaux modes de transit, permettant de faire facilement la navette entre le centre-ville et la banlieue.

Des lotissements de haut standing sont créés pour ces communautés. Ces lotissements devaient produire une **nouvelle image**. Ils devaient évoquer le **caractère pastoral et bucolique** de la maison, en opposition avec le monde efficace de l'usine ou du bureau. Cette image pastorale et bucolique était une part importante de l'idéal suburbain : les lotissements suburbains devaient prendre une forme romantique, en harmonie avec la nature. Selon Jackson, **le changement le plus marquant dans la création de ces lotissements a été le plan du réseau viaire**. Jusqu'ici, les réseaux en grille étaient majoritaires aux Etats Unis. Les rues rectilignes attestaient de « la capacité de l'homme à dépasser l'hostilité des terres et à civiliser un continent »²². Dans l'imaginaire de l'époque, les lignes droites symbolisent la ville, alors que les lignes courbes symbolisent la campagne. Ainsi, lorsque les urbanistes étasuniens eurent besoin de donner une image pastorale et bucolique à ces nouvelles communautés, ils choisirent de tracer leur réseau viaire selon des voies courbes.

A noter que l'utilisation de voies courbes avait une autre raison. Jackson (1987) explique que la grille était considérée comme idéale pour les maisons en rangées : elle permet de les agréger sans perte d'espace. Mais dans les banlieues étasuniennes, les individus avaient tendance à assurer un retrait par rapport à la rue, et à centrer leur maison en milieu de parcelle. Dans ce cas, selon Jackson, ce sont les voies courbes qui deviennent idéales. Enfin, l'auteur ajoute que ces voies courbes inspirent **l'ordre esthétique d'une conception unifiée**, opposé à l'ordre mécanique imposé par la subdivision de la grille.

Jackson évoque un exemple de ces communautés réalisées dans la seconde moitié du XIXe siècle. En 1852, l'homme d'affaires new yorkais Llewellyn S Haskell voulait créer une « retraite pour l'homme », où il pourrait exercer ses droits et ses privilèges. Il lance la conception de Llewellyn park, un lotissement de haut standing dans le New Jersey, destinée aux hommes d'affaires de New York. L'architecte Alexander Jackson Davis est chargé de réaliser le plan de ce lotissement.

Selon Jackson, Llewellyn park est la première concrétisation du système de **voies curvilignes**²³ : six miles de voies gracieusement ondulantes, suivant les contours naturels du terrain. Jackson explique que ces voies courbes sont une part essentielle de l'environnement pittoresque et romantique du lotissement. Le but étant de conserver le caractère rural du terrain, le plan a été conçu de manière à préserver autant que possible la beauté naturelle du site (cf figure 1.7). De son côté, Le Goix

²² Traduit par R Hachi.

²³ Le système de voies curvilignes n'était pas la seule innovation introduite par Alexander Davis à Llewellyn park. Jackson (1987) explique que cet architecte a aussi introduit la notion de gouvernance privée des espaces collectifs : le parc central du lotissement étant préservé à l'état d'espace naturel, était sous la responsabilité d'un *Committee of Management*. Autre innovation, un règlement de copropriété contraignant (*restrictive covenants*) interdit toute activité commerciale ou industrielle au sein du parc résidentiel. Enfin, Davis introduit l'enclosure du lotissement, avec un panneau disposé à l'entrée : « *Private entrance. Do not enter* ». A ce titre, Renaud Le Goix considère que Llewellyn park est la première *Gated community* (lotissement fermé) étasunienne (Le Goix 2006).

(2006) affirme que ce plan créait une faible densité²⁴, ce qui était très valorisé par les habitants et les promoteurs de l'époque. Jackson signale enfin que le lotissement Llewellyn park a permis de montrer, aux Etats Unis, l'intérêt de concevoir un cadre naturel agréable, non pas uniquement pour une famille individuelle, mais pour un groupe d'habitants. Cette approche était nouvelle pour les architectes étasuniens, et elle ouvrit la voie à une longue tradition de lotissements soigneusement planifiés. Parmi eux, Riverside dans l'Illinois, conçu par l'architecte Frederick Law Olmsted en 1868 (cf figure 1.8). Selon Archer (1983), ces lotissements devaient présenter les avantages à la fois de la ville et de la campagne, sans les inconvénients des deux. A noter toutefois que malgré ces exemples, la grille est restée dominante dans les banlieues étasuniennes jusqu'en 1900 (Jackson 1987).

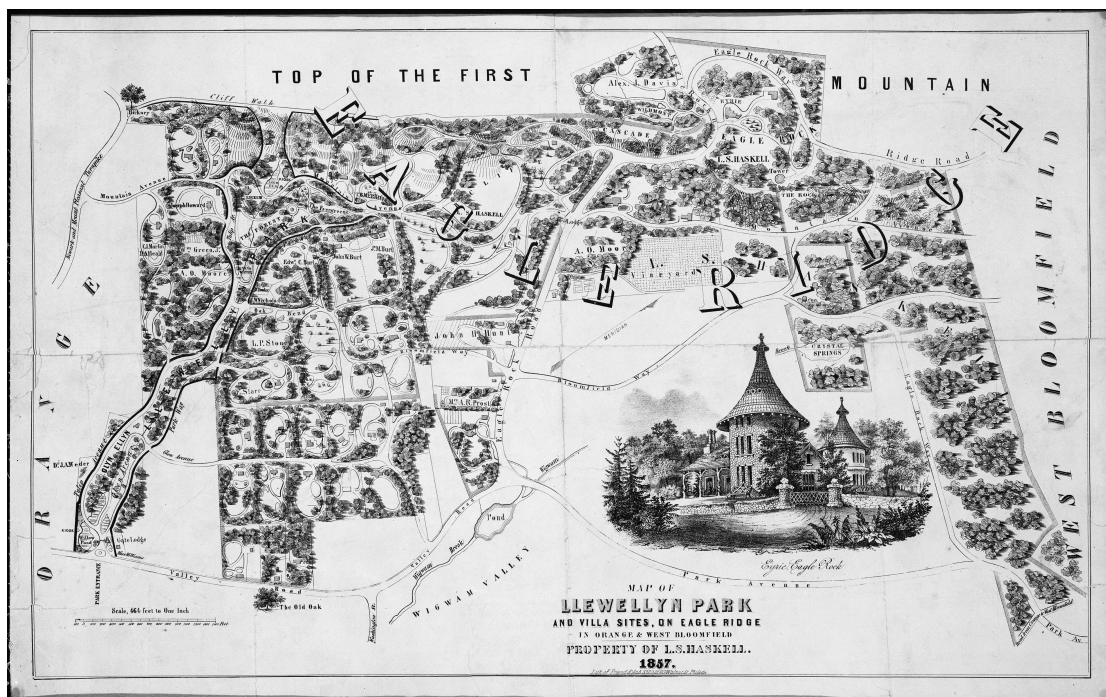


Figure 1.7 : Plan de Llewellyn park (New Jersey) par Alexander Jackson Davis, 1857. Source: The Metropolitan Museum of Art, Harris Brisbane Dick Fund, 1924.

²⁴ Notamment parce que les maisons peuvent difficilement être mitoyennes lorsque les voies sont courbes.



Figure 1.8 : Plan de Riverside (Illinois) par Frederick Law Olmsted, 1869. Source : site internet de Riverside.

Cette image bucolique ne doit pas être confondue avec celle prônée par l'art des jardins (cf section I.2.1). Ce dernier propose une domestication de la nature, comme en témoigne les jardins à la française. A l'inverse, l'image produite par le réseau viaire dans les lotissements étasuniens s'inspire de la nature non domestiquée et du caractère rural des terrains sur lesquels ces lotissements sont implantés. Une autre particularité du réseau viaire de ces lotissements est qu'il n'est pas censé organiser des vues sur la ville, mais plutôt sur la campagne. **Dit autrement, on passe de l'image urbaine du Streetscape (paysage de rues), à l'image rurale du Landscape (paysage rural).**

Ainsi, les lotissements romantiques étasuniens du XIXe siècle comme Llewelyn park et Riverside introduisent la voie courbe comme nouveau principe de composition des réseaux viaires. Ces voies devaient permettre d'organiser la vue sur le paysage. La courbure des voies est une innovation qui sera reprise dans d'autres réseaux par la suite (cf section III.5.1).

I.4. Une image empruntée au passé : l'urbanisme culturaliste, XIXe siècle

En 1965, Françoise Choay publie *L'urbanisme, utopies et réalités*, dans lequel elle identifie deux principaux courants urbanistiques datant du XIXe siècle : l'urbanisme culturaliste, et l'urbanisme progressiste, sur lequel nous reviendrons en section III.3.3. Elle classe dans l'urbanisme culturaliste les travaux d'architectes,

d'urbanistes ou autre, qui proposent une ville empreinte d'un sentiment de nostalgie du passé. Il peut s'agir du passé antique, avec ses formes géométriques strictes, ou du passé médiéval, avec ses formes organiques (Camillo Sitte ; William Morris)²⁵. La ville des culturalistes n'est pas faite pour s'adapter aux défis techniques de l'époque, mais plutôt pour créer les conditions esthétiques d'un bien-être spirituel (Hermenault 2017).

L'architecte autrichien Camillo Sitte²⁶ est selon Françoise Choay l'initiateur de l'urbanisme culturaliste. A la fin du XIXe siècle, alors que des villes comme Paris ou Barcelone connaissent des transformations de grande envergure, Sitte se préoccupe de l'effacement des lieux publics par la construction d'infrastructures viaires démesurées (Pellegrino et al. 1999). Il préconise pour sa part de s'inspirer des places anciennes, qu'il étudie en détail. Pour lui « le dédale de rues, l'irrégularité des édifices, la brisure des artères, trouvent dans l'inattendu d'une place une figure de métonymie qui donne un visage à l'ensemble de la ville » (Pellegrino et al. 1999). Sitte défend ainsi **l'irrégularité du plan**, et des édifices, plutôt que la répétition selon une division régulière de l'espace, et une symétrie abstraite.

Cette critique de la régularité est proche de celle formulée par Pierre Patte et Léonce Reynaud. Mais pour les culturalistes comme Camillo Sitte, le modèle à suivre est celui de la ville du passé, une ville dans laquelle l'esthétique et l'harmonie des espaces publics – notamment des rues – produit des vertus sociales et psychologiques (cf figure 1.9).



Figure 1.9 : Vue depuis une rue de Bruxelles. Source : (Sitte, 1889).

²⁵ Selon Choay, l'urbanisme culturaliste ne compte aucun représentant français.

²⁶ Ses réflexions sur la ville sont notamment publiées dans son livre *L'art de bâtir les villes*, paru en 1889.

Ainsi, après avoir prôné l'ordre, le contraste, puis le bucolique, les écrits d'urbanisme portant sur la conception des réseaux viaires introduisent avec le culturalisme la nostalgie du passé. Cette nostalgie peut s'expliquer par les bouleversements qui ont lieu dans les villes aux XIXe et XXe siècles, notamment avec l'urbanisme progressiste (cf paradigme 3, le réseau comme support de la circulation). Des auteurs comme Camillo Sitte prônent alors **la conception de réseaux viaires au plan irrégulier, avec des artères brisées, pour rappeler les formes organiques du Moyen Age.**

Synthèse du premier paradigme, le réseau viaire comme image de la ville

Cette partie visait à présenter des écrits théoriques et des projets, utopiques ou non, qui ont instrumentalisé le réseau viaire afin de produire une image de la ville : une image ordonnée, une image de contrastes, une image bucolique, ou une image empruntée au passé. Les motivations derrière chacune de ces images sont variées, elles peuvent être d'ordre politique, esthétique, social, etc.

Ces écrits et projets ne sont pas uniquement le fait d'architectes et d'urbanistes, mais aussi de philosophes (Tommaso Campanella), de théoriciens socialistes (Charles Fourier), de religieux (abbé Laugier, pape Sixt Quint), etc. Remarquons que, quelque soit leur domaine, ces auteurs font des **préconisations précises concernant le *plan* que devrait adopter le réseau viaire pour produire l'image voulue. La morphologie du réseau apparaît donc comme un élément déterminant sur lequel agir pour donner une image à la ville.**

II. Deuxième paradigme, le réseau viaire comme lieu de vie

Comme l'explique le géographe Antoine Fleury, la rue sous sa forme traditionnelle occupe une fonction déterminante dans la fabrique de l'urbanité : elle incarne la césure entre la sphère publique et les multiples univers privés, et assure la mise en relation des lieux, des fonctions et des groupes sociaux (Fleury, 2004). En tant qu'espace public, le réseau viaire peut être le lieu de multiples activités (cf figure 1.10), brassages, conflits, manifestations sociales, manifestations de pouvoir²⁷. Mais le réseau viaire est plus qu'un simple contenant de ces interactions : il rétroagit sur elles. Clot-Goudard et Tillous (2008) soulignent cela, en disant que « les protagonistes d'une interaction qui, comme toute activité, est par nature située,

²⁷ Le contrôle étroit de l'espace public, et donc du réseau viaire, par les régimes autoritaires en est un exemple.

s'appuient sur leur environnement qui se présente à eux comme qualitativement différencié et dans lequel ils trouvent des **ressources pour leur activité** ».

Ainsi, le réseau viaire peut avoir pour fonction d'être un « lieu de vie ». Cette fonction vient du fait que, contrairement à d'autres types de réseaux (électrique, d'assainissement, ...), le réseau viaire n'est pas un « tube » (Dupuy, 1991), il adhère à la localité (Brès, 1998). En effet, la plupart des voies de circulations²⁸ irriguent l'espace par les porosités que représentent les multiples accès qu'elles assurent tout au long de leur tracé (Brès, 1998). Ces porosités sont autant de points de contact entre les voies et les bâtiments, places publiques, ou parcs qu'elles desservent. L'activité qui se déroule dans ces espaces « déborde » ou « déteint » sur les voies. Dès lors, les voies urbaines se voient attribuer une *ambiance*, et des caractéristiques différenciées en fonction des espaces qui les bordent : on parlera de rue commerçante, d'allée résidentielle, d'avenue du parc, etc. Balzac (1833, cité dans Fleury (2004)) parlant de la grande variété des rues de Paris, disait qu'il existe « des rues nobles, puis des rues simplement honnêtes (...) ; des rues estimables, des rues toujours propres, des rues toujours sales, des rues ouvrières, travailleuses, mercantiles »²⁹.

Plusieurs écrits portant sur la conception des réseaux viaires ont défendu cette fonction du réseau viaire comme « lieu de vie », exacerbant par-là son caractère d'espace public de sociabilité.



Figure 1.10 : Image de la Place de la Comédie à Montpellier. Source : (Hersemul 2016).

²⁸ A l'exception des ponts, tunnels, viaducs, autoroutes urbaines.

²⁹ Balzac, *Histoire des Treize. Premier épisode : Ferragus, chef des dévorants*, Paris, Garnier-Flammarion, 1988, p. 77, cité dans Fleury (2004).

II.1. L'urbanisme culturaliste, XIXe siècle

Bien qu'il ait été cité dans le premier paradigme (le réseau comme image de la ville), le culturalisme a aussi accordé une grande importance à la fonction des rues et des espaces publics en général comme lieux de vie. En effet, les valeurs du culturalisme sont **la richesse des relations humaines et la permanence des traditions culturelles**³⁰. Le culturalisme défend aussi plus d'interaction entre différentes populations, grâce à des espaces publics ouverts. Ainsi, il cherche à redonner à ces espaces la fonction et l'importance qu'ils avaient dans les villes de l'Antiquité et du Moyen Age, s'opposant par-là à l'utilisation qui en est faite par l'urbanisme progressiste (cf section III.3.3). L'architecte autrichien Camillo Sitte évoque cela à propos des places, mais les mêmes enjeux s'appliquent au réseau viaire :

*« La signification des places dégagées au centre des villes (forum ou place du marché) est devenue essentiellement différente. Aujourd'hui, ces places ne servent plus que rarement à des grandes fêtes populaires, et **la vie de tous les jours s'en éloigne toujours davantage**. Elles ne remplissent souvent plus d'autre fonction que de procurer davantage d'air et de lumière, de rompre la monotonie de l'océan de maisons ou, tout au plus, de dégager la perspective sur tel ou tel édifice important, pour mieux mettre en valeur son effet architectonique. Quelle différence avec l'Antiquité ! Les grandes places étaient alors pour chaque ville un impératif vital, dans la mesure où s'y déroulait une grande partie de la vie publique, qui est reléguée aujourd'hui dans des espaces intérieurs fermés » (Sitte, 1996)³¹.*

La fonction du réseau viaire comme lieu de vie est valorisée par les culturalistes du XIXe siècle. La ville du Moyen Age, avec **son fouillis de ruelles étroites, et son enchevêtrement d'intersections et de places**, mais aussi la ville Antique, deviennent un exemple à suivre pour « redonner vie » aux espaces publics de la ville du XIXe siècle.

II.2. Le XXe siècle, de nouveaux espaces publics

Le XXe siècle s'est caractérisé par la prévalence d'une conception du réseau viaire comme support de la circulation automobile (cf section III.4). Néanmoins, la fonction du réseau viaire comme lieu de vie n'était pas totalement absente des préoccupations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme à cette époque.

En effet, selon l'historien Cédric Feriel, dès les années 1950, des préconisations sont faites de la part des urbanistes progressistes (cf section III.3.3) afin de redéfinir les centres villes comme des artefacts qui concentrent toutes les fonctions, et qui sont

³⁰ Entrée « Urbanisme, théories et réalisations » dans Universalis.fr.

³¹ La première parution de l'ouvrage date de 1889.

strictement séparés de la circulation automobile (Ferial 2015). C'est la naissance des îlots piétonniers, des zones fermées à la circulation automobile, dans lesquelles l'espace public est entièrement réaménagé pour le confort et le loisir des seuls piétons (mobiliers urbains, suppression de la distinction chaussée/trottoir). Ferial (2016) cite plusieurs architectes européens qui ont pris part à ce mouvement : Donald Gibson et Frederick Gibberd en Angleterre, Jacob Bakema aux Pays-Bas, ou encore Sven Markelius en Suède. Ces architectes ont réalisé des projets d'îlots piétonniers dans des villes européennes à partir de 1945 (cf figure 1.11). Les *malls* étasuniens³² sont un autre exemple de ces piétonisations. Il s'agit de rues piétonnes à vocation commerciale, se répandant dans les villes étasuniennes entre 1960 et 1980. Ferial (2015) explique que ces opérations ne s'insèrent pas dans une vision nostalgique et passéiste de la ville, mais répondent aux préconisations de l'urbanisme progressiste, qui prône une séparation stricte entre circulation piétonne et circulation automobile.



Figure 1.11 : Opération de piétonisation dans le centre-ville d'Essen en Allemagne (1959-1960). Source : (Ferial 2016)

Au XXe siècle, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme s'intéressent également à la conception des espaces publics (notamment les réseaux viaires) dans les banlieues des villes. Les Grands Ensembles français, réalisés dans les années 1960-70 (cf section III.5.4), en sont une illustration. Au lieu d'être bordés par des rues, ces Grands Ensembles comprennent à leurs pieds de grands espaces libres paysagers, essentiellement piétonniers. **Le réseau viaire est alors difficile à délimiter, il apparaît comme éclaté** (cf figure 1.12). Dans l'esprit de leurs concepteurs, ces espaces libres devaient accueillir **les activités et relations de proximité** (Brès

³² A ne pas confondre avec les centres commerciaux, également désignés *malls* en anglais.

1998). Selon Antoni (2016), ils « étaient censés apporter **un cadre de vie nouveau et idéal répondant au confort moderne** ». Pourtant, Antoni ajoute que les espaces libres des Grands Ensembles se sont révélés, dans les faits, **difficiles à vivre**. Brès (1998) dresse le même constat. Pour lui, le fait que ces espaces aient souvent une implantation **introvertie** par rapport au bâti favorise leur appropriation par les seuls riverains, et n'encourage guère leur usage au-delà du voisinage immédiat. Ainsi, de l'avis de plusieurs auteurs (Lévy 1999; Antoni 2016; Brès 1998), l'espace public conçu en banlieue dans les années 1950-1970 **n'a pas rempli sa fonction de lieu de vie**. Selon l'historien Lewis Mumford, (1960, *cité dans Choay (1965)*), il s'agit plutôt d'espaces libres visuels et abstraits, remplissant une fonction plus biologique (hygiénique, sanitaire) que sociale. Nous reviendrons sur ce point en section III.4.1.



Figure 1.12 : Gauche : Vue sur un grand ensemble. Droite : Espace libre dans un grand ensemble à Picon-Busseine, Marseille. On constate sur ces figures que le réseau viaire est difficilement identifiable. Les bâtiments ne sont pas bordés par des rues mais par de grands espaces libres, essentiellement piétonniers. Source : (Hersemul 2016).

Ainsi, les modifications apportées aux réseaux viaires dans les années 1950-70, avec le remplacement des rues par de grands espaces libres paysagers et piétonniers, visaient notamment à créer des lieux de vie. **Des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, notamment les architectes européens qui ont réalisé des projets d'îlots piétonniers à cette époque, ont instrumentalisé le réseau viaire afin de créer un nouveau type d'espace public**. Toutefois, ces espaces publics ont largement été critiqués, notamment par les partisans de l'urbanisme culturaliste, car ils seraient selon eux incapables de remplir la fonction de lieu de vie.

II.3. Des contre-solutions à l'urbanisme « pour la voiture »

Dans la seconde moitié du XXe siècle aux Etats-Unis, la fonction du réseau viaire comme lieu de vie est prônée en réaction à l'urbanisme « pour la voiture », qui s'y répand au XXe siècle (cf section III.4). Les concepts de densité et de compacité sont alors prônés par des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, pour « redonner vie » aux villes. Ces concepts seront également promus à partir des années 1980-1990 par les partisans du développement durable, notamment pour réduire la pollution occasionnée par l'automobile.

II.3.1. Jane Jacobs et la théorie de la ville compacte

La théorie de la ville compacte a notamment été défendue par Jane Jacobs dans son livre *The Death and Life of Great American Cities* (1961). Pour cette philosophe de l'architecture et de l'urbanisme canado-américaine, la ville doit être **le cadre de la vie de tous les jours, et favoriser les interactions sociales**. Pour ce faire, les rues doivent être des lieux de confiance, confiance qui, selon elle, s'accomplit grâce aux multiples contacts publics que l'on a en se déplaçant sur un trottoir. Jacobs vante les mérites de la ville traditionnelle. Elle parle de « l'organisation « féérique » des vieux quartiers, une organisation qui, à l'inverse de la géométrie euclidienne, n'est pas visible au premier coup d'œil, n'est pas imposée par un grand ordonnateur, mais résulte d'une accumulation de petits détails, de contributions cumulatives par une foule d'acteurs temporels, chacun suivant sa propre trajectoire » (Jacobs, 1961 citée dans Porta, Crucitti, et Latora (2006)). Cet ordre est biologique, « **c'est celui de la vie, le seul qui puisse contribuer à rendre un quartier ou une ville vivable**, donc celui qui doit nous guider vers la future ville « durable » » (Jacobs, 1961 citée dans Porta, Crucitti, et Latora (2006)).

Jane Jacobs propose des solutions concrètes à mener sur la ville pour recréer cette organisation. Elle prône des espaces à fonction mixte, une forte concentration d'individus, et un mélange entre bâtiments anciens et nouveaux. Concernant le réseau viaire, elle préconise que celui-ci soit **dense³³ et « perméable », afin de permettre aux individus de se déplacer à pied**. Un réseau viaire perméable peut être défini comme un réseau facile à traverser, sans obstacles. Pour concevoir un tel réseau, elle préconise de concevoir des blocs de petites dimensions, qui permettent d'obtenir un réseau aux mailles resserrées (cf figure 1.13).

³³ Un réseau viaire dense est un réseau dans lequel le nombre de voies de circulation, par unité de surface, est élevé.

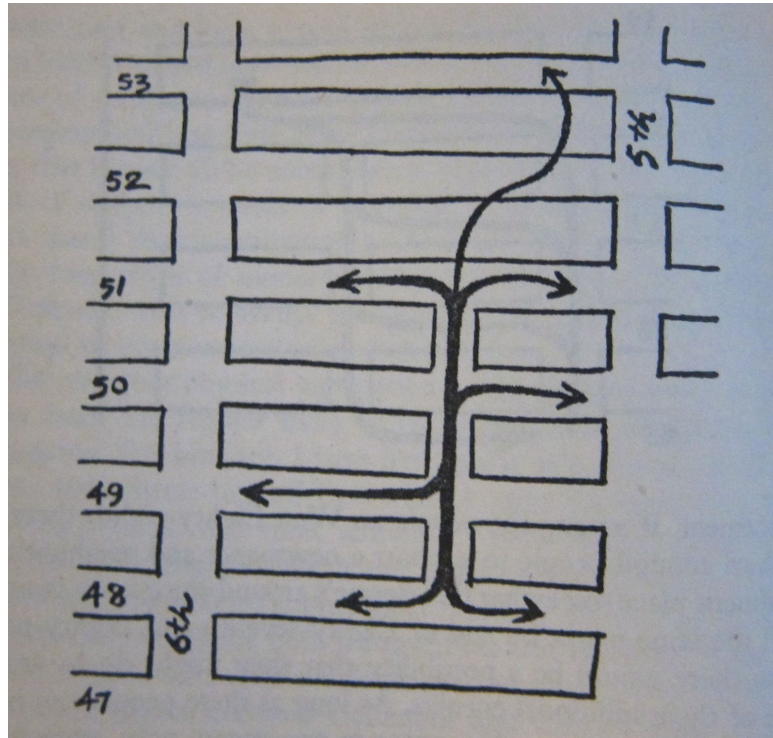


Figure 1.13 : Proposition de Jane Jacobs pour assurer la perméabilité du réseau viarie, par la création de blocs de petites dimensions. Source : (Jacobs 1961).

Pour Jane Jacobs, le réseau viarie ne doit pas être pensé comme un lieu de circulation pure, mais comme **un espace mixte où peut se dérouler la vie de tous les jours. Ainsi, la fonction du réseau viarie comme lieu de vie est omniprésente dans son travail. Pour elle, la densité et la perméabilité du réseau sont des moyens de développer cette fonction.**

II.3.2. Le Nouvel Urbanisme

Le Nouvel Urbanisme fait lui aussi partie des théories apparues dans cette seconde moitié du XXe siècle (début des années 1980) aux Etats-Unis. Ce courant vise à réintroduire la question de l'humain, des usagers, dans la discipline de l'urbanisme. Il prône des **rues vivantes, à usage collectif** (Martin, 2001), promeut la réhabilitation de la marche à pied et la compacité des villes (Ghorra-Gobin, 2014). Le Nouvel Urbanisme dresse une critique sévère à l'égard de l'espace public créé par l'urbanisme progressiste (cf section III.3.3), qu'il juge ségrégué et monofonctionnel.

S'inspirant de ce courant, des politiques sont menées dans des lotissements suburbains aux Etats-Unis, en faveur de la densité et de la compacité (Le Goix, 2016). Elles ont par exemple été déployées à Ladera Ranch (Californie) : des paysages bâtis plus resserrés, avec **un réseau viarie dont les voies sont fortement interconnectées** (cf figure 1.14). Néanmoins, selon Le Goix, ces changements demeurent minoritaires dans les banlieues étasuniennes. Cela peut s'expliquer par le fait que, comme le signale Ghorra-Gobin (2004), la culture américaine,

contrairement à la culture européenne, n'a jamais valorisé la ville et a opté pour le principe des banlieues comme référent social et politique (cf section I.3). Le mythe de la ville traditionnelle, resserrée, faite de proximités, est beaucoup moins présent aux Etats-Unis qu'en Europe.

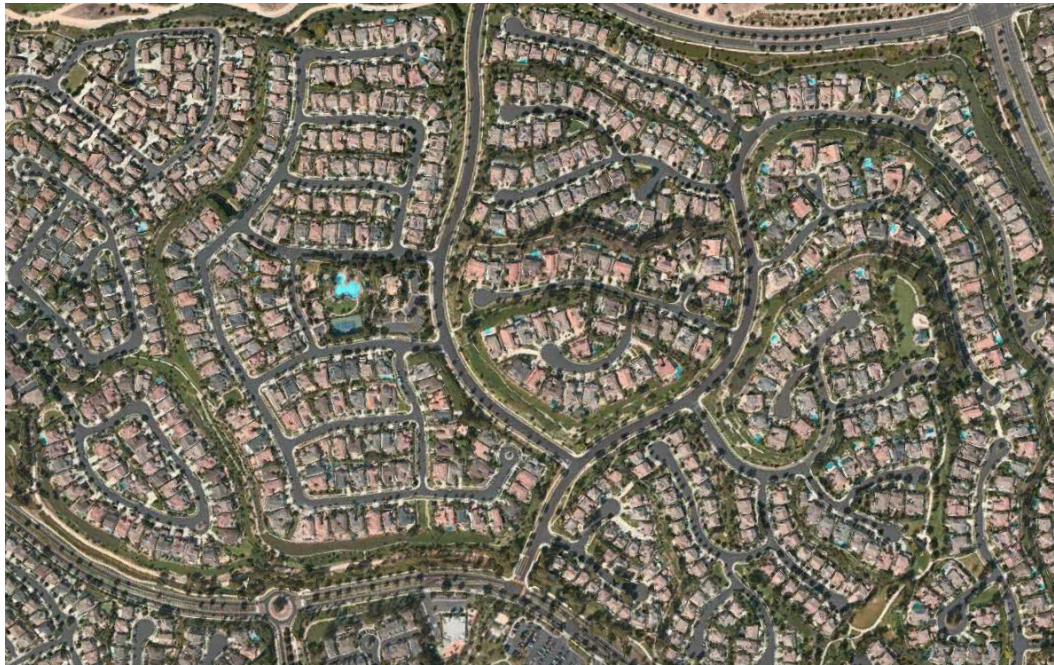


Figure 1.14 : Image satellite d'une partie de Ladera Ranch (Californie), on remarque la densité du lotissement. Source : Googlemap.

La fonction du réseau viarie comme lieu de vie est prônée par de nombreux théoriciens et praticiens de l'urbanisme aux Etats-Unis. La densité du réseau apparaît comme un élément déterminant pour lui permettre d'assurer cette fonction. Pourtant, les manifestations concrètes de cette tendance demeurent minoritaires aux Etats-Unis, en raison de la permanence d'autres conceptions du réseau, et d'anciennes *façons de faire* (Le Goix 2016).

Synthèse du deuxième paradigme, le réseau viarie comme lieu de vie

Au XIXe siècle, profitant d'une vision nostalgique de la ville traditionnelle, la fonction du réseau viarie comme *lieu de vie* est valorisée, en particulier en Europe par les partisans de l'urbanisme culturaliste. Cette valorisation se poursuit au XXe siècle. Aux Etats-Unis, elle est une réaction à l'urbanisme « pour la voiture », mais demeure, dans les faits, assez marginale, en raison d'un référent social et politique n'ayant jamais valorisé la ville (Ghorra-Gobin, 2004).

Ces travaux montrent que la morphologie du réseau viarie est souvent évoquée comme un ingrédient lui permettant de remplir sa fonction de « lieu de vie ». Par

exemple, un réseau viaire dense et perméable (Jacobs, 1961), et des voies interconnectées (Nouvel Urbanisme) sont présentés comme des ingrédients pouvant favoriser la marche, susciter le contact, les interactions, et donc faire du réseau un lieu de vie.

III. Le réseau viaire comme support de la circulation

« La forme d'une ville est ou doit être une forme dérivée des nécessités de locomotion »
(Soria³⁴, 1984 cité dans Dupuy (1991))

Le réseau viaire est le support du mouvement des hommes et des véhicules³⁵ dans l'espace urbain, autrement dit le support de la circulation³⁶. Cette fonction du réseau viaire est sans doute la plus ancienne, et revêt, aujourd'hui encore, une grande importance. En effet, comme le soulignent Clot-Goudard et Tillous (2008), le citadin est un être de mouvement, de locomotion, qui passe d'un territoire à un autre. Selon Jean-Pierre Orfeuil (2004), le mouvement du citadin en ville revêt une telle importance qu'il s'agit d'une « condition nécessaire (mais certes pas suffisante) d'une inscription normale dans la vie sociale ». L'auteur ajoute que les populations dont l'aptitude à la mobilité est la plus faible encourent des risques d'isolement, de pauvreté économique et relationnelle, de marginalisation et d'exclusion. Ce rôle « social » du mouvement est repris par plusieurs auteurs. Gharbi (2016) explique que les espaces urbains et les sociétés urbaines sont traditionnellement évalués au regard de leur offre de mobilité sociale, mais aussi spatiale³⁷. La mobilité « mesure les relations sociales et le degré de socialisation de telle ou telle population urbaine » (Joseph, 2007, cité dans Clot-Goudard et Tillous (2008)).

Des théoriciens et praticiens de la conception de ce réseau ont, dès l'Antiquité et jusqu'à la période actuelle, « pensé la voie à l'aune des mouvements qu'elle supporte » (Alonzo, 2018), et fait des préconisations sur la manière dont le réseau viaire pouvait remplir au mieux son rôle de support de la circulation. Nous présentons cela dans les sections suivantes. En plus de la circulation des hommes et des véhicules, nous incluons dans le terme « circulation » celle de l'air, de l'eau, et de toutes les matières, car, dans l'espace urbain, celle-ci se fait également via le réseau

³⁴ Arturo Soria y Mata, urbaniste espagnol, connu pour son projet de Cité linéaire (fin XIXe siècle).

³⁵ Nous incluons les animaux servant de véhicule.

³⁶ Selon le Dictionnaire en ligne Larousse, la circulation désigne le « mouvement des véhicules, des piétons, etc., qui se déplacent sur des voies de communication » (Larousse.fr).

³⁷ La mobilité spatiale, concept phare en géographie, est souvent prioritairement considérée comme quotidienne et définie comme "l'ensemble des pratiques de déplacements d'une population dans son cadre habituel" (Bonnerandi, 2004). Nous reviendrons plus en détail sur ce concept dans le chapitre 2.

viaire. La circulation de ces matières constitue un enjeu majeur, en particulier au XVIIIe et au XIXe siècle (Barles, 2000).

III.1. Antiquité et XVIIe siècle

Selon Alonzo (2018), les germes de cette conception du réseau viaire sont très anciens. Ils remontent à l'Antiquité puisque certaines voies romaines étaient déjà équipées de « trottoirs et de passages piétons destinés à dissocier les différents modes de transport ». L'auteur ajoute que, selon l'architecte Leon Battista Alberti, cet héritage antique comprend également des dispositifs de gestion de sens de circulation différenciés et de séparation des flux par superposition. Signalons toutefois que la fonction de ces dispositifs en matière de circulation peut être contestée. Leon Battista Alberti et Eric Alonzo proposent ici une **interprétation du rôle de ces dispositifs antiques**, celle-ci peut être différente de leur véritable rôle à l'époque.

Alonzo évoque également des innovations plus récentes en matière de prise en compte de la circulation. Il cite en particulier la proposition de l'ingénieur français Henri Gautier, à la fin du XVIIe siècle, de dimensionner la largeur des chaussées proportionnellement aux files de véhicules.

III.2. Le XVIIIe siècle : améliorer l'hygiène et la circulation dans la ville

Au XVIIIe siècle, selon Malverti et Picard (1989), l'aménagement du territoire et des villes connaît une évolution nette : **les ingénieurs prennent le pouvoir sur ce domaine dès 1700**. Cela se traduit par de nouvelles attitudes et conceptions de l'aménagement. Celles-ci annoncent et préparent des modifications des villes qui surviendront au milieu du XIXe siècle (M.P, 1989).

Les grandes villes européennes souffrent, en ce XVIIIe siècle, « du désordre provoqué par le nombre de véhicules dans les rues et par l'indiscipline de leur « chauffeur » » (Alonzo, 2018). Les écrits de l'époque, notamment sur Paris, parlent d'une congestion anarchique croissante. Ils parlent aussi d'une grande insalubrité : l'architecte Pierre Patte constate en 1769 que les villes sont victimes de nombreux maux (miasmes, odeurs, maladies, encombrements, ...) et que leurs espaces n'ont jamais été distribués convenablement pour le bien-être de leurs habitants (Patte 1769, *cité dans* M.P (1989)). Il considère qu'aucune ville ayant été bâtie jusqu'ici ne peut véritablement être citée comme modèle. Il pointe du doigt leur « constitution vicieuse » : « elles ne sont toutes que des amas de maisons distribuées sans ordre, sans entente d'un plan total convenablement raisonné », il ajoute « ce qui frappe d'abord c'est de voir de toute part couler les immondices à découvert dans les

ruisseaux avant de se rendre dans les égouts ». Ce constat est également dressé par l'abbé Laugier en 1753, qui disait à propos de Paris :

« Le centre de cette capitale n'a presque point changé depuis trois cents ans : on y voit toujours le même nombre de petites rues étroites, tortueuses, qui ne respirent que la mal-propreté et l'ordure, et où la rencontre des voitures cause à tout instant des embarras. (...) Les avenues en sont misérables, les rues mal percées et trop étroites, les maisons simplement et trivialement bâties, les places en petit nombre et peu considérables en elles-mêmes » (Laugier, 1753 cité dans M.P (1989)).

Ces constats dressés par Patte et Laugier dépeignent un état chaotique en termes d'hygiène et de circulation. Il faut néanmoins souligner qu'il s'agit là d'une interprétation de la situation de l'époque, de la part d'auteurs qui ont pour visée de défendre leur point de vue : la nécessité d'améliorer l'hygiène et la circulation dans la ville. De fait, les constats dressés sont potentiellement exagérés, afin de défendre ce point de vue.

La ville du XVIIIe siècle mène à une volonté de la part de théoriciens et praticiens de l'urbanisme (notamment Pierre Patte) de *libérer le mouvement*, volonté qui deviendra une véritable **doctrine urbanistique**. Selon Alonzo (2018), cette doctrine trouve certainement ses racines dans le nouveau paradigme scientifique engagé au siècle précédent par les études scientifiques sur le mouvement (Galilée ; Descartes ; Leibniz). C'est ainsi qu'au Siècle des lumières, la culture scientifique (qui imprègne l'art de l'ingénieur comme celui de l'architecte et du jardinier), engendre un passage « d'une connaissance statique des structures à une connaissance dynamique des fonctions et des opérations susceptibles de rendre compte des mouvements, des flux et des processus tant naturels qu'humains » (Picon, 1995 cité dans Alonzo (2018)).

Selon Alonzo, une nouvelle conception de la santé publique apparaît à cette époque, elle vise à chasser les maladies en s'assurant de la libre circulation de l'eau et de l'air. C'est le temps de la médecine aériste³⁸. Le mouvement était considéré comme l'inverse de l'insalubrité. Cela peut sembler surprenant aujourd'hui, mais la circulation des voitures, par les courants d'air qu'elle génère, était identifiée comme un agent d'assainissement. Alonzo cite à ce propos l'hygiéniste Antoine Augustin Parmentier, qui expliquait que « le mouvement continu et multiplié des voitures, celui où sont perpétuellement une foule d'hommes qui vont et viennent » est un des ingrédients de la salubrité de l'air.

C'est ainsi qu'au XVIIIe siècle, **la prise en compte des flux dans la conception du réseau viaire va devenir déterminante et occuper une place qui ne cessera de croître pour devenir bientôt prépondérante**. Alonzo (2018) illustre cela, en

³⁸ Relatif à une théorie du XVIIIe siècle faisant jouer à l'air un rôle primordial dans les infections et épidémies.

prenant appui sur l'ouvrage de Christophe Studeny *L'invention de la vitesse, France XVIIIe - XXe siècle* (1995) qui explique que cette prise en compte des flux « s'amorce bien avant l'irruption de l'automobile, par l'émergence d'une aspiration à la vitesse qui précédera les révolutions techniques ». Pour Studeny, cette aspiration à la vitesse, venue d'Angleterre, est née au XVIIIe siècle.

Le réseau viaire au XVIIIe siècle devait être conçu de manière à libérer le mouvement, à « **dissiper la congestion des flux par une meilleure configuration des voies** » (Alonzo, 2018). Pour ce faire, les voies devaient être larges et droites. Elles devaient avoir la capacité de garantir une circulation ininterrompue des personnes et des marchandises. Cette capacité était nécessaire aussi bien pour les raisons de santé publique susmentionnées, que pour le bon fonctionnement de l'économie. Pierre Patte fait partie des architectes à s'être prononcé, dès 1769, sur les conditions d'amélioration de l'hygiène et de la circulation dans les villes. Partant du principe que la forme de la ville peut avoir une influence sur son fonctionnement, Patte propose des solutions quant à la manière la plus avantageuse de « distribuer » une ville. Pour lui, « l'essentiel est que tous les abords soient faciles, qu'il y ait suffisamment de débouchés d'un quartier à l'autre pour le transport des marchandises et la libre circulation des voitures » (1769 cité dans M.P (1989)).

L'architecte Jean-Nicolas-Louis Durand illustre une tendance plus extrême dans la prise en compte de la circulation. Il dispense un cours d'architecture à l'Ecole Polytechnique à partir de 1794, avec un contenu qu'il veut « parfaitement adapté aux ingénieurs ». Pour lui, les communications (voies de circulation, places, ponts) sont le seul élément dont on peut être maître lors de la conception d'une ville. Il soutient que ces communications doivent être les plus courtes et les plus commodes. Pour ce faire, la ligne droite est pour lui la première condition. Ainsi, Durand abandonne le discours sur le besoin de variété et contre l'uniformité, commun à la plupart des architectes de son époque (cf section I.2.2), il dit que « les formes les plus symétriques, les plus régulières et les plus simples, telles que le cercle, le carré, le parallélogramme peu allongé, sont les formes les plus favorables à l'économie parce qu'elles renferment une même superficie avec un moindre périmètre que les autres, et que par conséquent ce sont elles dont on doit faire usage de préférence » (Durand, 1802 cité dans M.P (1989)).

En conclusion, au XVIIIe siècle, face à l'insalubrité et à la congestion des villes, les premières considérations hygiénistes apparaissent en urbanisme : le mouvement de l'air, des véhicules, et des hommes est alors considéré comme un remède aux maladies. La conception des réseaux viaires doit alors permettre de libérer ce mouvement. Des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, comme Patte et Durand, proposent des solutions concrètes pour cela.

III.3. XIXe siècle, des réponses aux problèmes de la ville industrielle

L'exode rural occasionné par la Révolution industrielle du XIXe siècle engendre une forte croissance de la population dans les villes. Selon Barles (2000), la première moitié du XIXe siècle est l'époque de l'essor de la mobilité hors marche à pied, de la diversification de l'offre de transport, et de l'intensification du trafic. Tout cela aggrave les problèmes d'encombrement, de pollution et les conditions de vie malsaines qui existaient déjà dans les villes traditionnelles (Porta et al., 2014). La cause identifiée est la même qu'au XVIIIe siècle : le manque d'assainissement et le confinement, qui créent un climat délétère pour la santé publique (Antoni, 2016). En effet, malgré les améliorations préconisées au Siècle des lumières, les rues de la ville du début du XIXe siècle sont toujours étroites, sans lumière et sans arbres, sans parcs ni jardins publics. Selon Porta et al. (2014), l'architecture et l'urbanisme sont marqués à cette période par la volonté de créer des environnements urbains plus sains, notamment en séparant l'industrie des autres activités, pour améliorer la santé publique. Ils prônent également plus d'efficacité dans les déplacements, notamment grâce à l'utilisation de moyens de transport modernes. Selon Barles (2000) et Papayanis (2004), c'est à ce moment que **les débats sur la circulation deviennent dominants chez les aménageurs**. Ces débats sont annonciateurs de grands travaux menés dans plusieurs capitales européennes à la seconde moitié du XIXe siècle.

III.3.1. L'hygiénisme d'Hausmann à Paris, tout doit circuler

Après avoir constaté la reconstruction de Londres suite à l'incendie de 1666, Napoléon III trouve dans cette ville une référence pour moderniser Paris en termes d'hygiène et d'urbanisme (Antoni, 2016). Il est convaincu qu'une « action volontaire sur l'espace peut réduire l'insalubrité de la capitale et y résorber la pauvreté ». Il confie en 1853 au préfet de la Seine, Georges Eugène Hausmann le réaménagement de Paris : « vingt ans de travaux visent explicitement à améliorer les conditions de vie et la santé publique par une intervention hygiéniste sur l'urbanisme » (Antoni, 2016). La transformation de Paris dans la seconde moitié du XIXe siècle se manifeste, entre autres, par une « nouvelle conception de l'urbanisme qui conçoit la ville comme un « tout », et dont **le plan reflète un organisme vivant qui doit respirer et dans lequel tout doit circuler (eau, égouts, énergie, voirie, transports en commun)** » (Antoni, 2016). Pour ce faire, Hausmann introduit de nouvelles normes dans la conception urbaine, telles que les notions de profils et de gabarits de rues.

L'une des interventions majeures d'Hausmann à Paris fut le traçage de larges percées (avenues et boulevards), dans le réseau existant. Ces percées devaient, entre autres, permettre de relier des points importants de la ville (gares, monuments), d'en faciliter l'accès (cf figure 1.15). Selon Moreno (2009), ces percées sont un

exemple de la volonté d'**influer sur la mobilité intra-urbaine par la morphologie**. Haussmann conçoit également des places publiques de très grande dimension. Selon Pellegrino et al. (1999), les places à l'époque d'Haussmann perdent leur valeur esthétique d'espace clos, et deviennent des **espaces de déplacements de masses**.



Figure 1.15 : Vue sur le Boulevard des italiens à Paris, fin XIXe siècle. Source : attelage-patrimoine.com.

Les interventions d'Haussmann sur le réseau viaire parisien ont indéniablement construit une nouvelle image de la ville, notamment grâce aux perspectives sur les monuments de la capitale. Néanmoins, **l'apport principal de ces interventions a été d'ordre hygiéniste : Paris sous Haussmann deviendra un modèle de ville en « bonne santé »** (Antoni, 2016). Ce modèle se diffusera largement en France (Rouen, Toulouse, Montpellier, Marseille, Lyon), et dans les colonies. Concrètement, l'un des apports principaux d'Haussmann a été la création de percées, visant à faciliter l'accès aux points les plus importants de la ville (gares, monuments).

III.3.2. Cerdà à Barcelone, la circulation généralisée

Toujours dans la seconde moitié du XIXe siècle, l'architecte, urbaniste et ingénieur Ildefons Cerdà³⁹ conçoit en 1859 pour la ville de Barcelone un plan plus radical encore que celui réalisé à Paris par Haussmann. Cerdà va à l'encontre d'une conception urbaine selon des formes reprises du passé. Il s'oppose par là à la vision des culturalistes (cf section I.4). Son plan impose à Barcelone un urbanisme d'extension radicalement différent du plan de la ville ancienne héritée du Moyen Age (Pellegrino et al., 1999). Il propose **un damier censé permettre une circulation généralisée, et une accessibilité rapide aux différents lots découpés par le plan** : « résultant d'une combinaison de voies en un réseau viaire où chaque nœud,

³⁹ Considéré par certains comme le père de l'urbanisme (Entrée « urbanisme » dans Universalis.fr).

chaque carrefour, est l'équivalent du suivant, le plan Cerdà s'oppose à une canalisation des flux dans un site séparé » (Pellegrino et al., 1999). Dit autrement, les déplacements ne sont pas canalisés sur certaines voies, mais plutôt répartis uniformément dans la grille. Cette répartition uniforme, égalitaire des déplacements a pour Cerdà une dimension politique. Cerdà prévoit également des espaces verts à l'intérieur des îlots carrés, mais ces espaces sont rapidement investis d'édicules. Selon Pellegrino et ses collègues, la ville selon ce plan doit être perméable⁴⁰ et sans limites, ils parlent de « communicativité » et d'extensivité en périphérie du plan en damier. Ils expliquent également que des flux de portées inégales se répartissent sur la même voie, de son centre vers sa périphérie. Cela n'est pas condamné car le **mouvement est perçu positivement** : il anime l'espace urbain.

Les vertus en matière de circulation que Cerdà attribue au plan en grille ne sont pas partagées par d'autres architectes du même siècle. L'architecte et ingénieur Léonce Reynaud, qui prend la suite de Durand à l'École Polytechnique en 1836, se prononce sur les conditions d'une bonne circulation. Pour lui, dans les grilles, « **la circulation n'est convenablement desservie que dans deux directions et elle est condamnée pour toutes les autres à suivre les deux côtés d'un triangle rectangle au lieu de prendre la diagonale** » (Reynaud, 1850 *cité dans* M.P (1989)). Mais Reynaud critique également les rues « trop brisées » qui selon lui allongent les distances, gaspillent les terrains, et donnent une mauvaise circulation à l'air. Les réseaux viaires en grille sont également très critiqués aux États-Unis au milieu du XIXe siècle. A cette époque, ce type de plan est massivement utilisé dans les villes et les banlieues étasuniennes, mais on lui prête de nombreux défauts : **les rues des réseaux en grille seraient sombres, propices à la propagation des maladies, peu attrayantes, et peu pratiques en matière de circulation** (Jackson, 1987).

En résumé, le plan de Cerdà à Barcelone illustre une tendance à faire table rase des formes héritées pour améliorer les conditions de circulation dans les villes. Il opte pour un **plan en grille, afin de répartir uniformément les déplacements, créant une circulation généralisée**. Ce type de plan est pourtant fortement critiqué en matière de circulation à cette période, aussi bien en France qu'aux États-Unis. **Cet exemple nous permet d'introduire le fait que des idées totalement contradictoires peuvent exister à propos d'un seul et même plan**. Nous y reviendrons dans le chapitre 3.

⁴⁰ Facile à traverser.

III.3.3. Le début de l'urbanisme progressiste, XIXe siècle

L'urbanisme progressiste est le deuxième grand courant urbanistique du XIXe siècle, identifié par Choay (1965) (l'autre étant l'urbanisme culturaliste). Choay désigne par le terme « progressistes » la catégorie d'architectes, d'urbanistes ou autres, qui ont proposé, au XIXe puis au XXe siècle, d'adapter la ville aux progrès de l'époque, pour améliorer la condition urbaine. Les valeurs du progressisme sont le **progrès social et technique, l'efficacité et l'hygiène**. Les progressistes proposent une nouvelle manière d'aménager l'espace, en rupture avec les principes traditionnels et millénaires de l'urbanisation européenne. Ils font, entre autres, des préconisations concernant le réseau viaire. Par exemple, pour permettre au soleil et à l'air de pénétrer dans les rues et les bâtiments, le philosophe français Charles Fourier, figure du progressisme selon Choay, propose en 1841 que les bâtiments aient une hauteur qui n'excède pas la largeur de la rue qui les borde. De son côté, le penseur politique français Etienne Cabet⁴¹ prône en 1840 une **hiérarchisation du réseau** viaire, de sorte que chaque type de voie soit destiné à la circulation d'un type de flux particulier. **Cette hiérarchisation sera par la suite reprise par de très nombreux théoriciens et praticiens de l'urbanisme.**

Bien que ses germes remontent au XIXe siècle, l'urbanisme progressiste se développe surtout à partir du XXe siècle, profitant de la nécessité d'adapter la ville – et le réseau viaire, à l'automobile en plein essor.

III.4. Le XXe siècle, introduction de l'automobile en ville

“The change from horse-drawn to motor traffic was a revolution, and nothing less than a corresponding revolution in roads and road user will suffice to put things right”
(Tripp, 1950 cité dans Marshall (2005)).

Les prescriptions hygiénistes du XIXe siècle influenceront encore largement les urbanistes du XXe siècle (Antoni, 2016). Ceci dit, une différence phare va s'opérer au début du XXe siècle : l'introduction de l'automobile individuelle en ville. Selon Alonzo (2018), **l'introduction de l'automobile à partir de 1873 puis sa multiplication dans les années 1890, n'entraînera pas tout de suite de changements majeurs dans la conception des réseaux viaires**. Des villes comme Paris se révéleront bien adaptées au déploiement de ce nouveau moyen de transport (cf figure 1.16). Plus tard, avec l'essor de l'urbanisme progressiste, l'automobile va polariser l'intérêt des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, au point de faire oublier les autres circulations, en particulier celle des piétons.

⁴¹ Notamment connu pour avoir écrit *Voyage en Icarie* (1840), description d'une cité idéale.



Figure 1.16 : Trafic automobile sur la Place de l'Étoile à Paris,. Source : Photographie de Germaine Krull, 1926.

III.4.1. La « ville-machine » de Le Corbusier

Commençons par un exemple caractéristique de ce début du XXe siècle, la « ville-machine » proposée par l'architecte Charles-Edouard Jeanneret, dit Le Corbusier. Figure phare du progressisme, Le Corbusier accorde une importance majeure au réseau viaire. Pour lui, la « ville-machine » doit être réticulée par « un autre type de rue », une « machine à circuler », une « usine dont l'outillage doit réaliser la circulation » (Antoni 2016). Le Corbusier souhaite abolir la rue-corridor, autrement dit la rue traditionnelle, avec ses cafés et ses lieux de repos. Pour lui, cette rue ne pose pas uniquement un problème d'hygiène, **elle contraint la circulation** en l'obligeant à s'intégrer dans le tissu urbain. Il soutient que rien ne doit briser la vitesse des automobiles, ou encombrer leurs déplacements. Pour y parvenir, il propose de traiter la circulation de manière indépendante des autres fonctions. Il explique : « les voies autoroutes traverseront en transit et selon le réseau le plus direct, le plus simplifié, entièrement au sol, à sa topographie, mais parfaitement indépendant des édifices ou immeubles pouvant se trouver à plus ou moins grande proximité » (Le Corbusier, 1963) (cf figure 1.17).

Selon Le Corbusier, le nombre de rues dans les villes doit être diminué des deux tiers, afin de réduire le nombre des croisements de rues. Ces derniers sont pour lui l'ennemi de la circulation. Dans la ville traditionnelle, les rues se coupent « tous les 50 mètres, tous les 20 mètres, tous les 10 mètres ! ... C'est alors l'embouteillage ridicule » (Le Corbusier, 1923 *cité dans* Choay (1965)). Il fait alors les préconisations suivantes :

« L'écartement de deux stations de métro ou d'autobus fournit le module utile d'écart entre les croisements de rues, module conditionné par la vitesse des véhicules et la résistance admissible du piéton. Cette mesure moyenne de 400 m donne donc l'écartement normal des rues, étalon des distances urbaines. Ma ville est tracée sur un quadrillage régulier de rues espacées de 400 mètres et recoupées parfois à 200 mètres »

Même s'il préconise de réduire le nombre de rues, Le Corbusier est favorable à la densité du bâti, qui selon lui permet de réduire la longueur des déplacements (Choay, 1965). Cette préconisation d'une ville plus dense peut sembler paradoxale quand on sait que l'urbanisme de cette époque a souvent produit une urbanisation diffuse, peu dense (cf section III.5.2). Le Corbusier critique également les rues tortueuses qui, selon lui, entravent la circulation. Il leur préfère celles en ligne droite : « **la circulation exige la droite**. La droite est saine aussi à l'âme des villes. **La courbe est ruineuse**, difficile et dangereuse ; elle paralyse. (...) La rue courbe est le chemin des ânes, la rue droite le chemin des hommes » (1923 cité dans Choay (1965)).

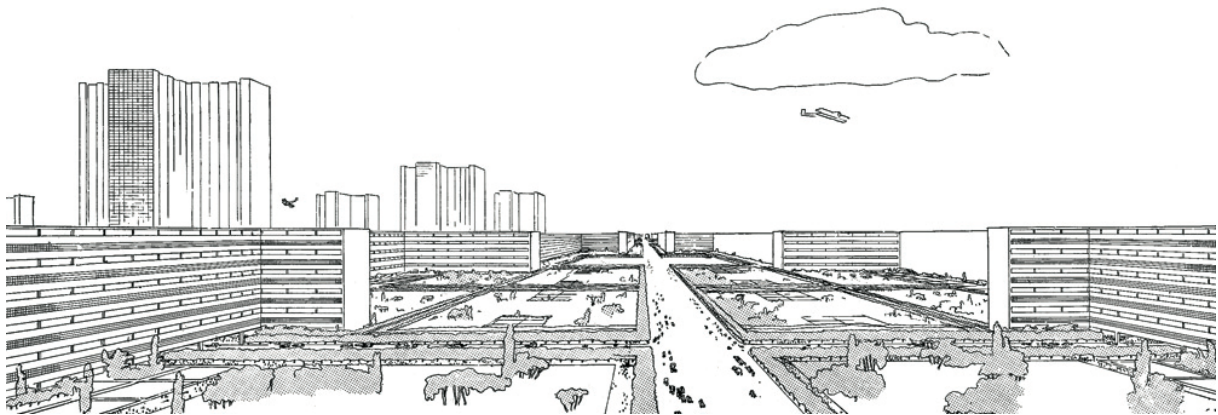


Figure 1.17 : Le *Plan Voisin*, projet pour le centre de Paris. Croquis de Le Corbusier, 1925.
Source : meriadeck.free.fr.

Comme Etienne Cabet le préconisait en 1840, Le Corbusier prône la **hiérarchisation** du réseau viaire. La voirie automobile est séparée des cheminements piétonniers de manière stricte (Brès, 1998). De plus, Le Corbusier propose d'ordonner les flux selon leurs vitesses respectives en leur attribuant à chacun un site propre. Pellegrino et al (1999) soulignent qu'« à l'opposé du mixage des flux et des activités que permet la rue, les voies projetées par l'urbanisme moderne⁴² sont spécialisées ; selon la portée, le pas et la vitesse des déplacements dont elles sont le support, elles sont le site de

⁴² Ils qualifient ainsi l'urbanisme de Le Corbusier.

flux dont les relations avec le contexte sont plus ou moins abstraites ». Selon Lévy (1999), cette séparation des flux prônée par Le Corbusier vise à « **garantir le fonctionnement optimal de la machine circulatoire, assurer une fluidité maximale et un débit continu (...)** au détriment des autres fonctions de la voirie urbaine ». La ville de Chandigarh conçue par Le Corbusier en 1951 représente l'une des expressions les plus abouties de ce réseau hiérarchisé (cf figure 1.18). Cette hiérarchie n'est pas visible sur le plan du réseau, puisque celui-ci a la forme d'une grille. Les voies de cette grille sont toutefois hiérarchisées en sept types (règle des 7 V), selon la nature des flux et des modes de déplacements (piétons, cyclistes, voitures, bus, poids lourds, etc.). Ces types de voies peuvent se situer à des hauteurs différentes.

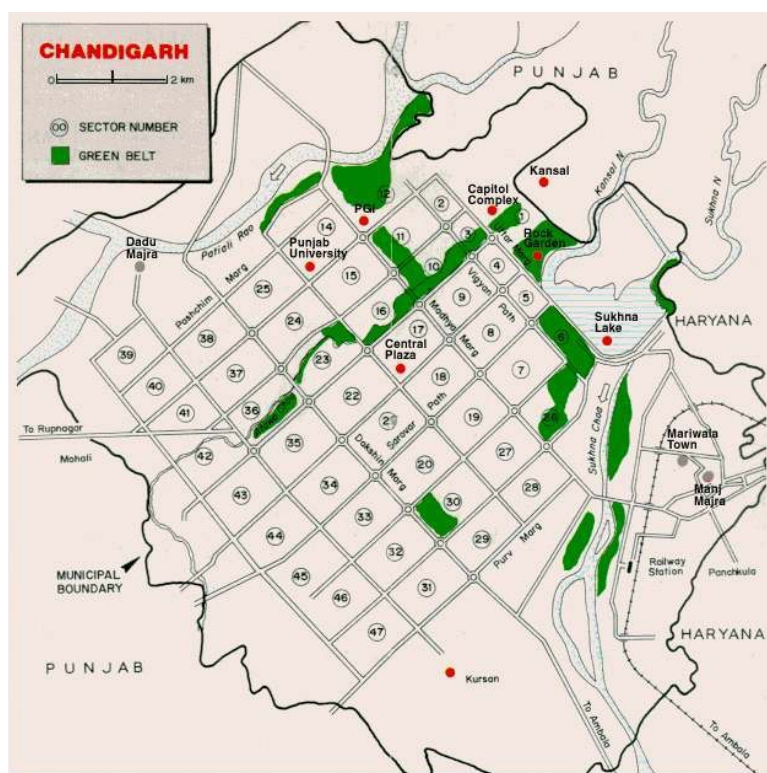


Figure 1.18 : Plan de Chandigarh. Source : Site internet de l'administration de Chandigarh.

La question de la hiérarchisation des réseaux viaires s'est largement répandue tout au long du XXe siècle dans les écrits des théoriciens et praticiens de l'urbanisme (cf figure 1.19). Elle est présente dans l'idée de « Cité verticale » prônée par l'architecte allemand Ludwig Hilberseimer en 1924. Elle l'est également dans le célèbre rapport Buchanan, *Traffic in towns*⁴³, rédigé en 1963 par l'urbaniste écossais Colin Buchanan. Ce rapport reprenait l'idée d'une séparation des différents types de flux, dans une volonté d'ordre et de clarification. Chaque flux devait avoir son type de

⁴³ Ce rapport a largement guidé la planification des transports au Royaume Uni dans les années 1960.

voie. Pour ce faire, certaines voies devaient être surélevées, d'autres enterrées. Les ensembles sur dalle des années 1950-75 (Picon-Lefèbvre, 2000) correspondaient à cette logique. La dalle était alors un idéal **d'efficacité et de sécurité** dans la séparation des déplacements piétons et automobiles.



Figure 1.19 : Projet de hiérarchisation du réseau viaire de Manhattan, par l'architecte Harvey Wiley Corbett dans *City of the Future* (1913). Il propose de séparer le déplacement piéton de celui des véhicules, en les plaçant à des niveaux différents. Source : meriadeck.free.fr.

En conclusion, Le Corbusier, qui est sans doute la figure la plus connue de l'urbanisme progressiste, **préconise un réseau viaire quadrillé et hiérarchisé, avec des voies espacées, en lignes droites et que rien ne doit obstruer, afin d'assurer une fluidité maximale des déplacements automobiles, un débit continu. La hiérarchisation du réseau avait également des vertus en termes de sécurité.** Les idées de Le Corbusier sont aujourd'hui considérées comme une

tendance très radicale en matière de prise en compte de la circulation lors de la conception des réseaux viaires.

III.4.2. Broadacre City, de Franck Lloyd Wright

Sans être progressiste, l'architecte américain Franck Lloyd Wright promeut lui aussi une ville conçue pour l'automobile. Il affirme que « le mouvement mécanique lié à l'automobile diffère absolument du mouvement de l'homme qui se déplace à pied ou utilise la traction animale. **Ce nouvel étalon de mesure doit être appliqué à la conception générale de l'espace dans la planification de la cité nouvelle** et de ses nouvelles demeures » (Wright (1932) cité dans Choay (1965)).

En 1934, Wright propose Broadacre City une ville dans laquelle chaque famille dispose d'une maison individuelle avec un terrain d'au moins un acre par personne. Dans cette ville, **le réseau de circulation très performant assure une bonne accessibilité de tous les habitants à l'ensemble des services et aménités urbaines** (Laterrasse, 2018). L'accessibilité généralisée qu'il préconise ne peut s'accomplir qu'avec un réseau viaire adapté, comprenant des autoroutes urbaines. Il décrit ces autoroutes en ces termes :

« Imaginons de vastes autoroutes, bien intégrées dans le paysage, sans aucune coupure (...). Imaginons ces autoroutes d'une largeur généreuse, présentant toute la sécurité désirable, offrant des accès faciles, égayées par des bordures de fleurs ou rafraichies par l'ombre des arbres, et reliées à intervalles réguliers à des aérodromes modernes. Des routes géantes, qui sont elles-mêmes de la grande architecture » (Wright, 1932 cité dans Choay (1965)).

Wright prône une conception de la ville totalement décentralisée, opposée à la concentration des édifices dans un lieu central, et au mouvement centripète qu'elle entraîne. Ses idées sont donc proches de celles de Cerdà. Wright conçoit cette ville selon un **plan en damier**, qui permet à la ville de s'étendre de façon régulière, sans démesure et sans restriction de tous côtés. Pellegrino et al. (1999) expliquent que « cette extension se base sur une décentralisation des fonctions et une diversification des formes, une nouvelle liberté articulée par une répartition égalitaire des espaces, des intervalles et des rythmes ». Ainsi, pour Wright, la régularité du plan en damier et son caractère égalitaire présentent l'avantage de permettre une grande liberté de formes et de fonctions. Sur ce damier, l'urbanisation est organisée en grappes, les bâtiments d'habitation sont comme des terminaux d'un réseau (cf figure 1.20), et les services occupent des places appropriées aux carrefours des voies importantes (Pellegrino et al. 1999).



Figure 1.20 : Plan de Broadacre city, F. L. Wright, 1934. Source: franklloydwright.org.

Dans les faits, les idées de Wright ne se sont concrétisées que de manière très limitée, sur des parcelles de taille restreinte. Cela s'explique par le fait que le plan de l'architecte était très consommateur d'espaces, ce qui allait à l'encontre d'une idée répandue à l'époque : la rationalité économique du peuplement dense (Haumont, 1993), prônée notamment par Le Corbusier.

Nous constatons que, comme Le Corbusier et Cerdà avant lui, Wright attribue au plan en grille des vertus en matière de circulation. Pour lui, ce plan, associé à un système d'autoroutes urbaines, permet une accessibilité généralisée à l'ensemble des services et aménités urbaines.

III.5. Des réseaux pour la voiture à l'échelle du quartier

Au XXe siècle, plusieurs écrits et projets vont porter non pas sur la manière de concevoir la ville, mais sur celle de concevoir la banlieue, en particulier la banlieue résidentielle (Magri et Topalov, 1987). Les lotissements suburbains, dont la conception avait été introduite aux Etats Unis à partir de la seconde moitié du XIXe siècle (cf section I.3), deviennent au XXe siècle un enjeu majeur pour les architectes américain et anglais (Jackson, 1987). En Europe et aux Etats-Unis, c'est alors le triomphe de la banlieue-jardin, inspirée de la Cité jardin d'Howard. Ce type de banlieue se révélera parfaitement adapté à la circulation automobile. Il connaîtra cependant tout au long du XXe siècle de nombreuses remises en question et adaptations. En France, on lui préfère le modèle du Grand Ensemble, qui permettra de répondre à la crise du logement des années 1960-70.

III.5.1. De la Cité jardin de Howard ...

L'idée initiale de la Cité jardin (*Garden city*), formulée par l'urbaniste britannique Ebenezer Howard en 1898 n'avait pas de lien avec une volonté de favoriser les déplacements automobiles⁴⁴, peut-être parce que l'automobile à l'époque était encore assez peu répandue. Néanmoins, nous choisissons d'évoquer la cité jardin dans cette section car elle a été une source d'inspiration indéniable des lotissements conçus *pour la voiture*, au lendemain de la première guerre mondiale.

Howard conçoit la cité jardin dans l'optique de stopper la croissance indéfinie des métropoles et de redistribuer populations et activités dans de nouveaux pôles urbains de taille limitée, ceinturés de zones rurales (Magri & Topalov, 1987). La Cité jardin est une communauté autosuffisante à l'écart des grandes métropoles, dans laquelle l'emploi et la résidence sont spatialement proches, formant une unité. Selon Le Goix (2006), **cette communauté est directement inspirée des communautés socialistes planifiées en Europe au XVIIIe siècle**, telles que l'utopie industrielle des salines d'Arc-et-Senans de Ledoux (cf section I.1.3). Le plan de la cité jardin est radioconcentrique : les maisons, chacune érigée sur son propre et spacieux terrain, sont bâties soit en anneaux concentriques sur des **voies circulaires**, soit le long de **voies qui convergent vers le centre** de la ville (cf figure 1.21) (Choay, 1965). La cité est également desservie par un réseau de chemins de fer, notamment par une ligne circulaire qui la ceinture.

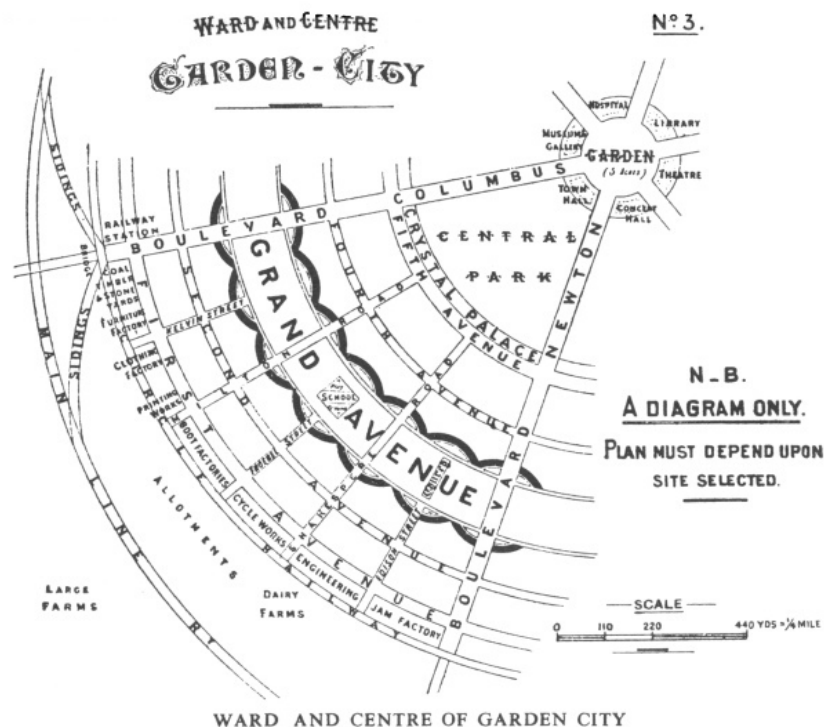
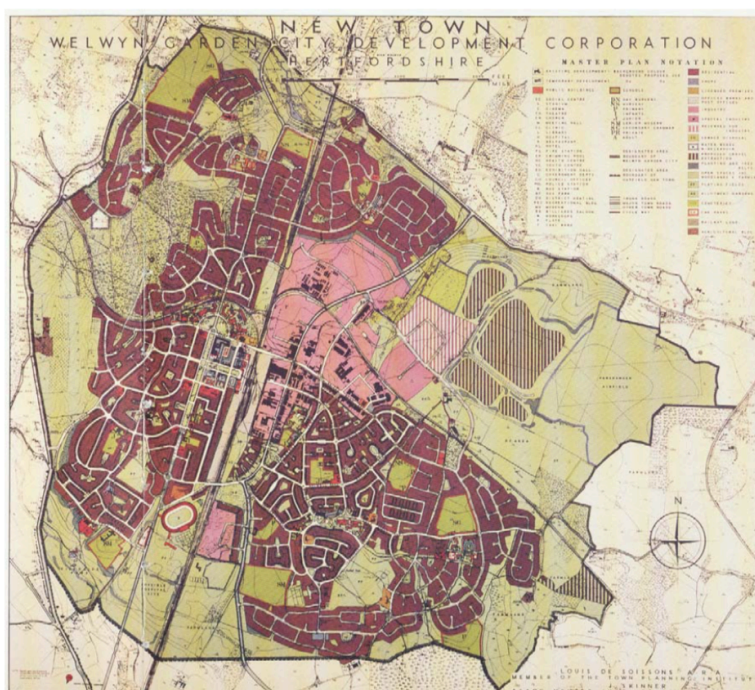


Figure 1.21 : Plan de la Cité jardin d'Howard. Source : (Howard, 1902).

⁴⁴ Françoise Choay classe Howard parmi les urbanistes culturalistes.

Howard confie la réalisation des premières cités jardins anglaises à des urbanistes : Parker et Unwin pour le plan de Letchworth, et Louis de Soissons pour le plan de Welwyn (cf figure 1.22). Leurs plans s'avèrent assez différents de celui conçu par Howard. **Le réseau viaire des quartiers résidentiels a un plan très proche de celui des lotissements suburbains conçus aux Etats Unis dès 1850** (cf section I.3) : des voies courbes conçues de manière à créer des vues changeantes sur l'environnement⁴⁵. Ainsi, la fonction du réseau viaire comme image de la ville est prise en compte dans ces cités jardins, ou du moins dans leurs quartiers résidentiels. On retrouve la même préoccupation chez Raymond Unwin lorsqu'il est chargé, en 1905, de réaliser le plan de la cité jardin de Hampstead. Pour lui, il faut que **de tous les endroits du faubourg on puisse avoir des panoramas ou des aperçus sur la campagne environnante** (Panerai et al. 1997).



Master Plan of Welwyn Garden City, 1949

Figure 1.22 : Plan de la cité jardin de Welwyn en 1949. Source : Welwyn Hatfield Borough Council.

Les préoccupations circulatoires n'étaient pas la priorité des cités jardins. Néanmoins, avec la propagation de l'automobile au lendemain de la première guerre mondiale, ces cités jardins anglaises vont s'imposer comme exemples pour les banlieues européennes et étasuniennes conçues *pour la voiture*.

⁴⁵ C'est ce qui est mentionné sur le site internet de la circonscription de Welwyn Hatfield (www.welhat.gov.uk).

III.5.2. ... à la banlieue-jardin conçue pour la voiture

Durant l'entre deux guerres, le modèle de la cité jardin s'impose largement en Europe et aux Etats Unis (Magri & Topalov, 1987), et Letchworth et Welwyn vont alors jouer le rôle de modèles (Choay, 1965). Néanmoins, plusieurs auteurs (Antoni 2016; Magri et Topalov 1987) soulignent que **les projets réalisés se révèlent très différents de l'idée initiale d'Howard**. En effet, ces cités jardins prennent, dans les faits, une forme diluée, à tel point qu'on les qualifia de « banlieues-jardins » (*garden suburbs*). Il s'agit de **lotissements de faibles densités, fortement dépendants de la ville centre**, et qui ont plutôt les caractéristiques d'un quartier résidentiel de banlieue ne comportant aucune fonction productive (Antoni 2016). Selon Magri et Topalov (1987), la non concrétisation de l'unité spatiale entre l'emploi et les résidences s'explique par une volonté de ne pas reproduire les quartiers surencombrés du centre, en assurant la ségrégation des usines et des lotissements résidentiels. Selon Porta et al. (2014), ces banlieues-jardins, avec leur très faible densité, sont une des manifestations du phénomène d'étalement. **Cet étalement va rendre l'usage de l'automobile quasi indispensable, et provoquer une désaffection de la marche à pied.**

Ainsi, bien que la Cité jardin d'Howard ait été conçue avant l'essor de l'automobile individuelle, sa déclinaison en banlieue-jardin s'est avérée parfaitement adaptée à l'usage de ce nouveau moyen de transport. Radburn, première banlieue-jardin américaine (1928) en est un exemple. Ce grand lotissement du New Jersey, réalisé partiellement seulement, a été **conçu « pour l'ère de la voiture », comme le revendiquent ses concepteurs**, les urbanistes C. Stein, H. Wright et l'architecte M. Sewell Cautley. Radburn se constitue de :

- « super blocs », des îlots de grande dimension (comparé aux blocs classiques) entourés de **voies de circulation** ;
- à l'intérieur de ces blocs, **des voies conçues en culs-de-sac** permettant de desservir les habitations. Le réseau viaire de Radburn est donc hiérarchisé (cf figure 1.23) ;
- une séparation des fonctions résidentielles, commerciales, industrielles, etc. présente dans le plan initial (qui n'a été réalisé qu'en partie).

Selon Jin (2010), l'ensemble de ces caractéristiques (blocs de grandes dimensions, hiérarchisation du réseau, ségrégation fonctionnelle) **décourage le mouvement piéton et favorise l'usage de l'automobile, ce qui justifie la désignation de Radburn comme lotissement « pour la voiture »**. A noter toutefois que le plan initial de Radburn comprend des **chemins et des parcs dédiés aux piétons**, ce qui permet la séparation entre piétons et automobiles, et donc **la sûreté des usagers**.

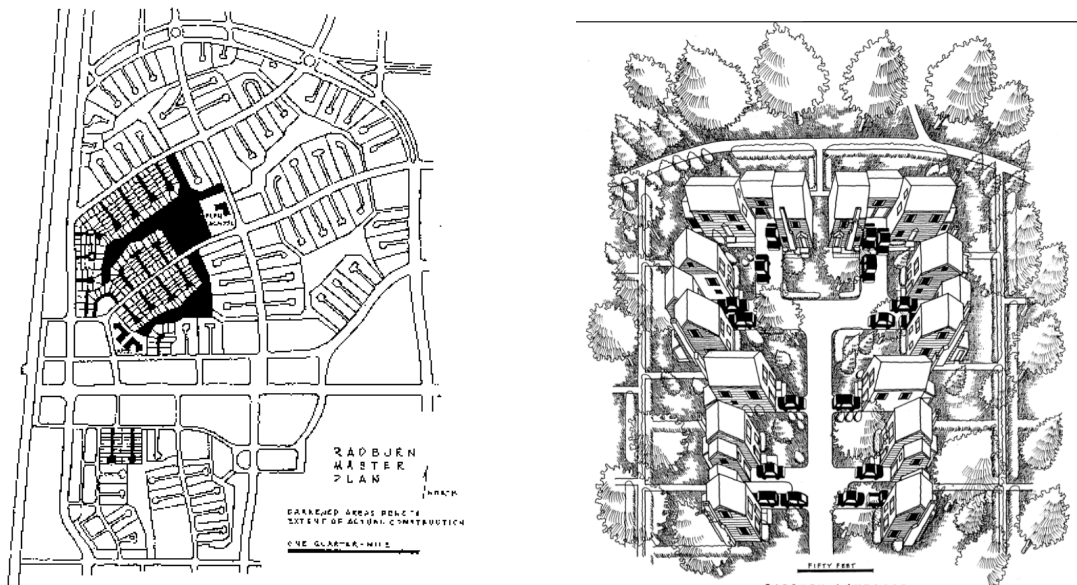


Figure 1.23 : Gauche : plan du projet initial de Radburn (seule la partie en noir a été réalisée). Droite : vue sur une des voies en culs-de-sac qui desservent les habitations.
Source : (Martin, 2001).

Ainsi, le début du XXe siècle aux Etats-Unis est marqué par l'apparition de banlieues-jardins très peu denses. Radburn dans le New Jersey en est un exemple. **Dans ce lotissement émerge un nouveau type de réseau viaire, hiérarchisé, constitué de voies de circulation entourant des « super blocs », et de voies en culs-de-sac qui desservent l'intérieur de ces blocs. Cette hiérarchie devait notamment permettre la sécurité des usagers. Dans les faits, ce réseau s'est surtout avéré adapté aux déplacements automobiles.**

III.5.3. Diffusion et adaptation du modèle Radburn après la seconde guerre mondiale

Selon Evans et Larkham (2004), parmi les considérations majeures de l'urbanisme **après la seconde guerre mondiale** figurent l'efficacité du plan (réduire la consommation de sol) et le coût. A cette époque, **les plans en culs-de-sac** proches du plan de Radburn sont largement utilisés aux Etats-Unis et au Canada, au détriment des plans en grille (Jin, 2010). Selon Jin, cela se justifie par leur meilleure efficacité dans l'occupation du sol : entre 16 et 25% de terrain en moins est nécessaire pour concevoir un plan en culs-de-sac, comparé à une grille. La recherche de rentabilité dans l'usage du sol conduit également à la suppression des cheminements piétons, qui étaient présents dans le modèle Radburn.

Selon Jin (2010), les lotissements inspirés de Radburn n'ont pas tardé à poser des problèmes de **congestion, de stationnement, de faible accès aux aménités et aux transports publics à l'intérieur des quartiers**, etc. Pour tenter de régler ces

problèmes, le plan de ces lotissements a connu diverses modifications et adaptations au cours du XXe siècle, donnant notamment naissance à l'Unité de développement planifiée, ou *Planned Unit Development (PUD)*, utilisée à partir des années 60. Elle est décrite par Jin (2010) :

- Elle est organisée en unités élémentaires comprenant au moins deux types de fonctions (habitat et commerce par exemple) ;
- L'espace résidentiel est regroupé autour d'espaces ouverts communs ;
- Des trottoirs sont prévus sur chaque rue, ainsi que des voies dédiées aux piétons ;
- Le réseau viaire est organisé de manière hiérarchique : des rues locales desservent les résidences, des collecteurs connectent ces rues locales aux grandes artères ;
- Du point de vue du plan, les **voies sont courbes et/ou en culs-de-sac** (cf figure 1.24) : les premières visent à procurer de la variété et des vues changeantes, les secondes visent à réduire la vitesse automobile et à promouvoir le calme et la sécurité (Rohe, 2009).

L'introduction de voies courbes dans les réseaux viaires des *Planned Unit Development* les rapproche davantage des cités jardins, qui elles-mêmes s'inspiraient des lotissements romantiques américains des années 1850. Néanmoins, le réseau viaire des *PUD* se distingue des deux autres par son caractère hiérarchisé, et par un nombre très important de culs-de-sac.

Malgré ces diverses adaptations, les *Planned Unit Development* ont également été critiqués par la suite, notamment en raison de l'éloignement persistant entre les zones résidentielles et la plupart des autres fonctions. Concernant leur réseau viaire, **les voies en culs-de-sac, très présentes dans ces lotissements, ont été critiquées en raison de leur faible connectivité**⁴⁶ (Jin, 2010). Selon les tenants de la ville compacte et du Nouvel Urbanisme (cf sections II.3.1 et II.3.2), cette faible connectivité crée des réseaux viaires **défavorables aux piétons** (Martin, 2001).

⁴⁶ Elles sont faiblement reliées les unes aux autres.



Figure 1.24 : Vue aérienne sur une *Planned Unit Development* de la ville de Dublin, Ohio. On constate la présence de plusieurs voies courbes et de voies en culs-de-sac. Source : Googlemap.

La propagation de lotissements inspirés du modèle Radburn marque l'adaptation des banlieues suburbaines étasuniennes à l'automobile. Même si certains éléments visaient à garantir la sécurité des piétons (les voies en culs-de-sac, visant à réduire la vitesse automobile), cette adaptation a globalement pénalisé cette catégorie d'utilisateurs. Le même constat peut être dressé en France, malgré des formes d'urbanisation différentes.

III.5.4. Les Grands Ensembles français

Dans les années 60 en France, les déplacements quotidiens augmentent, se diversifient et s'allongent. Haumont (1993) parle de « poussée péri-urbaine » qui s'amplifie. Parallèlement, le **pilotage de l'urbanisme est confié aux ingénieurs des Ponts et Chaussées dès 1958**. Ces derniers ont la charge d'élaborer des Schémas directeurs dits stratégiques pour répondre à cette nouvelle situation. Ils donnent dans ces schémas **une place importante à la voirie rapide**.

C'est à cette époque que l'on voit en France la propagation des Grands Ensembles (évoqués en section II.2), logements collectifs en nombre important, souvent sous forme de barres et de tours⁴⁷. Les réseaux viaires de ces Grands Ensembles ne sont

⁴⁷ La forte densité de leurs immeubles a permis de répondre à la crise du logement des années 1960-70.

pas constitués de rues clairement délimitées, mais de grands espaces libres paysagers (cf figure 1.25). Les Grands Ensembles sont implantés en zone périurbaine, sur les franges des infrastructures autoroutières, ce qui leur confère une **bonne accessibilité en voiture**. Néanmoins, ces infrastructures occasionnent aussi de nombreuses coupures entre les grands ensembles et leur environnement (Brès, 1998), ce qui rend **systématique le recours à l'automobile, et dissuade les piétons**. Selon le Plan de déplacements urbains d'Ile-de-France (2014), c'est lors de la propagation des Grands Ensembles (entre 1976 et 1991) que la marche connaît en Ile-de-France une désaffection progressive.

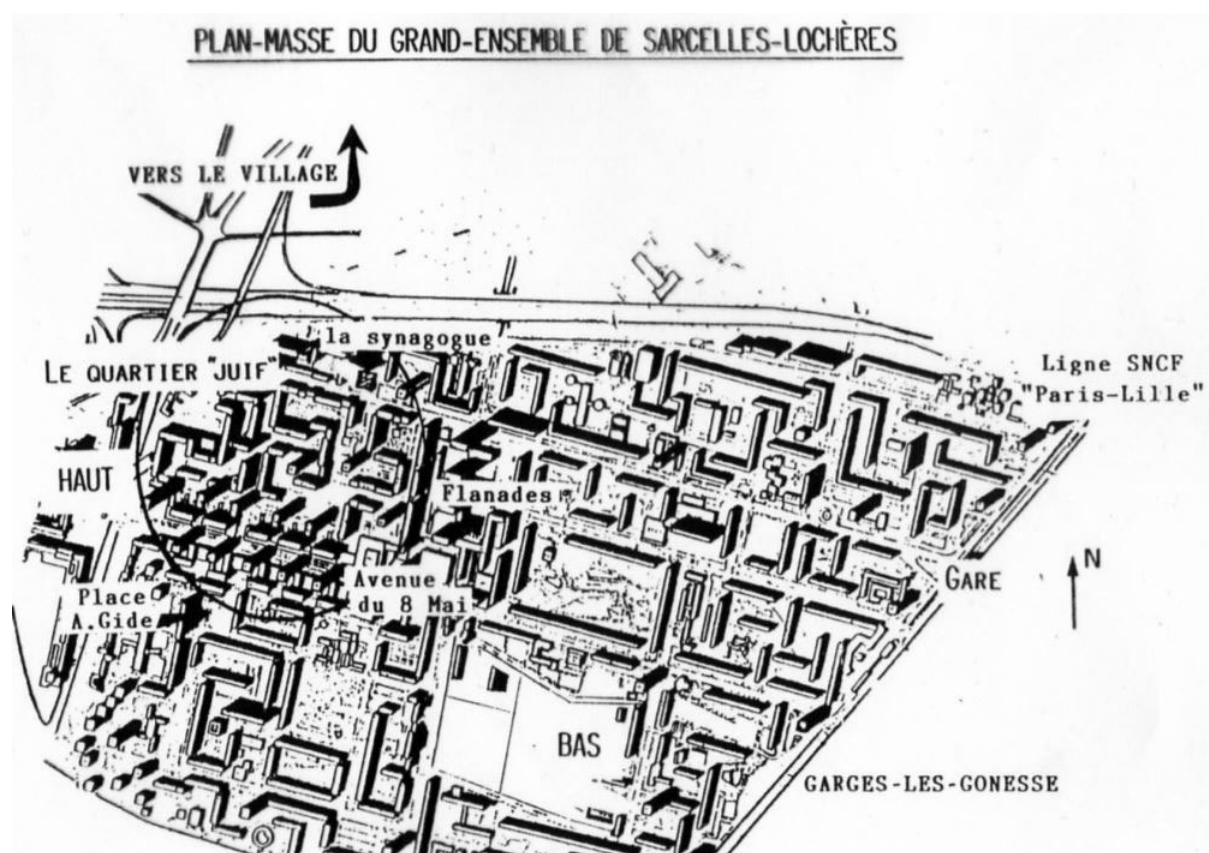


Figure 1.25 : Plan de masse du grand ensemble Sarcelles-Lochères, réalisé entre 1955 et 1976 par les architectes-urbanistes Jacques Henri-Labourdette et Roger Boileau. Source : (Vieillard-Baron, 1989).

Ainsi, bien qu'il prenne une forme différente de celui des lotissements suburbains étasuniens au XXe siècle, le réseau viaire des Grands Ensembles produit le même résultat : il favorise les déplacements automobiles et pénalise les piétons.

Synthèse du troisième paradigme, le réseau viaire comme support de la circulation

L'hygiénisme du XVIIIe siècle a introduit dans la ville l'idée que *tout doit circuler* (hommes, véhicules, air, etc.). Cette idée a préparé les grands travaux menés dans la seconde moitié du XIXe siècle dans plusieurs villes européennes, leur permettant de s'adapter à l'essor des déplacements occasionné par la Révolution industrielle. Le XXe siècle a été marqué par l'introduction de l'automobile individuelle dans la ville. Bien que cette introduction n'ait pas immédiatement imposé d'adaptation au réseau viaire, en particulier dans les grandes villes, elle a tout de même nourrit les doctrines architecturales et urbanistiques de cette époque. A l'échelle de la ville, **les réseaux en grilles** ont alors été préférés par de nombreux théoriciens et praticiens (Le Corbusier, Wright). A l'échelle des lotissements suburbains étasuniens en revanche, on leur préfère **les réseaux aux voies courbes et aux culs-de-sac**, car ces derniers consomment moins de terrain. En outre, la présence de ces culs-de-sac, ainsi que la hiérarchisation des voies dans ces réseaux devaient permettre une meilleure sécurité pour les piétons. Dans les faits, ces réseaux se sont avérés dissuasifs pour la marche à pied, notamment en raison de leur faible connectivité (en raison du grand nombre de culs-de-sac) et parce que les cheminements piétons y ont peu à peu été supprimés. Les Grands Ensembles construits en France ont eux aussi engendré une désaffection de l'usage de la marche, en raison de leur localisation sur les franges des infrastructures routières.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu de la richesse **des préconisations faites en urbanisme concernant la conception des réseaux viaires**. Ces préconisations ont été classées en trois paradigmes qui, selon nous, ont guidé la conception de ces réseaux, de l'Antiquité à la fin du XXe siècle : le réseau viaire comme image de la ville, le réseau viaire comme lieu de vie, et le réseau viaire comme support de la circulation.

Nous constatons d'abord la grande variété d'acteurs cités à propos de chacun des paradigmes. Nous avons ainsi évoqué des architectes et des urbanistes (Ledoux, Cerdà, Davis, Le Corbusier, F. L. Wright), des ingénieurs (Gautier, Reynaud), des philosophes (Jacobs), des religieux (Sixt V, Laugier), des penseurs politiques (Cabet) ou encore des hommes politiques (Hausmann). Par ailleurs, nous constatons que plusieurs de ces acteurs évoquent la morphologie des réseaux viaires (leur plan) comme un ingrédient fondamental dans leurs préconisations. Ces plans sont extrêmement variés (symétriques, hiérarchisés, circulaires, perméables, ...). Ce point sera abordé plus en détail dans le chapitre 3.

Au sein de chaque paradigme, nous avons observé des préconisations très différentes, voire contradictoires, entre un auteur et un autre, ou entre un contexte spatio-temporel et un autre. Nous avons par exemple montré que l'image de la ville, recherchée par certains théoriciens et praticiens lors de la conception des réseaux viaires, pouvait être une image d'ordre, de contraste, de nostalgie. La fonction du réseau comme support de la circulation a elle aussi fait l'objet de préconisations contradictoires. Par exemple, la vitesse des véhicules a été encouragée à partir du XVIIIe siècle, puis finalement dépréciée à partir des années 1960 dans les *Planned Unit Development* étasuniens (les voies en culs-de-sac dans ces lotissements devaient permettre de réduire la vitesse des véhicules), et ce pour des raisons de sécurité. Ces exemples illustrent le **caractère mouvant des préconisations faites en urbanisme, en matière de conception des réseaux viaires**.

Les trois paradigmes que nous proposons ne sont pas totalement indépendants les uns des autres. Par exemple, la perception de l'espace urbain est liée au mouvement (Brès, 1998), il existe donc des *interférences* entre le réseau comme image de la ville, et le réseau comme support de la circulation. Autre exemple, la fonction du réseau comme lieu de vie est liée à la possibilité de pratiquer la marche dans ce réseau (la marche favorise les contacts, les interactions). Elle est donc liée à la question circulaire.

Focus sur la question circulaire

Nous avons montré dans ce chapitre que la question de la circulation en ville a suscité un grand intérêt, et donné lieu à de nombreuses préconisations de la part des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Ces derniers ont été regroupés dans le troisième paradigme. Toutefois, des auteurs cités à propos d'autres paradigmes évoquent de manière indirecte la question de la circulation. Par exemple, l'architecte italien Vincence Andrea Palladio soutient que les voies en lignes droites soulagent le marcheur. Il évoque donc la question du confort de l'utilisateur lors de ses déplacements. De son côté, l'abbé Laugier affirme que les réseaux viaires répétitifs comme ceux en grille sont source d'égarement pour les individus. Il évoque donc la capacité des usagers mobiles à se repérer lors de leurs déplacements. Enfin, la philosophe de l'architecte Jane Jacobs, lorsqu'elle préconise de faire du réseau viaire un lieu de vie, évoque la nécessité de permettre aux usagers de se déplacer à pied. Elle aborde donc indirectement la question circulaire.

Si on se concentre sur les seuls auteurs classés dans le paradigme du réseau viaire comme support de la circulation, on constate que les enjeux qu'ils associent à la question circulaire sont différents. Certains évoquent l'efficacité dans les déplacements, d'autres leur **répartition uniforme** sur le réseau, d'autres auteurs évoquent la **commodité**, ou la **sécurité** offertes aux usagers lors de ces déplacements. La multiplicité de ces enjeux indique qu'en urbanisme, le déplacement n'est pas seulement efficace : il peut aussi être sûr, commode, uniformément réparti, ... Ainsi, **les théoriciens et praticiens de l'urbanisme se**

prononcent sur différentes « conditions de circulation », qu'ils souhaitent offrir aux usagers. Ces conditions concernent des aspects aussi variés que le confort offert à l'utilisateur, l'encombrement auquel il est soumis en voiture, ou la possibilité qui lui est offerte de se déplacer à pied.

Le tableau 1.1 ci-dessous synthétise (par ordre chronologique) les principales préconisations relatives à la question circulaire, tirées des textes et projets des théoriciens et praticiens cités dans ce chapitre. La majorité de ces auteurs sont associés au paradigme du réseau comme support de la circulation, mais certains avaient également été cités à propos d'autres paradigmes. La première colonne correspond soit à un auteur⁴⁸, soit à un contexte temporel et spatial. La seconde colonne correspond aux préconisations relatives à la circulation. Les mots en gras correspondent aux conditions de circulation évoquées.

⁴⁸ La date qui accompagne chaque auteur est donnée à titre indicatif pour indiquer son contexte temporel, elle correspond souvent à la date de publication de son œuvre.

Auteur, ou contexte spatial et temporel	Préconisations concernant la circulation
Antiquité, Europe	Trottoirs et passages piétons pour dissocier les modes de transport ; Dispositif de gestion de sens de circulation différenciés, et de séparation des flux par superposition
V. A. Palladio (architecte), 1570	La commodité des voies en lignes droites soulage ceux qui marchent et leur procure plaisir et satisfaction
Henri Gautier (ingénieur), fin XVIIIe siècle	Dimensionner la largeur des chaussées proportionnellement aux files de véhicules
XVIIIe siècle, Europe	Dissiper la congestion des flux par une meilleure configuration des voies ; Concevoir des voies larges et droites, ayant la capacité de garantir une circulation ininterrompue des personnes et des marchandises
M. A. Laugier (abbé et historien de l'architecture), 1753	Les réseaux dont le plan est répétitif sont sources d'égarment pour les individus (on s'y perd)
Pierre Patte (architecte), 1769	Il faut que tous les abords soient faciles , qu'il y ait suffisamment de débouchés d'un quartier à l'autre pour le transport des marchandises et la libre circulation des voitures
J-N-L Durand (architecte), 1794	Les communications doivent être les plus courtes et les plus commodes , la ligne droite est pour cela la première condition
XIXe siècle, Europe	Il faut plus d'efficacité dans les déplacements
Léonce Reynaud (architecte et ingénieur), dès 1836	Les réseaux en grille ne desservent correctement la circulation que dans deux directions ; les rues trop brisées rallongent les distances
G. E. Haussmann (haut fonctionnaire et homme politique), 1852-1870	Tout doit circuler, il faut relier les points importants de la ville, répartir le déplacement des piétons et celui des véhicules sur des sites propres (trottoirs et chaussées)
Ildefons Cerdà (urbaniste, homme politique, entre autres), 1859	Circulation généralisée, accessibilité rapide aux différents lots découpés par le plan, déplacements répartis uniformément sur le réseau en grille, perméabilité, communicativité
Etienne Cabet (penseur politique), 1840	Hiérarchisation du réseau viaire, de sorte que chaque type de voie soit destiné à la circulation d'un type de flux particulier
XXe siècle, Europe et Amériques du Nord	Efficacité et sécurité par la séparation des déplacements piéton et automobiles

Le Corbusier (architecte, urbaniste, entre autres), 1925	La vitesse des automobiles ne doit pas être brisée, leur déplacement ne doit pas être encombré , il faut garantir le fonctionnement optimal de la « machine circulatoire », assurer une fluidité maximale et un débit continu. Pour cela, le réseau viaire doit être hiérarchisé, suivant un quadrillage régulier, avec des voies droites et longues, et des croisements tous les 400 mètres ; Les voies autoroutes traverseront en transit et selon le réseau le plus direct, le plus simplifié , parfaitement indépendant des édifices ou immeubles pouvant se trouver à proximité
F. L. Wright (architecte), 1934	Réseau de circulation performant, assurant une bonne accessibilité de tous les habitants à l'ensemble des services et aménités urbaines (accessibilité généralisée), pas de mouvement centripète
C. Stein, H. Wright, M. Sewell Cautley (urbanistes, concepteurs du lotissement Radburn), 1928	Lotissement (Radburn) conçu pour « l'ère de la voiture », avec un réseau viaire hiérarchisé, comprenant plusieurs culs-de-sac ; Chemins dédiés aux piétons, pour assurer leur sécurité
Jane Jacobs (philosophe de l'architecture), 1961	Réseau dense et perméable pour permettre les déplacements à pied
Années 1960 aux Etats-Unis	<i>Planned Unit Development</i> , lotissements mixtes (au moins deux fonctions) visant à régler les problèmes de congestion , de stationnement, de faible accès aux aménités et aux transports publics à l'intérieur des quartiers ; réseau viaire hiérarchisé, composé de voies courbes et de culs-de-sac. Les culs-de-sac visent à réduire la vitesse automobile, et promouvoir la sécurité
Années 1960-70 en France	<i>Grands Ensembles</i> , implantés sur les franges des infrastructures autoroutières, ce qui leur confère une bonne accessibilité en automobile
Nouvel Urbanisme, 1980 aux Etats-Unis	Réhabiliter la marche à pied grâce à des réseaux viaires aux voies fortement interconnectées

Tableau 1.1 : Synthèse des préconisations relatives à la circulation, faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme mentionnés dans le chapitre, ou répandues dans des contextes spatiaux et temporels spécifiques. Nous précisons systématiquement la discipline d'origine des auteurs.

Les trois paradigmes de conception des réseaux viaires que nous avons proposés font l'objet de travaux au-delà du champ des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. La fonction du réseau viaire comme image de la ville est notamment

abordée dans des travaux d'architecture et d'étude du paysage, portant sur la perception de l'espace urbain (Bailly, 1974; Leduc & Chauvat, 2013). Pour ce qui est de la fonction du réseau viaire comme lieu de vie, elle est notamment abordé par les géographes et les sociologues, dans les travaux portant sur l'espace public (Fleury, 2004; Joseph, 1984; Leménorel, 1997).

De son côté, la fonction du réseau viaire en tant que support de la circulation fait l'objet d'un grand intérêt dans plusieurs disciplines (géographie, urbanisme et aménagement, ingénierie des transports, sociologie, pour ne citer que celles-ci). En effet, depuis les années 1920, des praticiens et des chercheurs ont fait de la question circulatoire leur spécialité, forgeant des théories, méthodes et matériaux qui ont fait de cette question un **champ scientifique** à part entière. Considérant cela, **comment positionner les théoriciens et praticiens de l'urbanisme au sein du champ scientifique d'étude de la circulation ? Où peut se situer leur apport ? Quelle différence y'a-t-il entre la prise en compte de la circulation en urbanisme, et sa prise en compte par les diverses disciplines scientifiques susmentionnées ?** Nous explorons ces questions dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : Croisement de regards sur la circulation, entre urbanisme et études de la mobilité urbaine

Introduction

« *Transport is not just another landuse* » (Marshall, 2005, p. 13).

Nous avons vu dans le premier chapitre que, parmi les motivations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaires figurait l'amélioration des conditions de circulation offertes aux usagers⁴⁹ à l'intérieur de l'espace urbain. L'étude de la circulation en ville est un **domaine scientifique** bien établi, avec ses propres professionnels, ses théories, méthodes et matériaux empiriques. Nous désignons ce domaine scientifique comme étant les « études de la mobilité urbaine ».

La mobilité urbaine désigne pour nous le déplacement des individus à l'intérieur de l'espace urbain, quelle que soit la temporalité de ce déplacement⁵⁰. Nous excluons de notre travail la mobilité interurbaine, c'est-à-dire entre les villes⁵¹. Par ailleurs, nous choisissons de nous focaliser sur les déplacements **à pied ou en véhicule individuel**, et qui se font **en empruntant le réseau viaire**. Nous excluons le transport collectif car celui-ci porte des enjeux spécifiques que nous n'abordons pas dans le cadre de notre travail⁵². De leur côté, **les études de la mobilité urbaine** renvoient, non pas uniquement aux travaux qui décrivent cette mobilité, mais à **l'ensemble des travaux qui ont contribué à la constitution d'un savoir sur la circulation à l'intérieur de l'espace urbain**. Ces travaux sont issus des sciences humaines et sociales (on parle de *mobility studies* ou *mobilities*), mais aussi de la socio-économie des transports. Ce champ disciplinaire se développe dans les années

⁴⁹ Le terme « usager » est utilisé pour désigner l'utilisateur d'un mode de déplacement, autrement dit l'individu qui se déplace.

⁵⁰ Signalons toutefois qu'en *géographie urbaine*, les mobilités sont souvent appréhendées dans le cadre des déplacements domicile-travail et d'une temporalité du quotidien. On parle alors de « *mobilité quotidienne* ».

⁵¹ Nous excluons également la mobilité résidentielle, relative aux déménagements des individus, la mobilité migratoire, et les voyages.

⁵² Nous renvoyons le lecteur intéressé par ces modes de transport aux travaux sur la planification des transports publics urbains.

1940-50 autour de spécialistes de la circulation (automobile dans un premier temps). Ces spécialistes sont chargés d'examiner, de proposer, et d'évaluer les projets d'infrastructures et de services de transport (Commenges, 2013)⁵³. Nous présentons de manière synthétique la genèse des études de la mobilité urbaine en annexe A.

La circulation est souvent abordée dans les études de la mobilité urbaine à travers l'angle de l'offre et de la demande. Les possibilités de déplacement offertes aux usagers sont l'offre, et leurs comportements de mobilité effectifs représentent la demande. Ainsi, des usagers peuvent avoir un certain comportement de mobilité *en dépit* des possibilités de déplacement qui s'offrent à eux. Ils peuvent par exemple se déplacer très peu alors que leur environnement leur offre toutes les possibilités pour le faire. C'est la raison pour laquelle, dans une optique d'action publique, Julie Vallée et ses collègues (2015) affirment qu'il est nécessaire « d'identifier les populations prioritaires comme celles souffrant d'un faible potentiel d'accès aux ressources (...) plutôt que celles avec une faible mobilité *stricto sensu* » (p. 1).

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme mentionnés s'intéressaient aux conditions de circulation offertes aux usagers, leur réflexion se situe donc au niveau de l'offre de déplacement, et pas au niveau des comportements effectifs des usagers. Un concept phare des études de la mobilité urbaine permet de résumer cette offre de déplacement il s'agit du concept d'**accessibilité**.

Dans ce chapitre, nous verrons que le concept d'accessibilité permet d'englober plusieurs des conditions de circulation recherchées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, lors de la conception des réseaux viaires. Le passage des « conditions de circulation » au « concept d'accessibilité » nous permet de faire dialoguer les réflexions des théoriciens et praticiens de l'urbanisme et les études de la mobilité urbaine. Nous verrons que **les études de la mobilité urbaine permettent de porter un regard scientifique sur la circulation telle qu'abordée dans les travaux des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Inversement, il apparaît que ces travaux incitent à enrichir les méthodes d'évaluation de l'accessibilité de critères nouveaux.**

⁵³ Apparue aux États-Unis, la socio-économie des transports se diffuse ensuite rapidement dans les pays d'Europe occidentale.

I. L'accessibilité, définitions, enjeux et méthodes

Notre recherche portant sur les possibilités de déplacement offertes aux usagers et non sur leurs comportements effectifs, le concept d'accessibilité s'avère particulièrement pertinent. Nous excluons donc tout un pan des études de la mobilité urbaine, relatif à la description, l'analyse, et la prévision de la demande de déplacement (cf annexe A). Dans cette première partie, nous donnons différentes définitions du concept d'accessibilité, et choisissons celle qui s'adapte le mieux à notre besoin : l'accessibilité comme possibilités de déplacement offertes aux usagers. Nous présentons ensuite les différents enjeux de l'accessibilité ainsi définie, ainsi que ses méthodes d'évaluation, développées dans les études de la mobilité urbaine.

I.1. Définition de l'accessibilité

I.1.1. Définitions générales

Une revue de la littérature nous permet de constater la variété des définitions de l'accessibilité. Nous en présentons certaines ci-dessous :

« *Potentiel **d'interaction** entre plusieurs lieux* » (Hansen, 1959)

« *Capacité à donner accès, à rendre **possible** le déplacement vers différentes destinations* » (Brès, 1998).

« *Ensemble des **possibilités** effectives pour relier deux lieux par un déplacement* » (Lévy et Lussault, 2003)

« ***Possibilité** d'accès à un lieu ou à partir d'un lieu* » (Merlin et Choay, 1996)

« ***Proximité** des activités* » (Ingram, 1971)⁵⁴

« ***Connectivité** entre les lieux* » (Taaffe et Gauthier, 1973)⁵⁵

« *Plus ou moins grande **facilité** avec laquelle un lieu ou une fonction économique attractive (emplois, commerces, services,...) peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, à l'aide de tout ou partie des moyens de transports existants* » (Bhat et al., 2000)⁵⁶

On comprend à travers ces définitions que l'accessibilité caractérise la relation entre des lieux. On constate également que les concepts évoqués pour décrire cette relation sont variés. Certains auteurs mettent en avant le concept *d'interaction* ;

⁵⁴ Cité dans Viana Cerqueira (2018).

⁵⁵ *Ibid.*

⁵⁶ *Ibid.*

d'autres le concept de *proximité* ; d'autres celui de *connectivité* ; certains évoquent la *facilité* du déplacement entre les lieux, tandis que d'autres se concentrent uniquement sur sa *possibilité*.

I.1.2. L'accessibilité comme offre de mobilité

Une manière de définir plus précisément le concept d'accessibilité est d'évoquer sa différence avec le concept de mobilité. Rappelons que celui-ci désigne le déplacement des individus dans l'espace urbain. L'accessibilité est parfois définie comme étant l'offre de mobilité. Selon Lévy et Lussault (2003)⁵⁷, pour chaque acteur, la mobilité est possible parce qu'il existe une offre de mobilité : l'accessibilité. Elle est donc une des conditions de la mobilité.

Selon cette acception, l'accessibilité est indépendante des décisions de celui qui est mobile ou qui décide de la mobilité. L'étude de l'accessibilité porte alors sur les déplacements **potentiels** des usagers (Lévy et Lussault 2003), les **opportunités**, au détriment des pratiques effectives. Elle regroupe « l'ensemble des déplacements possibles dans une situation donnée », et définit de fait « une carte des virtualités de déplacement » (*ibid*⁵⁸). Lévy et Lussault ajoutent que « la prise en compte de la relation entre le virtuel (l'accessibilité) et l'actuel (déplacements) constitue l'une des manières d'aborder le concept de mobilité ».

I.1.3. Définition choisie

Nous choisissons une définition de l'accessibilité qui englobe aussi bien les concepts évoqués dans les définitions classiques (proximité, facilité, connectivité, interaction) que l'idée de potentialités offertes aux usagers en termes de déplacements (idée présente dans les travaux sur la mobilité). Ainsi, nous choisissons de définir l'accessibilité comme **un ensemble de conditions favorables aux déplacements, et qui s'offrent aux individus dans une situation donnée.**

I.2. Les enjeux de l'accessibilité

« On ne peut produire du bâti, de l'habitabilité, sans produire en même temps du **lien potentiel**, de la viabilité » (Brès, 1998, p. 19).

⁵⁷ Entrée « mobilité » dans le dictionnaire Lévy & Lussault (2003).

⁵⁸ *Ibid* indique que cette référence est la même que celle qui la précède dans le paragraphe.

Un des apports des études de la mobilité urbaine est de décrire les enjeux qui ont été portés par le concept d'accessibilité à travers le temps. Nous identifions dans la littérature trois principaux types d'enjeux : des enjeux politiques (le droit au transport est une condition du droit à la ville), des enjeux d'insertion sociale (l'insertion sociale dépend en grande partie de la capacité à se déplacer), et des enjeux de structuration de l'espace (l'accessibilité est un facteur primordial de localisation des populations et de développement économique des territoires). Nous détaillons ces trois enjeux dans les sections ci-dessous.

I.2.1. L'accessibilité comme projet politique

Selon Antoine Haumont (1993), bien que l'accessibilité soit considérée comme un problème technique pour les politiques d'urbanisme et de transport, elle est aussi soumise à des variations historiques dont les bases sont politiques et sociales. Pour lui, l'accessibilité est le résultat d'un projet politique. Pierre Merlin (1985) de son côté affirme que, depuis la fin des années 1960, les choix en matière de transport prennent une dimension nouvelle, ils ont « une portée sociale, un caractère politique qui explique qu'ils se trouvent au centre des luttes sociales : le « droit aux transports » devient un élément du « droit à la ville », une des bases de la recherche d'une plus grande égalité des citoyens ».

Mais cet enjeu n'est pas récent. Pour l'historien Georges Duby (*cité dans* Haumont (1993)), dans la ville européenne de la fin du Moyen Age, l'accessibilité est perçue « comme un objectif civique, dans une ville qui reste cependant compartimentée par ses quartiers, ses paroisses et ses communautés » (p. 112). Haumont donne comme exemple une recherche menée par l'historien Jacques Heers en 1984, sur les espaces publics et les espaces privés à Bologne au XIIIe siècle. Dans la seconde moitié du XIIIe siècle et suite à divers conflits, des changements majeurs sont opérés dans la ville : la muraille est élargie et les espaces publics bornés ou rebornés au profit du réseau viaire, et une grande place centrale est créée. Pour Haumont (1993), « à une ville multicellulaire, dominée par des groupes sociaux qui prétendent préserver leur isolement et leur indépendance, se superposent des solidarités plus larges et plus complexes ; aux espaces privés, réservés, des espaces publics ouverts à tous » (p. 112). A travers cet exemple, Haumont illustre que l'amélioration de l'accessibilité peut viser à contrôler une part de la population, en empêchant son isolement. Cette idée d'instrumentalisation de l'accessibilité à des fins politiques est reprise par Antoni (2016), qui parle d'accessibilité comme d'une option d'aménagement stratégique, conditionnée par une vision et des impératifs politiques.

Le droit à l'accessibilité est inscrit dans la loi en France (droit au transport⁵⁹). Selon Haumont (1993), ce droit, dont il fait remonter les prémices au Moyen Age, ne sera jamais remis en cause. Néanmoins, Haumont ajoute que, dès le Moyen Age, ce droit ne va pas sans le devoir de ne pas s'écarter du périmètre urbain : les habitants des faubourgs extra-muros ne pouvaient prétendre à la protection de la Cité. Cette idée reviendra au premier plan dans les années actuelles lorsque les « dynamiques du desserrement seront critiquées au nom même des intéressés et au nom de l'intérêt public : comment assurer à une population qui s'éparpille le droit d'accéder à la ville, à ses emplois et à ses services ? ». Haumont fait ainsi référence aux territoires peu accessibles, où, selon Jean-Pierre Orfeuil (2004)⁶⁰ (*cité dans Bonerandi (2004)*), « l'usage de l'automobile est rendu indispensable par les faibles densités d'occupation, par les faibles densités d'activité et par la faiblesse des services de transport autres que scolaires ».

Les cités ouvrières du XVIIe et XVIIIe siècles et les cités jardins d'Howard offrent également un exemple d'accessibilité employée pour servir un projet politique. Ces cités rapprochaient spatialement l'espace de travail et les logements des travailleurs, ce qui leur conférait une bonne accessibilité. L'objectif était ici d'augmenter la cohésion et la disponibilité des équipes de travail tout en assurant leur équilibre par la présence des familles. Plutôt qu'une utopie socialiste, ces cités représentaient pour Antoni (2016) une contre-réponse de l'économie capitaliste libérale aux revendications ouvrières. Le salaire bas des ouvriers était alors compensé par la proximité aux aménités.

L'instrumentalisation de l'accessibilité à des fins politiques et sociales peut aussi consister à limiter l'accès de certains espaces à des franges privilégiées de la population. On le voit dans les *gated communities*, lotissements cossus très répandus aux Etats-Unis, et dont l'accès est limité aux seuls résidents. On le voit également, selon l'architecte David Mangin (*cité dans Allix (2008)*), dans les nouveaux plans de déplacement des tissus urbains anciens : leur logique consiste à repousser la circulation sur les boulevards et à transformer les rues en impasses par des jeux de sens uniques. Ces projets engendrent une réduction volontaire de l'accessibilité dans l'espace urbain. Pour Mangin, ils reproduisent une logique distributive et un système d'enclaves néovillageois.

I.2.2. L'accessibilité comme condition d'insertion sociale

« Les espaces urbains et les sociétés urbaines, traditionnellement évalués au regard de leur offre de mobilité, tant spatiale que sociale, font de l'accessibilité une valeur

⁵⁹ Il est promulgué par la Loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) du 30 décembre 1982. Cette loi affirme un droit au transport devant permettre de se déplacer « dans des conditions raisonnables d'accès, de qualité et de prix ainsi que de coûts pour la collectivité ».

⁶⁰ Dans son ouvrage intitulé *Transports, pauvretés, exclusions. Pouvoir bouger pour s'en sortir*.

fondamentale, quelque chose comme le noyau dur de l'urbanité » (Isaac, 1998 cité dans Gharbi (2016)).

Pour comprendre cet enjeu de l'accessibilité, il faut se placer dans une vision du citoyen comme un être de mouvement, de locomotion, qui passe d'un territoire à un autre (Clot-Goudard & Tillous, 2008). Pour Clot-Goudard et Tillous (2008), ce mouvement constitue l'activité cognitive par laquelle le citoyen recompose sans cesse la connaissance qu'il a de la ville. Mais ce mouvement est aussi une mesure des relations sociales et du degré de socialisation d'une population urbaine (*ibid*). Les usagers eux-mêmes sont de plus en plus évalués selon leur capacité à se déplacer, à être mobiles (Viana Cerqueira, 2018). Comme le souligne Jean-Pierre Orfeuill (2004), « la capacité à se déplacer est une condition nécessaire (mais certes pas suffisante) d'une inscription normale dans la vie sociale ». Geneviève Lévy écrit à ce propos : « comment s'instruire, travailler, se distraire, participer à la vie de la cité, nouer des liens amicaux, familiaux ou sociaux, si l'on ne peut se déplacer et accéder dans les lieux où se pratiquent les activités sociales, éducatives et professionnelles » (Lévy, 2003)

Orfeuill (2004) ajoute que « les populations dont l'aptitude à la mobilité est la plus faible encourent des risques d'isolement, de pauvreté économique et relationnelle, de marginalisation et d'exclusion ». Cette aptitude à la mobilité dépend bien entendu des caractéristiques des usagers⁶¹. Néanmoins, elle dépend aussi de l'accessibilité qui s'offre à eux, par exemple la disponibilité de moyens de transport, leur confort, la proximité des activités, etc. Des fractions entières de la population se trouvent sous-engagées dans la mobilité par défaut d'accessibilité. On comprend dès lors pourquoi l'accessibilité est souvent considérée comme le noyau dur de l'urbanité.

1.2.3. Accessibilité et structuration de l'espace

L'accessibilité structure l'espace. Pour Viana Cerqueira (2018), « les possibilités d'accès depuis un lieu et la capacité des services de transport à répondre efficacement aux programmes d'activités des individus sont des facteurs essentiels de localisation des populations et de développement économique des territoires » (p. 106). Cela explique que l'accessibilité influe fortement sur le niveau des valeurs foncières (Merlin & Choay, 1996). Dans la même idée, Haumont (1993) évoque l'importance des transports dans « l'équilibre dynamique de l'affectation du sol, dans l'extension et la relative densification de la périphérie (d'une ville), au cours du temps, dans la modernisation continue de l'aire centrale (d'une ville) » (p. 111).

Les transports ont donc un effet sur l'occupation du sol (Hansen, 1959). Cet effet a été décrit dès 1942 par l'économiste américain Walter Isard. Celui-ci montre que l'activité du secteur du bâtiment – dont on peut par exemple prendre la mesure en

⁶¹ Viana Cerqueira (2018) explique le « frein de la distance » est appréhendé différemment selon les individus, en fonction de leur condition sociale, de leur âge, de leur sexe, etc.

observant l'évolution du nombre de permis de construire accordés, est liée aux trois vagues d'innovation dans les transports : l'arrivée du chemin de fer, celle des transports en commun urbains, et enfin celle de l'automobile (Isard, 1942).

De fait, les changements majeurs du système de transport ont des effets sur les choix de localisation des résidences et des emplois. Mais ces derniers ont à leur tour des répercussions sur le nombre de déplacements, leurs destinations, et les modes de ces déplacements. Transport et occupation du sol sont donc en interaction. Les modèles *Land-use Transport Interaction* (LUTI) ont pour but d'étudier ces interactions, en considérant « l'action réciproque du réseau de transport sur le mode d'occupation de l'espace et du mode d'occupation de l'espace sur le réseau de transport » (Commenges, 2013, p. 268). Vance (1986) (*cité dans* Wang, Antipova, et Porta (2011)) évoque également cette forte interdépendance entre réseau de transport et occupation du sol intra-urbain. A certains moments, le développement de la ville encourage la construction de systèmes de transport, tandis qu'à d'autres moments, c'est le développement des transports qui facilite la croissance de la ville. Pour Gabriel Dupuy (1985), les municipalités peuvent tirer parti de cette interdépendance, par exemple pour renforcer le centre-ville, ou au contraire pour le faire dépérir.

I.3. Les méthodes d'évaluation de l'accessibilité

Comment est évaluée l'accessibilité ? Comment évaluer si les conditions offertes aux individus dans une situation donnée sont favorables ? La revue de la littérature des études sur la mobilité laisse apparaître plusieurs approches. Nous en présentons certaines dans cette section. Il faut signaler que dans toutes ces approches, l'accessibilité est considérée à l'échelle d'un lieu ou d'une situation donnée, il ne s'agit pas d'une accessibilité globale, qui qualifierait l'ensemble d'une ville par exemple.

I.3.1. Les approches classiques d'évaluation de l'accessibilité

Merlin et Choay (1996) évoquent différentes approches pour l'évaluation de l'accessibilité d'un lieu donné :

- par « tout ou rien » : ce lieu est accessible ou ne l'est pas, par exemple en fonction de la distance qui le sépare de la plus proche station des transports en commun (on fixe un seuil au-delà duquel le lieu est considéré comme non accessible) ;
- par des courbes isochrones reliant les points vers lesquels le temps de trajet (depuis le lieu considéré) est le même, par un moyen de transport donné ou par le plus rapide. Cela permet par exemple de définir des durées d'accès moyennes depuis un certain lieu vers les différentes destinations dans la

ville. La figure 2.1 présente l'exemple d'un isochrone depuis l'Opéra de Paris, en considérant un déplacement à pied ;

- par une moyenne des coûts généralisés de déplacements⁶² depuis un lieu donné vers différentes destinations (les emplois par exemple).

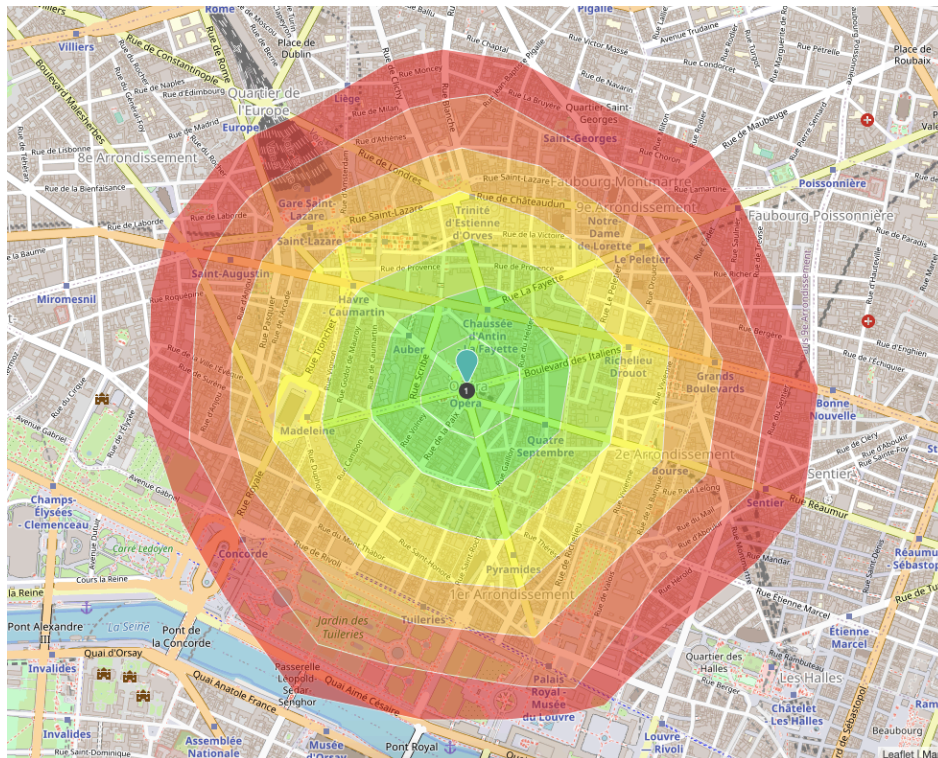


Figure 2.1 : Isochrone au départ de l'Opéra de Paris, en considérant un déplacement à pied. Les courbes sont distantes de 2 minutes. Source : Isochrone obtenu avec l'outil Openroute Service (maps.openrouteservice.org).

Ces approches classiques montrent la multiplicité des variables permettant d'évaluer l'accessibilité. En effet, celle-ci peut être évaluée par l'intermédiaire **de la distance à parcourir pour atteindre sa destination, du temps de trajet**, ou encore du **coût associé au déplacement**. Cette multiplicité est intrinsèque à la notion même d'accessibilité, qui comme nous l'avons vu en section I.1.1, peut être définie par tout un ensemble de concepts.

I.3.2. L'approche gravitaire d'évaluation de l'accessibilité

L'économiste américain Walter Hansen, du *Département de planification urbaine et régionale* du MIT, était l'un des pionniers du concept d'accessibilité. Il définit celle-ci

⁶² Le coût généralisé du déplacement est une mesure composite qui prend en compte le temps et le coût monétaire dépensés lors d'un déplacement ainsi que les inconforts subis (Merlin & Choay, 1996).

comme le potentiel d'interaction entre une entité et les autres entités (Hansen, 1959). Pour lui, l'accessibilité d'une entité A à une entité B est directement proportionnelle à la taille de l'entité B, et inversement proportionnelle à la distance (ou au temps de trajet par exemple) entre A et B. Dit autrement, plus la taille de B augmente et la distance entre A et B diminue, plus l'accessibilité de A à B est élevée. Ces deux entités ont alors un fort potentiel d'interaction. Cette approche est dite gravitaire.

L'accessibilité « totale » de A est égale à la somme des accessibilités aux entités qui l'entourent. Ce type d'accessibilité est pondéré par le poids de la destination (B dans cet exemple), qui peut être le nombre d'emplois s'il s'agit d'une zone d'activités, la superficie de l'entité, sa population, son nombre de commerces, etc. Cette pondération permet de prendre en compte le fait que les interactions seront potentiellement plus importantes avec des entités attractives (par leur taille, leur activité, ...). Il existe toutefois des variantes de l'accessibilité non pondérées par le poids des destinations, et qui prennent en compte uniquement la distance entre les entités (Ingram, 1971).

Selon Cooper et Chiaradia (2015), l'accessibilité telle que définie par Hansen est **utilisée dans la plupart des modèles de planification des transports⁶³ des 50 dernières années**. Toutefois, Chiaradia et ses collègues (2014) critiquent cette méthode, car l'accessibilité y est évaluée entre des entités spatiales zonales⁶⁴, et en considérant les distances à vol d'oiseau entre ces zones. Pour eux, cela rend le calcul de l'accessibilité imprécis, en particulier à échelle urbaine.

En conclusion, l'approche gravitaire diffère des approches précédemment mentionnées, dans la mesure où l'accessibilité y est évaluée par l'intermédiaire de la distance (ou du temps de trajet) qui sépare les lieux, mais aussi du « poids » de la destination (nombre d'emplois, superficie, population, ou autre).

1.3.3. L'approche de la *Time Geography* pour l'évaluation de l'accessibilité

La *Time geography* est une approche introduite par le géographe suédois Torsten Hägerstrand en 1970. Celle-ci part du principe que les trajectoires des usagers sont guidées par un faisceau de contraintes et d'obstacles (en termes d'emploi du temps, ou d'horaires d'ouverture des activités par exemple). La modélisation de ces

⁶³ La planification des transports désigne l'« établissement de programmes, spatiaux et économiques, déterminant la demande [de déplacement] prévisible à l'horizon temporel étudié, les investissements à réaliser pour la satisfaire, leur échelonnement dans le temps et leurs conséquences prévisibles, en particulier sur le développement urbain et la localisation des activités et des équipements » (Merlin & Choay, 1996).

⁶⁴ Il s'agit souvent de zones équivalentes en termes de population, nommées des TAZ (*traffic analysis zones*).

contraintes et obstacles permet d'anticiper le spectre des **possibilités d'action pour un type d'utilisateur dans une situation donnée** (Banos et al. 2005). Dans ce cas, l'accessibilité, entendue comme possibilités de déplacement qui s'offrent aux usagers, dépend fortement de ces contraintes et obstacles.

Cette méthode est intéressante dans la mesure où elle vise à déterminer « l'univers des possibles auquel est soumis chaque individu en terme de consommation quotidienne de son espace de vie » (Banos et al., 2005). Néanmoins, comme le souligne Viana Cerqueira (2018), elle requiert des données vastes et spécifiques, notamment sur le programme d'activités des usagers.

I.3.4. Une évaluation de plus en plus précise de l'accessibilité

L'évaluation de l'accessibilité peut englober un nombre plus ou moins important de « composantes ». Dans un rapport pour *L'Institut national néerlandais pour la santé publique et l'environnement*, les chercheurs en transport Karst Geurs et Jan Ritsema van Eck (2001) ont théorisé le concept d'accessibilité comme étant un concept à la jonction de plusieurs composantes :

- la composante transport ;
- la composante spatiale ;
- la composante temporelle ;
- et la composante individuelle.

Les approches classiques présentées par Merlin et Choay (1996) (calcul de la distance à parcourir pour atteindre sa destination, du temps de trajet, du coût du déplacement) correspondent à la composante « transports » de l'accessibilité. C'est la composante originelle, elle porte sur la **performance des systèmes de transport et les éléments techniques de ces systèmes**. De son côté, l'approche gravitaire de Hansen regroupe à la fois la distance à parcourir (ou le temps de trajet) mais aussi le poids de la destination (nombre d'emplois par exemple). Elle prend donc en compte à la fois la composante « transports » et la composante « spatiale » (localisation et caractéristiques des activités). La *Time geography* de son côté ajoute des données sur les usagers (leur emploi du temps par exemple), et des données temporelles (horaires d'ouverture des activités par exemple). Elle introduit de fait une composante individuelle et une composante temporelle.

Grâce à ces différents développements méthodologiques, l'accessibilité entendue comme un ensemble de conditions favorables aux déplacements, intègre des dimensions de plus en plus variées, ce qui la rend plus à même de rendre compte des possibilités de déplacement *effectivement* offertes à chaque usager. Ces développements requièrent cependant des données vastes et parfois très spécifiques (sur le programme d'activités des usagers par exemple).

Conclusion de la partie I

L'accessibilité désigne pour nous **un ensemble de conditions favorables aux déplacements, et qui s'offrent aux individus dans une situation donnée**. Après avoir défini ce concept et présenté ses différents enjeux, nous avons constaté que l'évaluation de l'accessibilité pouvait être plus ou moins « raffinée », passant d'une évaluation de la distance ou du temps nécessaires pour atteindre sa destination (approches classiques), à une prise en compte du poids des destinations (approche gravitaire), ou encore du programme d'activités des usagers (*Time geography*).

Notre objectif est d'explorer le thème de la **circulation en ville tel qu'il est abordé par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaires**. Or, le réseau viaire fait partie de la **composante « transports »** de l'accessibilité, puisqu'il est une partie du système de transport d'une ville. Nous choisissons donc de nous limiter à une évaluation de la composante « transports » de l'accessibilité⁶⁵.

II. Un croisement de regard sur la circulation

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps la circulation telle qu'elle est traitée par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux. Ces théoriciens et praticiens abordent peu le concept d'accessibilité en tant que tel, toutefois, nous verrons qu'ils traitent d'un ensemble de conditions de circulation qu'ils souhaitent offrir aux usagers. Nous proposons ensuite une relecture de ces diverses conditions de circulation, vues par les études de la mobilité urbaine. Cette relecture nous permettra de traduire les conditions de circulation décrites en urbanisme, en conditions d'accessibilité précisément définis.

Ainsi, l'objectif de cette partie est de mettre en lien les **conditions de circulation**, qui sont un ensemble de qualités que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme veulent faire émerger lors de la conception des réseaux viaires, et les **conditions d'accessibilité**, concept issu des études de la mobilité urbaine, et que nous définissons comme un ensemble de conditions, ou de potentialités, favorables aux déplacements, qui s'offrent aux individus dans une situation donnée.

⁶⁵ Il serait intéressant dans de futurs travaux d'aborder la composante « spatiale » de l'accessibilité, et la manière dont elle est traitée en urbanisme.

II.1. Des conditions de circulation décrites en urbanisme

Nous présentons dans le tableau 2.1 ci-dessous quelques unes des conditions de circulation que des théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont voulu attribuer aux réseaux viaries. Il est une version synthétisée du tableau 1.1 du chapitre 1 : nous avons conservé uniquement les lignes correspondant à des théoriciens et praticiens de l'urbanisme qui se sont clairement prononcés sur les conditions de circulation qu'ils recherchent. Les auteurs sont classés par ordre chronologique.

Auteur	Conditions de circulation recherchées
V. A. Palladio	Commodité, soulagement du marcheur, plaisir et satisfaction
M. A. Laugier	Eviter l'égaré
P. Patte	Tous les abords doivent être faciles, libre circulation
J-N-L Durand	Communications courtes et commodes
L. Reynaud	Desservir la circulation dans toutes les directions, ne pas rallonger les distances, éviter l'égaré
G. E. Haussmann	Améliorer la communication entre certains points de la ville
I. Cerdà	Circulation généralisée, accessibilité rapide, répartition uniforme des déplacements, perméabilité, communicativité
Le Corbusier	Permettre la vitesse, éviter l'encombrement, fluidité maximale, débit continu
F. L. Wright	Accessibilité généralisée, pas de mouvement centripète
Stein, Wright, Sewell Cautley	Sécurité
J. Jacobs	Perméabilité, déplacements à distance de marche

Tableau 2.1 : Conditions de circulation recherchées par des théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaries (d'après le tableau 1.1 du chapitre 1).

On constate que certaines des conditions de circulation mentionnées dans le tableau sont similaires, elles peuvent de fait être regroupées en catégories, comme nous le verrons dans la section II.3. On constate également que certaines de ces conditions de circulation sont difficiles à définir de manière précise. Que signifie précisément améliorer la communication entre certains points du réseau ? permettre une accessibilité généralisée ? une perméabilité du réseau ? des abords faciles ? La signification de ces conditions de circulation, et de plusieurs autres, est sujette à interprétation. C'est la raison pour laquelle **nous proposons de traduire ces conditions de circulation en conditions d'accessibilité précisément définies.**

II.2. Les conditions d'accessibilité, apport des études de la mobilité urbaine

Les études de la mobilité urbaine nous permettent de proposer des conditions d'accessibilité correspondant à chacune des conditions de circulation recherchée en urbanisme. **Certaines de ces conditions sont prises en compte dans les méthodes classiques d'évaluation de l'accessibilité (cf section I.3.1.), d'autres sont moins courantes.**

Pour identifier ces conditions d'accessibilité, nous nous appuyons sur des travaux de chercheurs en sciences humaines et sociales tels que Victor ; Mateo-Babiano et Ieda ; Foltête, Genre-Grandpierre, et Josselin. Nous nous appuyons également sur les travaux de chercheurs spécialistes de la socio-économie des transports, tels que Dupuy ; Merlin ; Barbier ; Ewing.

II.2.1. Des conditions qui reflètent les besoins des usagers mobiles

Dans les études de la mobilité urbaine, les conditions d'accessibilité sont souvent présentées comme des **besoins** que les usagers cherchent à satisfaire lors de la planification et de l'exécution d'un trajet sur le réseau viaire. Cela est particulièrement vrai pour le cas des usagers piétons, dont les besoins ont reçu une attention particulière ces dernières années (Mateo-Babiano et Ieda (2005) ; Piombini (2006) ; Victor (2016)). Selon Najda Victor (2016), les besoins des piétons peuvent soit conditionner l'exécution du trajet, soit influencer des aspects de celui-ci, tels que le choix d'itinéraire. L'objectif du déplacement, l'heure de la journée ou encore les conditions météorologiques peuvent fortement influencer les besoins de l'utilisateur. Par exemple, « une personne cherchant à rejoindre son travail ou un arrêt de bus accordera moins d'importance à ce qui l'entoure qu'une personne, avec un budget- temps plus souple, effectuant une marche récréative » (Victor, 2016, p. 83).

Certains besoins des usagers apparaissent comme plus importants que d'autres. Par exemple, selon Victor (2016), le fait que le trajet soit perçu par un piéton comme réalisable dans un temps donné conditionne son exécution, alors que d'autres besoins apparaissent quant à eux « variables en fonction du contexte de déplacement mais aussi d'une sensibilité propre à chaque usager piéton ». Par ailleurs, l'importance des besoins dépend du mode de déplacement : certains besoins apparaissent comme très importants pour les usagers à pied tandis que d'autres le sont davantage pour les usagers en véhicule. Dans les sections suivantes, **nous rendrons compte de la distinction piéton/usager en véhicule chaque fois qu'elle nous semblera pertinente.**

Signalons enfin que ces besoins des usagers ne sont pas propres à une période donnée. Plusieurs d'entre eux ont constitué un enjeu important à différents moments de l'Histoire. Nous montrons cela dans les sections suivantes à travers quelques exemples historiques. Ces exemples n'ont pas vocation à être exhaustifs, ils visent à illustrer la « chronicité » des conditions d'accessibilité évoquées.

II.3. Passage des conditions de circulation aux conditions d'accessibilité

Nous reprenons dans cette partie les conditions de circulation recherchées en urbanisme (tirées du tableau 2.1) regroupées en catégories, ainsi que les conditions d'accessibilité qui leur correspondent dans les études de la mobilité urbaine. Rappelons que nos propos concernent uniquement le type de déplacement qui nous intéresse, à savoir les **déplacements à pied ou en véhicule individuel, s'effectuant sur le réseau viaire d'une ville**. Toutefois, la littérature mobilisée concerne parfois d'autres modes de déplacement. Nous conservons uniquement les éléments qui correspondent au type de déplacement qui nous intéresse.

II.3.1. Permettre la commodité du déplacement, le soulagement de l'utilisateur, son plaisir, sa satisfaction

« [La commodité de la ligne droite] et l'assurance que donne une longue découverte du pays soulagent fort ceux qui marchent, et leur esprit trouve du plaisir et de la satisfaction dans la nouveauté continuelle des divers objets qui se présentent » (Palladio (1570) cité dans Alonzo (2018) p. 54).

L'architecte italien Andrea Palladio (vers 1570⁶⁶) fait ici référence à de nombreuses conditions de circulation : la commodité, le soulagement de l'utilisateur, son plaisir et sa satisfaction. La commodité est également une condition de circulation recherchée par l'architecte J-N-L Durand (vers 1794), qui prône des communications commodes. Toutefois, ces auteurs ne vont pas plus loin dans la définition de ce qu'est la commodité, le soulagement, le plaisir ou la satisfaction. Nous verrons ci-dessous que les études de la mobilité urbaine permettent de **proposer un concept qui résume ces conditions de circulation**.

⁶⁶ Les dates précédées de « vers » servent à donner une indication du contexte temporel auquel appartient le théoricien ou praticien de l'urbanisme mentionné.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

Les conditions de circulation évoquées par Palladio peuvent être regroupées sous le concept du **confort de l'utilisateur**. Ce concept est largement évoqué dans les études de la mobilité urbaine **comme étant un besoin des usagers**. Dans ces travaux, on sépare généralement le confort ressenti par les usagers à pied de celui ressenti par les usagers en véhicule. Pour ce qui est des piétons, plusieurs auteurs ont identifié le niveau de confort comme étant un critère important pour agir sur l'usage de la marche (Ewing & Handy, 2009; Özbil et al., 2015). Selon Victor (2016), le confort influence le choix d'itinéraire des piétons, et peut provoquer un report modal. Elle ajoute que le confort du piéton est associé à une certaine quête du plaisir qui pour elle est procuré par l'expérience sensorielle de la rue. Pour Mateo-Babiano et Ieda (2005), le plaisir de l'utilisateur piéton (*enjoyment*) est lié à plusieurs sous-besoins tels que le besoin de socialisation⁶⁷, de vibrance⁶⁸, ou encore d'appartenance⁶⁹. Ce dernier point est également évoqué par Victor (2016), pour qui l'environnement urbain doit présenter un intérêt visuel mais également susciter un sentiment d'appartenance.

Ces exemples illustrent que la notion de confort peut recouvrir des aspects très variés, différents d'un auteur à un autre. Cela peut s'expliquer par le caractère très subjectif de cette notion de confort. En effet, le confort ressenti varie énormément d'un usager à un autre, notamment en fonction de sa condition physique, et de sa familiarité avec l'environnement et avec les autres usagers (Victor 2016).

Pour ce qui est des déplacements en véhicule, les éléments de confort et d'inconfort sont nombreux. Merlin & Choay (1996) identifient parmi les éléments de confort : la disponibilité (comparé aux transports collectifs) qui supprime ou réduit l'attente, les correspondances et les trajets terminaux ; et le confort esthétique : agrément du véhicule ou du paysage parcouru. Parmi les inconforts figurent : la recherche d'un emplacement de stationnement (temps perdu et incertitude) ; les trajets terminaux à pied qui peuvent être perçus comme inconfortables (si le lieu de stationnement est éloigné du lieu de destination) ; l'irrégularité dans la durée du trajet (ralentissement suite à un événement imprévu type accident de la circulation).

Les études de la mobilité urbaine, et plus précisément la socio-économie des transports, proposent une **mesure quantitative** de la notion de confort. Cette mesure a été introduite dans les années 1960, afin de prendre en compte les éléments de confort et d'inconfort que présentent les différents moyens de déplacement (marche, automobile, transport collectif, ...). Pour ce faire, Michel

⁶⁷ Besoin d'avoir des relations sociales.

⁶⁸ Le dynamisme du lieu.

⁶⁹ Qui désigne ici un lien fort entre un individu et un lieu, provoqué par exemple par un contact régulier avec ce lieu.

Barbier⁷⁰ et Pierre Merlin⁷¹ développent à Paris entre 1963 et 1964 le **coefficient de pénibilité**. Celui-ci s'est par la suite généralisé aux États-Unis et en Grande-Bretagne. Le coefficient de pénibilité est un « coefficient multiplicateur à appliquer à la durée d'une séquence d'un déplacement (marche à pied, attente, correspondance, etc.) pour tenir compte de la pénibilité de cette séquence » (Merlin & Choay, 1996). Ce coefficient est évalué par analyse du comportement effectif des usagers lorsqu'ils ont le choix entre plusieurs moyens de transport. Plus l'inconfort est important, plus la valeur du coefficient est élevée. À titre d'exemple, le coefficient de pénibilité vaut 1 pour un trajet dans un métro ou un bus dans des conditions normales de charge. Il est de 1,2 à 1,4 pour un véhicule en surcharge. Ce coefficient se rapproche de 2 pour les trajets terminaux à pied (Merlin & Choay, 1996). Le coefficient de pénibilité représente un exemple de mesure d'un concept *a priori* subjectif, le confort.

Ainsi, les différentes conditions de circulation mentionnées par Palladio peuvent être regroupées sous un concept unique, le confort offert à l'usager. Selon les études de la mobilité urbaine, le confort lors des déplacements correspond à un besoin des piétons et des usagers en véhicule.

II.3.2. Faciliter l'orientation, éviter l'égaré

L'abbé Laugier (vers 1753) et l'architecte Léonce Reynaud (vers 1836) préconisent tous deux d'éviter les sources d'égaré lors des déplacements des usagers, et de produire des repères pour les aider dans ces déplacements.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

« Penser la ville, ce n'est pas s'en tenir à l'appropriation ou au sentiment d'appartenance d'une population à son quartier, mais étudier les dispositifs urbanistiques, les équipements et les services qui permettent au citoyen de surmonter l'étrangerité à un territoire non familier, de s'orienter dans un « univers d'étrangers » » (Lofland (1973), cité dans Joseph (2004), p. 131).

La nécessité d'éviter l'égaré des usagers, c'est-à-dire de leur permettre une facilité d'orientation lors de leurs déplacements, a été soulignée par quelques études de la mobilité urbaine. Victor (2016) évoque le besoin de la part des usagers, piétons en particulier, d'avoir des déplacements **simples**, de minimiser les parcours

⁷⁰ Ingénieur civil des Ponts et Chaussées.

⁷¹ Polytechnicien, du Corps des Ingénieurs Géographes.

complexes. Cette idée est reprise par Cooper (2015). Selon lui, les individus ont besoin de simplifier le modèle qu'ils ont de leur environnement, et leur cheminement à travers celui-ci. Ils recherchent donc les **chemins les plus simples, ceux comprenant le moins de changements de direction** lors de leurs déplacements. Cooper ajoute que la simplicité des déplacements réduit la pression cognitive qui pèse sur un usager non familier du réseau.

Ainsi, **la facilité d'orientation, la nécessité d'éviter les sources d'égarement, peuvent être regroupées sous le concept de simplicité des déplacements.** Toutefois, ce concept suggère que la facilité d'orientation est uniquement liée à une minimisation des parcours complexes. Or, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (en l'occurrence Laugier et Reynaud) évoquent également l'importance d'avoir des points de repère.

II.3.3. Permettre une circulation généralisée et uniforme

Plusieurs théoriciens et praticiens de l'urbanisme insistent sur l'importance d'**offrir des connexions entre tous les lieux de la ville.** Pierre Patte (vers 1769) préconise que tous les abords de la ville soient faciles d'accès, qu'il y ait suffisamment de débouchés d'un quartier à l'autre pour le transport des marchandises et la libre circulation des voitures. Léonce Reynaud (vers 1836) de son côté préconise que la circulation soit bien desservie dans toutes les directions. Ildefonso Cerda (vers 1859) pour sa part prône une circulation généralisée, des déplacements répartis uniformément, une perméabilité et une communicativité du réseau viaire. Enfin, pour Frank Lloyd Wright (vers 1934), le réseau de circulation doit assurer une bonne accessibilité de tous les habitants à l'ensemble des services et aménités urbaines. Il s'oppose par là même au mouvement centripète.

D'autres théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont une vision différente. Plutôt que de prôner un espace correctement desservi dans toutes les directions, ils se concentrent sur l'amélioration de la liaison entre des points singuliers de la ville. C'est le cas du baron Haussmann, qui dans son projet pour Paris au XIXe siècle, a conçu des percées visant à relier les gares et les monuments entre eux.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

Selon Haumont (1993), dans la ville traditionnelle européenne, les débouchés d'un quartier vers les autres étaient peu développés, « l'impression dominante est celle d'une division des villes en petites aires d'emploi, du moins jusqu'au moment où les réseaux de transports en commun vont désenclaver les déplacements intra-urbains » (p. 113). Haumont ajoute, citant Pierre Patte (1765), qu'à Paris au XVIIIe

siècle, des quartiers entiers n'ont presque pas de communications les uns avec les autres.

La circulation généralisée, répartie uniformément dans toutes les directions, correspond dans les études de la mobilité urbaine au concept d'**isotropie**. Dans un espace isotrope, par exemple un réseau isotrope, il n'existe pas de directions privilégiées, chaque nœud est également connecté à chacun des autres nœuds, un espace isotrope n'a ni centre, ni périphérie (Viganò et al., 2016). Pour les géographes Bretagnolle et Robic (2005), l'isotropie est liée à une utopie sur la disparition des lieux. Cette utopie revient de manière récurrente à travers les siècles, chaque fois que les développements techniques amenuisent les obstacles de la distance (nous y reviendrons en section II.3.4). Dupuy (1985) souligne que l'isotropie était recherchée dans les premiers travaux de socio-économie des transports. Il ajoute néanmoins que celle-ci ne pouvait être totalement obtenue, car le phénomène même de « centre », lieu le plus accessible pour le plus grand nombre, s'y oppose. Le glossaire de géographie publié par Géoconfluences indique même que « les mobilités contemporaines contribuent à produire de **l'anisotropie** : elles reposent sur les différenciations entre espaces attractifs ou, au contraire, répulsifs ; elles empruntent des axes privilégiés ; elles ont diverses formes de **concentration** »⁷². Ainsi, même si l'isotropie est présentée par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme comme une condition de circulation recherchée, la réalité des mobilités obéit davantage au concept d'anisotropie et de concentration.

Nous concluons que les conditions de circulation mentionnées ci-dessus sont abordées dans les études de la mobilité urbaine par l'intermédiaire du concept d'isotropie. Les travaux mentionnés indiquent que ce concept correspond davantage à une utopie recherchée par les pouvoirs publics, qu'à une réalité empirique.

II.3.4. Permettre des communications courtes

J.-N.-L. Durand préconise dès 1794 que les communications entre les lieux de la ville soient les plus courtes possibles. De son côté, L. Reynaud évoque vers 1836 l'importance de ne pas rallonger les distances pour l'usager. Enfin, Jane Jacobs dans les années 1960, puis les tenants du Nouvel Urbanisme dans les années 1980, évoquent tous deux l'importance de permettre des déplacements à distance de marche.

⁷² Entrée « Isotropie/anisotropie » dans le glossaire du site Géoconfluences.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

Les conditions de circulation susmentionnées correspondent au concept de **proximité**, autrement dit de minimisation des distances à parcourir. Ce concept est évoqué par Ingram (1971), pour qui l'accessibilité renvoie à la proximité des activités. La proximité est un concept largement évoqué dans les études de la mobilité urbaine. Elle revêt une importance particulière pour les piétons. Comme le soulignent Mateo-Babiano et Ieda (2005), les usagers piétons ont besoin de pouvoir accéder à des destinations à distance de marche (*walking distance*). Victor (2016) explique que, pour les chercheurs, cette minimisation des distances apparaît comme le critère le plus intuitif lorsqu'il s'agit de déplacements piétons. Ces chercheurs considèrent que « les usagers piétons font preuve d'une rationalité physique les conduisant à minimiser la distance à parcourir (ou l'énergie à dépenser) en raison de la perméabilité de la relation usagers-environnement » (Victor, 2016, p. 86).

La distance moyenne que les citoyens acceptent de parcourir à pied diffère selon les villes. Selon Merlin et Choay (1996), elle est de 500 m dans une ville moyenne (villes de provinces en France, villes américaines), de 1 km dans une métropole (Paris, New York), mais peut souvent atteindre 2 à 3 km dans les villes des pays en développement, à cause des insuffisances des réseaux de transport en commun, et du coût de ce transport⁷³. Par ailleurs, selon Reid Ewing (1996), cette distance marchée peut varier en fonction du motif du déplacement (achat, travail, loisirs, ...).

La proximité revêt un intérêt différent pour ce qui est des déplacements en véhicules. Selon Bretagnolle et Robic (2005), les innovations dans les réseaux de communication s'accompagnent toutes de métaphores sur la disparition de la distance. Pour Gharbi (2016) « le passage d'un mode de circulation à un autre contribue à une certaine réinvention de l'ordre des relations entre le proche et le lointain ». Ce phénomène a été décrit pour plusieurs moyens de transport, et notamment pour l'automobile à partir de la seconde moitié du XXe siècle. En 1980, l'historien Georges Duby dans la préface de son *Histoire de la France urbaine*, décrivait la situation suivante :

« Depuis trente ans, les innovations techniques viennent à bout des monopoles culturels que détenaient les villes, amenuisent les obstacles de la distance (...) autorisent les agglomérations à se décontracter, à se répandre dans la ruralité qui les environne, (...) les résidences secondaires, les supermarchés, les campus universitaires (...) s'établissent au milieu des champs » (Duby, 1980 cité dans Haumont (1993), p. 112).

⁷³ Ces distances moyennes marchées ont été données par Merlin et Choay en 1996, elles peuvent avoir évolué depuis. Nous les donnons à titre indicatif.

De l'avis de plusieurs auteurs, l'essor de l'automobile au XXe siècle a rendu le frein de la distance, donc le besoin de proximité, beaucoup moins prégnant. Foltête, Genre-Grandpierre, et Josselin (2008) affirment que l'automobile incite à ne pas agencer ses lieux d'activités selon des critères de proximité physique. En 2007, Saint-Julien et Le Goix, dressent le constat suivant concernant les espaces métropolitains :

« Les proximités métropolitaines se redéfinissent dans un espace de plus en plus vaste (...) Les réseaux de tous ordres libèrent les mouvements, chacun peut d'autant mieux individualiser son espace que le territoire métropolitain est plus maillé par les réseaux. Les évaluations des proximités, de plus en plus sensibles à la variété des représentations qu'on s'en fait, peuvent s'éloigner des distances effectivement pratiquées » (Saint-Julien & Le Goix, 2007, p. 6).

Lévy et Lussault (2003)⁷⁴ en concluent qu'on assiste à une redéfinition du concept d'espace. Celui-ci redouble d'importance, mais il n'est plus considéré comme une étendue à parcourir, il devient un **espace relatif, relationnel**. Cette redéfinition a des répercussions sur le concept de proximité : la proximité via le réseau (réseau viaire dans notre cas) devient plus importante que la proximité à vol d'oiseau.

Ainsi, les études de la mobilité urbaine nous permettent de constater que la notion de proximité a connu plusieurs redéfinitions à travers l'Histoire, à mesure que les modes de déplacement ont évolué. La proximité via le réseau viaire apparaît désormais comme une condition d'accessibilité plus pertinente que la proximité à vol d'oiseau. Pourtant, comme le soulignent Chiaradia et ses collègues (2014), la distance à vol d'oiseau continue d'être utilisée comme variable d'évaluation de l'accessibilité dans la plupart des modèles de planification des transports (cf section I.3.2).

II.3.5. Garantir une perméabilité et une communicativité du réseau viaire

Selon l'urbaniste Ildefonso Cerda, le réseau viaire d'une ville doit être perméable et communicatif. Dans le chapitre 1, nous avons défini ces deux concepts comme étant la **possibilité de se déplacer sans obstacles dans le réseau viaire, de manière directe et continue**. Jane Jacobs fait également référence à cette condition de circulation, puisqu'elle préconise que le réseau viaire soit perméable.

⁷⁴ Entrée « mobilité » dans le dictionnaire de Lévy et Lussault.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

La perméabilité et la communicativité sont peu décrites en ces termes dans les études de la mobilité urbaine. En revanche, l'absence d'obstacles aux déplacements, c'est-à-dire la continuité des itinéraires, est souvent présentée comme une condition d'accessibilité importante. Elle l'est aussi bien pour l'usage de la marche que pour la conduite d'un véhicule. Grammenos, Pogharian, et Tasker-Brown (2001) soutiennent que pour être agréable, la conduite d'un véhicule nécessite une circulation sans obstacles⁷⁵. De son côté, Victor (2016) explique que les piétons accordent une grande importance à la continuité de leurs itinéraires. Ils montrent une forte aversion à effectuer des détours. L'absence de barrières à la marche, qu'elles soient physiques (comme une voie à grande vitesse) ou perçues (comme une pente très importante) influe sur la capacité d'une personne à être en mesure d'accéder à sa destination. Victor ajoute que ce critère est essentiel car il détermine en partie si le déplacement pédestre est réalisable ou pas. De fait, il conditionne son exécution : si le déplacement n'est pas réalisable, une solution de report modal peut alors être envisagée au sein de la chaîne de déplacement. Mateo-Babiano et Ieda (2005) évoquent eux aussi la continuité des itinéraires comme un des facteurs permettant de faciliter les déplacements piétons.

Nous proposons le concept de continuité des déplacements comme condition d'accessibilité capable de rendre compte de la perméabilité du plan d'une ville (décrite par Cerdà et Jacobs). Les études de la mobilité urbaine indiquent que cette continuité correspond à un besoin des usagers piétons et en véhicule.

II.3.6. Permettre une accessibilité rapide, une fluidité maximale

Ildefons Cerdà est de ceux qui préconisent dès 1859 une accessibilité rapide. De son côté, Le Corbusier (vers 1925) parle de garantir le fonctionnement optimal de la « machine circulatoire », d'assurer une fluidité maximale et un débit continu. Pour lui, rien ne doit briser la vitesse des automobiles, ni encombrer leur déplacement. Toutefois, certaines tendances en urbanisme vont à l'encontre de cette course à la vitesse. Par exemple les *Planned Unit Development* des années 1960 ont été conçus de manière à réduire la vitesse automobile, grâce aux nombreux culs-de-sac qu'ils contiennent (Rohe, 2009).

⁷⁵ « *To be enjoyable, driving requires unimpeded flow* » (Grammenos et al., 2001).

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

Nous identifions dans les études de la mobilité urbaine deux conditions d'accessibilité correspondant aux conditions de circulation susmentionnées : le concept de fluidité des déplacements d'une part, et le concept de rapidité des déplacements d'autre part.

La fluidité des déplacements

Selon le Centre national de ressources textuelles et lexicales, la fluidité désigne l'écoulement régulier de la circulation⁷⁶. La fluidité des déplacements est une condition d'accessibilité préférentiellement abordée dans la littérature sur la mobilité pour le cas des véhicules. Pourtant, elle est également importante pour l'accessibilité piétonne. En effet, selon Mateo-Babiano et Ieda (2005), le manque de fluidité engendre de la *désutilité* pour les déplacements piétons – le concept de désutilité est ici à comprendre comme le contraire de l'accessibilité.

La fluidité des déplacements est liée à l'absence d'encombrements sur le réseau viaire. Selon Lévy et Lussault (2003), des voies encombrées sont une restriction à l'accessibilité. La réduction du niveau d'encombrement a constitué un enjeu majeur dans l'histoire des villes. Dès le XVIIIe siècle apparaît la volonté de garantir une circulation ininterrompue des personnes et des marchandises, et de dissiper la congestion des flux (Alonzo, 2018). Pourtant, l'encombrement du réseau viaire a continué d'être un problème dans les villes européennes, atteignant son paroxysme dans la première moitié du XIXe siècle. En effet, comme le souligne Sabine Barles (2000) pour le cas de Paris au début du XIXe siècle, l'industrialisation n'a pas supprimé l'encombrement chronique de la ville, et l'a au contraire amplifié et démultiplié. La diffusion des trottoirs, les premières règles de dimensionnement des chaussées⁷⁷, et la multiplication des réseaux (eau, égout, gaz) à cette époque ont certes permis une relative libération de la rue de ses différents « embarras » (Barles, 2000). En revanche, il n'y avait pas à l'époque de volonté de réduire le trafic. Il s'agissait plutôt de « faciliter la circulation et l'accueil de nouveaux déplacements », deux choses très différentes. En effet, à cette époque, « l'augmentation du trafic n'est pas jugulée et sa limitation n'apparaît pas comme une nécessité puisqu'elle est considérée comme un bienfait, dans la mesure où elle témoigne de la vitalité économique d'une ville en pleine révolution industrielle. Plus généralement le mouvement est, depuis le XVIIIe siècle, le remède à la stagnation délétère de l'espace urbain préindustriel » (Barles, 2000, p. 7-8).

⁷⁶ Entrée « fluidité » sur le site du CNRTL.

⁷⁷ Le terme « chaussée » renvoie pour nous à la partie des voies réservée au déplacement des véhicules.

Au XXe siècle, avec la propagation de l'automobile, la volonté d'avoir plus de fluidité dans les déplacements s'accroît. La hantise de la congestion et de l'enclavement devient prépondérante. Les villes étasuniennes sont encombrées dès les années 1914-1915 (McShane & Mocquot, 1984). Les professionnels de la socio-économie des transports sont alors chargés de régler les problèmes d'encombrement. Après une première phase d'extension des réseaux viaires, ils vont proposer l'optimisation de l'utilisation de ces réseaux, grâce à des techniques de régulation du trafic. Nous renvoyons le lecteur intéressé par ces techniques à la thèse de Commenges (2013).

Ainsi, la fluidité des déplacements, et son corolaire l'absence d'encombrement, sont des conditions d'accessibilité décrites au moins depuis le XVIIIe siècle. Les études de la mobilité urbaine nous montrent que la volonté de libérer les voies de circulation, d'éviter la stagnation, revient de manière récurrente à travers l'Histoire, que ce soit pour des raisons hygiénistes, ou pour des raisons d'efficacité dans les déplacements.

La rapidité des déplacements

Selon le Centre national de ressources textuelles et lexicales, la rapidité est le caractère d'un mouvement, d'un déplacement qui est exécuté très vite, elle est donc synonyme de la vitesse⁷⁸. La rapidité des déplacements est une condition d'accessibilité importante à la fois pour les piétons et les véhicules. En effet, selon Mateo-Babiano et Ieda (2005), pour les piétons, pouvoir se déplacer à une vitesse rapide est un facteur d'efficacité des déplacements. Pourtant, Foltête, Genre-Grandpierre, et Josselin (2008) soutiennent que la vitesse de déplacement à pied est relativement constante quel que soit le type de voies empruntées. Les piétons se déplacent généralement selon leurs vitesses de confort intrinsèques afin de minimiser leur consommation énergétique (Victor, 2016).

Pour ce qui est des déplacements en véhicule, la vitesse de déplacement peut varier dans de larges proportions. Les innovations dans les moyens de transport (l'automobile notamment) ont souvent permis de repousser toujours plus loin les frontières de la vitesse. Pourtant, selon l'historien Christophe Studeny (1995), l'aspiration à la vitesse a précédé les révolutions techniques et l'irruption de l'automobile. Pour lui, cette aspiration est née en Angleterre au XVIIIe siècle. Malgré cette aspiration ancienne, la vitesse restera longtemps considérée comme dangereuse, en particulier dans l'espace urbain. Selon Barles (2000), au début du XIXe siècle, c'est en particulier le danger que représente le cheval qui est stigmatisé : « le rêve de vitesse ne peut être concrétisé quand la circulation est assurée par un animal facilement effrayé ». Barles ajoute que :

⁷⁸ Entrée « rapidité » sur le site du CNRTL.

« Longtemps la ville résistera à la vitesse. Cependant celle-ci apparaît déjà, quoique timidement et sans faire l'unanimité, comme un facteur de fluidité et de rentabilité, avantages qui seront plus tard, au XXe siècle, considérés comme supérieurs à ses dangers » (p. 9).

Selon Lévy et Lussault (2003)⁷⁹, à partir de 1850, la vitesse commence à jouer un rôle important dans l'augmentation du nombre de déplacements. Ils soutiennent que « le nombre d'objets matériels et, surtout, immatériels en mouvement croit de façon exponentielle depuis 1850, c'est-à-dire depuis que les sociétés industrielles ont pu **modifier radicalement les conditions de vitesse des déplacements** ». Selon eux, les premiers bateaux à vapeur ont constitué un indice initial de cette mutation de la vitesse qui s'est poursuivie jusqu'à la promotion de l'instantanéité du déplacement pour les objets immatériels (notamment grâce au téléphone).

Le sujet de la vitesse revient sur le devant de la scène avec l'essor de l'automobile au début du XXe siècle. En France, les professionnels de la socio-économie des transports au milieu du XXe siècle voulaient tirer profit des **avantages, en termes de vitesse, que permettait l'automobile**, tout en évitant l'engorgement (Dupuy, 1985). Leur objectif était « d'assurer à l'intérieur et vers l'extérieur du système urbain des déplacements plus rapides que les déplacements à pied, en 2 roues, en transport en commun, au moins pour des distances supérieures à 500 m (...) on cherche à fluidiser la circulation, à **diminuer le temps passé par les automobilistes** » (Dupuy, 1985). Dupuy s'interroge néanmoins sur le bien-fondé d'une telle importance donnée à la vitesse automobile : « le système urbain nécessitait-il des flux à cette vitesse pour son fonctionnement, sa permanence, sa cohérence, son organisation ? La réponse aurait été plus nuancée selon les relations envisagées ».

Pour Lévy et Lussault (2003)⁸⁰, la course à la vitesse de déplacements n'est pas terminée. Les exigences de rapidité imposent des logistiques de plus en plus lourdes et coûteuses et des compétences actuelles sophistiquées. De fait, « les coûts économiques généraux de la mobilité ont tendance à s'alourdir, de même que les coûts temporels et sociaux, du simple fait que la mobilité des individus et des choses augmente » (Lévy & Lussault, 2003)⁸¹. Selon eux, la course à la rapidité et la promotion du temps réel sont à la fois des faits, des objectifs ultimes, et des **valeurs sociales et même culturelles**. Néanmoins, et contrairement à certaines idées reçues, **cette course à la rapidité et cette promotion du temps réel ne paraissent pas aliéner la dimension spatiale**. Au contraire, il en résulte des organisations de l'espace et des spatialités inédites. Pour Lévy et Lussault, « plus la

⁷⁹ Entrée « mobilité ».

⁸⁰ *Ibid.*

⁸¹ *Ibid.*

vitesse devient un enjeu, plus l'espace prend de l'importance », sous réserve que l'espace ne soit pas considéré comme une étendue à parcourir, mais plutôt comme un espace relatif, relationnel. Ce point avait été évoqué en section II.3.4.

Les études de la mobilité urbaine décrivent également des tendances qui vont à l'encontre de cette course à la rapidité. Reid Ewing (1996) explique par exemple qu'en Europe à partir du milieu du XXe siècle, la vitesse du trafic de transit a été réduite dans les villes afin de le rendre plus acceptable. Cette tendance est encore fortement présente dans les politiques d'aménagement actuelles, en particulier en centre urbain. Sylvanie Godillon (2016) défend cette tendance en disant que « le déplacement n'est pas uniquement efficace et rapide, mais peut également être un temps agréable au cours duquel l'utilisateur a la possibilité de flâner et de **prendre son temps** ». Néanmoins, Godillon n'entend pas condamner la vitesse, elle explique plutôt que les espaces de circulation sont animés par des usages s'inscrivant dans des **temporalités différentes**. Les possibilités de « lenteur » sont donc tout aussi importantes que les possibilités de vitesse.

Nous concluons que, comme la fluidité des déplacements, leur rapidité a constitué une condition d'accessibilité majeure au moins depuis le XVIIIe siècle. Elle est désormais considérée comme une valeur sociale et culturelle (Lévy & Lussault, 2003⁸²). Toutefois, nous avons pointé du doigt plusieurs « résistances » à la rapidité, notamment à travers des tendances actuelles, qui proposent qu'aux côtés des possibilités de vitesse soient envisagées des possibilités de lenteur.

II.3.7. Garantir la sécurité des usagers

Plusieurs théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont évoqué la question sécuritaire comme une condition de circulation importante. Citons en particulier les concepteurs du lotissement de Radburn, Stein, Wright et Sewell Cautley (vers 1928), ainsi que les concepteurs des *Planned Unit Development* (années 1960). Les réseaux viaires hiérarchisés de ces lotissements avaient pour but de séparer les automobiles des piétons, afin de garantir la sécurité de ces derniers. En outre, les culs-de-sac des *Planned Unit Development* devaient permettre de réduire la vitesse automobile, afin d'accroître la sécurité.

Condition d'accessibilité correspondante dans les études de la mobilité urbaine

La question sécuritaire correspond en tant que telle à une condition d'accessibilité largement évoquée dans les études de la mobilité urbaine. Selon Victor (2016) cette condition est double, elle comprend d'une part la sécurité vis-à-vis de la circulation,

⁸² Entrée « mobilité ».

et d'autre part la sécurité vis-à-vis de la criminalité – qui concerne surtout les usagers piétons. Nous nous concentrons sur la sécurité vis-à-vis de la circulation car elle c'est à elle que font référence les théoriciens et praticiens de l'urbanisme susmentionnés.

La sécurité vis-à-vis de la circulation a constitué **un enjeu majeur à différents moments de l'Histoire**. Par exemple, dans la ville industrielle européenne du début du XIXe siècle, la circulation est présentée comme particulièrement dangereuse pour les piétons comme pour les usagers des véhicules. A Paris à cette époque, la multiplication du nombre de véhicules en circulation rend celle-ci très peu sûre dans divers quartiers (Barles, 2000)⁸³. On assiste à une violence accrue de la rue, à des accidents permanents. C'est alors le danger que représente le cheval qui est stigmatisé, cet animal est décrit comme « facilement effrayé, ayant l'instinct de fuite, difficilement maîtrisable s'il s'emballe ou s'il tire de lourdes charges du fait de leur inertie » (Barles, 2000, p. 8). Le galop est ainsi rigoureusement proscrit en ville, et les trottoirs, qui s'étendent considérablement dans la première moitié du XIXe siècle, deviennent l'ultime refuge du piéton.

Dans les études de la mobilité urbaine, les piétons sont souvent présentés comme les usagers les plus vulnérables, en raison de leur manque de protection à l'égard des véhicules (ils ne sont pas protégés par une carrosserie). Leur sécurité a donc reçu une attention particulière de la part des chercheurs⁸⁴. Selon Victor (2016), les usagers peuvent choisir d'éviter de pratiquer la marche dans certains espaces pour des questions de sécurité – vis-à-vis de la circulation ou de la criminalité. La sécurité est aussi un enjeu fondamental pour les conducteurs de véhicule, notamment la sécurité perçue (Grammenos et al., 2001). En Europe, et même si le nombre de victimes baisse depuis 1990⁸⁵, près de la moitié des tués sur la route en 2015 étaient des automobilistes (contre environ 1/4 pour les piétons)⁸⁶. Si les accidents mortels ont surtout lieu hors des agglomérations, le nombre d'accidents est lui généralement plus élevé à l'intérieur de celles-ci (Merlin & Choay, 1996).

Dans les études de la mobilité urbaine, la sécurité peut être évaluée par l'intermédiaire du **risque d'accident**, qui se mesure par le nombre de tués et de blessés (graves ou légers) par million de voyageurs-kilomètres (unité de mesure qui équivaut au transport d'un voyageur sur une distance d'un kilomètre) (Merlin & Choay, 1996).

En conclusion, la sécurité offerte aux usagers (à pied ou en véhicule) lors de leurs déplacements est à la fois une condition de circulation recherchée en

⁸³ L'auteure prend appui sur une Ordonnance de police du 25 septembre 1828 (préambule).

⁸⁴ Rifaat et ses collègues (2011) proposent un état de l'art de cette question.

⁸⁵ Source : Rapport d'Eurostat (2015) *Sécurité routière, Quelle est la situation dans votre pays?* (URL : ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/statistics/dacota/scoreboard_2015_en.pdf), consulté en 2019.

⁸⁶ Source: Rapport de l'OMS (2015) *Global Status Report on Road Safety*.

urbanisme, et une condition d'accessibilité des études de la mobilité urbaine. Ces études sur la mobilité proposent une évaluation de la sécurité par la mesure du risque d'accident (nombre de tués et de blessés par million de voyageurs-kilomètres).

Conclusion de la partie II

Cet état de l'art nous permet de faire correspondre à chaque condition de circulation recherchée par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme une condition d'accessibilité décrite dans les études de la mobilité urbaine. Le tableau 2.2 ci-dessous synthétise cette mise en relation.

Conditions de circulation recherchée en urbanisme	Condition d'accessibilité décrite dans les études de la mobilité urbaine
Permettre la commodité du déplacement, le soulagement de l'utilisateur, son plaisir, sa satisfaction	Confort lors des déplacements
Eviter l'égarement	Simplicité des déplacements
Permettre une circulation généralisée, que tous les abords soient faciles, que la circulation soit desservie dans toutes les directions de manière uniforme, qu'il n'y ait pas de mouvement centripète	Isotropie des déplacements
Permettre des communications courtes, à distance de marche, ne pas rallonger les distances	Proximité des déplacements
Garantir une perméabilité et une communicativité du réseau viaire	Continuité des déplacements
Permettre une accessibilité rapide, une fluidité maximale et un débit continu, ne pas briser la vitesse automobile, éviter l'encombrement	Fluidité des déplacements
	Rapidité des déplacements
Garantir la sécurité des usagers	Sécurité lors des déplacements

Tableau 2.2 : Mise en relation des conditions de circulation recherchées en urbanisme et des conditions d'accessibilité tirées des études de la mobilité urbaine.

Nous avons présenté dans cette partie II un ensemble de conditions d'accessibilité offertes aux usagers, issues des conditions de circulation recherchées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Ces conditions ne sont pas redondantes, chacune d'entre elles dépeint un aspect particulier de l'accessibilité offerte aux usagers dans une situation donnée. Il s'agit du **confort et de la sécurité offerts aux usagers lors de leurs déplacements, de la simplicité de ces déplacements, de leur isotropie, proximité, continuité, fluidité, et rapidité.**

Seules certaines de ces conditions sont prises en compte dans les méthodes classiques d'évaluation de l'accessibilité (cf section I.3.1) : la proximité, à travers la variable des distances à parcourir, la fluidité et la rapidité, à travers la variable du temps de trajet. Pourtant, selon les études de la mobilité urbaine mobilisées dans la partie II, la plupart des conditions d'accessibilité que nous avons identifiées correspondent à des besoins des usagers mobiles, à pied ou en véhicule. Cela nous incite à préconiser une **approche multicritère d'évaluation de l'accessibilité, basée sur cet ensemble de conditions.** Cette approche permettrait plus de nuance dans l'évaluation de l'accessibilité offerte aux usagers, puisque chaque condition d'accessibilité serait évaluée séparément des autres. On pourrait alors identifier des situations où les distances à parcourir sont faibles (proximité des déplacements), mais où la fluidité ou la sécurité des déplacements ne sont pas assurées.

Conclusion du chapitre

Les développements théoriques et méthodologiques des études de la mobilité urbaine ont un apport conséquent pour l'étude de la circulation en ville. Nous avons mobilisé ces travaux tout au long de ce chapitre. Notre approche consiste à considérer le thème de la circulation en ville tel qu'il est abordé par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaires. Ces théoriciens et praticiens s'intéressent davantage à **l'offre de mobilité mise à disposition des usagers**, qu'à leurs comportements de mobilité effectifs. Nous avons donc choisi d'écarter la question des comportements de mobilité, pour nous focaliser sur le concept d'**accessibilité**, défini comme **ensemble de conditions favorables aux déplacements, qui s'offrent aux individus dans une situation donnée** (partie I). Par ailleurs, nous nous sommes focalisé sur la **composante « transports »** de l'accessibilité, car c'est celle dont fait partie le réseau viaire. Il serait intéressant dans de futurs travaux d'aborder la composante « spatiale » de l'accessibilité, et la manière dont cette composante est traitée en urbanisme.

Dans la partie II, nous avons vu que la circulation était abordée en urbanisme par l'intermédiaire d'un ensemble de conditions de circulation, recherchées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Grâce aux études de la mobilité urbaine, nous avons proposé une série de conditions d'accessibilité correspondant aux

conditions de circulation recherchées en urbanisme. En effet, la mobilisation des études sur la mobilité nous a permis de traduire des conditions de circulation parfois sujettes à interprétation, en un ensemble de conditions d'accessibilité précisément définies (cf tableau 2.2). Ces conditions sont le **confort, la simplicité, l'isotropie, la proximité, la continuité, la fluidité, la rapidité et la sécurité**. Ces conditions ne sont pas redondantes, et correspondent à des besoins des usagers, à pied ou en véhicule, lors de leurs déplacements sur le réseau viaire d'une ville. Plusieurs de ces conditions ont constitué un enjeu majeur en matière de circulation, à différents moments de l'Histoire. Pour toutes ces raisons, nous proposons que ces conditions enrichissent les méthodes classiques d'évaluation de l'accessibilité.

Pour conclure, tandis que **les études de la mobilité urbaine nous permettent de porter un regard scientifique sur la circulation en ville telle qu'abordée en urbanisme, l'urbanisme quant à lui nous incite à enrichir les méthodes d'évaluation de l'accessibilité, en introduisant une grande variété de critères.**

Plusieurs leviers permettent d'agir sur les conditions d'accessibilité identifiées dans ce chapitre. Il est par exemple possible d'agir sur les caractéristiques du bâti pour améliorer le confort ressenti par l'utilisateur lors de ses déplacements, ou la simplicité de ces déplacements. Il est également possible de prévoir des aménagements sur le réseau viaire pour en améliorer la sécurité des déplacements (trottoirs, passages piétons). Dans notre cas, nous choisissons de nous focaliser sur un levier en particulier, la **morphologie du réseau viaire**, autrement dit son plan. Comme nous le verrons dans le chapitre 3, ce levier est largement mobilisé par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

Le rôle de la morphologie des réseaux viaires en matière d'accessibilité a été souligné par plusieurs auteurs. Par exemple, certaines morphologies auraient intrinsèquement tendance à concentrer les flux, ce qui les rendrait « naturellement » plus propices à la congestion (Foltête et al., 2008); d'autres morphologies engendreraient un rallongement des distances à parcourir, ce qui les rendrait défavorables à la marche (Genre-Grandpierre, 2001). Foltête et ses collègues (2008) ajoutent que les praticiens pourraient jouer des contraintes et potentialités qu'offrent les différents types de morphologie, notamment pour orienter le choix modal des usagers.

La morphologie du réseau viaire est un levier d'autant plus important qu'elle est à concevoir en amont des aménagements physiques sur le réseau. Pourtant, selon l'urbaniste américain Jeff Speck (2017), cette caractéristique est peu mobilisée dans la pratique comme levier d'action sur l'accessibilité. Selon lui, cela est dû au coût de sa mise en œuvre : la modification de la morphologie d'un réseau viaire existant est une opération bien plus coûteuse que l'aménagement de ce réseau.

Malgré ces contraintes, **la morphologie du réseau viaire est un levier que mobilisent largement les théoriciens et praticiens de l'urbanisme lorsqu'ils se**

proposent d'agir sur les conditions de circulation offertes aux usagers, c'est-à-dire sur l'accessibilité. Nous verrons dans le chapitre 3 que ces théoriciens et praticiens font des préconisations précises sur la morphologie à adopter pour améliorer telle ou telle condition d'accessibilité. Nous verrons également comment ils construisent ces préconisations.

Chapitre 3 : Relation entre la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers : quelles préconisations en urbanisme ?

Introduction

Le chapitre 1 nous a permis d'illustrer que la conception des réseaux viaires était souvent instrumentalisée par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme pour atteindre des visées variées. Ces visées peuvent être de produire une image de la ville, de faire du réseau viaire un lieu de vie, ou d'en faire un support de la circulation. Dans le chapitre 2, nous nous sommes intéressés plus en détail à la question circulatoire. Nous avons traduit les conditions de circulation recherchées en urbanisme en un ensemble de « conditions d'accessibilité »⁸⁷. Nous avons identifié huit de ces conditions : **le confort et la sécurité lors des déplacements, la simplicité des déplacements, leur continuité, leur isotropie, proximité, fluidité et rapidité**. Nous considérons que ces conditions sont représentatives des besoins variés de l'utilisateur mobile lors de ses déplacements.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux actions concrètes que préconisent les théoriciens et praticiens de l'urbanisme pour agir sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Les leviers permettant d'agir sur les conditions d'accessibilité sont de natures diverses, nous en présentons certains dans la figure 3.1 ci-dessous. Par exemple, la sécurité offerte aux usagers peut être améliorée grâce à la conception de certains aménagements sur le réseau : passages piétons, signalisation, éclairage public. Autre exemple, la proximité des déplacements peut être obtenue par un rapprochement des activités, donc par une action sur l'usage du sol urbain.

⁸⁷ Pour rappel, nous avons défini dans le chapitre 2 l'accessibilité comme un ensemble de conditions favorables aux déplacements, et qui s'offrent aux individus dans une situation donnée.

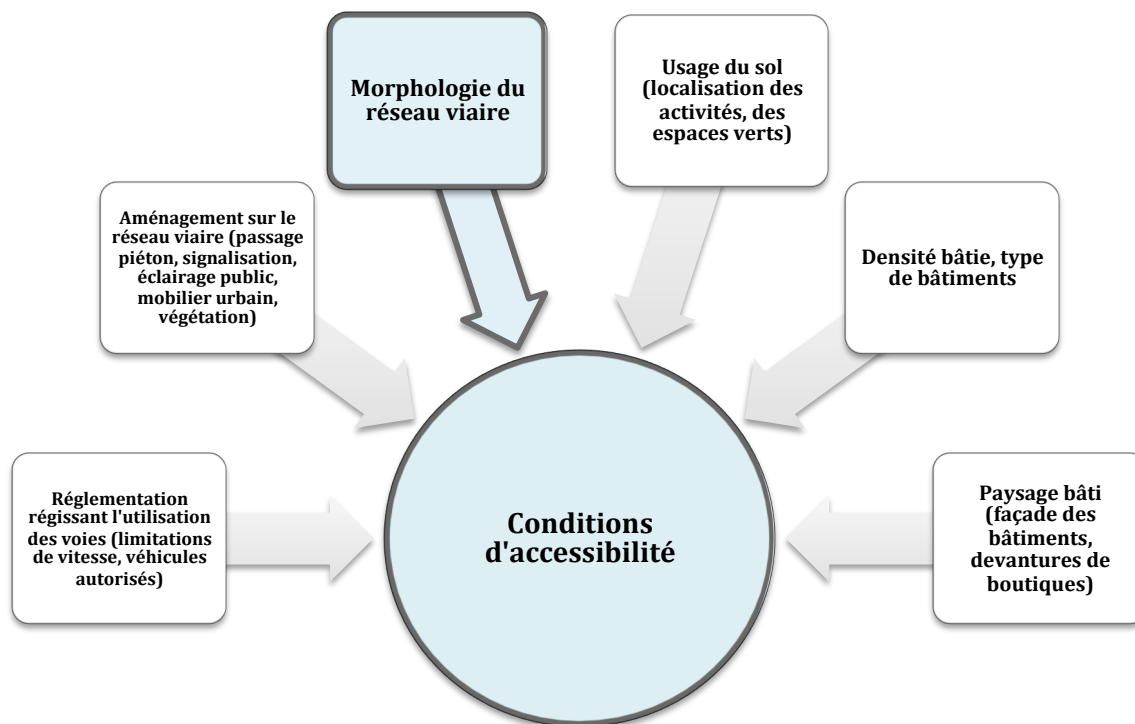


Figure 3.1 : Schéma représentant quelques exemples de leviers permettant d’agir sur les conditions d’accessibilité offertes aux usagers dans l’espace urbain. Notre intérêt porte sur le levier « morphologie du réseau viaire ».

Dans notre cas, nous nous intéressons à un levier unique : **la morphologie du réseau viaire**. Nous utilisons le terme « morphologie » comme synonyme de « forme », et lui attribuons la définition donnée par Roncayolo (2008) (en l’occurrence, à propos de la forme des villes)⁸⁸ : « la forme de la ville reste attachée à l’image de la ville dessinée, résumée tout entière dans une sorte de vision d’ensemble ». La forme (ou morphologie) du réseau viaire est une des composantes de la forme d’une ville. Elle désigne donc pour nous **l’ensemble visible sur le dessin du réseau viaire**, c’est-à-dire sur son plan.

Pour Marshall (2005), la morphologie d’un réseau viaire comprend d’une part sa composition, et d’autre part sa configuration. La composition renvoie pour lui à la géométrie réelle du réseau, qui respecte le positionnement des voies et des jonctions, les longueurs et largeurs de voies, leur orientation, leur courbure. De son côté, la configuration désigne la topologie du réseau, telle que représentée de manière abstraite par des liens et des nœuds (comme dans le plan d’un métro par exemple). Ces deux éléments mentionnés par Marshall nous mènent à préciser notre définition de la morphologie d’un réseau viaire. Il s’agit d’un **ensemble doté d’une composition et d’une configuration, visible sur le plan de ce réseau**.

⁸⁸ Pour Roncayolo, cette définition correspond à une tradition entretenue par Pierre Lavedan et Marcel Poète.

Ainsi, nous nous demandons dans ce chapitre **comment les théoriciens et praticiens de l'urbanisme proposent-ils d'agir sur la morphologie des réseaux viaires, afin d'obtenir les conditions de circulation qu'ils recherchent ?** Nous explorons cette question dans la partie I, en nous appuyant principalement sur les travaux évoqués en chapitre 1. Par la suite, nous questionnons dans la partie II le processus de construction de ces préconisations en urbanisme. Nous nous demandons ensuite comment la question de la relation entre la morphologie du réseau viaire et les conditions d'accessibilité est traitée dans la littérature scientifique des études de la mobilité urbaine. Enfin, nous présentons dans les parties III et IV notre propre proposition sur la manière d'explorer cette relation.

I. La relation entre la morphologie des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité chez les théoriciens et praticiens de l'urbanisme

La question du lien entre la morphologie d'un réseau viaire et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers intéresse en premier lieu les théoriciens et les praticiens de l'urbanisme. En effet, la morphologie urbaine en générale, et notamment celle des réseaux viaires, fait partie de leur domaine d'expertise. Ils ont en revanche peu de prise sur des leviers tels que les vitesses autorisées, et sont concurrencés par d'autres professionnels pour des leviers tels que la localisation des activités. Ainsi, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme font surtout des préconisations précises quant à la morphologie à attribuer aux réseaux viaires, de manière à offrir aux usagers des conditions d'accessibilité qu'ils jugent favorables. Nous présentons quelques-unes de ces préconisations dans cette partie, en nous appuyant sur les travaux des théoriciens et praticiens de l'urbanisme évoqués dans le chapitre 1.

En plus des auteurs mentionnés en chapitre 1, nous aurons recours à une littérature plus récente, elle aussi issue de théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Cela nous permettra de renforcer notre propos, et de montrer la chronicité de certaines préconisations faites pour améliorer les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Ainsi, nous aurons recours dans ce chapitre à une littérature non-académique, dans laquelle des théoriciens et praticiens de l'urbanisme présentent un argumentaire, souvent illustré par plusieurs figures et schémas, visant à présenter les qualités ou les défauts d'une certaine morphologie de réseau viaire. Ces auteurs utilisent pour cela divers supports : rapports⁸⁹, vidéos⁹⁰, ou encore

⁸⁹ Nous utilisons en particulier le rapport *Residential street pattern design*, rédigé en 2001 par Fanis Grammenos, Sevag Pogharian et Julie Tasker-Brown pour le *Real Estate Center* de l'Université de Pennsylvanie.

billets de blog⁹¹. Bien qu'il ne s'agisse pas de travaux scientifiques, ces rapports, billets de blogs ou autres ont souvent vocation à être réutilisés par des étudiants en architecture ou en urbanisme lors de leurs projets. Ils peuvent également avoir un but opérationnel, c'est-à-dire influencer les choix faits par les praticiens de l'urbanisme, ou les décideurs publics ou privés. C'est le cas du rapport *Residential street pattern design* rédigé par les architectes et urbanistes Grammenos, Pogharian et Tasker-Brown (2001), auquel nous aurons souvent recours. Ce rapport a été rédigé pour la Société canadienne d'hypothèques et de logements⁹², afin de présenter des préconisations pour la conception des quartiers résidentiels au Canada.

Enfin, nous aurons recours dans cette première partie à certains travaux qui commentent les préconisations faites par des architectes et urbanistes. Nous utilisons en particulier l'article de Ibrahim Gharbi (2016) *Infrastructures viaires et discontinuités urbaines : quels remèdes pour une accessibilité meilleure dans le contexte de la ville-région contemporaine ?* dans lequel l'auteur commente les travaux de plusieurs architectes tels que David Mangin et Albert Pope.

I.1. Morphologie du réseau viaire et confort des déplacements

Le terme de « commodité » est davantage utilisé que celui de « confort » dans la littérature consultée. A la Renaissance, Vicence Palladio (1570, cité dans Alonzo (2018)) préconise, pour plus de commodité et pour le soulagement du marcheur, de concevoir des voies larges et droites (cf figure 3.2). On retrouve la même préconisation à la fin du XVIIIe siècle chez Jean-Nicolas-Louis Durand (1802, cité dans Malverti & Picard (1989)⁹³), pour qui les voies en lignes droites sont la première condition pour que les communications soient commodes. Cet exemple illustre que, même si plusieurs siècles séparent ces deux auteurs, ils préconisent tous deux de concevoir des voies larges et droites afin d'améliorer les conditions de confort offertes aux usagers.

⁹⁰ Nous faisons référence à un *Ted Talk* de 2017, de l'urbaniste américain Jeff Speck, intitulé *4 ways to make a city more walkable*.

⁹¹ Nous faisons notamment référence à un billet de blog publié sur Quora.com par l'architecte Max Chanowitz en 2014, intitulé *Is the grid system in city planning the most efficient ?*.

⁹² *Canada Mortgage and Housing Corporation*.

⁹³ Nous utilisons dans la suite du texte l'abréviation M.P (1989) pour la référence Malverti & Picard (1989).



Figure 3.2 : Rue tracée à la Renaissance dans la ville de Ferrare (Italie). Source : Crawford (2005).

I.2. Morphologie du réseau viaire et sécurité des déplacements

La hiérarchisation du réseau viaire est une préconisation fréquente pour l'amélioration des conditions de sécurité offertes aux usagers, qu'ils soient piétons ou en véhicule. L'idée est de séparer les déplacements par mode de transport (à pied, à vélo, en automobile, ...), par type de déplacement (déplacement local, déplacement de transit, ...), ou encore par vitesse de déplacement. Cette hiérarchisation du réseau peut s'opérer par le biais de la réglementation ou grâce à des aménagements sur le réseau, mais elle peut également se manifester par une **morphologie particulière du réseau**. C'est le cas dans le réseau viaire de Radburn (New Jersey) et ceux s'en inspirant, mais aussi dans le réseau viaire des *Planned Unit Development* (PUD), et dans un grand nombre de lotissements suburbains étasuniens. Le réseau viaire de ces lotissements est composé d'artères qui desservent des collecteurs, qui eux-mêmes desservent des voies en culs-de-sac permettant d'accéder aux bâtiments (cf figure 3.3 et 3.4). Selon Rohe (2009), ces voies en culs-de-sac sont conçues pour réduire la vitesse des automobilistes, afin de promouvoir leur sécurité et celle des piétons.

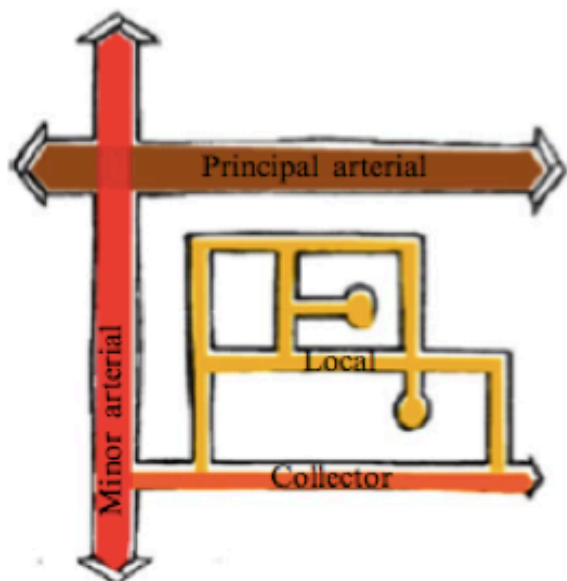


Figure 3.3 : Schéma représentant le principe de hiérarchisation des voies. Source : Levinson et Huang (2012).

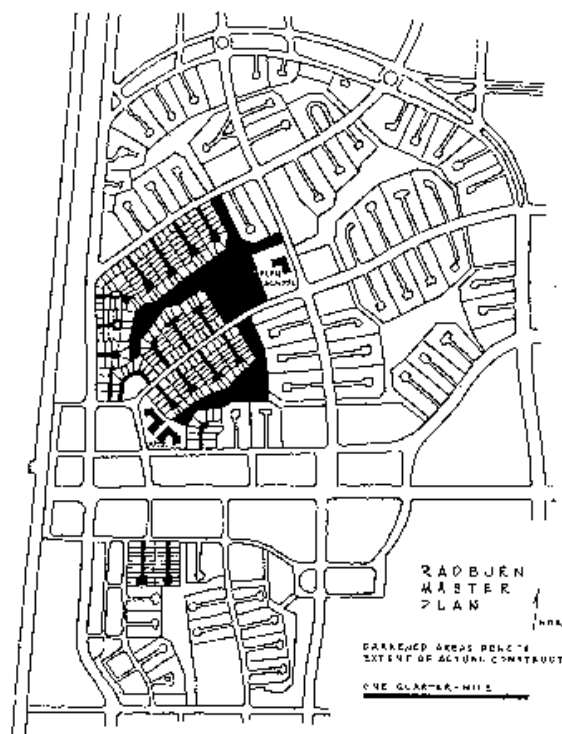


Figure 3.4 : Plan du projet initial de Radburn. La hiérarchie du réseau apparaît dans sa morphologie, on distingue des artères, des collecteurs et des culs-de-sac. Source : Martin (2001)

Les qualités en matière de sécurité offertes par ce type de réseau (morphologiquement hiérarchisés) sont également décrites par Grammenos et ses collègues (2001). Pour eux, ces réseaux sont plus sûrs car ils présentent des discontinuités qui freinent la vitesse des véhicules. Ces discontinuités incitent les automobilistes à ralentir, ce qui engendre de meilleures conditions de sécurité. L'urbaniste américain Jeff Speck (2017) a un **avis contraire**. Pour lui, dans les réseaux viaires morphologiquement hiérarchisés, les rues se connectent peu entre elles, par conséquent, lorsqu'elles le font, elles sont fortement fréquentées ce qui les rend dangereuses.

Nous constatons des **contradictions dans les préconisations faites pour améliorer la sécurité des usagers**. Là où certains théoriciens et praticiens de l'urbanisme affirment qu'un réseau morphologiquement hiérarchisé garantit une meilleure sécurité, d'autres soutiennent que ce type de réseau engendre des intersections dangereuses.

I.3. Morphologie du réseau viaire et simplicité des déplacements

Pour permettre une simplicité des déplacements, l'abbé Laugier (1753, *cité dans* M.P (1989)) et l'architecte Léonce Reynaud (1850, *ibid*⁹⁴) soulignent l'importance d'éviter la monotonie qui pour eux est une source d'égarement. Ils critiquent à ce titre la symétrie, les réseaux trop réguliers ou formant une grille (comme le réseau de Manhattan), et les rues droites et longues (cf figures 3.5 et 3.6). Pour eux, ces éléments n'offrent aucun point de repère lors des déplacements. Cet avis n'est pas partagé par Grammenos et ses collègues (2001) et Chanowitz (2014), pour qui les réseaux en grille permettent au contraire une orientation facile, en particulier pour ceux qui ne connaissent pas la ville (cf figure 3.7).



Figure 3.5 : Les rues droites et longues n'offrent pas de points de repère selon Reynaud. Septième Avenue, Manhattan, 1935. Source : Abbott (1935, sur Wikimedia).

⁹⁴ *Ibid* indique que cette référence est la même que celle qui la précède dans le paragraphe.



Figure 3.6 : Les réseaux en grille sont monotones selon Laugier et Reynaud. Source : Marshall (2005)

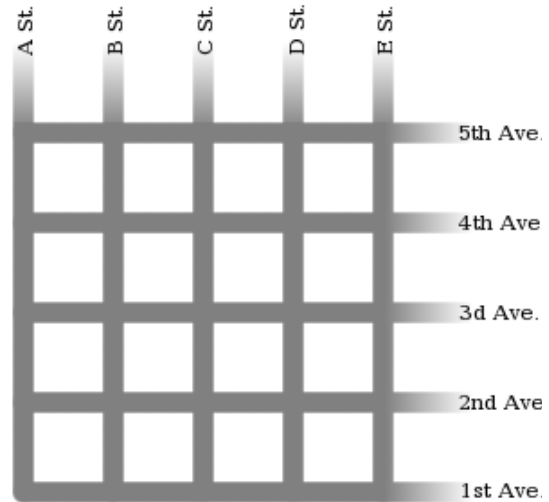


Figure 3.7 : Max Chanowitz explique que les réseaux en grille permettent une orientation facile, en particulier pour ceux qui ne connaissent pas la ville. Source : Chanowitz (2014).

D'autres auteurs ont parlé de la capacité des réseaux viaires, de par leur morphologie, à produire des repères et à éviter l'égaré. L'architecte et urbaniste Antoine Brès préconise « des configurations viaires qui révèlent mieux l'organisation des aires urbaines et invitent à leur exploration » (Brès 1998). Il donne pour exemple **les villes anciennes européennes**, dans lesquelles « le réseau continu des voies héritées participe en général d'une **visibilité totale**, « **panoptique** », de l'espace urbain ». Il ajoute qu'à l'inverse, la conception en cul-de-sac dans les réseaux hiérarchisés maintient l'espace urbain en situation d'invisibilité. Dans le même registre, Grammenos et ses collègues (2001) affirment que la morphologie des réseaux hiérarchisés, en particulier lorsque les voies sont curvilignes, rend le cheminement confus (cf figure 3.8). Brès ajoute toutefois que les infrastructures de transport modernes situées en périphérie des villes facilitent l'orientation des automobilistes. En effet, il souligne qu'en voiture, l'orientation est meilleure si on organise ses déplacements et qu'on choisit ses destinations selon le réseau formé de périphériques, rocade et radiales. Cela vient de la facilité de repérage que ce réseau de voies assure, et de la « familiarité qu'on en a progressivement acquise ; on se déplace en terrain connu et balisé. C'est d'autant plus vrai que l'on a une connaissance plus faible du milieu dans lequel on se déplace » (Brès, 1998). Brès ajoute que les déplacements suivant ce réseau (périphérique, rocade, radiale) ne sont pas nécessairement les plus rapides, mais ils peuvent être rapides parce qu'ils sont simples.

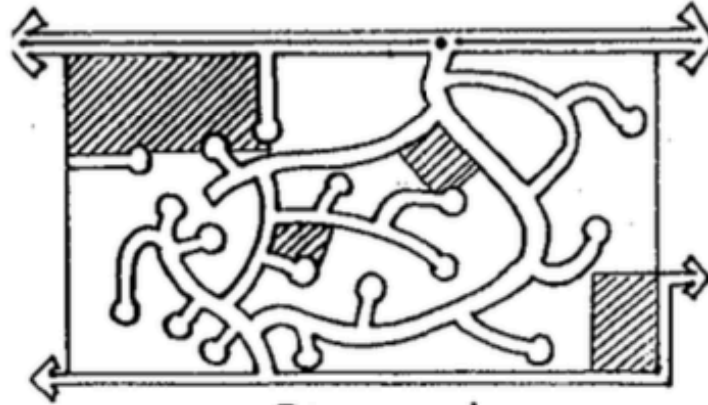


Figure 3.8 : Schéma représentant un réseau hiérarchisé avec des voies courbes. Selon Grammenos et ses collègues (2001), le cheminement dans ce réseau est confus. Source : Marshall (2005).

I.4. Morphologie du réseau viaire et continuité des déplacements

Rappelons que nous avons regroupé la perméabilité et la communicativité du réseau viaire, l'absence d'obstacles et de détours lors des déplacements et l'existence de trajectoires directes, sous l'expression « continuité des déplacements ». La relation entre cette condition d'accessibilité et la morphologie du réseau est souvent décrite par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

Dans l'Art des jardins, la conception d'un réseau viaire composé de faisceaux de voies rectilignes et de figures étoilées vise à créer des trajectoires directes, continues, entre différents lieux. C'est également ce que visait Georges Eugène Haussmann, préfet de Paris au XIXe siècle, avec le percement de voies rectilignes entre des points particuliers du réseau viaire parisien (monuments, gares, ...). Selon Crawford (2005), cette pratique était fréquente à la période de l'architecture baroque⁹⁵ : des diagonales étaient ajoutées aux réseaux en grille afin de **faciliter leur traversée**. Ces diagonales font partie de ce que l'on appelle plus généralement les **percées urbaines** (Darin 1988; Douady 2014). Ces percées offrent un raccourci entre des points particulièrement importants de la ville (cf figure 3.9).

⁹⁵ Que Morris (2013) situe entre 1600 et 1750.

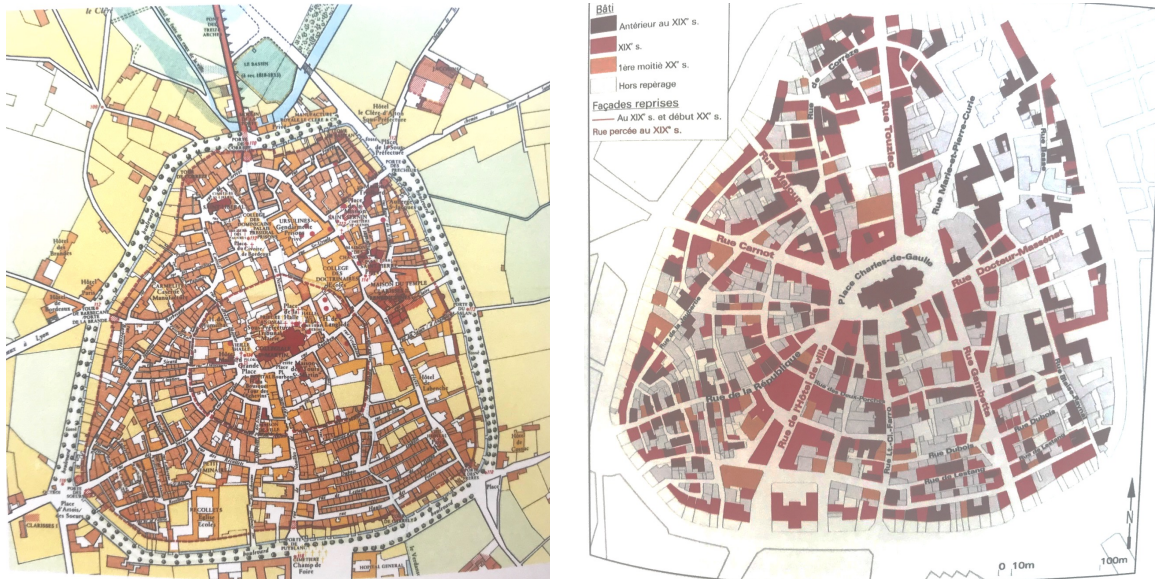


Figure 3.9 : Gauche : Reconstitution du plan de Brive (France) avant son expansion hors-les-murs. Droite : Brive après les différents alignements et percées opérées au XIXe siècle. Ces percées créent des trajectoires directes entre l'extérieur et le centre de la ville. Source : Douady (2016)

La continuité des déplacements est également liée au concept de perméabilité. Ce concept est évoqué par l'urbaniste Ildefonso Serrà (*cité dans* Pellegrino et al. (1999)) et par Jane Jacobs (1961), mais les préconisations qu'ils font pour rendre le réseau viaire perméable sont différentes. Alors que Serrà préconise une morphologie en grille, Jacobs s'intéresse à la taille des mailles du réseau. Pour elle, des mailles de petites dimensions, obtenues grâce à un réseau viaire dense aux rues peu espacées, permettent une meilleure perméabilité. Les réseaux aux mailles de grande dimension imposent au contraire de nombreux détours, donc une moins bonne continuité des déplacements (cf figure 3.10).

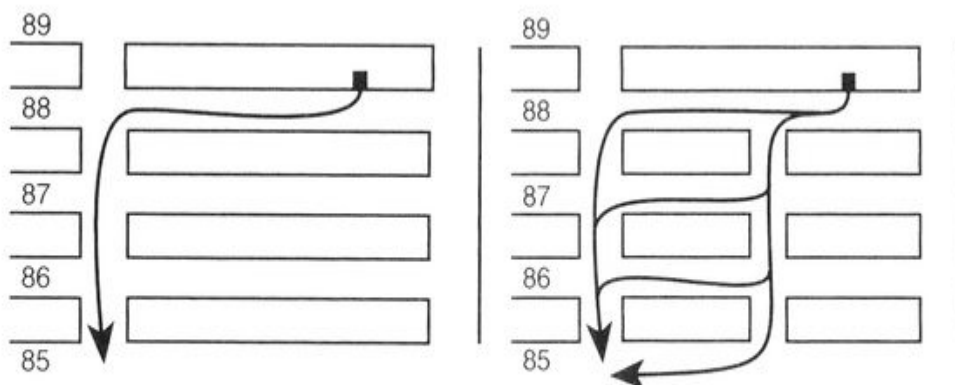


Figure 3.10 : Schémas illustrant l'amélioration de la perméabilité d'un réseau viaire par la réduction de la dimension des mailles. Source : Chanowitz (2014) d'après les préconisations de Jane Jacobs.

Les réseaux viaires conçus pour l'automobile dans les périphéries urbaines sont souvent présentés comme de mauvais exemples en termes de continuité des déplacements. Selon David Mangin (2004, *cité dans* Gharbi (2016)), on retrouve dans ces périphéries des entités enclavées « où l'on ne passe pas et que l'on doit contourner ». Dans la même optique, Georges Amar (1993, *cité dans* Brès (1998)) explique que « la création de contournements, rocade, déviation fait que les relations entre les différents réseaux de voirie tendent à se restreindre à des points singuliers connectés entre eux ». Pour Antoine Brès (1998), ces voies consomment une grande surface mais ne se connectent pas, ou très peu, au territoire qu'elles traversent. Il explique que ces voies n'ont aucune vocation locale. Il critique également les voies labyrinthiques, qui développent un grand linéaire, mais présentent un faible nombre de connections avec le reste du réseau viaire. Ce type de réseau « produit moins d'adhérence potentielle à la localité dès qu'il s'agit pour l'habitant de dépasser les limites de son voisinage immédiat ». C'est alors le passage de la « continuité » à la « connexité appauvrie », de l'imbrication généralisée à l'imbrication limitée.

Les architectes David Mangin (2004) Albert Pope (2012) (*cités dans* Gharbi (2016)) opposent à cela une « **continuité de l'espace public, qui ne pourrait être matérialisée qu'à travers un maillage continu de voies** » (cf figure 3.11). Mangin propose à ce propos la notion de « **ville passante** ». Le qualificatif « passant » signifie selon lui « un réseau et des systèmes de maillages de voies qui rendent accessibles les espaces publics structurants d'une ville, d'un territoire ou d'un paysage ». Pour Mangin, « rendre la ville passante signifie également tout un **processus de désenclavement** des quartiers pavillonnaires pour les rendre accessibles par le transport en commun et autres formes de mobilité » (Gharbi, 2016).

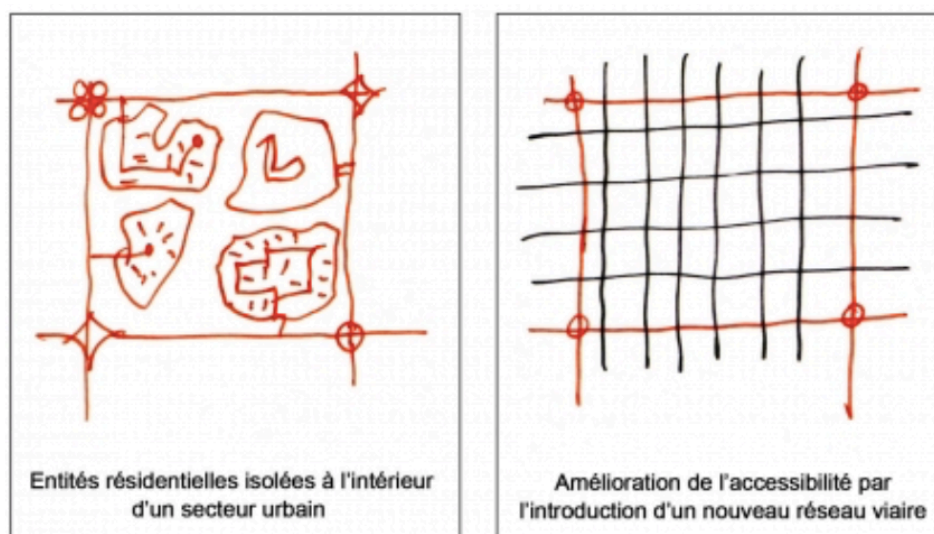


Figure 3.11 : Gharbi illustre à travers ces schémas comment Mangin propose de « rendre la ville passante », grâce à un maillage continu de voies. Source : Gharbi (2016).

Signalons enfin que certaines interventions peuvent au contraire viser à éviter que le réseau viaire d'une ville ne soit perméable, en réorientant le trafic de manière à créer des discontinuités. C'est notamment l'objectif des boulevards qui ceignent les centres villes. Ceux-ci visent à irriguer la ville depuis toutes les directions, tout en évitant sa traversée, souvent dans le but d'éviter l'encombrement (Douady, 2016).

I.5. Morphologie du réseau viaire et isotropie des déplacements

Rappelons que nous avons regroupé sous l'expression « isotropie des déplacements » le fait que les déplacements se répartissent uniformément sur l'ensemble du réseau, que l'accessibilité soit généralisée, que *tous les abords* soient faciles. Des contradictions existent quant au moyen de permettre cette isotropie des déplacements. Tandis que Léonce Reynaud (1850, *cité dans M.P (1989)*) énonce que les réseaux en grille ne permettent une desserte correcte de la circulation que dans deux directions orthogonales, Ildefons Cerdà et Franck Lloyd Wright (*cités dans Pellegrino et al. (1999)*) affirment au contraire que les grilles permettent une circulation généralisée, une accessibilité offerte à tous, et des déplacements répartis uniformément (cf figure 3.12).

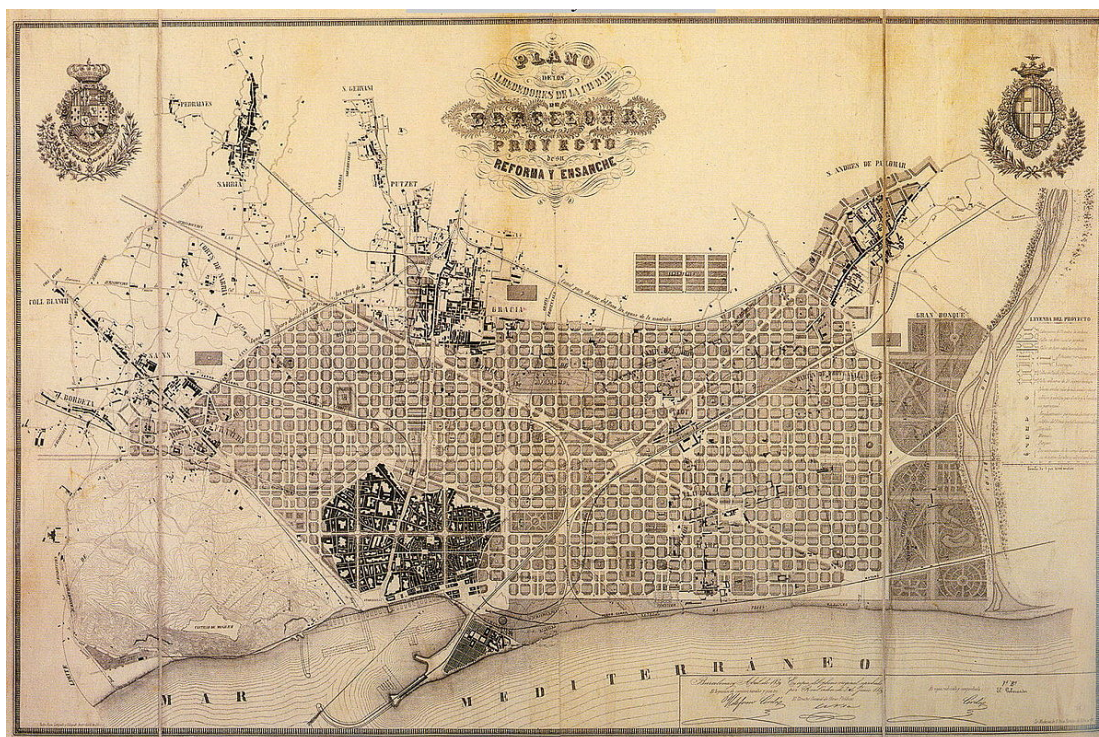


Figure 3.12 : Plan de Barcelone par Ildefons Cerdà, 1859. Un réseau viaire dans lequel chaque carrefour est identique au suivant. Source : Entrée « Plan Cerdà » sur Wikipédia.

L'architecte américain Christopher Alexander (1967) dans son ouvrage intitulé *A city is not a tree* évoque indirectement la relation entre morphologie du réseau viaire et isotropie des déplacements. Il dresse une critique sévère à l'égard des morphologies hiérarchisées et en culs-de-sac, qu'il compare à des arbres, hiérarchisés des racines à la feuille. Pour lui, cette morphologie en arbre ne peut convenir à une ville, qui doit au contraire assurer la communication entre presque toutes les feuilles. Alexander oppose à l'arbre les morphologies en semi-treillis. Dans le même registre qu'Alexander, Gharbi (2016) critique les formes d'urbanisation moderne situées en périphérie des grandes villes. Pour lui, les lieux de commerce et de service y sont directement accessibles depuis l'autoroute, en revanche, les lieux d'habitation – situés généralement en arrière-plan par rapport à ces espaces – demandent un trajet plus long à parcourir sans aucune articulation avec les autres entités commerciales et de service.

1.6. Morphologie du réseau viaire et proximité des déplacements

Plusieurs théoriciens et praticiens de l'urbanisme font des préconisations sur la manière de réduire les distances à parcourir lors de ses déplacements (donc améliorer la proximité des déplacements), en agissant sur la morphologie des réseaux viaires. Léonce Reynaud (1850, *cité dans* M.P (1989)) affirme que les rues brisées (telles que celles des centres anciens européens) rallongent les distances. Jean-Nicolas-Louis Durand (1802, *ibid*) pour sa part souligne que la ligne droite est la première condition pour que les communications soient les plus courtes possibles. Pour Jane Jacobs (1961), ce sont les réseaux denses et resserrés des villes anciennes européennes qui sont présentés comme solutions pour réduire les distances à parcourir, et permettre la marche. Cette solution est reprise par les tenants du Nouvel Urbanisme, pour qui les réseaux viaires denses, compactes, et les voies fortement interconnectées permettent des déplacements à distance de marche.

De leur côté, Grammenos et ses collègues (2001) soutiennent que les réseaux en grille permettent un bon accès à courte distance pour les piétons. A l'inverse, les réseaux hiérarchisés sont pour eux peu adaptés aux piétons : leur morphologie, en particulier lorsqu'ils comprennent des voies curvilignes, rallonge les distances marchées. Chanowitz (2014) de son côté affirme que les grilles réparties uniformément dans l'espace permettent un accès à courte distance à une plus grande proportion de l'espace urbain qu'un réseau comprenant des culs-de-sac (cf figure 3.13). Plus généralement, les réseaux morphologiquement hiérarchisés dans les lotissements périphériques sont réputés peu adaptés à des déplacements courts. Brès (1998) explique que, dans ces lotissements, les habitants souhaitent au bout d'un certain temps une meilleure liaison avec l'environnement proche (le sentier des

écoliers ou le chemin d'accès aux équipements par exemple). Les infrastructures de transport rapides comme les autoroutes ou les rocade sont elles aussi présentées comme négligeant les déplacements locaux. Elles facilitent l'accessibilité à longue distance au détriment des services de **proximité** (Viana Cerqueira 2018).

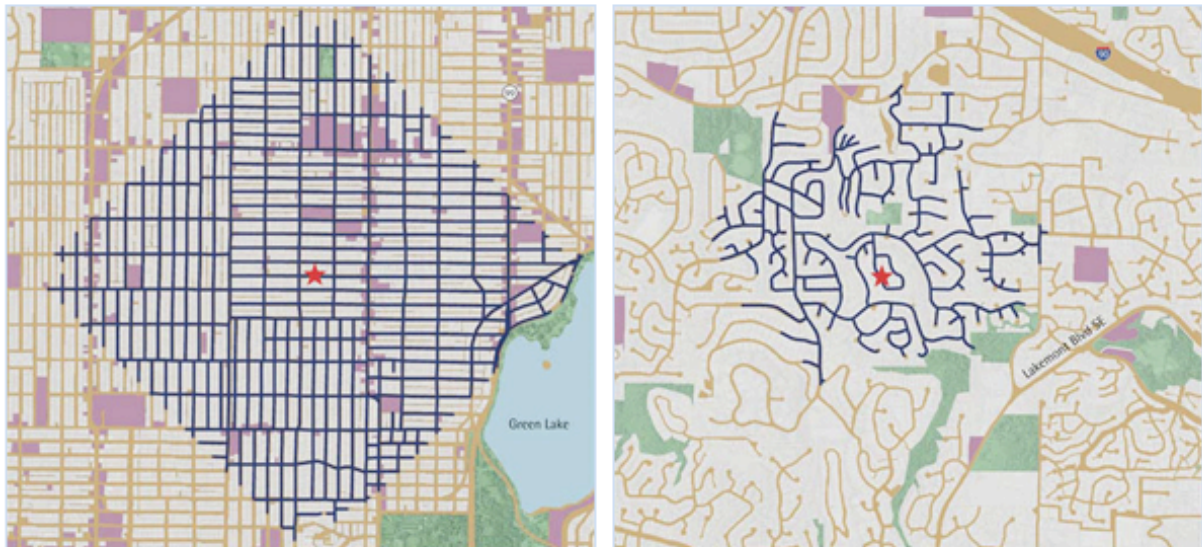


Figure 3.13 : Comparaison de la portion du réseau accessible en marchant un *mile* autour d'un point donné, à gauche dans le réseau en grille de Phinney Ridge à Seattle, à droite dans le réseau aux voies courbes et aux culs-de-sac de Bellevue (état de Washington). La grille permet un accès à courte distance à une plus grande part du réseau. Source : Chanowitz (2014), d'après une carte de Lawrence Frank & Co. et du Sightline Institute.

I.7. Morphologie du réseau viaire et fluidité des déplacements

La hiérarchisation du réseau est souvent la solution présentée pour réduire l'encombrement, donc améliorer la fluidité des déplacements. Les réseaux à la morphologie hiérarchisée, comme celui de Radburn ou des *Planned Unit Development*, sont utilisés au XXe siècle afin de fluidifier les déplacements automobiles. Cette solution est reprise par Grammenos et ses collègues (2001), qui expliquent que, comme la circulation de transit est assurée, dans ces réseaux hiérarchisés, par des collecteurs et des artères dédiés, cette circulation est bannie au niveau local, ce qui permet d'éviter l'encombrement (cf figure 3.14). Ils opposent à ces réseaux les réseaux en grille, dans lesquels la circulation de transit est fréquente, ce qui accroît les risques d'engorgement. Grammenos et ses collègues vont jusqu'à soutenir que les réseaux en grille sont incompatibles avec un trafic automobile fluide. Pour eux, seule l'introduction de feux tricolores et de voies à sens uniques a permis à la grille d'accueillir l'automobile.

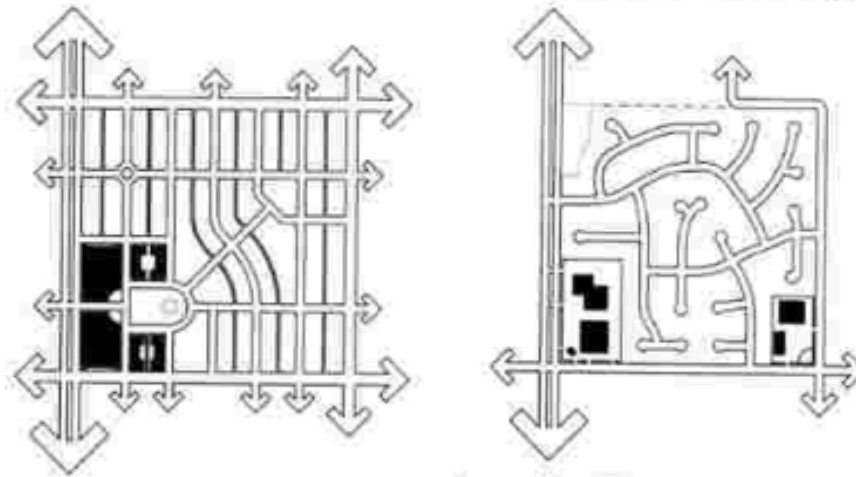


Figure 3.14 : Gauche : réseau viaire en grille, droite : réseau viaire morphologiquement hiérarchisé. La circulation de transit, représentée ici par des flèches, est fréquente dans les réseaux en grille, alors que dans les réseaux hiérarchisés, elle est concentrée sur les collecteurs et artères dédiés. Source : Beimborn et Kennedy (1996).

Les qualités attribuées aux réseaux hiérarchisés en matière de fluidités des déplacements ne sont pas partagées unanimement. L'urbaniste Jeff Speck (2017) par exemple soutient que, comme les rues de ces réseaux se connectent peu entre elles, lorsqu'elles se connectent, elles sont fortement encombrées. A ce propos, l'architecte Max Chanowitz (2014) préconise des réseaux viaires redondants, comprenant plusieurs chemins alternatifs. Il explique que, dans ce type de réseau, si une voie est bloquée, le trafic peut facilement être redirigé vers d'autres voies (cf figure 3.15). Les risques d'encombrement sont alors réduits.

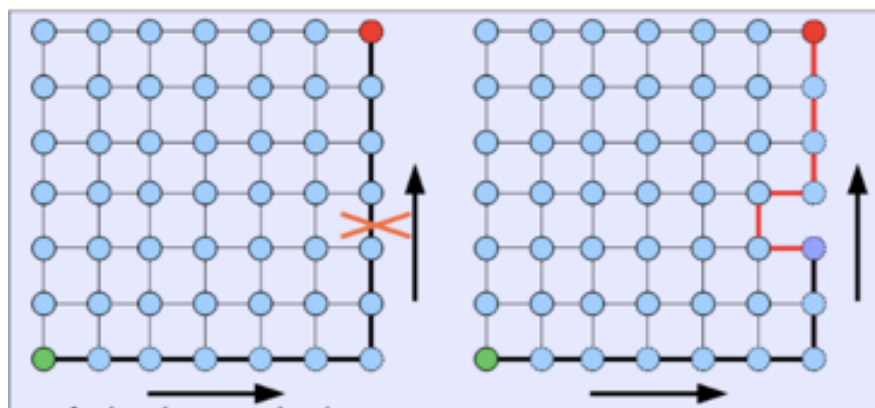


Figure 3.15 : Schéma illustrant les propos de Chanowitz (2014) : dans un réseau en grille, si une rue est bloquée, le trafic peut être redirigé sur une autre rue. Source : Nabaa (2011).

I.8. Morphologie du réseau viaire et rapidité des déplacements

Au XIXe siècle, Ildefonso Cerda affirme que les réseaux en grille permettent des déplacements rapides (Pellegrino et al. 1999). Plus tard, au XXe siècle, Le Corbusier accorde un grand intérêt à la rapidité des déplacements. Pour lui, rien ne doit briser la vitesse automobile. Il prône pour cela une hiérarchisation du réseau, mais il insiste également sur la nécessité de concevoir des voies en lignes droites, formant éventuellement une grille (comme dans la ville qu'il conçoit à Chandigarh). Il insiste également sur la nécessité de réduire le nombre de rues et d'intersections, qui sont sources de ralentissement. Il préconise des croisements tous les 400 m environ (Le Corbusier (1923), *cité dans Choay (1965)*). Le Corbusier prône également l'introduction d'autoroutes urbaines selon le tracé le plus direct et le plus simplifié. Avec l'essor de l'automobile, les autoroutes urbaines, les périphériques et les rocade ont été largement introduits en périphérie des villes (Haumont 1993). Brès (1998) explique qu'en organisant ses déplacements selon le réseau formé par ce type de voies, **les automobilistes peuvent prendre de la vitesse.**

De leur côté, Grammenos et ses collègues (2001) identifient des sources de ralentissements dans les réseaux viaires morphologiquement hiérarchisés. Pour eux ces réseaux comprennent des discontinuités qui freinent la vitesse des véhicules, offrant de meilleures conditions de sécurité (cf section I.2). Les voies en culs-de-sac dans les *Planned Unit Development* sont justement conçues pour réduire la vitesse automobile (Rohe 2009).

Conclusion de la partie I

Nous constatons que la morphologie des réseaux viaires est un levier largement mobilisé par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, pour agir sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers, autrement dit sur le confort et la sécurité lors des déplacements, la simplicité des déplacements, leur continuité, isotropie, proximité, fluidité et rapidité. Les préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme se situent à deux échelles. Soit elles portent sur les caractéristiques du réseau dans son ensemble. C'est le cas par exemple lorsqu'ils préconisent, ou au contraire critiquent, les réseaux en grille, hiérarchisés, symétriques, denses ou compacts. Soit les préconisations portent sur les caractéristiques des composants du réseau, à savoir les voies et les intersections. C'est le cas lorsque les auteurs susmentionnés préconisent, ou au contraire critiquent, les voies droites, larges, courbes ou brisées, les voies rapprochées, en culs-de-sac ou formant des percées, les croisements de rues peu fréquents. Nous choisissons de regrouper ces caractéristiques, qu'elles soient à l'échelle du réseau ou

à celle de ses composants, comme étant les **caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire**.

Nous avons également remarqué qu'il existait des convergences, mais aussi plusieurs avis contradictoires concernant les conditions d'accessibilité offertes par les mêmes caractéristiques morphologiques. Par exemple, Grammenos et ses collègues soutiennent que les réseaux morphologiquement hiérarchisés permettent une fluidité des déplacements, tandis que Jeff Speck soutient que les intersections dans ce type de réseau sont encombrées. Laugier et Reynaud soutiennent que les réseaux en grille sont source d'égarement, alors que ces réseaux sont préconisés par Chanowitz et Grammenos et ses collègues pour faciliter l'orientation. Ces contradictions soulignent **l'absence de consensus** sur les caractéristiques morphologiques à préconiser pour agir sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Cela nous incite à nous interroger dans la partie II ci-dessous sur le processus de construction de ces préconisations.

II. Quelle évaluation du lien entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité ?

La partie I nous a permis de montrer que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme accordaient un grand intérêt à la question de **l'effet de certaines caractéristiques morphologiques sur les conditions d'accessibilité dans un réseau viaire**. Mais comment ces théoriciens et praticiens évaluent-ils cet effet ? Comment sont justifiées dans cette littérature les « qualités » attribuées aux caractéristiques morphologiques en question ? Qu'en est-il dans la littérature académique ? Nous abordons ces questions dans cette deuxième partie.

II.1. L'argumentaire des théoriciens et praticiens de l'urbanisme

II.1.1. Des préconisations peu précises

Les travaux mentionnés dans la partie I, qu'il s'agisse d'ouvrages d'architecture et d'urbanisme, de billets de blogs, de rapports ou encore de *Ted Talks*⁹⁶, visent à présenter des arguments en faveur de certaines caractéristiques morphologiques. Stephen Marshall (2005) formule plusieurs critiques à l'égard de ces travaux. La première est que certains auteurs préconisent des réseaux en grille ou hiérarchisés, mais sans dire explicitement quelles caractéristiques morphologiques sont importantes dans ces réseaux, autrement dit, quels *ingrédients* l'auteur considère comme favorables ou défavorables. Dans une grille par exemple, est-ce la rectitude

⁹⁶ Il s'agit d'une communication orale grand public.

des voies ? leur orthogonalité ? les intersections à quatre voies qu'elle comprend ? Marshall craint que cette imprécision n'engendre une interprétation erronée des préconisations. Par ailleurs, il déplore que la terminologie utilisée par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme pour désigner les différents types de morphologie ne soit pas standard. Un même terme peut désigner des morphologies différentes, et des termes différents peuvent désigner une même morphologie. Par exemple, parler de réseau en grille, orthogonal ou hippodaméen signifie généralement la même chose. Marshall évoque également l'ambiguïté de certaines expressions utilisées, telles qu'un « réseau viaire *connecté* » (*connected street network*)⁹⁷. La signification précise de ces expressions n'est pas toujours claire.

Ces critiques soulignent l'importance d'un travail d'harmonisation et de définition précise des termes utilisés dans les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

II.1.2. Une argumentation par le discours

Selon Marshall (2005), il n'existe pas de justification théorique cohérente faisant par exemple préférer les réseaux en grille aux réseaux hiérarchisés. En examinant les textes mobilisés dans la partie I, on remarque en effet que leurs auteurs n'avancent pas nécessairement de *preuves* appuyant leurs propos. Les arguments mobilisés pour convaincre des mérites ou défauts de telles ou telles caractéristiques morphologiques sont de l'ordre du discours. Dans son ouvrage *L'urbanisme, Utopies et réalités*, Françoise Choay (1965) explique que les textes produits par l'urbanisme s'attribuent souvent un statut scientifique auquel ils n'ont pas droit. Pour elle, les préconisations présentées dans ces textes sont souvent sous-tendues par des **idéologies** non dites et non assumées. Elle ajoute que, même si ces textes ont parfois recours aux sciences de la nature et de « l'homme », ce recours « est subordonné à des **choix éthiques et politiques**, à des finalités qui n'appartiennent pas seulement à l'ordre du savoir » (Choay 1996)⁹⁸. Dans sa thèse, Hadrien Commenges (2013) écrit que les architectes du début du XXe siècle se faisaient une « opinion » de la circulation. Nous pensons que le terme « opinion » n'est pas neutre. Il indique une tendance, toujours présente, à considérer les écrits des architectes et urbanistes comme étant des avis personnels, non fondés sur une argumentation objective.

Dans la pratique, cette absence d'argumentation objective conduit à ce que les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme soient parfois largement adoptées dans leur communauté, alors que la pertinence de ces préconisations n'a

⁹⁷ Pour Marshall, dire qu'un réseau viaire est « connecté » est tautologique car tous les réseaux viaires sont composés de voies « connectées » entre elles.

⁹⁸ Choay entend dans son ouvrage *La règle et le modèle* (1996) définir le statut véritable de ces textes d'urbanisme, « les intentions secrètes que masquent identiquement leurs prétentions explicites et leurs idéologies tacites ».

pas été démontrée. Or, selon Randall Crane (1996), les mérites de tel ou tel réseau sont loin d'être évidents, et il est indispensable d'explorer en détail les qualités de chacun, pour éviter qu'il ne cause plus de problèmes qu'il n'en règle. Crane examine un ensemble de préconisations faites par les tenants du Nouvel Urbanisme, du *transit-oriented development*⁹⁹, et de l'urbanisme néo-traditionnel¹⁰⁰. Il conclut que, bien que ces préconisations aient probablement des mérites dans certaines circonstances, chacune de leurs composantes peut ne pas être une bonne chose. Il déplore que cette possibilité ne soit même pas évoquée par les architectes et urbanistes qu'il cite. Marshall va encore plus loin, en affirmant que certains auteurs taisent les défauts des morphologies de réseau qu'ils souhaitent mettre en avant, et que cela peut être dangereux (Marshall 2005). Ce problème est également soulevé par l'ingénieur Ray Brindle (*cité dans* Marshall (2005)), qui met en garde les planificateurs des transports et les ingénieurs du trafic contre la rhétorique de certains urbanistes dits néo-traditionnels (Nouvel urbanisme), qui ont une claire préférence pour les réseaux en grille.

II.1.3. Des contradictions pour les mêmes caractéristiques morphologiques

Dans la partie I, nous avons soulevé au fil du texte plusieurs avis contradictoires entre les auteurs, concernant les conditions d'accessibilité offertes par des caractéristiques morphologiques identiques. Le tableau 3.1 ci-dessous confronte certaines de ces contradictions. Nous pensons qu'elles sont une conséquence directe du manque d'argumentation objective dans la construction des préconisations en urbanisme.

⁹⁹ Courant datant des années 1990, dans lequel sont formulées des préconisations visant à favoriser la marche à pied et l'usage des transports en commun.

¹⁰⁰ L'expression « urbanisme néo-traditionnel » est généralement synonyme de Nouvel Urbanisme, mais concerne uniquement les quartiers nouveaux ou les villes nouvelles (Entrée « Nouvel Urbanisme » sur Wikipédia).

<p><i>Les réseaux hiérarchisés permettent d'éviter l'encombrement</i></p> <p>Stein, Wright et Sewell Cautley ; Grammenos et ses collègues</p>	<p><i>Les intersections dans les réseaux hiérarchisés sont encombrées</i></p> <p>Speck</p>
<p><i>Les réseaux hiérarchisés limitent le risque d'accidents</i></p> <p>Stein, Wright et Sewell Cautley ; Grammenos et ses collègues</p>	<p><i>Les intersections dans les réseaux hiérarchisés sont dangereuses</i></p> <p>Speck</p>
<p><i>Les rues trop brisées rallongent les distances</i></p> <p>Reynaud</p>	<p><i>Les réseaux viaires denses et resserrés réduisent les distances parcourues</i></p> <p>Jacobs</p>
<p><i>Les grilles offrent une accessibilité généralisée, les déplacements y sont uniformément répartis</i></p> <p>Cerdà, F. L. Wright</p>	<p><i>Les grilles ne desservent correctement la circulation que dans deux directions</i></p> <p>Reynaud</p>
<p><i>Les réseaux en grille permettent de se repérer facilement</i></p> <p>Chanowitz; Grammenos et ses collègues</p>	<p><i>Les réseaux en grille sont sources d'égarement, ils n'offrent pas de points de repère</i></p> <p>Laugier; Reynaud</p>

Tableau 3.1 : Tableau relevant certaines contradictions dans les préconisations des auteurs évoqués en partie I.

On constate par ailleurs une tendance de la part de certains théoriciens et praticiens de l'urbanisme à un usage du chiffre pour appuyer leur argumentation en faveur de telle ou telle caractéristique morphologique. Nous présentons brièvement cette approche ci-dessous.

II.1.4. Une argumentation par le chiffre

Quantifier signifie « exprimer et faire exister sous une forme numérique ce qui, auparavant, était exprimé par des mots et non par des nombres » (Desrosières 2012).

Plusieurs théoriciens et praticiens de l'urbanisme ont recours à une argumentation par le chiffre pour prôner les conditions d'accessibilité offertes par certaines caractéristiques morphologiques. Pour illustrer cette tendance, nous nous appuyerons essentiellement sur le rapport réalisé par Grammenos, Pogharian, et Tasker-Brown (2001) pour la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logements. Ce rapport vise à présenter les avantages et inconvénients respectifs des réseaux en grille et des réseaux hiérarchisés, pour la conception des quartiers résidentiels. Pour ce faire, les auteurs s'appuient – entre autres – sur des **mesures calculées sur le plan du réseau, mesures qu'ils relient ensuite à des conditions d'accessibilité**. Parmi ces mesures figure le nombre de voies qui s'intersectent en un carrefour, autrement dit le **type d'intersections** (intersection à quatre voies, trois voies, etc.). Selon Grammenos et ses collègues, plus le nombre de voies qui se coupent en une intersection est élevé, plus il sera compliqué pour les automobilistes de savoir qui a la priorité (cf figure 3.16). Les intersections à plusieurs voies seraient donc source **d'insécurité routière**. De fait, la circulation dans les grilles, qui ont des intersections de 4 voies, serait plus compliquée et moins sûre que dans des réseaux morphologiquement hiérarchisés, dans lesquels les intersections sont généralement à trois voies. Grammenos et ses collègues utilisent alors la proportion d'intersections à trois voies pour évaluer la « bonne » **sécurité routière** dans le réseau.

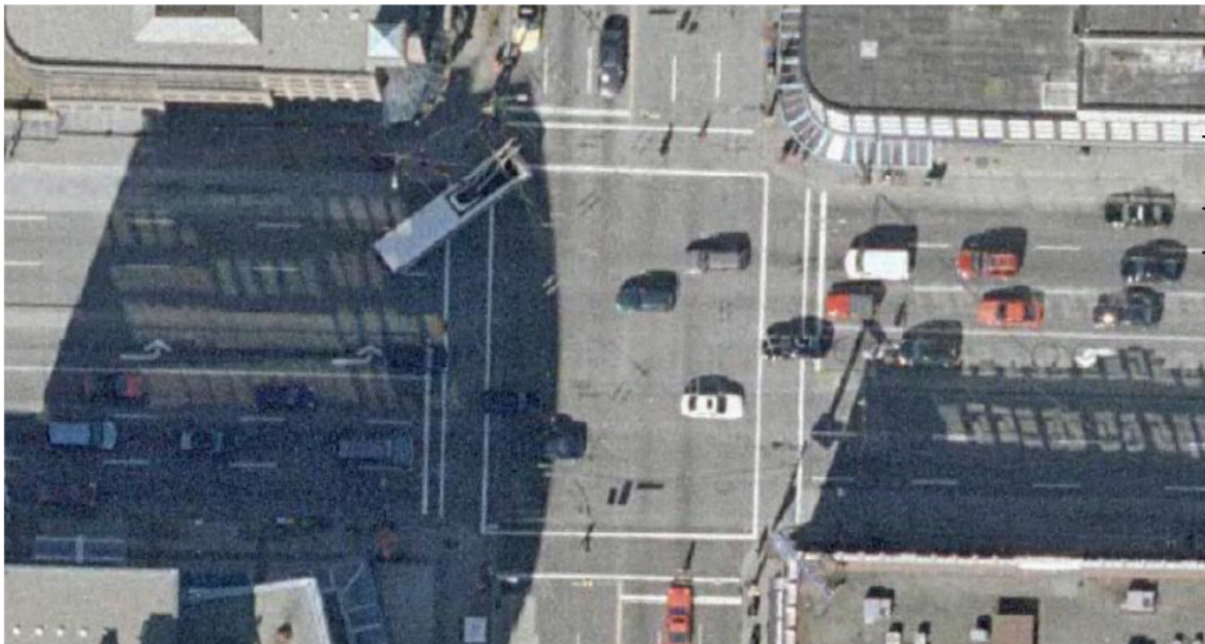


Figure 3.16 : Intersections à quatre voies : il est difficile de savoir qui a la priorité. Sources : Haut : article de Retronews.fr, *La circulation à Paris, 350 ans de casse-tête insoluble* ; Bas : Condon (2008).

Par ailleurs, Grammenos et ses collègues utilisent le **nombre d'intersections dans le réseau** pour rendre compte des **ralentissements** sur celui-ci, ralentissements qui ont un effet sur la fluidité des déplacements. Ils expliquent par exemple que les grilles comprennent un grand nombre d'intersections : si les voies de la grille sont espacées de 200 pieds (environ 60 mètres), une voiture roulant à une vitesse moyenne rencontrera une intersection toutes les 6 à 8 secondes, ce qui correspond à autant de ralentissements éventuels. A l'inverse, les réseaux hiérarchisés, dans lesquels les intersections sont beaucoup moins fréquentes, connaissent moins de ralentissements, donc permettent une meilleure fluidité des déplacements. Cet écart

dans le nombre d'intersections entre les réseaux en grille et les réseaux hiérarchisés est souvent pointé du doigt dans la littérature en urbanisme (voir un exemple dans la figure 3.17 ci-dessous).



Figure 3.17 : Comparaison du nombre d'intersection au km² dans un réseau en grille (à Vancouver) et dans un réseau hiérarchisé (à Surrey). 66 intersections au km² à Vancouver contre 36 à Surrey. Source : Condon (2008).

Ce recours au « chiffre » comme argument pour la préconisation de certaines caractéristiques morphologique présente un avantage. Il permet de savoir **précisément quelle caractéristique morphologique est considérée comme favorable ou défavorable**. En revanche, plusieurs critiques peuvent être formulées à son égard. D'abord, la relation de causalité, posée dans ces travaux, entre caractéristique morphologique et condition d'accessibilité, est davantage postulée que démontrée. De fait, **cette approche par le chiffre diffère assez peu d'une argumentation par le discours**. Selon Bentayou et Benbouzid (2009), l'usage du « chiffre » en urbanisme, de manière systématique et répétitive, vise parfois à produire un effet d'autorité, indépendamment de la pertinence des calculs effectués. Les auteurs ajoutent que ces chiffres font parfois partie d'une « réserve de données » dans laquelle le praticien puise librement et de façon sélective pour justifier ses choix.

Par ailleurs, ces travaux relient chaque condition d'accessibilité à une caractéristique morphologique unique : le type d'intersections est relié à la sécurité routière ; le nombre d'intersections est relié à la fluidité des déplacements. Or, chaque condition d'accessibilité peut en réalité être influencée par une multitude de caractéristiques morphologiques. La sécurité routière ne dépend pas uniquement du type d'intersections, les ralentissements dans le réseau ne dépendent pas uniquement du nombre de ces intersections.

Malgré ces critiques, nous retenons de cette approche la description des **caractéristiques morphologiques des réseaux par l'intermédiaire de mesures quantitatives telles que le nombre d'intersections suivant leur type**.

II.2. La relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité dans la littérature scientifique

Jusqu'ici, nous nous sommes intéressé aux écrits des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Nous allons maintenant nous demander comment la question du lien entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire et les conditions d'accessibilité est abordée par les chercheurs, autrement dit dans la littérature scientifique.

II.2.1. Le rôle de la morphologie négligé par les chercheurs ?

Selon Eric Alonzo (2018), l'intérêt croissant durant ces dernières décennies des historiens, géographes et sociologues pour les réseaux, les flux et les mobilités, s'est accompagné d'un oubli du rôle joué par le **support physique et tangible, l'infrastructure matérielle** sur laquelle se font les déplacements en ville, à savoir le réseau viaire. Ce constat est également dressé par Hermenault (2017) pour le cas des recherches en Histoire. Elle explique que dans l'après-guerre, et plus encore depuis le *Mobility turn*¹⁰¹ des années 2000, « **la matérialité de la rue est délaissée [en histoire] au profit de l'étude de la circulation des hommes dans l'espace** et à ses effets sur la composition et le fonctionnement des sociétés. Le flux concentre les attentions au détriment du support ». Dans le même registre, Bruno Latour (2009, cité dans Alonzo (2018)), écrit :

*« Quand on parle de mobilité accrue, de civilisation de la vitesse, on tend à ne concentrer son attention que sur le mobile qui se déplace et pas du tout sur l'ensemble du système pour lequel le mobile n'est que l'élément final. Or, il n'y a de mobile que parce qu'il existe une **infrastructure immobile**. Quand la mobilité d'un élément s'accroît, l'immobilité des infrastructures (ou, pour parler le langage de l'économie, ses emprises, ses investissements) s'accroît d'autant ».*

Alonzo (2018) cite également Régis Debray, qui écrit en 1996 :

« Le message occulte le canal, comme les engins les systèmes, comme les flux laissent dans l'ombre les réseaux. Plus ces derniers performant, mieux ils savent s'évanouir. Est-ce une raison suffisante pour dédaigner l'asphalte ? Apparemment, oui. Éternel handicap de ce qui gît en dessous, l'upokeimenon des Grecs, par où se désignaient le substrat et le principe. [...] Prestige du véhicule, humilité du vecteur ».

¹⁰¹ Celui-ci place la mobilité au cœur des préoccupations des historiens.

Cet oubli du vecteur au profit du véhicule ne date pas du XXe siècle. Il pourrait remonter en France au XVIIIe siècle. Alonzo (2018) explique qu'à cette époque, un grand intérêt est porté à la classification des routes en classes, et aux statistiques sur le nombre de véhicules en circulation. Pour Alonzo, **la gestion de la voirie et sa conception tendent alors vers une plus grande abstraction** : la voirie devient moins définie par ses caractéristiques physiques particulières que par son usage et sa fonction au sein du réseau circulatoire. Ce mode de gestion de la voirie est décrit par Dupuy en 1985. Selon lui, la morphologie des réseaux est un aspect assez peu pensé par les ingénieurs du trafic automobile (Dupuy 1985). En général, ces derniers ont déjà un ou des projets de réseaux dont les caractéristiques « cadrent » la conception des futurs réseaux. Pourtant, Dupuy affirme qu'il existe *a priori* une multitude de réseaux compatibles avec l'acheminement des flux envisagés, pourquoi alors laisser des idées préconçues, ou parfois le simple hasard, déterminer le choix du réseau à construire ? Onze ans plus tard, Ewing (1996) explique que les caractéristiques de la forme urbaine, dont la morphologie du réseau viaire fait partie, reçoivent en général moins d'attention dans les travaux de *transit-oriented development* que des facteurs tels que l'usage du sol.

Dans le même registre, Cyrille Genre-Grandpierre (2001) explique qu'il reste « difficile de savoir si certains réseaux sont structurellement plus efficaces que d'autres c'est-à-dire qu'ils allongent moins les trajets réels de courte portée par rapport à la distance euclidienne, ce qui tendrait à les rendre intrinsèquement plus favorables à l'usage des modes doux pour lesquels l'allongement est un facteur limitant ». De leur côté, Foltête et ses collègues (2008) expliquent que « l'étude des performances de l'offre de transport publique n'a généralement pas recours à l'analyse des caractéristiques du réseau viaire ». Selon eux, « cette évaluation consiste le plus souvent à mettre en regard les intrants du service (capital, travail, etc.) avec les résultats mesurés par quelques indices agrégés (ratio recettes/dépenses, taux de fréquentation, notamment) ». Pourtant, Foltête et ses collègues expliquent que :

« à intrants égaux, on peut penser que la forme et le fonctionnement du réseau vont intervenir sur la qualité de la prestation et, in fine, sur ses performances. En paraphrasant Gabriel Dupuy (...), on peut même dire que la structure de la boîte noire qu'est le réseau intègre intrinsèquement une bonne partie des performances économiques du service, tant du côté des coûts que des utilités ».

Selon Marshall (2005), cette faible prise en compte de la morphologie du réseau dans les travaux sur les mobilités de manière générale peut s'expliquer par une complexité de forme et de structure des réseaux viaires, qui les met à l'écart des autres « objets » de l'analyse urbaine et des transports. L'auteur explique par exemple qu'il n'existe pas de descripteur unique ou standard capable de rendre

compte de la morphologie d'un réseau viaire¹⁰². Marshall ajoute que cela explique la difficulté de mettre en place des recommandations robustes et généralisables pour la conception des réseaux viaires.

II.2.2. Quelques tentatives d'exploration de la relation entre morphologie du réseau viaire et conditions d'accessibilité

Malgré le constat dressé ci-dessus, nous identifions dans la littérature sur l'étude de la mobilité urbaine quelques travaux visant à mettre en relation les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires avec des variables décrivant les conditions d'accessibilité. Nous en présentons trois approches ci-dessous.

II.2.2.1. L'approche par la comparaison

Pour isoler l'effet des caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers, une première approche consisterait à **comparer** plusieurs réseaux viaires dans lesquels tous les facteurs pouvant agir sur les conditions d'accessibilité seraient identiques, à l'exception des caractéristiques morphologiques. Si les conditions d'accessibilité sont différentes d'un réseau à l'autre, on pourra en conclure que cela est dû aux caractéristiques morphologiques de chaque réseau.

Certains travaux procèdent en comparant la valeur prise par la variable décrivant une condition d'accessibilité donnée à la moyenne nationale, ou à la valeur qu'elle prend dans des zones dites « comparables ». Par exemple, Stephen Marshall et David Banister (2000) ont étudié la congestion automobile dans la ville hollandaise de Houten. Ils ont pour cela observé la circulation aux heures de pointe, et l'ont comparé à la moyenne nationale. Les auteurs constatent que cette circulation est 10% plus faible que la moyenne nationale. Ils associent cela aux caractéristiques morphologiques du réseau viaire de Houten, qui contient des cheminements piétons et cyclistes perméables, et des voies imperméables et tortueuses pour les voitures. Nous identifions deux écueils dans cette approche. Le premier est que la congestion dans un réseau viaire ne dépend pas uniquement des conditions d'accessibilité offertes dans ce réseau, mais aussi de multiples facteurs tels que les caractéristiques socio-économiques des individus ou les conditions climatiques. Le second est que, même en considérant que la congestion automobile rend compte des conditions d'accessibilité offertes aux usagers, d'autres leviers que la morphologie du réseau peuvent être responsables de cette condition : la localisation des activités par

¹⁰² « *The complexities of shape and structure set street pattern apart from many other objects of urban or transport analysis (...) there is no straightforward or standard descriptor that is used to capture street pattern* » (Marshall, 2005, p. 73).

exemple, la densité bâtie, ou encore les aménagements sur le réseau (la localisation des feux tricolores par exemple).

Cela nous incite à dire que la comparaison, lorsqu'elle porte sur des cas empiriques, ne permet pas d'isoler le rôle de la morphologie du réseau viaire sur les conditions d'accessibilité. Une autre méthode consiste à se détacher des cas empiriques, et à modéliser des déplacements sur des réseaux fictifs. Les modèles sont souvent décrits comme des laboratoires virtuels car ils permettent de fixer artificiellement certains facteurs pour isoler l'effet d'autres facteurs sur le phénomène étudié. Nous présentons cette approche par la modélisation dans la section ci-dessous.

II.2.2.2. L'approche par la modélisation des déplacements

Dans l'article *An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns*, Xiongbing Jin et Roger White (2012) ont développé un modèle de simulation des déplacements et du trafic (*trip and traffic simulation model*) prenant en considération les caractéristiques individuelles des usagers, leurs préférences et les interactions entre piétons et trafic automobile, tout ceci afin de reproduire les déplacements réels. Ce modèle a été calibré grâce à des données empiriques sur le trafic dans la ville d'Ottawa (Ontario). Ce modèle a ensuite été utilisé pour simuler des déplacements sur un ensemble de réseaux viaires à la morphologie type : des réseaux en grille, des réseaux hiérarchisés, et des dits néo-traditionnels (Nouvel urbanisme). Ils ont ensuite analysé en sortie plusieurs variables, et en particulier les distances moyennes à parcourir pour accéder aux aménités dans chacun de ces réseaux, pour les piétons et pour les véhicules. Leur analyse devait donc permettre d'observer **l'effet de la morphologie du réseau sur les distances à parcourir dans le réseau**. Leurs résultats montrent notamment que les réseaux hiérarchisés induisent des distances à parcourir nettement plus élevées que les réseaux en grille, pour les piétons comme pour les véhicules. Néanmoins, les auteurs ajoutent que les résultats obtenus dépendent notamment de l'implémentation du modèle, autrement dit des règles utilisées pour reproduire les caractéristiques des usagers, leurs préférences, et les interactions entre piétons et automobiles. Ces règles ont une influence sur les comportements de mobilité simulés, comportements qui sont ensuite utilisés pour calculer la variable des distances à parcourir pour accéder aux aménités.

Autre exemple, Rifaat, Tay et de Barros dans leur article intitulé *Effect of street pattern on the severity of crashes involving vulnerable road users* (2011), se proposent d'étudier l'effet des caractéristiques morphologiques du réseau sur la sévérité des accidents de la route, donc sur la sécurité offerte aux usagers. Ils modélisent pour cela les déplacements sur quatre types de réseaux viaires, grâce à un modèle basé sur des données de la ville de Calgary (Canada) entre 2003 et 2005. Leurs résultats montrent notamment que **les accidents sont plus fréquents dans**

les réseaux hiérarchisés que dans les autres réseaux, mais que ces accidents y sont aussi moins graves. Néanmoins, ici aussi, les auteurs insistent sur l'effet d'autres facteurs influant sur la sévérité des accidents, tels que les caractéristiques du conducteur et du véhicule, ou encore les conditions environnementales. Ainsi, même les travaux qui semblent *a priori* porter une attention particulière au rôle du facteur « morphologie du réseau » finissent souvent par nuancer ce rôle et par mettre en avant le poids d'autres facteurs explicatifs.

En conclusion, il semble que les travaux qui modélisent des déplacements réels échouent à isoler l'effet de la morphologie du réseau viaire sur les conditions d'accessibilité, car les résultats de ces travaux sont dépendants de la manière dont les déplacements ont été modélisés. Une troisième approche consiste à complètement se détacher des déplacements sur le réseau, et à décrire les caractéristiques des chemins qui relient les points de ce réseau. Nous présentons succinctement cette approche ci-dessous.

II.2.2.3. Décrire les caractéristiques des chemins sur le réseau

Un chemin est un espace parcouru ou à parcourir d'un lieu à un autre (CNRTL). Un réseau viaire peut être vu comme un ensemble de chemins qui relient les lieux d'une ville, d'un quartier. Les caractéristiques de ces chemins rendent directement compte de l'implication du réseau dans les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Par exemple, si les chemins qui relient les différents lieux d'une ville sont courts, cela signifie que le réseau viaire de cette ville, de par sa morphologie, permet une proximité dans les déplacements. A l'inverse, si ces chemins sont longs, cela signifie que le réseau de par sa morphologie rallonge les distances. On retrouve un exemple de cette approche dans l'ouvrage de Peter Haggett et Richard Chorley (1969), intitulé *Network analysis in geography*. Les auteurs y comparent par exemple la longueur du chemin entre deux points dans un réseau en grille, à la longueur du chemin entre ces mêmes points si le réseau était composé de voies radiales (cf figure 3.18). Cela permet de comparer directement ces deux réseaux en termes de proximité offerte aux usagers.

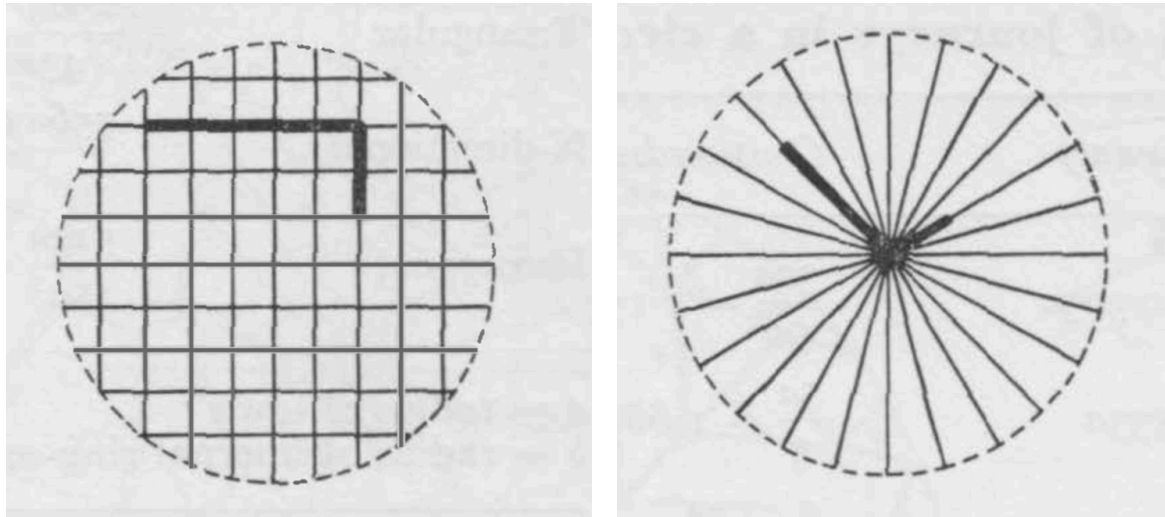


Figure 3.18 : Comparaison de la longueur du chemin entre deux points, sur un réseau en grille à gauche, et un réseau radial à droite. Source : Haggett et Chorley (1969) d'après Holroyd (1966).

La longueur des chemins n'est pas leur seule caractéristique. Haggett et Chorley présentent plusieurs autres caractéristiques, qu'ils évaluent grâce à des mesures quantitatives calculées directement sur le réseau. Cette approche fait partie d'un champ scientifique bien établi, connu sous le nom d'Analyse des réseaux (*Network analysis*). Ce champ porte sur l'étude des caractéristiques des réseaux, qu'il s'agisse de réseaux viaires ou routiers, de réseaux aériens ou maritimes, ou encore de réseaux sociaux. Ce champ nous apparaît comme une piste intéressante, pour étudier **l'implication d'un réseau viaire dans les conditions d'accessibilité offertes aux usagers se déplaçant sur ce réseau.**

Conclusion de la partie II

Cette partie nous a permis de mettre en exergue certaines faiblesses dans l'argumentation des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, quant au lien entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Selon Marshall (2005), ces faiblesses rendent difficiles la mise en place de préconisations robustes et généralisables. Nous avons également vu que, du côté des chercheurs, cette question était assez peu abordée de manière satisfaisante, à l'exception des travaux ayant recours à l'Analyse de réseaux (*Network analysis*). Ces derniers permettent de décrire les **caractéristiques des chemins formés par le réseau viaire**. Nous avons montré à travers un exemple comment ces caractéristiques des chemins pouvaient rendre compte de l'implication du réseau viaire dans les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Nous développons davantage cet aspect dans le chapitre 4.

III. Proposition pour explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers

Notre objectif principal est d'explorer **la relation entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers**. L'état de l'art de la partie I a révélé l'existence de plusieurs points de vue contradictoires parmi les théoriciens et praticiens de l'urbanisme quant aux qualités portées par telle ou telle caractéristique morphologique des réseaux. Cela renforce la nécessité, soulignée par plusieurs auteurs (Dupuy 1985; Crane 1996; Genre-Grandpierre 2001; Foltête, Genre-Grandpierre, et Josselin 2008; Zhang et al. 2011), de mettre au point une méthode formalisée, pour évaluer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité.

Les conclusions des premières parties de ce chapitre nous mènent à décliner notre objectif principal en trois sous-objectifs :

1. Les travaux discutés dans la partie I ont montré que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme présentent les mérites ou les défauts, en matière de conditions d'accessibilité, de certaines caractéristiques morphologiques des réseaux : des voies droites, courbes ou encore brisées ; des réseaux hiérarchisés, en grille, ou symétriques ; des intersections fréquentes ou espacées, et bien d'autres caractéristiques. Dit autrement, ce sont ces caractéristiques qui sont supposés agir sur les conditions d'accessibilité. Cela nous mène à formuler un **premier sous-objectif, qui est de décrire précisément les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires**.

Nous avons également souligné dans la section II.1.1 que l'une des raisons de la faiblesse d'argumentation dans les préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, était le **manque d'harmonisation dans les termes utilisés lors de ces préconisations**. Ce manque d'harmonisation engendre de l'ambiguïté quant aux caractéristiques morphologiques recherchées. Pour pallier cela, nous suggérons de décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux au moyen de mesures quantitatives, telle que le nombre d'intersections suivant leur type (cf section II.1.4). Ainsi, pour atteindre notre premier sous-objectif, nous aurons recours à **des mesures quantitatives qui permettent de décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires**.

2. Par ailleurs, la section II.2.2 a montré la nécessité, pour atteindre notre objectif principal, de parvenir à isoler le rôle de la morphologie du réseau dans l'accessibilité, de celui d'autres facteurs. Cela nous mène à **un second sous-objectif, qui est de mettre au point une méthode pour identifier les conditions d'accessibilité portées uniquement par la morphologie d'un réseau viaire**. Pour atteindre cet objectif, l'état de l'art de la section II.2.2 suggère de nous détacher des

déplacements réels, et de choisir une approche basée sur la **description des caractéristiques des chemins sur le réseau** (leur longueur par exemple). Ces caractéristiques des chemins peuvent être considérées comme des révélateurs des qualités « naturelles »¹⁰³ de ce réseau en matière d'accessibilité, ses forces et faiblesses intrinsèques.

3. Le troisième sous-objectif est celui qui permettra de répondre à notre objectif principal. Il consiste à **identifier comment chacune des caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire agit sur les conditions d'accessibilité**. Pour mener à bien ce sous-objectif, nous allons **analyser la relation entre les mesures décrivant les caractéristiques morphologiques des réseaux et les mesures décrivant les conditions d'accessibilité portées par ce réseau**, c'est-à-dire celles décrivant les caractéristiques des chemins de ce réseau. Notre hypothèse est que **des caractéristiques morphologiques proches offriront des conditions d'accessibilité proches**.

Notre travail visera notamment à explorer certains questionnements issus de la revue de la littérature :

- les réseaux en grille permettent-ils plus de simplicité dans les déplacements ? et si oui, lesquelles de leurs caractéristiques morphologiques permettent cela ?
- les réseaux hiérarchisés permettent-ils une fluidité des déplacements ? et si oui, quelles caractéristiques morphologiques en sont responsables ?
- les réseaux denses et compacts permettent-ils plus de proximité entre les différents lieux d'une ville ? et si oui, qu'est-ce qui, dans leurs caractéristiques morphologiques, permet cela ?

Pour répondre à ces questionnements, nous proposons une démarche en trois temps (cf figure 3.19):

- 1. Décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires ;**
- 2. Décrire les conditions d'accessibilité portées par ces réseaux ;**
- 3. Décrire la relation entre les deux.**

¹⁰³ Nous empruntons ce terme à Foltête, Genre-Grandpierre, et Josselin (2008).

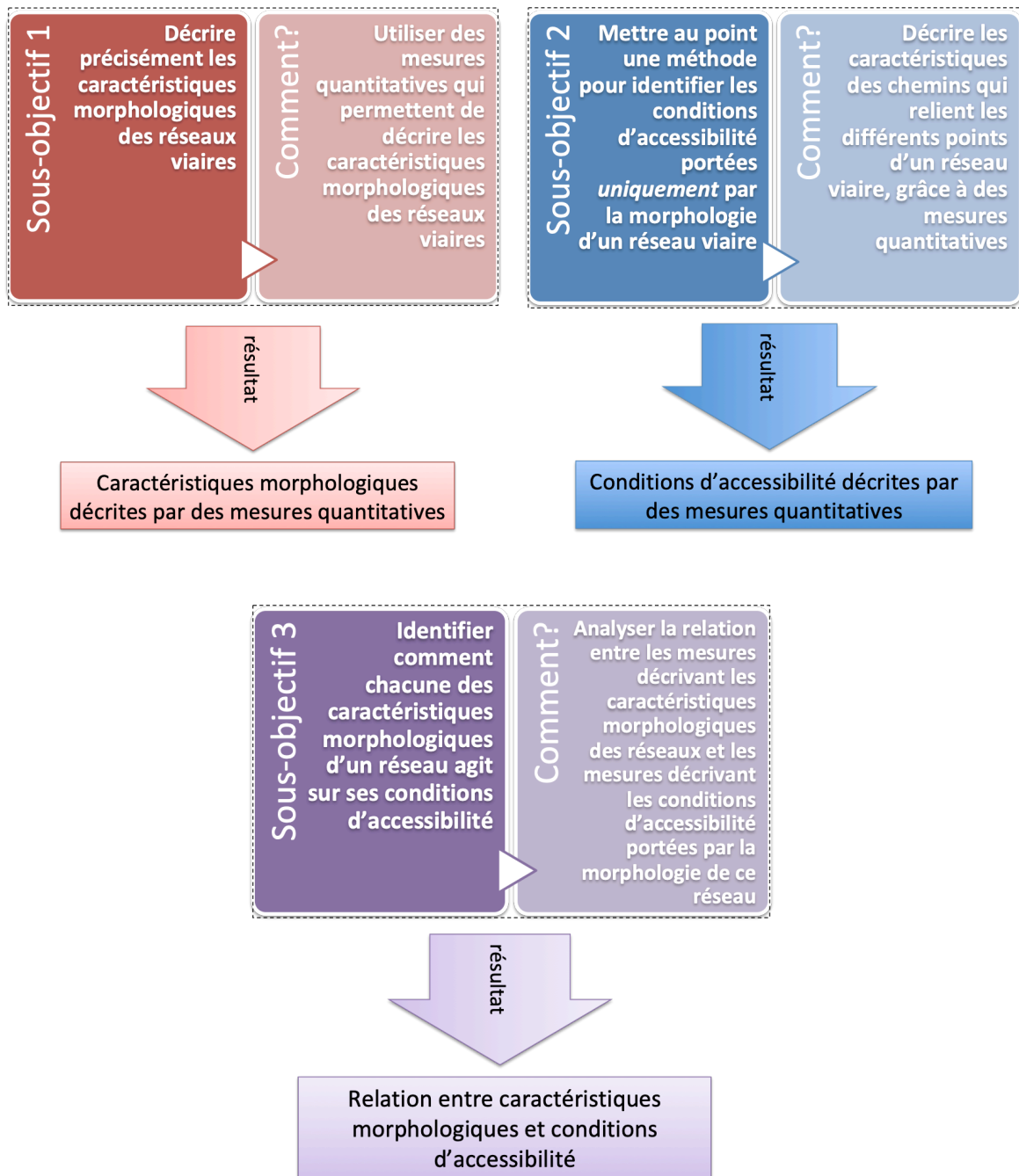


Figure 3.19 : Schéma résumant les trois sous-objectifs, la manière de les atteindre, et le résultat attendu.

IV. Choix d'un ensemble de préconisations

L'état de l'art de la partie I permet de constater que parmi les préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité, certaines sont particulièrement fréquentes, à tel point qu'on pourrait les qualifier de *typiques*. Par exemple, plusieurs théoriciens et praticiens préconisent des voies droites et larges, des réseaux en grille, hiérarchisés, denses, ou encore symétriques. Nous choisissons de nous concentrer sur un ensemble de

préconisations *typiques*, car celles-ci rendent compte de théories et de pratiques fréquentes en urbanisme. L'objectif en faisant ce choix est de pouvoir avoir un retour critique sur les préconisations faites en urbanisme : ont-elles réellement l'effet escompté sur les conditions d'accessibilité ? Dit autrement, nous voulons vérifier si nos résultats sur les conditions d'accessibilité des réseaux étudiés coïncident avec ce qui est décrit en urbanisme.

Ainsi, notre exploration de la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers prendra appui sur un ensemble de préconisations typiques. Celles-ci seront choisies d'une part parce qu'elles sont largement évoquées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme mentionnés en partie I, et d'autre part parce qu'elles sont fréquentes dans les cas empiriques, autrement dit dans les réseaux viaires existants. Ce second point permettra par la suite de choisir des cas d'étude empiriques représentatifs de ces préconisations typiques. Ce sera l'objet du chapitre 5.

IV.1. Des préconisations typiques

IV.1.1. Une définition souple du « type »

Avant de présenter les préconisations typiques sur lesquelles portera notre travail, il convient de préciser notre acception du concept de « type », en le différenciant de celui de « modèle ». Ces deux concepts ne doivent pas être confondus. Selon Merlin et Choay (1996), le modèle est « l'instrument d'une méthode de conception et de production de l'espace bâti », il dérive de la démarche utopiste. Il consiste en « un plan standard élaboré *a priori* pour promouvoir un ensemble de conditions sociales et matérielles tenues pour universellement valables : c'est un objet définitif et, par définition reproductible, quel que soit le contexte physique et social de son application ». De son côté, « le mot type présente moins l'image d'une chose à copier ou à imiter complètement, que l'idée d'un élément qui doit lui-même servir de règle au modèle » (Quatremere de Quincy (1832, *cité dans* Rossi (2006, p. 33)). Ainsi, comme l'explique l'architecte français Quatremere de Quincy : « le modèle entendu dans l'exécution pratique de l'art, est un objet qu'on répète tel qu'il est. Le type est, au contraire, un objet d'après lequel chacun peut concevoir des ouvrages qui ne se ressembleraient pas entre eux ». Il conclut « tout est précis et donné dans le modèle, tout est plus ou moins vague dans le type » (*ibid*).

Ainsi, nous choisissons d'adopter une certaine souplesse dans la définition des préconisations typiques. Pour nous, chaque préconisation typique doit avoir des **caractéristiques suffisamment précises pour lui conférer une identité propre, mais aussi suffisamment larges pour qu'une multitude de réseaux viaires ou d'intervention puissent y correspondre.**

IV.1.2. Quatre préconisations typiques

La revue de la littérature dans le chapitre 1 et la partie I de ce chapitre amènent à sélectionner quatre préconisations typiques, fréquemment mentionnées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Trois d'entre elles consistent à préconiser la conception d'un réseau à la morphologie typique, la quatrième consiste en une intervention sur la morphologie d'un réseau existant.

Le premier réseau à la morphologie typique que nous choisissons est le « **réseau organique** ». Il est notamment préconisé par Camillo Sitte. Le second type est prôné dès l'Antiquité par Hippodamos de Milet, et plus tard par des urbanistes tels que Ildefons Cerdà ou Franck Lloyd Wright. Nous le désignons comme « **réseau quadrillé** ». Enfin, le troisième type est particulièrement prôné au XXe siècle, notamment par Stein, Wright et Sewell Cautley avec le modèle Radburn, et dans les *Planned Unit Development* des années 1960. Nous le désignons comme un « **réseau arborescent** ». Les schémas ci-dessous (figure 3.20) donnent un aperçu de chacun de ces types.

La quatrième préconisation sur laquelle portera notre travail est la **création de percées configurées en étoile, dans un réseau viaire existant**. Il s'agit donc de préconiser une intervention sur la morphologie d'un réseau existant, plutôt que de concevoir un réseau à la morphologie typique. Nous verrons dans la section IV.5 ci-dessous que la création de percées configurées en étoile était une préconisation majeure aux XVIIe et XVIIIe siècles, et qu'elle a donné lieu à plusieurs réalisations concrètes.

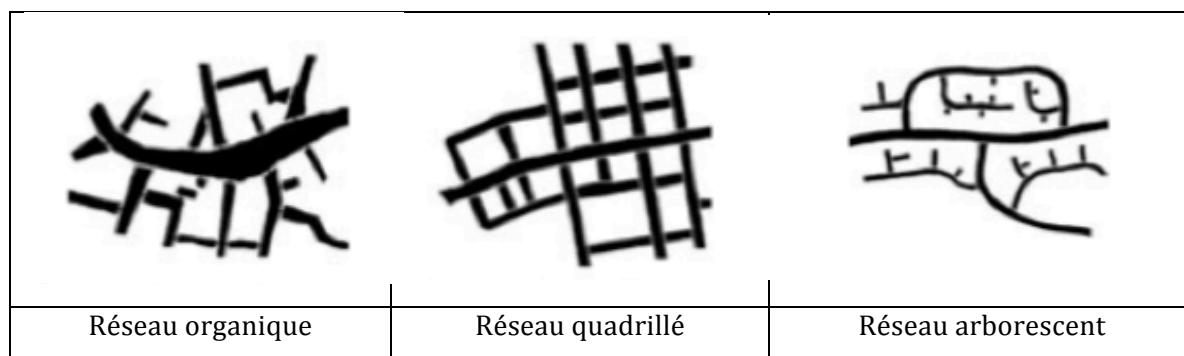


Figure 3.20 : Schémas représentant les trois types de réseaux sélectionnés. Source : Marshall (2005).

Avant de poursuivre, il convient de signaler que le type organique diffère des deux autres réseaux typiques (quadrillé et arborescent), dans la mesure où il n'est pas issu d'une construction « volontaire », planifiée de la part des théoriciens et praticiens de l'urbanisme (ce qui est souvent le cas pour les deux autres types). Néanmoins, le type organique figure, comme les deux autres types de réseau, parmi les préconisations faites en urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité

dans un réseau viaire. Nous choisissons donc de l'inclure aux réseaux typiques sélectionnés.

Le tableau 3.2 regroupe les préconisations typiques choisies. Dans les sections suivantes, nous allons présenter les trois réseaux typiques choisis (organique, quadrillé et arborescent) et la création de percées configurées en étoile, en décrivant d'abord les contextes spatiaux et temporels durant lesquels ces réseaux et interventions ont été les plus répandus¹⁰⁴, puis en spécifiant les caractéristiques morphologiques, et les conditions d'accessibilité qui leur sont attribuées dans la littérature. Cette fois-ci, nous aurons recours aussi bien aux travaux des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, qu'à la littérature scientifique, ce qui nous permettra de décrire précisément chacune de ces préconisations.

Catégorie de préconisation	Préconisation
Des réseaux à la morphologie typique	Réseaux organiques
	Réseaux quadrillés
	Réseaux arborescents
Des interventions sur la morphologie d'un réseau existant	Création de percées configurées en étoile

Tableau 3.2 : Tableau synthétisant les préconisations typiques choisies pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité.

IV.2. Les réseaux organiques

IV.2.1. Présentation

Ce premier type de réseau est caractéristique des centres historiques des villes européennes, resserrées et faites de proximités (Haumont, 1993) (cf figure 3.21). Il se caractérise par son irrégularité. Celle-ci peut s'expliquer par le fait que, en l'absence de règles d'urbanisme réglementant la voirie, **le réseau viaire correspond à l'espace résiduel laissé entre les bâtiments**¹⁰⁵. Pour d'autres auteurs, cette irrégularité est typique des réseaux créés par à-coups, de manière progressive, spontanée et sans plan d'ensemble. Magali Watteaux (2014) les décrit en ces termes : « il s'agit de réseaux de formes non planifiées qui ressortent de logiques de structuration s'inscrivant dans la très longue durée et que l'on étudie de

¹⁰⁴ Nous nous limitons toutefois au contexte européen et nord-américain.

¹⁰⁵ C'est pour cela qu'une réglementation apparaît dès le Moyen-Age, visant à régulariser le cours des voies, et à empêcher les propriétaires d'empiéter sur l'espace public (Stransky, 1995, p. 118).

ce fait sous l'angle des systèmes auto-organisés » (p. 181). Dans la même optique, Porta, Crucitti, et Latora (2006) expliquent que l'organisation des vieux quartiers « n'est pas visible au premier coup d'œil, n'est pas imposée par un grand ordonnateur, mais résulte d'une accumulation de petits détails, de contributions cumulatives par une foule d'acteurs temporels, chacun suivant sa propre trajectoire ». Watteaux ajoute : « nous ne percevons ces réseaux que par le résultat de leur organisation, visible sur les cartes et les photographies aériennes, à savoir par une forme stable qualifiée de structure mais dont la fixité n'est qu'apparente puisque cette organisation en réseau est le produit d'un processus **d'interactions entre les composantes du paysage** » (p. 181). Sur ce dernier point, Douady (2014) soutient que l'irrégularité de ces réseaux vient d'une adaptation « aux grandes lignes du relief et de l'hydrographie » (p. 53). Par exemple, si la topographie du site est accidentée, la conception de réseaux quadrillés est difficile en raison du dénivelé entre deux voies parallèles. Les voies sont alors conçues suivant des directions variées, perpendiculaires aux courbes de niveau ou en lacets.

Après avoir été longtemps décrié, le caractère désordonné de ces réseaux est revalorisé en urbanisme depuis le début des années 1960, au nom de la « magie » des vieilles villes. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, cela s'est fait sous l'impulsion de théoriciens et praticiens de l'urbanisme tels que Jane Jacobs, et grâce à la relecture de textes comme ceux de Camillo Sitte, qui dès 1889, préconisait un retour à l'esthétique sociale des entrelacs médiévaux (1889, *citée dans* Porta et al. (2006)).

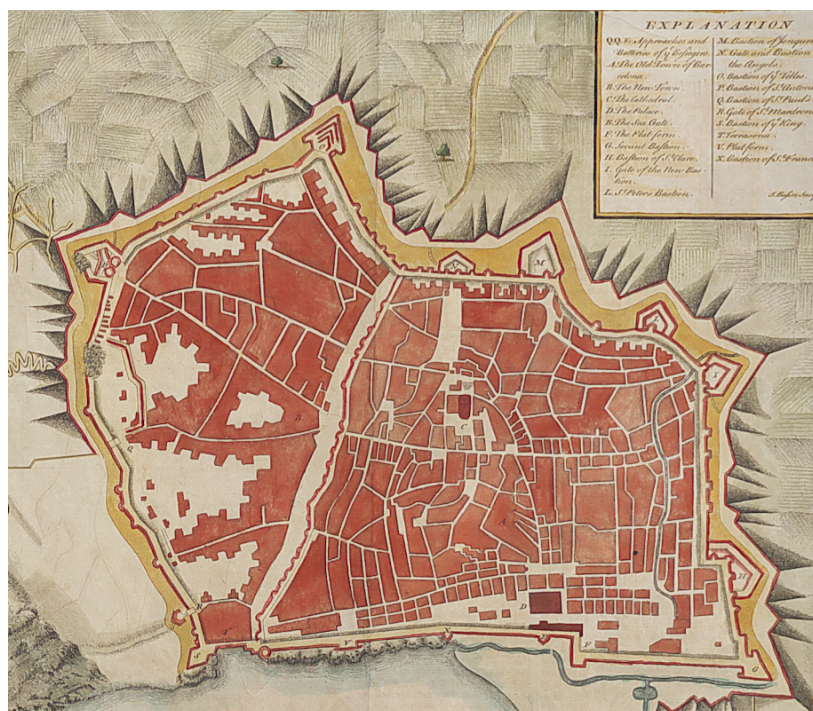


Figure 3.21 : Extrait du plan de la ville de Barcelone, tracé par Paul Rapin de Thoyras en 1740. Source : Time-for-maps.tumblr.com

Dans la littérature anglophone, ce type de réseau est souvent qualifié d'auto-organisé (Buhl et al. 2006; Rui et al. 2013; Masucci et Molinero 2016), ce qui signifie qu'il est conçu sans autorité planificatrice. Bien que cela soit généralement le cas, nous pensons que le terme « auto-organisé » n'est pas suffisant pour désigner ce type de réseau, car même des réseaux quadrillés peuvent être conçus sans autorité planificatrice (Caniggia 1994; Moreno 2009) (cf section IV.3). Pour notre part, nous choisissons le terme organique, utilisé notamment par Douady (2016) et Shpuza (2009), car celui-ci rend compte à la fois de l'auto-organisation qui génère ce type de réseau, mais aussi de son aspect irrégulier, rappelant les formes de la nature.

IV.2.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux organiques

Une variété des réseaux viaires peuvent être considérés comme organiques. Le réseau de Brive avant son expansion hors-les-murs par exemple a un aspect radioconcentrique, fréquent dans les villes ceinturées (cf figure 3.22). Le réseau de Londres en revanche comprend de longues voies de circulation qui lui donnent un aspect linéaire (cf figure 3.23). Malgré cette variété, l'observation d'un grand nombre de plans de ce type, associée à une revue de la littérature, nous permettent d'identifier dans ces réseaux certaines caractéristiques morphologiques communes.

A une échelle territoriale, ces réseaux sont souvent de type radio-quadrillé, c'est-à-dire qu'ils associent « un réseau radial (...) et un quadrillage souple, d'extension le plus souvent supracommunale » (Watteaux, 2014, p. 181). Mais à l'échelle intra-urbaine, qui est celle qui nous intéresse, leur morphologie est irrégulière. Pour Camillo Sitte, ce type de réseau se caractérise par un dédale de rues, une brisure des artères, une irrégularité du plan, et un enchevêtrement d'intersections et de places (1889, *citée dans* Pellegrino et al. (1999)). De son côté, Marshall (2005) décrit les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires d'une part à travers leur « composition »¹⁰⁶ et d'autre part à travers leur « configuration »¹⁰⁷. Pour Marshall, la composition des réseaux organiques est irrégulière, les voies sont **courtes (donc rapprochées) et tortueuses**, ce qui peut s'expliquer par la topographie de leur site. **Leur largeur et leur orientation sont variables**. Du point de vue de la configuration, on retrouve dans ces réseaux des **intersections en T mais aussi en X**, quelques **culs-de-sac**, et une **connectivité modérée** entre les voies (Marshall, 2005). Le grand nombre d'intersections en T dans ces réseaux s'explique du fait que les voies ne sont pas toujours alignées les unes aux autres : de grands axes peuvent buter sur du bâti.

¹⁰⁶ Rappelons que la composition renvoie pour Marshall à la **géométrie** réelle du réseau, qui respecte le positionnement des voies et des jonctions, les longueurs et largeurs de voies, leur orientation, leur courbure.

¹⁰⁷ La configuration désigne pour Marshall la **topologie** du réseau, telle que représentée de manière abstraite par des liens et des nœuds (comme dans le plan d'un métro par exemple).



Figure 3.22 : Reconstitution du plan de Brive (France) avant son expansion hors-les-murs.
Source : Douady (2016).



Figure 3.23 : Plan de Londres en 1677, tracé par John Ogilby, William Morgan, Wenceslaus Hollar, intitulé *The first accurate and detailed map of London*, Source : British library.

IV.2.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux organiques

Les réseaux organiques sont surtout décrits pour leur capacité à permettre des déplacements courts en distance. Haumont (1993) décrit la ville traditionnelle européenne, où était fortement répandu ce type de réseau, comme une ville faite de proximités. C'est également ce qu'affirme Jane Jacobs (1961), pour qui les réseaux organiques réduisent les distances à parcourir. Pourtant, ces réseaux se caractérisent par des rues tortueuses, brisées, qui, de l'avis de Léonce Reynaud (1850, *cité dans* M.P (1989)), rallongent au contraire les distances. Ce type de rues est également critiqué par Le Corbusier (1923, *cité dans* Choay (1965)), elles correspondent pour lui au « chemin des ânes ». Le Corbusier critique plus généralement les réseaux organiques des villes traditionnelles, qui selon lui génèrent de l'encombrement, donc empêchent la fluidité des déplacements. Cette idée est reprise par Pierre Patte (1759 *cité dans* M.P (1989)), pour qui la ville traditionnelle européenne est victime de l'encombrement, car elle n'est qu'un « amas de maisons distribuées sans ordre, sans entente d'un plan total convenablement raisonné ». L'abbé Laugier (1753, *ibid*) de son côté déplore que, dans cette ville aux petites rues étroites et tortueuses, « la rencontre des voitures cause à tout instant des embarras ».

De son côté, Haumont (1993) déplore que les débouchés d'un quartier à un autre soient assez peu développés dans ce type de réseau : « l'impression dominante est celle d'une division des villes en petites aires d'emploi, du moins jusqu'au moment où les réseaux de transports en commun vont désenclaver les déplacements intra-urbains ». Il ajoute, citant Pierre Patte : « à Paris des quartiers entiers n'ont presque pas de communications les uns avec les autres » (1765 *cité dans* Haumont (1993)). Ces citations suggèrent que les réseaux organiques ne favorisent ni l'isotropie, ni la continuité des déplacements. Le schéma ci-dessous (figure 3.24) synthétise les conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux organiques.

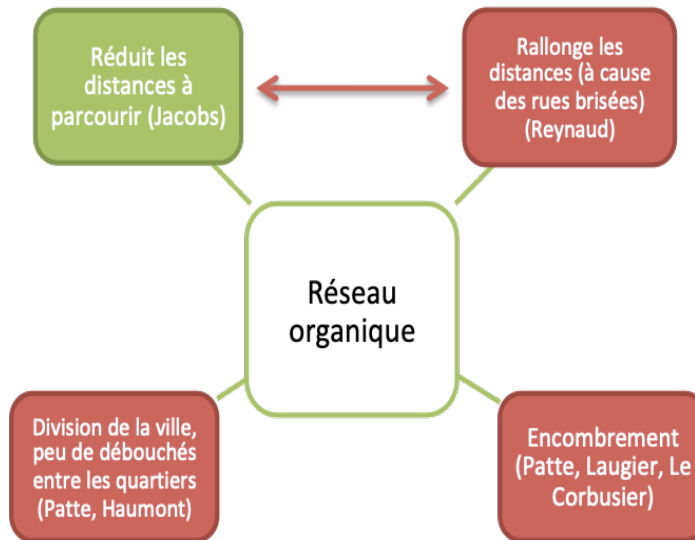


Figure 3.24 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux organiques par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots).

Les conditions « positives » sont en vert et les « négatives » sont en rouge. Les doubles flèches sont utilisées pour indiquer des contradictions entre les auteurs.

IV.3. Le réseau quadrillé

IV.3.1. Présentation

Les réseaux quadrillés s'observent aussi bien dans les centres villes, dans les extensions, qu'à l'échelle d'une ville toute entière (Marshall, 2005). Pour Marshall, ce type de réseau correspond à l'ère du cheval et du chariot, mais nous avons vu dans le chapitre 1 que les réseaux en grille étaient utilisés dès l'Antiquité. Les réseaux quadrillés correspondent à une tradition forte aux Etats-Unis. Au XVIIIe siècle, le *Public Land Survey System* généralise le quadrillage du territoire, donc la division du foncier, selon une grille orthogonale prenant comme référence des parallèles à l'équateur et des méridiens. Ce système fut utilisé dans les trois-quarts du territoire des Etats-Unis dès la fin du XVIIIe siècle.

Les réseaux quadrillés prédominent aussi à l'échelle des villes américaines¹⁰⁸, en particulier jusqu'à la Seconde guerre mondiale (Southworth et Owens, 1993), lorsque les déplacements à pied étaient fréquents, et les automobiles peu nombreuses (cf figure 3.25). Ces plans ont également été utilisés dès 1850 dans les premiers lotissements suburbains américains desservis par le tramway

¹⁰⁸ Jackson (1987) dresse un historique des plans orthogonaux utilisés dans les villes américaines. Il explique notamment que la ville de Philadelphie adopte un plan en damier dès 1682, Savannah en 1733, et New York en 1811.

(Grammenos et al., 2001). Ces lotissements quadrillés¹⁰⁹, construits le long d'une ligne de tramway ou à proximité, étaient très courants avant 1945 (Cervero et Gorham, 1995). Nous verrons dans la section IV.4 qu'ils seront moins utilisés après la propagation de l'automobile.

La prédominance de ce type de plan aux Etats-Unis s'explique par plusieurs raisons : le système de voies droites et orthogonales facilite l'arpentage, réduit les risques de conflits sur les limites des lots, maximise le nombre de maisons donnant sur rue, et marque les villes américaines de lots standards, souvent d'environ 7 mètres de largeur et 30 mètres de profondeur (Jackson, 1987). Il vise également à refléter « ordre et culture » dans un territoire perçu comme sauvage (Ghorra-Gobin, 1998, p. 22). Enfin, comme le souligne John Randel, l'auteur en 1811 du *Commissioners Plan* de Manhattan, les réseaux orthogonaux facilitent « l'achat, la vente et l'optimisation de l'immobilier » (*cité dans* Jackson (1987))¹¹⁰. Ces plans étaient censés faciliter les divisions spéculatives des lots. Southworth et Owens (1993) parlent d'ailleurs de « grille spéculative » (*speculative gridiron*).

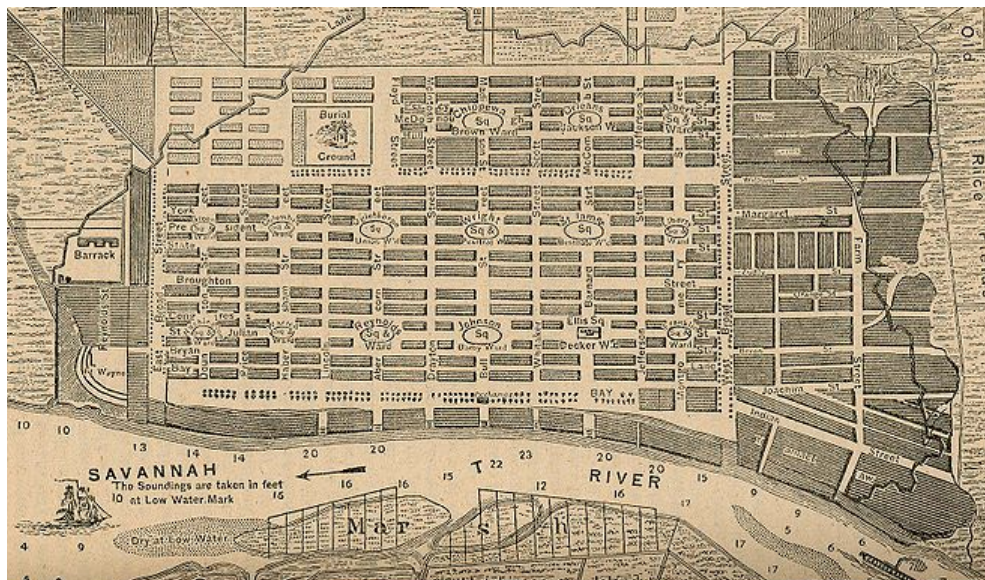


Figure 3.25 : Extrait du plan de Savannah en 1818, tracé par Moss Eng. Co. Source : Entrée « Oglethorpe Plan » sur Wikimedia.

Douady (2014) constate que le quadrillage rigoureusement orthogonal est souvent privilégié dans l'analyse de la trame urbaine, mais plus limité dans la réalité observable sur le terrain. En effet, même à la période antique, le schéma orthogonal était en réalité moins contraignant qu'on a pu le penser autrefois : « mieux vaut considérer les « écarts » à ce schéma, non pas comme des anomalies, mais comme des variantes et des adaptations, révélant la « fabrique de la ville » et son évolution » (Hermenault, 2017, p. 35). Certes, des réseaux rigoureusement orthogonaux existent, mais ils supposent une « autorité en mesure de commander

¹⁰⁹ Ils sont qualifiés dans la littérature de *streetcar suburbs* ou de *transit neighborhoods*.

¹¹⁰ « *Buying, selling, and improving real estate* ».

un tel projet puis de le faire appliquer dans la durée nécessaire à sa réalisation, puis d'assurer son maintien à travers le temps » (Douady, 2014, p. 53). Cette idée est reprise par Moreno (2009), pour qui les plans réguliers tels que le plan orthogonal hippodaméen sont attribués à des civilisations urbaines ayant fait l'effort de se doter de structures d'urbanisme directives, le plan s'imposant aux bâtisseurs ultérieurs. En revanche, des réseaux orthogonaux plus souples, éventuellement conçus sans autorité planificatrice, s'observent dans de nombreux réseaux viaires. Il peut par exemple s'agir d'un réseau orthogonal dont la régularité est contrariée par un élément naturel ou artificiel (voie de chemin de fer, rivière, fort dénivelé, ...). Douady (2014) les qualifie de « quadrillages souples » qui présentent une « meilleure adaptation au détail de la structure naturelle locale » (p. 53) (cf figures 3.26 et 3.27). Des réseaux orthogonaux irréguliers s'observent également lorsque deux ou plusieurs réseaux orthogonaux conçus selon des directions différentes, se rencontrent et s'articulent l'un à l'autre.

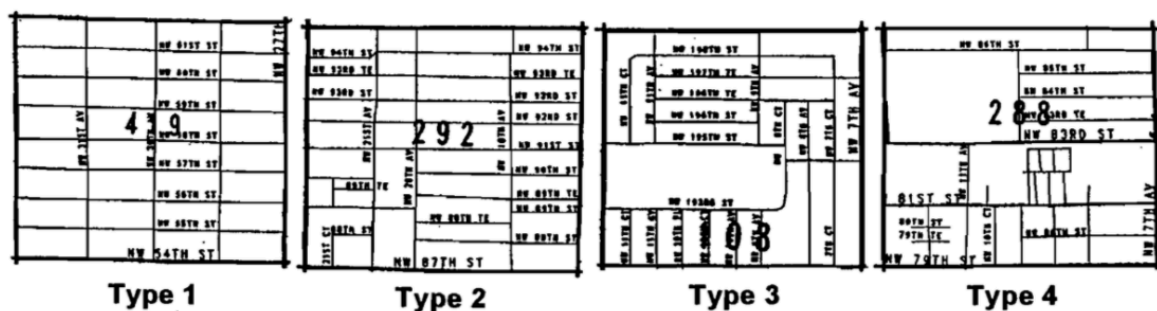


Figure 3.26 : Plans représentant des réseaux quadrillés classés du plus régulier au plus souple. Source : Ewing (1996).



Figure 3.27 : Schéma représentant un réseau au quadrillage souple. Source : McNally et Kulkarni (1997).

Les termes employés dans la littérature pour désigner ce type de réseau sont nombreux : quadrillé, orthogonal, en grille, en damier, hippodaméen. Pour l'historien de l'architecture Spiro Kostof (1991), le terme « Gridiron » renvoie à un réseau aux blocs longs et étroits, c'est-à-dire à maille rectangulaire. De son côté, le terme « checkerboard », donc « en damier », désigne pour lui un réseau aux blocs carrés. Enfin, le mot « grille » est pour lui un substitut pratique mais imprécis pour désigner la planification orthogonale. Pour notre part, nous choisissons l'expression « réseau quadrillé », qui permet d'inclure aussi bien les réseaux à maille carrée que ceux à mailles rectangulaire, les quadrillages rigoureux mais aussi les quadrillages plus souples.

IV.3.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux quadrillés

Southworth et Owens (1993) décrivent en ces termes les caractéristiques morphologiques des réseaux quadrillés (ils utilisent l'expression « gridiron ») : c'est un système simple composé de **deux séries de voies parallèles se coupant à angle droit**, pour former des blocs carrés ou rectangulaires. Ainsi, la présence d'angles droits est une caractéristique clef des réseaux quadrillés.

Autre caractéristique importante, les voies y sont souvent alignées les unes aux autres, ce qui forme **des intersections en X** (Zhang et al. 2011). A ce propos, Cervero et Gorham (1995), qui utilisent le terme « grille », proposent de classer dans cette catégorie les réseaux contenant plus de 50% d'intersections en X (à quatre voies). Ces réseaux se caractérisent également par des voies **droites** et **fortement interconnectées** (Zhang et al. 2011; McNally et Kulkarni 1997). La plupart de ces caractéristiques sont reprises par Marshall (2005), qui décrit d'une part la composition et d'autre part la configuration de ce type de réseau. Pour lui, leur composition est régulière, orthogonale, rectilinéaire, la largeur des rues est constante, et ces dernières ont deux orientations. Concernant la configuration, ces réseaux ont des intersections en X et une connectivité élevée.

Certains auteurs ont également décrit des caractéristiques dimensionnelles de ces réseaux, en particulier la dimension des mailles, donc l'espacement des voies. Lorsque la maille est rectangulaire, la double profondeur de parcelle offre, selon Douady (2014), une distance optimale d'espacement des voies. La longueur de l'îlot en revanche est plus libre. Lorsque la maille est carrée, comme dans le plan de Cerdà à Barcelone, l'espacement des voies peut être variable, mais une organisation particulière du cœur d'îlot est souvent nécessaire, des cours intérieures par exemple (Douady, 2014, p. 55).

IV.3.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux quadrillés

Pour les architectes David Mangin (2004) et Albert Pope (2012) (*cités dans* Gharbi (2016)), la continuité de l'espace public ne peut être matérialisée qu'à travers un

maillage continu de voies. Cela suggère que les réseaux quadrillés permettent une **continuité des déplacements**. Par ailleurs, les réseaux quadrillés sont souvent décrits pour leur capacité à favoriser ou au contraire à empêcher l'**isotropie** des déplacements. Ainsi, Ildefonso Cerda (1859, *cité dans* Lévy (1999)) et Frank Lloyd Wright (1934, *cité dans* Pellegrino et al. (1999)) affirment que ces réseaux permettent de répartir uniformément les déplacements. Cet avis n'est pas partagé par Léonce Reynaud (1850, *cité dans* M.P (1989)), qui soutient au contraire que les réseaux orthogonaux ne desservent correctement la circulation que dans deux directions : les deux directions perpendiculaires de la grille.

Les réseaux quadrillés sont également décrits pour leur capacité à favoriser ou à empêcher une orientation facile dans le réseau, donc une **simplicité des déplacements**. Laugier (1753) et Reynaud (1850) (*cités dans* M.P (1989)) suggèrent que ces réseaux sont source d'égarement, tandis que Chanowitz (2014) et Grammenos, Pogharian, et Tasker-Brown (2001) affirment au contraire qu'ils permettent de se repérer facilement.

Par ailleurs, selon Cerda (*cité dans* Lévy (1999)), les réseaux quadrillés en grille offrent une **accessibilité rapide** aux différents lots découpés par le plan. Pourtant, de nombreux auteurs affirment que, pour ce qui est des déplacements en véhicule, ces réseaux sont intrinsèquement propices à la congestion. Par exemple, Grammenos et ses collègues (2001) soulignent que les réseaux quadrillés ont nécessité de nombreuses modifications pour les adapter à l'automobile, telles que l'instauration de voies à sens unique et de feux tricolores. Selon eux, sans ces adaptations, la **congestion était inévitable**¹¹¹. McShane et Mocquot (1984) vont plus loin en affirmant que ces multiples adaptations n'ont pas permis de réduire les embouteillages dans de grandes villes comme New York. Malgré la mise en place au début du XXe siècle de feux tricolores, de sens giratoires, ou encore de panneaux stop, le réseau viaire de Manhattan demeure selon lui encombré. Certes ces adaptations favorisent la fluidité de la circulation sur les artères où elles sont mises en place, mais ces artères attirent aussitôt davantage de véhicules, ce qui crée de nouveaux embouteillages.

Pour Grammenos et ses collègues, la congestion observée dans les réseaux quadrillés est notamment due à l'effet « gridlock ». Celui-ci peut se produire dans un réseau quadrillé lorsque l'encombrement d'une voie est tel que des véhicules sont à l'arrêt au niveau de l'intersection entre cette voie et les autres. Ces autres voies se retrouvent encombrées à leur tour, y compris au niveau de leurs intersections. A termes, on obtient l'effet *gridlock* dans lequel toutes les intersections sont bloquées (cf figure 3.28).

¹¹¹ « *The traditional grid patterns that predate the automobile have required major adaptations such as one-way streets and traffic lights in order to achieve good automobile traffic flow. Without such adaptations, congestion is inevitable* ».

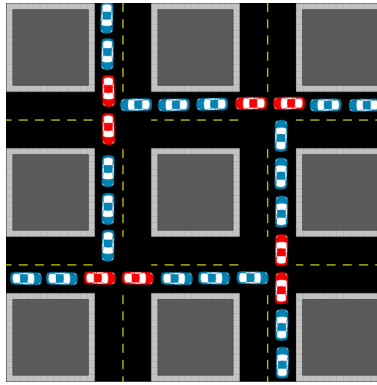


Figure 3.28 : Schéma illustrant l'effet « gridlock » : les véhicules en rouge à l'arrêt au niveau des intersections paralysent la circulation. Source : Entrée « Gridlock » sur Wikipédia.

Grammenos et ses collègues (2001) pointent également du doigt la **dangerosité** des réseaux quadrillés, qui rend indispensable la mise en place de feux tricolores, de panneaux stop, etc. Ces aménagements **empêchent les véhicules de prendre de la vitesse**. Cela mène Grammenos et ses collègues à conclure que les réseaux quadrillés compromettent soit la rapidité des déplacements, soit leur sécurité, soit les deux. Néanmoins, ces auteurs mettent également en avant certains avantages des réseaux quadrillés. Pour eux, ces derniers permettent des trajets à longue distance efficaces, et des accès à courte distance faisables pour les piétons¹¹². Cet avis est partagé par Southworth et Owens (1993), pour qui les réseaux quadrillés permettent des déplacements **plus courts** en distance que les réseaux arborescents (que nous abordons ci-après). Pour eux, cela en fait des réseaux parfaitement adaptés aux déplacements à pied. Le schéma ci-dessous (figure 3.29) synthétise les conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux quadrillés.

¹¹² « *Efficient long-distance commuting and convenient short-distance pedestrian access* ».

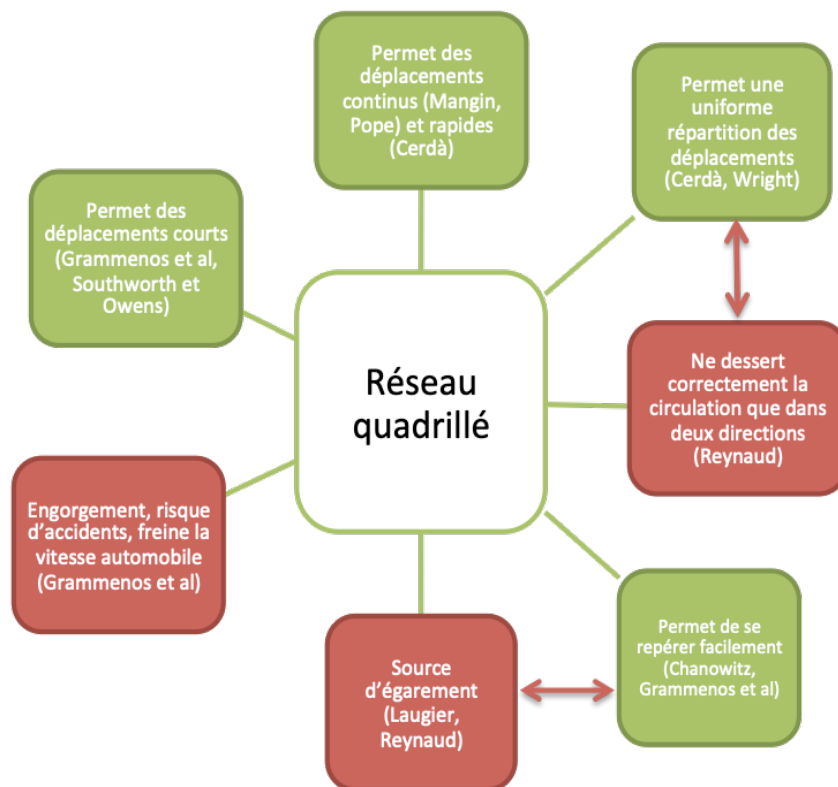


Figure 3.29 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux quadrillés par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots). Les conditions « positives » sont en vert et les « négatives » sont en rouge. Les doubles flèches sont utilisées pour indiquer des contradictions entre les auteurs.

IV.4. Le réseau arborescent

IV.4.1. Présentation

Ce type de réseau s'observe en particulier en périphérie des villes, par exemple en comblement dans certains espaces (Marshall 2005). Il correspond le plus souvent à l'ère de l'automobile. Cette idée est soutenue par Southworth (1997), pour qui le passage aux Etats-Unis des réseaux en grille aux réseaux arborescents traduit une adaptation au véhicule individuel. Pour Cervero et Gorham (1995), ces réseaux s'observent dans des quartiers datant d'après 1945, conçus pour l'automobile et sans prise en compte des transports collectifs, dans des espaces où ces derniers n'existent pas. Les réseaux arborescents sont en général rigoureusement planifiés, de manière à satisfaire certaines exigences, telles que la création d'enclaves pour satisfaire un besoin de sécurité et d'isolement, ou l'organisation de vues sur le paysage (Panerai et al., 1997) (cf figure 3.30).



Figure 3.30 : Image aérienne d'une banlieue suburbaine de Colorado Springs (Etats-Unis).
Source : Shankbone (2008, sur Wikimedia).

Selon Southworth et Owens (1993), les réseaux arborescents étaient assez peu étudiés jusqu'aux années 1990, les architectes et urbanistes les considérant comme ayant peu d'intérêt. Southworth et Owens se proposent de combler ce vide¹¹³, dans un article où ils étudient l'évolution du réseau viarie des banlieues étasuniennes entre 1940 et les années 1990¹¹⁴. Pour eux, les quartiers résidentiels depuis les années 1940 sont de plus en plus « déconnectés » de leur environnement physique : ils décrivent une augmentation du nombre de voies en culs-de-sac et de boucles, une diminution des voies de transit (*through streets*), et un réseau viarie organisé en entités autonomes avec seulement quelques points d'accès. L'un des apports de l'article de Southworth et Owens a été de montrer la **diversité des réseaux viaries dans les banlieues étasuniennes**. Plusieurs de ces réseaux peuvent être considérés comme arborescents. Nous en identifions deux : les réseaux en boucles et raquettes (*loops and lollipops*) utilisés dès 1970, et les réseaux en raquettes sur bâton (*lollipops on a stick*) utilisés à partir de 1980¹¹⁵ (cf figure 3.31).

¹¹³ Depuis, plusieurs travaux ont porté sur les réseaux viaries des banlieues américaines et européennes. Citons par exemple le projet ANR de Renaud Le Goix sur les banlieues franciliennes, intitulé *Interaction public-privé dans la production des espaces périurbains*.

¹¹⁴ Ils prennent pour cas d'étude des villes et des banlieues situées dans la baie de San Francisco.

¹¹⁵ L'évolution des réseaux des lotissements étasuniens n'est pas terminée. Selon Le Goix (2016), dans plusieurs municipalités (il cite l'exemple de *Ladera ranch*, dans le comté d'Orange) des politiques sont mises en œuvre en faveur de la compacité et de la densité, afin d'introduire des

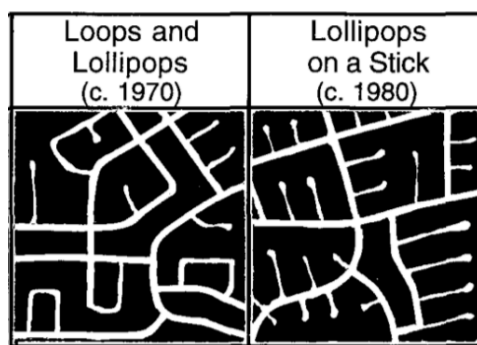


Figure 3.31 : Réseau en boucles et raquettes (*loops and lollipops*), et raquettes sur bâton (*lollipops on a stick*). Source : Southworth et Owens (1993).

Les réseaux arborescents sont souvent désignés par l'expression « réseaux hiérarchisés » dans la littérature en urbanisme¹¹⁶. Pourtant, même un réseau en grille peut être hiérarchisé (Marshall, 2005), comme le montre le plan d'Edimbourg conçu par James Craig en 1768. C'est la raison pour laquelle nous préférons le terme **arborescent**, qui présente un double avantage. D'une part il rend compte du caractère hiérarchisé de ces réseaux viaires, évoquant la forme d'un arbre avec un tronc et des branches. D'autre part il évoque les formes ondulantes de la nature, par opposition aux formes quadrillées de l'urbain (Jackson, 1987). Ces formes ondulantes sont présentes dans les réseaux arborescents, et plus généralement dans les banlieues suburbaines étasuniennes dès le XIXe siècle (cf chapitre 1).

IV.4.2. Les caractéristiques morphologiques des réseaux arborescents

Malgré la diversité des réseaux viaires arborescents, nous pouvons y distinguer certaines caractéristiques morphologiques communes, en nous basant notamment sur la revue de la littérature. Frederick Gibberd (1970, *cité dans* Marshall (2005), p. 63) décrit ce type de réseau en ces termes :

« Des rues principales filent entre les espaces urbanisés qui ressemblent à de grandes îles dans lesquelles le trafic de transit rapide ne passe pas. Chaque espace urbanisé est à son tour subdivisé par des voies qui donnent accès à ses principales parties (...) Il y a donc une série d'îles (...) plus ces îles sont petites et plus le trafic sur leurs voies est faible »¹¹⁷.

paysages bâtis plus resserrés, inspirées par le Nouvel Urbanisme. Néanmoins, l'auteur ajoute que ces formes restent minoritaires et n'affectent que marginalement les modalités de construction.

¹¹⁶ Nous avons parlé dans la partie I de réseaux morphologiquement hiérarchisés, pour désigner les réseaux composés d'une hiérarchie de voies (artères, collecteurs, culs-de-sac).

¹¹⁷ Citation originale : « *The main roads . . . should run between the areas leaving them as great islands free of fast through-traffic. Each built-up area will be sub-divided by the roads giving access to its*

Ainsi, bien qu'elle ne soit pas propre aux réseaux arborescents, la **hiérarchie** est une de leurs caractéristiques morphologiques. Cette hiérarchie est décrite par de nombreux auteurs (Grammenos et al., 2001; Jin, 2010; McNally & Kulkarni, 1997).

Du point de vue de la composition, les réseaux arborescents comprennent souvent des voies **courbes, circulaires, sinueuses**, et ce à tous les niveaux (Grammenos et al., 2001; Jin, 2010; McNally & Kulkarni, 1997). Ces voies forment souvent **des boucles et des culs-de-sac, ont une faible connectivité, et se croisent souvent par des intersections en T** (Cervero & Gorham, 1995; Jin, 2010; Marshall, 2005). Jin (2010) décrit également ces réseaux comme formant de larges îlots, **leurs voies sont donc espacées**. Enfin, McNally et Kulkarni (1997) ajoutent que les points d'accès à ces réseaux depuis l'extérieur sont en nombre limité.

IV.4.3. Les conditions d'accessibilité des réseaux arborescents

Levinson et Huang (2012) ont étudié les avantages et inconvénients offerts par la hiérarchisation des réseaux viaires. Comme les réseaux arborescents sont hiérarchisés, nous considérons que leurs propos peuvent s'appliquer à ce type de réseaux. Levinson et Huang expliquent que dans un réseau hiérarchisé, le *mouvement* est séparé de l'*accès*, ce qui rend l'un comme l'autre **plus sûrs**¹¹⁸. Cet avis est partagé par Grammenos et al. (2001), mais pas par l'urbaniste Jeff Speck (2017), pour qui ce type de réseau accroît le risque d'accidents. Levinson et Huang (2012) présentent également de nombreux inconvénients des réseaux hiérarchisés. Pour eux, ceux-ci **rallongent les distances à parcourir** – notamment parce qu'ils nécessitent souvent des retours en arrière. Cet aspect est également évoqué par Grammenos et al. (2001), pour le cas plus général des réseaux arborescents. Selon eux, les voies courbes dans ce type de réseau contribuent à **rallonger les distances marchées, et rendent le cheminement confus**. Ils ajoutent que ces réseaux se caractérisent par leurs **discontinuités**, pour les piétons comme pour les véhicules. Ces discontinuités inhibent l'accès à pied aux aménités urbaines, ce qui rend ces réseaux mauvais pour les déplacements piétons. Dans la même optique, Southworth et Owens (1993) affirment que les réseaux des quartiers résidentiels suburbains (notamment ceux en « boucles et raquettes »¹¹⁹ et ceux en « raquettes sur

principal parts . . . There is thus a series of islands (...) and, as they get smaller having less vehicles on their roads ».

¹¹⁸ Levinson et Huang évoquent aussi d'autres aspects que les conditions d'accessibilité. Pour eux, la hiérarchisation permet également de maintenir au calme les quartiers résidentiels, de réduire la redondance du réseau, et présente bien d'autres avantages. Néanmoins, pour eux, la faible redondance de ces réseaux fait qu'ils comprennent des points critiques, ce qui les rend vulnérables.

¹¹⁹ *Loops and lollipops.*

bâtons »¹²⁰, cf figure 3.31) souffrent d'une part de la dégradation de l'accessibilité à pied, et d'autre part d'un manque de cohérence perceptuelle, qui sont le résultat de rues de plus en plus **déconnectées et fermées**.

Southworth et Owens (1993) se prononcent plus précisément sur les conditions d'accessibilité dans les réseaux en « boucles et raquettes » (cf figure 3.31). Pour eux, ces réseaux ont une structure labyrinthique qui désoriente les usagers¹²¹. Ils y constatent également une **dépendance quasi-totale aux boucles et aux voies en culs-de-sac**, limitant de fait les espaces accessibles à pied dans ces réseaux aux maisons des voisins et à l'école du quartier. Tous ces facteurs concourent selon eux à augmenter les déplacements en voiture, et à les concentrer sur les quelques voies artérielles existantes, ce qui y génère une **congestion sans précédent**. Cet avis est partagé par Speck (2017), qui soutient que les **intersections dans ce type de réseau sont encombrées**. Southworth et Owens en concluent que ce type de réseau s'avère indésirable aussi bien pour les piétons que pour les conducteurs d'automobile. Ce dernier point n'est pas partagé par Grammenos et ses collègues (2001), qui au contraire affirment que la géométrie de ces réseaux est adaptée à l'automobile, car ils excluent le trafic des rues locales et permettent **un bon écoulement des flux** au niveau des collecteurs et des artères. La figure 3.32 synthétise ces conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux arborescents.

¹²⁰ *Lollipops on a stick*.

¹²¹ Southworth et Owens expliquent également que l'intimité est accrue dans ce type de réseaux par un petit nombre de choix d'itinéraires, et un petit nombre de points d'accès. Leurs rues sont calmes et relativement sans danger pour les enfants.

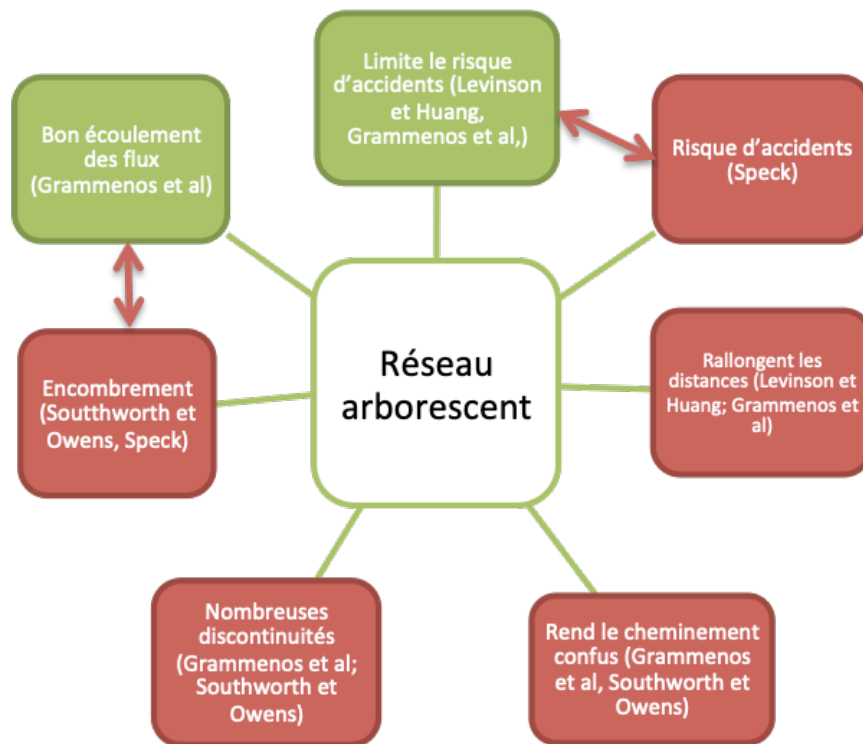


Figure 3.32 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux arborescents par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots). Les conditions « positives » sont en vert et les « négatives » sont en rouge. Les doubles flèches sont utilisées pour indiquer des contradictions entre les auteurs.

IV.5. Les percées configurées en étoile

En plus de préconiser des réseaux viaires typiques, les théoriciens et praticiens de l'urbanisme préconisent également plusieurs interventions typiques à mener sur un réseau viaire existant. Il s'agit d'**ajouts, de suppressions, ou de modifications** à opérer sur la morphologie d'un réseau viaire, afin d'agir sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Ce type de préconisation était fréquent en Europe (France et Italie en particulier) à la période classique (1550-1750) et au Siècle des Lumières (1715-1789). En effet, la période classique coïncide avec une étape de la croissance urbaine qui rend nécessaire un réajustement structurel dans les villes (Panerai et al., 1997), et notamment une adaptation de leur réseau viaire. De son côté, le Siècle des Lumières est le temps des *plans d'embellissement*, qui correspondent à des transformations physiques opérées sur l'espace urbain existant. Nous nous intéressons à une préconisation commune à ces deux périodes : la création de percées configurées en étoile dans un réseau existant.

IV.5.1. Présentation

Des percées en étoile à la période classique (1550-1750)

A la période classique, une intervention fréquente consistait à créer des avenues en diagonal dans les réseaux en grille, afin de les traverser (Crawford, 2005). On observe une « **rhétorique d'axes, de places marquées par des monuments, de monuments configurés en réseau** » (Panerai et al. 1997, p. 28), **un étirement des voies, et un vocabulaire de tridents et d'étoiles**. Ces éléments sont notamment visibles dans le plan de Rome conçu à la fin du XVI^e siècle par le pape Sixte Quint (cf figure 3.33). Ici, de larges **rues rayonnantes** relient entre elles les sept basiliques principales de la ville, formant des figures étoilées. Chaque nœud de ce réseau étoilé est marqué par un point focal qui est soit l'une des sept basiliques, soit un obélisque.

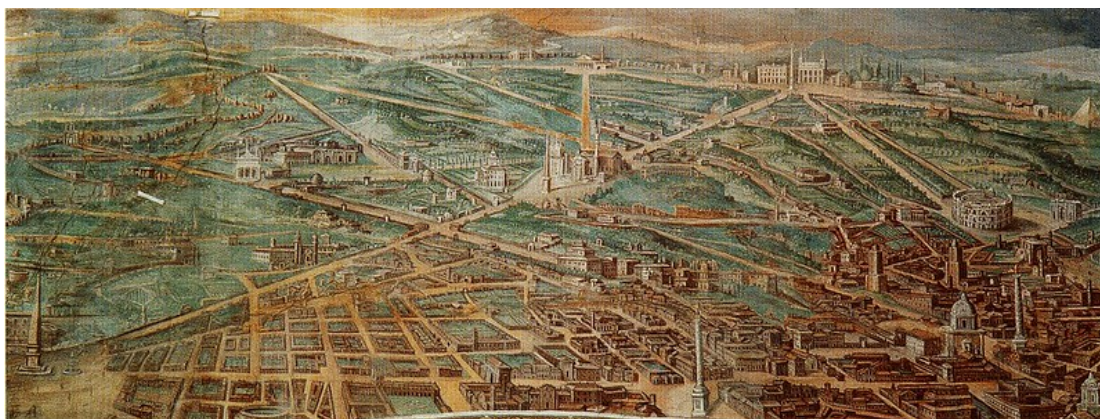


Figure 3.33 : Plan d'ensemble de la Rome de Sixte Quint, 1589, fresque de la Bibliothèque vaticane. Source : flickr.com.

Des percées en étoile au Siècle des Lumières (1715-1789)

Le Siècle des Lumières se caractérise lui aussi par des préconisations relatives à la création de percées en étoile dans les réseaux viaires existants. Nous identifions ce type de préconisation chez trois théoriciens français Marc-Antoine Laugier, Jacques-François Blondel et Pierre Patte.

Au XVIII^e siècle, le jardin à la française (cf figure 3.34) devient, aux yeux de plusieurs architectes et ingénieurs français, le savoir de référence en matière de conception des réseaux viaires intra-urbains (Alonzo, 2018). L'abbé Laugier fait partie des théoriciens de l'urbanisme à avoir préconisé la conception des réseaux suivant le vocabulaire du jardin à la française : **faisceaux et trames de voies rectilignes, avenues en lignes droites, figures étoilées, lieux d'observation panoptique, places de ralliement et trajectoires directes**. Pour Laugier, il faut « qu'ici on aperçoive une étoile, là une patte d'oie, de ce côté des routes en épis, de l'autre des routes en éventail, plus loin des parallèles, partout des carrefours, des dessins et figures différentes » (1753, *cité dans* Alonzo (2018)).

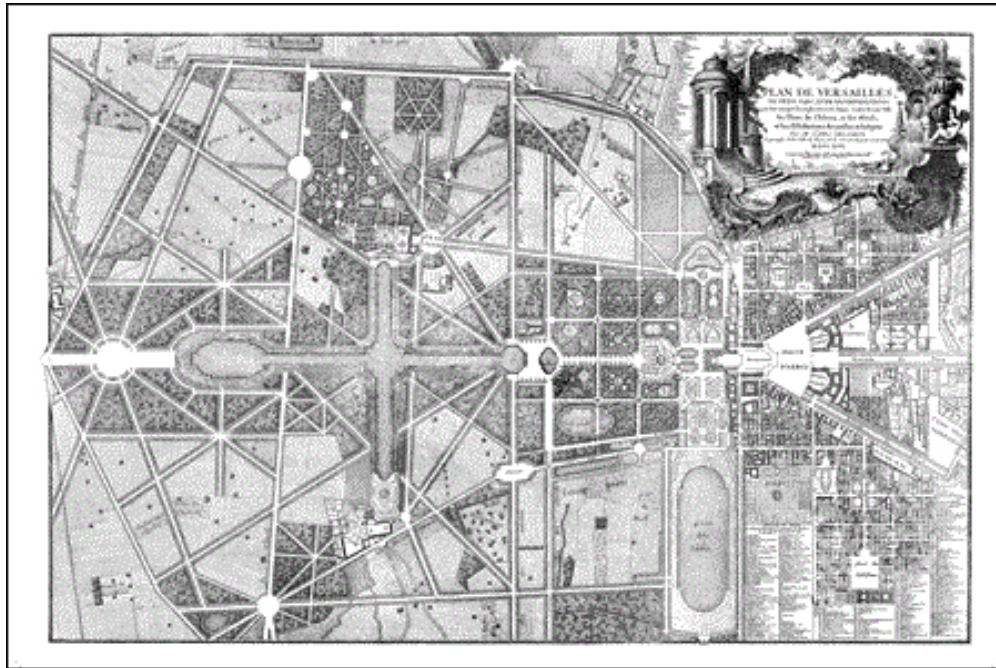


Figure 3.34 : Plan tracé par Jean de La Grive en 1746, représentant le château, le petit parc et la ville de Versailles tels que conçus, notamment, par André Le Nôtre. Source : Entrée « Jardin de Versailles » sur Wikipédia.

Jacques-François Blondel est un architecte et théoricien de l'architecture (fondateur de l'École des Arts en 1743, puis professeur de l'Académie d'architecture) qui conçoit au milieu du XVIII^e siècle de nombreux plans d'embellissement pour les villes françaises. Selon Fialcofschi (2009), la ville de Blondel est constituée comme **un réseau d'édifices monumentaux qui interrompent le tissu urbain. L'architecte opère en fonction de ces édifices des alignements et des percées censés restructurer le reste de l'espace urbain.** Ce mode d'intervention est visible dans son projet non réalisé pour l'embellissement de la ville de Strasbourg, conçu en 1765 (cf figure 3.35). Blondel explique : « il n'est point, ou presque point de Carrefours que nous n'ayons convertis en place, point de rues que nous n'ayons alignées » (Blondel, 1773)¹²².

¹²² Cité dans le catalogue de l'exposition *Construire en quartier ancien*, du Ministère de l'environnement du cadre de vie (1980).

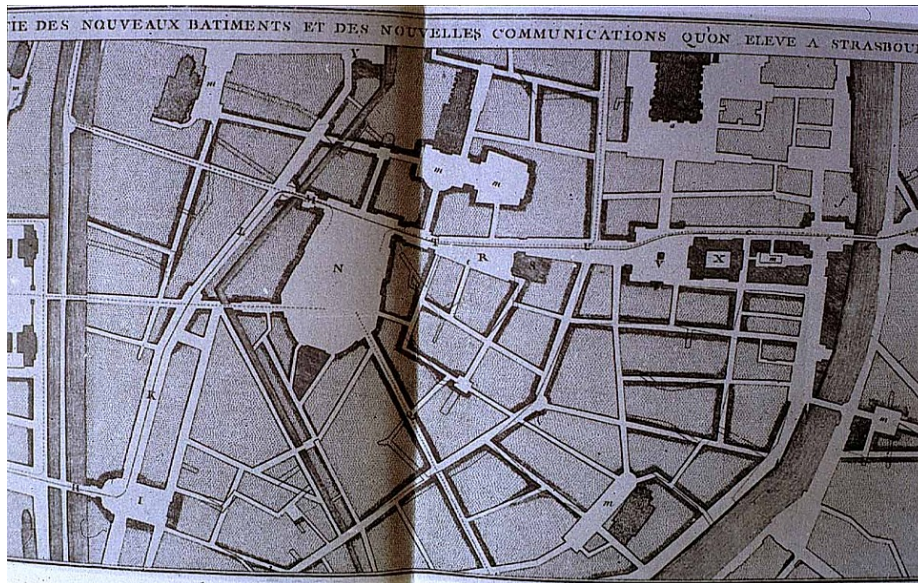


Figure 3.35 : Plan de Blondel pour la ville de Strasbourg, 1765 (projet non réalisé). Source : Catalogue de l'exposition *Construire en quartier ancien*, du Ministère de l'environnement du cadre de vie (1980).

Enfin, Pierre Patte, architecte, se place dans la tradition de Jacques-François Blondel, dont il fut l'assistant. Pour lui, les édifices remarquables doivent être les points de référence de la nouvelle ville. La ville de Patte est « une ville traversée par **un réseau de constructions monumentales et organisée de sorte à permettre la circulation** » (Fialcofschi, 2009). Plus concrètement, il propose l'ouverture à Paris de plusieurs voies rectilignes traversant les anciens quartiers, et le tracé de nombreuses places royales (cf figure 3.36).

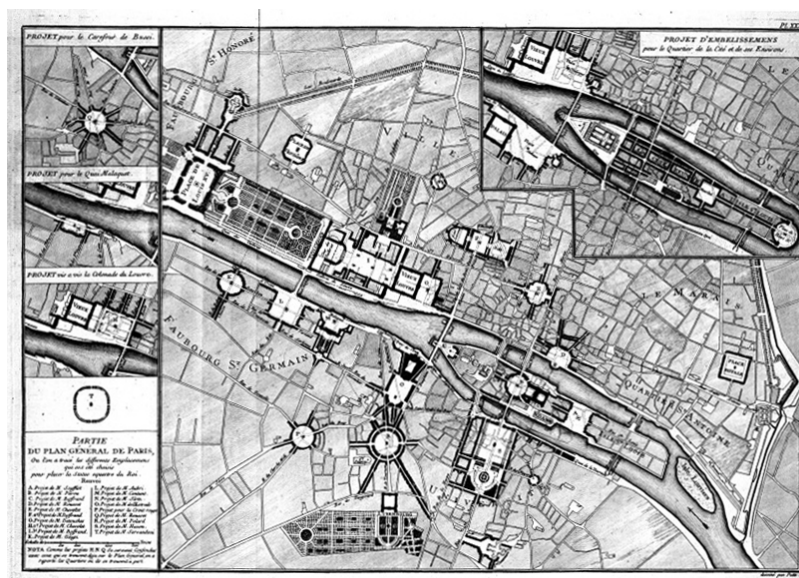


Figure 3.36 : Plan tracé par Pierre Patte, intitulé « Partie du plan général de Paris où l'on a tracé les différents emplacements qui ont été choisis pour placer la statue équestre du roi » (1765). Bien qu'il ne soit pas l'auteur de l'ensemble de ces places, Pierre Patte illustre dans ce plan sa vision pour la capitale : des places royales pour valoriser les monuments, et des voies rectilignes tracées dans le tissu ancien. Source : Rickert (2012).

Des préconisations communes

Le tableau 3.3 synthétise quelques-unes des préconisations faites à la période classique et au Siècle des Lumières. Nous constatons que ces deux périodes partagent le fait de préconiser la création **de percées configurées en étoile dans un réseau existant**. Cette intervention revient de manière récurrente dans les écrits de ces deux périodes, mais aussi à d'autres périodes historiques : le baron Haussmann s'en est largement inspiré pour son projet pour Paris (nous y reviendrons dans le chapitre 5 lors de la présentation de nos cas d'étude). Il s'agit donc là d'une intervention « typique ».

Période/courant/auteur		Préconisations
Période classique		« Rhétorique d'axes, de places marquées par des monuments, de monuments configurés en réseau », un étirement des voies, et un vocabulaire de tridents et d'étoiles (Panerai et al., 1997).
Siècle des Lumières	Laugier	Faisceaux et trames de voies rectilignes, avenues en lignes droites, figures étoilées, pattes d'oie, routes en épis, en éventail, ...
	Blondel	« Réseau d'édifices monumentaux (...) en fonction desquels l'architecte opère des alignements et des percées » (Fialcofschi, 2009). Carrefours transformés en places, rues alignées.
	Patte	Ville traversée par un réseau de constructions monumentales et organisée de sorte à permettre la circulation (Fialcofschi, 2009). Ouverture de voies rectilignes, places royales.

Tableau 3.3 : Tableau regroupant des préconisations similaires entre l'âge classique et le Siècle des Lumières.

IV.5.2. Les caractéristiques morphologiques des percées en étoile

Rappelons que les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire désignent pour nous les caractéristiques observables à l'œil nu sur le plan de ce réseau. Les percées configurées en étoile préconisées à l'âge classique et au Siècle des Lumières se manifestent dans le plan des réseaux viaires par **des caractéristiques morphologiques particulières** :

- Des **voies rectilignes**, d'où le vocabulaire des axes, des voies étirées, des avenues en lignes droites, des alignements et percées ;
- Une **configuration en étoile** de ces voies, d'où le vocabulaire des faisceaux, étoiles, tridents, pattes d'oie, éventails. Cette configuration en étoile confère aux voies des orientations variées.

IV.5.3. Les conditions d'accessibilité des percées en étoile

L'effet de la création de percées configurées en étoile sur les conditions d'accessibilité dans un réseau existant est décrit par plusieurs auteurs. A la période classique, les percées du plan de Rome tracé par Sixte Quint avaient pour justification fonctionnelle de relier par des trajectoires directes des pôles éloignés du territoire urbain : les basiliques romaines (Panerai et al., 1997). L'objectif était donc de permettre une **continuité des déplacements** entre ces basiliques. Pour Laugier, ces percées devaient offrir des lieux d'observation panoptiques, ce qui peut permettre de se repérer dans le réseau. On peut donc postuler un lien entre ces percées et la **simplicité des déplacements** dans le réseau. De son côté, Blondel considère que les percées permettent une distribution commode des édifices, il fait donc référence au **confort du déplacement**. Enfin, les voies rectilignes et les places en étoile préconisées par Patte visent à ce que *tous les abords soient faciles*. Il veut offrir des débouchés entre les quartiers, pour que tout se dégage du centre à la circonférence sans confusion. Il évoque donc **l'isotropie** des déplacements (accessibilité en tous points). Ces conditions d'accessibilité sont résumées dans le schéma ci-dessous (figure 3.37).

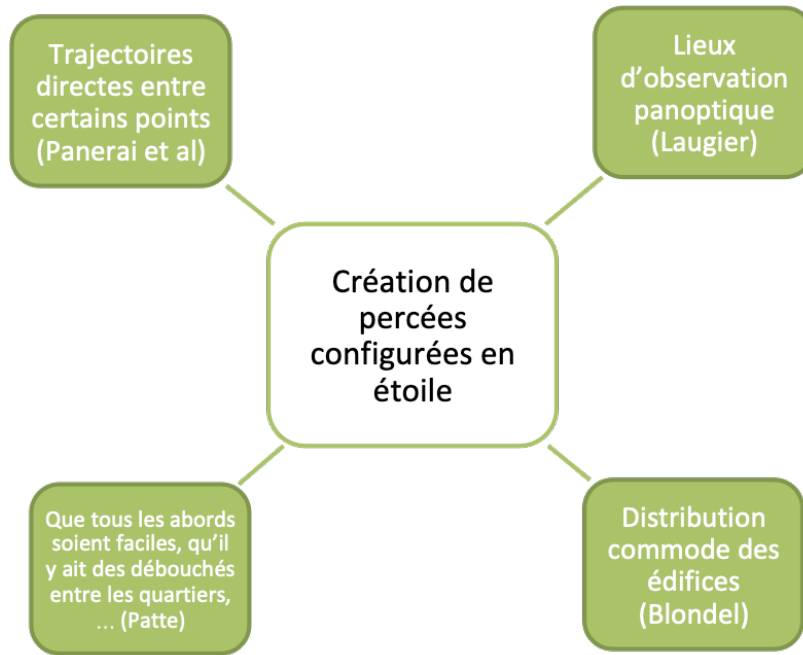


Figure 3.37 : Schéma représentant les conditions d'accessibilité attribuées aux percées configurées en étoile par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots).

Conclusion de la partie IV

Nous avons présenté dans cette partie les quatre préconisations typiques sur lesquelles portera notre exploration de la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité. Notre choix a porté sur trois types de réseaux viaires, le type organique, le type quadrillé et le type arborescent. Nous avons décrit les caractéristiques morphologiques de chacun de ces types, ainsi que les conditions d'accessibilité qui leur sont attribuées dans la littérature. Nous avons pu noter plusieurs avis contradictoires concernant ces conditions d'accessibilité.

Nous avons également choisi comme quatrième préconisation la création de percées configurées en étoile dans un réseau viaire existant. Cette « intervention » correspond à une tradition forte de l'âge classique et du Siècle des Lumières. Nous avons également vu que des théoriciens et praticiens de l'urbanisme considéraient que ce type d'intervention pouvait améliorer certaines conditions d'accessibilité dans un réseau viaire.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté diverses préconisations faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, pour améliorer les conditions d'accessibilité¹²³ offertes aux usagers dans l'espace urbain, en agissant sur les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires (partie I). Nous avons constaté plusieurs préconisations communes, mais aussi des avis contradictoires entre les divers théoriciens et praticiens mentionnés. **Certaines caractéristiques morphologiques sont préconisées par un auteur, et fortement critiquées par un autre. D'autres caractéristiques morphologiques sont préconisées par plusieurs auteurs, mais pour des raisons différentes.**

La partie II nous a permis de constater que la question de la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité n'était pas toujours abordée de manière objective en urbanisme, et qu'elle faisait l'objet de peu d'intérêt dans la littérature scientifique. Pour Marshall (2005), cela peut s'expliquer par la complexité de la morphologie des réseaux viaires, qui les met à l'écart des autres « objets » de l'analyse urbaine et des transports. Marshall ajoute que cela explique la difficulté de mettre en place des **préconisations robustes et généralisables pour la conception des réseaux viaires.**

Nous avons donc proposé une méthode formalisée, en trois temps, afin d'explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers (partie III). Nous proposons d'abord de décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires grâce à des mesures quantitatives. Ces mesures nous permettront une définition précise, selon un cadre harmonisé, des caractéristiques morphologiques préconisées en urbanisme.

Nous décrivons dans un second temps les conditions d'accessibilité dans ces réseaux, grâce à des mesures quantitatives qui rendent compte des **caractéristiques de leurs chemins**, autrement dit des caractéristiques de **l'espace à parcourir pour se déplacer dans ces réseaux**. Ces mesures nous permettront d'identifier les conditions d'accessibilité *portées* par le réseau.

Enfin, nous explorons dans un troisième temps la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité, par l'intermédiaire de la relation entre les mesures des caractéristiques morphologiques, et les mesures des caractéristiques des chemins.

Nous avons également présenté dans la partie IV du chapitre un ensemble de préconisations sur lesquelles portera notre exploration de la relation entre caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et conditions d'accessibilité.

¹²³ Le confort et la sécurité lors des déplacements, la simplicité des déplacements, leur continuité, leur isotropie, proximité, fluidité et rapidité. Voir chapitre 2 pour la définition de chacune de ces conditions d'accessibilité.

Ces préconisations n'ont pas vocation à être exhaustives. Elles ont été choisies parce qu'elles sont particulièrement évoquées dans les écrits et les projets des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, notamment pour leur effet supposé sur les conditions d'accessibilité. Nous les avons également choisies car plusieurs cas empiriques sont représentatifs de ces préconisations. Nous présentons les cas empiriques choisis dans le chapitre 5. Mais avant cela, nous présentons dans le chapitre 4 le champ méthodologique dans lequel s'inscrit notre travail, celui de l'Analyse de réseaux. Nous puisons dans ce champ les mesures quantitatives de caractéristiques morphologiques et de caractéristiques des chemins, mobilisées dans notre travail.

Chapitre 4 : Cadre méthodologique : L'analyse des réseaux viaires au moyen de la théorie des graphes

Introduction

La relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers fait l'objet de nombreux avis contradictoires parmi les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Cela nous a mené dans le chapitre 3 à proposer une méthode formalisée visant à explorer cette relation.

Nous proposons d'avoir recours à l'Analyse de réseaux (*Network analysis*)¹²⁴, et son pendant mathématique, la théorie des graphes, qui permet de construire un cadre harmonisé pour l'étude de cette relation. Les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité ne sont plus décrites par des « mots », mais par des mesures quantitatives, ce qui permet de donner à chacune une définition précise, et donc de savoir exactement *de quoi on parle*. Mais avant cela, il faut passer de l'objet empirique qui nous intéresse, à savoir le réseau viaire, à un objet mathématique, le graphe viaire, sur lequel pourront être effectuées des mesures. Le graphe, cet objet mathématique, est un système formel dans lequel travailler, afin de construire des connaissances sur l'objet empirique représenté par le graphe, à savoir le réseau.

Nous présentons dans la partie I de ce chapitre le passage du réseau au graphe. Nous allons ensuite présenter en partie II et III quelques uns des descripteurs qui permettent de rendre compte des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires, et des conditions d'accessibilité portées par ces réseaux. Nous verrons que dans certains cas, le descripteur rend compte précisément de la caractéristique morphologique ou de la condition d'accessibilité considérée. Dans d'autres cas, il en décrit une certaine acception. Dans d'autres cas encore, la caractéristique morphologique ou la condition d'accessibilité ne peut être décrite par une mesure quantitative. Ainsi, le passage d'une description par des mots à une description par des mesures quantitatives implique des choix, et certaines concessions. Nous concluons par un retour critique sur le champ de l'analyse des réseaux viaires.

¹²⁴ Nous employons l'expression « analyse de réseaux » pour désigner les travaux ayant recours à la théorie des graphes.

I. Passage d'un objet empirique à un objet mathématique, du réseau au graphe

Cette première partie vise à présenter le passage de l'objet empirique « réseau viaire » à l'objet conceptuel « réseau », puis à l'objet mathématique « graphe ». Nous présentons ensuite les différents types de graphes permettant de représenter un réseau viaire, et choisissons l'une de ces représentations.

I.1. Quelques définitions

I.1.1. Qu'est-ce qu'un réseau ?

« Kublai était un joueur d'échecs attentif ; à suivre les gestes de Marco, il observait que certaines pièces impliquaient ou au contraire excluaient le voisinage d'autres pièces, et se déplaçaient selon certaines lignes. Négligeant la variété des formes des objets, il retenait leur manière de se disposer les uns par rapport aux autres sur le dallage de faïence » (Calvino (1972), cité dans Moreno (2009)).

Cette métaphore du jeu d'échec illustre parfaitement la notion de réseau. Comme le souligne Lemoigne (1990), l'important dans un réseau n'est pas la nature des éléments, mais plutôt les connexions entre ces éléments, autrement dit la disposition relative des éléments les uns par rapport aux autres. Ainsi, un réseau est un « outil conceptuel permettant de décrire la mise en relation d'un ensemble d'entités par des connexions » (Bonin, 2014). Le concept de réseau permet ainsi un saut fondamental dans l'abstraction des phénomènes. En effet, la seule information nécessaire pour construire un réseau est l'existence ou l'absence de connexion entre deux entités.

Ces connexions peuvent être matérielles, comme dans le cas d'un réseau technique : réseau routier, réseau d'eau, réseau électrique, etc. Elles peuvent également être immatérielles, comme dans le cas des réseaux sociaux. L'utilisation du concept de réseau en sociologie a donné naissance à plusieurs champs tels que la sociologie structurelle (Lazega, 2007). Celle-ci consiste à représenter un groupe de personnes placé dans un cadre social ou organisationnel sous forme de réseau, dont les éléments sont les individus et les connexions sont les relations sociales entre ces individus. Ces relations peuvent être des relations familiales, amicales, professionnelles, des mails échangés, des liens virtuels (amitiés Facebook), des collaborations scientifiques, etc.

Dans le champ des études urbaines, le concept de réseau est utilisé pour désigner des phénomènes différents. A titre d'exemple, les géographes emploient le terme

« réseau urbain » pour désigner l'ensemble des villes d'une région, d'un état, voire d'un continent, et les relations entre elles (Pumain, 1982). Le concept est également utilisé à l'échelle intra urbaine, par exemple pour qualifier des relations existant entre les différents lieux de la ville (Moreno, 2009; Pouyanne, 2005). Dans tous les cas, l'analyse des réseaux a généralement recours au « graphe », un objet mathématique que nous définissons ci-après.

1.1.2. Qu'est-ce qu'un graphe ?

Un graphe est la transcription mathématique d'un réseau. Cette transcription peut prendre différentes formes : il peut par exemple s'agir d'une liste d'entités et d'une liste de connexions entre ces entités. On peut également représenter un graphe sous la forme d'une matrice d'adjacence, c'est-à-dire d'un tableau faisant figurer en ligne et en colonne les entités du réseau. Les cellules du tableau portent alors la valeur 1 s'il existe une connexion entre telle et telle entité, et la valeur 0 s'il n'existe pas de connexion.

Mais le formalisme le plus fréquent est la représentation *graphique* en un ensemble de points, appelés *nœuds* ou *sommets*, reliés entre eux par des liens, appelés *arcs* ou *arêtes*. Une arête est obligatoirement bornée par deux sommets. Un sommet peut être l'intersection de plusieurs arêtes, ou l'extrémité d'une arête. Les arêtes sont généralement représentées par des lignes droites, et les sommets par des points. **Dans la suite de ce travail, nous emploierons le terme « graphe » pour désigner ce formalisme *graphique*, en sommets et arêtes.**

Le graphe renvoie intuitivement à la notion de réseau, ses arêtes sont les connexions, et ses sommets sont les entités à relier. Le formalisme en graphe remonte à Leonard Euler, en 1741. Euler voulait déterminer s'il était possible d'établir un itinéraire permettant de parcourir les sept ponts de la ville de Königsberg et de revenir au point de départ, en traversant une seule fois chacun de ces ponts. Euler représenta chaque entité géographique de la ville par un sommet du graphe, faisant ainsi abstraction de leur morphologie. Les ponts quant à eux constituaient les arêtes du graphe. Cette formalisation lui a permis de montrer qu'étant donnée la configuration de la ville, le trajet recherché n'existait pas. Autrement dit, la disposition relative des sommets du graphe pouvait rendre certains itinéraires impossibles.

En 1930, le mathématicien hongrois Dénes König donne naissance à la **théorie des graphes**, discipline mathématique et informatique, qui constitue l'outil fondamental d'analyse de la structure des réseaux (Stransky, 1995). Cette théorie se développe surtout à partir des années soixante, au moment où les ordinateurs ont fourni les puissances de calcul nécessaires à son application à des cas concrets.

I.1.3. Quelques propriétés des graphes

En plus de l'existence ou l'absence de connexion entre deux entités, les graphes contiennent souvent une information sur l'intensité de cette connexion. Cela peut être utile pour représenter les réseaux d'échanges commerciaux. On parlera alors de *graphe valué*. Dans ce cas, la matrice d'adjacence du graphe ne portera plus uniquement les valeurs 1 et 0, mais des nombres variables en fonction de l'intensité de chaque connexion.

En outre, il est possible de donner une orientation aux arêtes du graphe, dans le cas de connexions non réciproques. Le graphe sera alors *orienté*. Cela peut être utile si la relation (un échange commercial par exemple) entre une entité A et une entité B est différente de celle entre B et A. Il existe d'autres manières d'enrichir les graphes d'informations diverses, en fonction du type de réseau à représenter. Nous verrons certaines d'entre elles au fil du texte.

On peut également distinguer « graphe planaire » et « non planaire ». Dans un graphe non planaire, les arêtes peuvent se croiser sans que cela ne corresponde à un sommet. C'est le cas par exemple lorsque le graphe représente un réseau aérien. Dans un graphe planaire en revanche, tout croisement entre deux arêtes est un sommet. Les réseaux routiers sont souvent représentés par des graphes planaires (Barthelemy, 2011; Lämmer et al., 2006)¹²⁵ : le croisement de deux routes correspond en général à une intersection, représentée sur le graphe par un sommet. Les tunnels et les ponts sont des exceptions à cette planarité.

On peut enfin distinguer les graphes du point de vue de leur *spatialité*. Certains graphes représentent des réseaux dits spatiaux, c'est-à-dire que les éléments du réseau, et parfois leurs relations¹²⁶, ont des positions géographiques dans un espace à deux, voire trois dimensions. Un réseau ferroviaire est un bon exemple de réseau spatial : les éléments (gares) aussi bien que les relations (lignes ferroviaires) ont des positions géographiques dans l'espace. Ces positions peuvent être reprises lors du passage du réseau au graphe. A l'inverse, certains graphes représentent des réseaux non spatiaux. Les réseaux sociaux représentant des relations familiales, ou des relations au sein d'une entreprise, sont souvent non spatiaux.

Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons uniquement à des graphes représentant des réseaux spatiaux, c'est-à-dire dans lesquels, *a minima*, les éléments ont des positions géographiques. Ce choix est guidé par le fait que les réseaux viaires, qui sont l'objet qui nous intéresse, sont des réseaux spatiaux.

¹²⁵ Ce choix ne fait pas l'unanimité, des auteurs comme Lagesse (2015) représentent au contraire les réseaux routiers par des graphes non planaires.

¹²⁶ Selon Barthélemy (2011) seule la spatialisation des éléments (sommets) est nécessaire pour que le réseau soit spatial.

I.2. Le cas des réseaux viaires

Dès les travaux de Dupuy (1985) et Haggett & Chorley (1969), les graphes ont été utilisés pour la représentation, sur plan, de **réseaux techniques** comme les réseaux d'eau potable et d'assainissement, les réseaux électriques, les réseaux ferrés, les réseaux routiers, les réseaux de métro, et bien d'autres. Les graphes permettent en effet de donner une image, simplifiée ou au contraire très précise, de la morphologie de ces réseaux. Généralement, les sommets du graphe représentent les infrastructures nodales (les stations de métro par exemple), et les arêtes représentent les infrastructures linéaires du réseau (les lignes de métro par exemple) (Gleyze, 2007).

Les réseaux viaires intra-urbains ne sont pas en reste. L'utilisation de la théorie des graphes pour analyser ces réseaux remonte aux années 60, et s'est développée depuis dans de nombreuses disciplines comme en géographie et géomatique (Dupuy, 1985; Graser et al., 2016; Haggett & Chorley, 1969; Kansky, 1963), en ingénierie civile (Garrison, 1990; Xie & Levinson, 2007), en architecture et en urbanisme (Hillier & Hanson, 1989; Marshall, 2005; Porta et al., 2006; Shpuza, 2014; Vaughan et al., 2013), ou encore en physique (Barthelemy et al., 2013; Costa et al., 2010; Crucitti et al., 2006; Lagesse, 2015; Strano et al., 2012; Viana et al., 2013).

Cet engouement pour l'analyse des réseaux viaires (et routiers) peut s'expliquer, selon Ducruet & Lugo (2013), par une facilité de représentation de la morphologie de ces réseaux, contrairement aux réseaux maritimes ou aériens par exemple, dans lesquels les relations ne sont pas portées par des infrastructures physiques.

I.2.1. Comment convertir un réseau viaire en graphe ?

Dans le chapitre 1, nous avons désigné par le terme « réseau viaire » l'objet empirique constitué d'un ensemble de voies de circulation et des intersections entre ces voies. Mais cet ensemble de rues peut aussi être *a priori* considéré comme un réseau du point de vue conceptuel, c'est à dire comme un ensemble d'entités mises en relation par des connexions. En effet, si on considère l'espace intra-urbain comme un ensemble de points auxquels on souhaite accéder, le réseau viaire est formé des connexions entre ces points (Chiaradia et al. 2012).

Néanmoins, lors du passage du réseau viaire comme objet empirique à un objet conceptuel pouvant être représenté par un graphe, quelques difficultés apparaissent. D'abord concernant ce qu'il faut considérer comme les sommets du graphe. Comme le souligne Stransky (1995), les graphes se prêtent facilement à la représentation des réseaux techniques à *accessibilité discrète*, autrement dit ceux dont les points d'accès sont dénombrables. Ces points d'accès sont alors les sommets du graphe, et les arêtes sont les itinéraires entre ces points. Cela est le cas des réseaux de transport en commun, dans lesquels les stations représentent des points d'accès. Il en est de même pour les réseaux autoroutiers, dans lesquels les entrées et

sorties d'autoroute sont des points d'accès dénombrables. Dans le cas d'un réseau viaire en revanche, **ces points d'accès sont extrêmement nombreux : les voies de circulation desservent l'espace intra-urbain par d'innombrables porosités.** Tous les points de contact entre le bâti et le réseau viaire sont potentiellement des points d'accès, pour reprendre une expression de Georges Amar, ces réseaux ont une forte adhérence (*cité dans Lévy (1999), p. 45*). Dans ce cas, **quels sont les sommets et les arêtes du graphe?**

Plusieurs alternatives sont possibles pour le passage d'un réseau viaire à un graphe. Nous en présentons certaines ci-dessous, avant de présenter notre choix. Une revue critique des différentes alternatives et proposée dans Marshall et al. (2018).

Le graphe topologique

Le formalisme le plus courant pour convertir un réseau viaire en graphe est le suivant : les sommets du graphe représentent les intersections du réseau, et les arêtes représentent les tronçons de voies situés entre deux intersections. Ainsi, l'objet « voie » disparaît au profit du tronçon. A noter que si le réseau viaire comprend des voies en cul-de-sac, l'extrémité de ces voies sera elle aussi représentée par un sommet dans le graphe (cf figure 4.1). Ainsi, un sommet est soit une extrémité d'impasse, soit une intersection. Il peut également s'agir de l'extrémité d'un tronçon coupé lors de la représentation du réseau (nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 5).

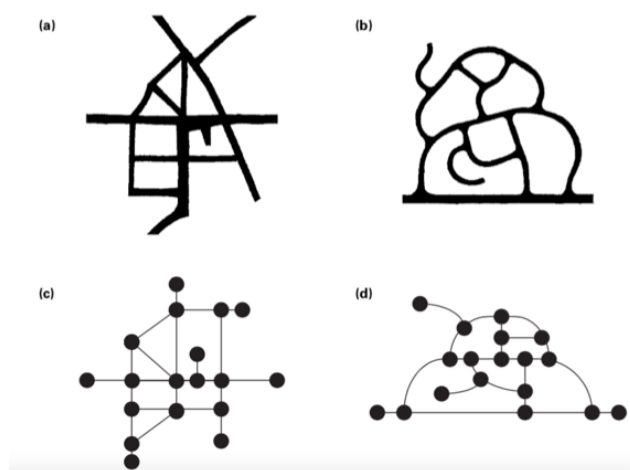


Figure 4.1 : Deux réseaux viaires (a et b) représentés par des graphes topologiques (c et d).
Source : (Marshall, 2005).

Selon cette représentation, le nombre de points d'accès existant dans le réseau est largement réduit. Seules les intersections et les extrémités d'impasses sont considérées comme des sommets, les autres « porosités » n'existent plus. Autre simplification : tous les « points » du réseau sont considérés comme homogènes : un carrefour à six voies et une extrémité d'impasses sont représentées de la même

manière par un sommet. De même, tous les tronçons, qu'ils soient larges ou étroits, centraux ou périphériques, sont représentés par des arêtes. En outre, ces arêtes **ne suivent pas la géométrie réelle des tronçons du réseau** : il s'agit généralement de lignes droites ou courbes, tracées entre les sommets. La position géographique des sommets n'est pas non plus reprise. Ainsi, la seule information que ce graphe conserve est la topologie du réseau viaire. Nous le désignerons par l'expression « graphe topologique ».

Plusieurs critiques se dressent face à l'utilisation des graphes topologiques pour la représentation des réseaux viaires. Lemoigne (1990, p. 28) les décrit en ces termes :

« Le réseau, alors, devient insignifiant, il n'exprime plus aucun projet: peut-on contester la légitimité du modèle de l'être cher réduit à un squelette osseux, passif et sans nécessité? Accepterait-on alors un modèle du réseau réduit à la matrice du graphe qui symbolise sa topologie? »

Pour Bonin (2014), ces graphes sont généralement utilisés pour les réseaux qui ne possèdent pas de géométrie naturelle, comme un réseau social ou un réseau d'interactions moléculaires dans une cellule. Or, les voies d'un réseau viaire sont matérielles, « concrètes ». Elles ont une géométrie et des dimensions. Elles peuvent être droites, courbes, en lacets, elles ont une orientation cardinale, une longueur, etc. En outre, ces voies, ainsi que les intersections et les extrémités d'impasses, sont spatialisées : elles ont des coordonnées géographiques. Les graphes dans leur acception la plus « pure » (celle du graphe topologique) ne portent pas en eux ces informations (Bonin, 2014).

Marshall (2005) ajoute que cette représentation est problématique car elle ne permet pas toujours de distinguer des réseaux viaires différents. Dans la figure 4.2 ci-dessous par exemple, deux réseaux viaires pourtant très différents, sont représentés par le même graphe. Cela vient du fait que ces deux réseaux ont le même nombre de sommets, d'arêtes, et la même topologie, malgré des différences évidentes sur le plan géométrique. Marshall conclut (p. 111) que **ce type de graphe n'est pas en mesure de distinguer des morphologies qui pourtant intéressent les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, dans leurs débats sur la conception des réseaux viaires**¹²⁷.

¹²⁷ « This means that conventional graph-theoretic representation does not necessarily distinguish between the kinds of structure that are of interest to urban designers and planners in debates about the form of urban layout ».



Figure 4.2 : Deux réseaux viaires différents (gauche et milieu) représentés par le même graphe topologique (droite). Source : (Marshall, 2005)

Ainsi, il y a tout lieu de penser que la géométrie et le dimensionnement des réseaux viaires doivent être conservés lors du passage au graphe. En effet, plusieurs auteurs affirment que la distance euclidienne et la géométrie des voies sont des éléments déterminants lorsqu'on étudie un réseau viaire, et qu'on ne peut se contenter d'un graphe topologique. Des variantes ont ainsi été proposées pour mieux prendre en compte la géométrie réelle des voies, leurs dimensions, et leur position spatiale. En effet, plusieurs approches proposent de s'éloigner du graphe topologique, à tel point que certains affirment que ces représentations ne sont plus des graphes à proprement parler (Porta, Crucitti, & Latora, 2006b). Nous verrons ci-dessous quelques-unes de ces variantes.

L'approche Space Syntax : la carte axiale

La *Space Syntax*, ou syntaxe spatiale est un courant apparu à la fin des années 80 au Royaume-Uni, sous l'impulsion des architectes Bill Hillier et Julienne Hanson de l'école d'architecture de Bartlett (Hillier & Hanson, 1989).

La *Space Syntax* a inventé la carte axiale (*axial map*). Celle-ci représente les « lignes de vue », autrement dit les axes que perçoit l'individu au moment où il se déplace dans un espace borné comme un réseau viaire (borné par des bâtiments). Pour obtenir cette carte (figure 4.3), il faut donc s'imaginer ce que voit un usager mobile à chaque point du réseau viaire : chaque fois qu'il y a un changement de direction, la « ligne de vue » de l'utilisateur change, et on dessine un autre axe. Le croisement de plusieurs lignes de vue survient aux intersections du réseau, mais aussi lorsqu'une voie accuse un changement de direction, comme dans le cas des voies courbes.

A l'inverse du graphe topologique, l'objet élémentaire étudié par la *Space Syntax* n'est pas le tronçon, mais l'axe, défini par son caractère linéaire. Un axe peut être composé de plusieurs tronçons, et un même tronçon, s'il est courbe, peut contenir plusieurs axes. Selon Hillier & Hanson (1989), ces axes se rapprochent des lignes de mouvement réel des individus. En effet, ces derniers tenteraient de maximiser leur champ de vision lorsqu'ils se déplacent dans un espace (qu'il s'agisse d'une pièce,

d'un musée, ou d'une rue). Cette maximisation du champ de vision fait que les individus tendent à emprunter les lignes tracées par la carte axiale.

En plus de représenter le mouvement, les axes, de par leur orientation, capturent une information sur l'espace borné où se déroule le déplacement. Comme le montre Marshall, cette information est suffisante pour éviter que deux réseaux viaires différents ne correspondent au même graphe (cf figure 4.3).

Ainsi, la carte axiale est censée représenter à la fois les lignes de mouvement des individus, et la géométrie du réseau dans lequel a lieu ce mouvement. On peut néanmoins discuter la capacité de la carte axiale à rendre compte de l'un comme de l'autre. En effet, comme le souligne Marshall (2005), le mouvement des individus ne correspond pas nécessairement aux lignes axiales. Cela est peut-être le cas dans un réseau en grille, mais pas dans les « espaces ouverts », non bornés, des formes d'urbanisation modernes. En outre, la carte axiale représente une simplification de la géométrie du réseau : les faibles déviations qui n'affectent pas l'axe de vue ne sont pas prises en compte.

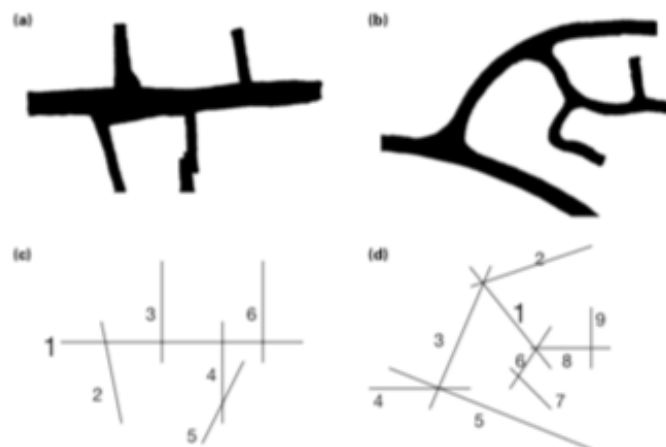


Figure 4.3 : Les deux réseaux viaires (a et b) de la figure 4.2, et leur carte axiale (c et d). On observe qu'une des voies du réseau (a) a été décomposée en deux axes (numéros 4 et 5) sur la carte axiale (c). Source : (Marshall, 2005)

Plusieurs auteurs affirment que les données disponibles actuellement sur la morphologie des réseaux viaires (sur Openstreetmap par exemple) permettent de le représenter tel qu'il est réellement (Cooper & Chiaradia, 2015), sans user d'artifices tels que la carte axiale. Nous verrons deux exemples ci-dessous.

Le graphe géométrique

Une troisième approche consiste à conserver le tronçon comme objet d'intérêt (comme en graphe topologique), mais à représenter la géométrie et le dimensionnement réels du réseau viaire (cf figure 4.4 e). Cette approche est utilisée

par de nombreux auteurs, citons en particulier Crispin Cooper et Alain Chiaradia, de l'Université de Cardiff¹²⁸. Pour plus de simplicité, nous la désignerons par l'expression « graphe géométrique », considérant que la géométrie comprend de toute façon des informations sur le dimensionnement du réseau.

Selon cette approche, les sommets et les arêtes du graphe ont des positions dans un espace euclidien. Les arêtes ont une géométrie et une longueur qui correspondent à la morphologie réelle des tronçons. Cette représentation permet ainsi de calculer directement la longueur d'un tronçon, de connaître son orientation, sa courbure, etc. Seule la largeur du tronçon, qui ne peut être représentée sur une arête, ne figure pas dans le graphe. Le graphe obtenu est donc très proche de la morphologie réelle du réseau viaire.

Une approche mixte

Signalons enfin une approche mixte, formalisée notamment par Claire Lagesse (2015). Cette approche consiste à combiner carte axiale et graphe géométrique. En effet, Lagesse puise dans la *Space Syntax* la volonté de reconstituer des éléments linéaires, et dans le graphe géométrique la volonté de « coller » à la morphologie réelle du réseau.

Il en résulte des axes plus ou moins linéaires, mais dont la géométrie respecte celle des voies du réseau viaire. Pour définir ces axes, l'auteure représente d'abord la morphologie du réseau, puis elle associe les tronçons en fonction d'un seuil de linéarité choisi : si deux tronçons sont déviant d'un angle inférieur à 60° (par exemple), les deux tronçons feront partie du même axe. Si l'angle est supérieur à 60°, il s'agira de deux axes différents. A noter que les tronçons courbes sont considérés comme formant un seul axe, même si leur courbure dépasse les 60°. Porta et al. (2006b) utilisent une approche très similaire à celle de Claire Lagesse, nommée *Intersection Continuity Negotiation model*, ou ICN.

Pour illustrer la différence entre les quatre approches susmentionnées (graphe topologique, carte axiale, graphe géométrique, et approche mixte) nous représentons dans la figure 4.4 ci-dessous le même réseau viaire, converti en graphe selon ces quatre approches. Ce réseau est une partie du réseau de l'île de la Cité à Paris, telle qu'il était au début du XIXe siècle. La partie représentée est celle située entre les actuels Boulevard du Palais et Rue de la Cité.

¹²⁸ Ils ont développé un outil sDNA (pour *Spatial Design Network Analysis*) permettant d'analyser les réseaux spatiaux, viaires notamment, en les considérant comme des graphes géométriques. Nous reviendrons sur cet outil dans le chapitre 5.

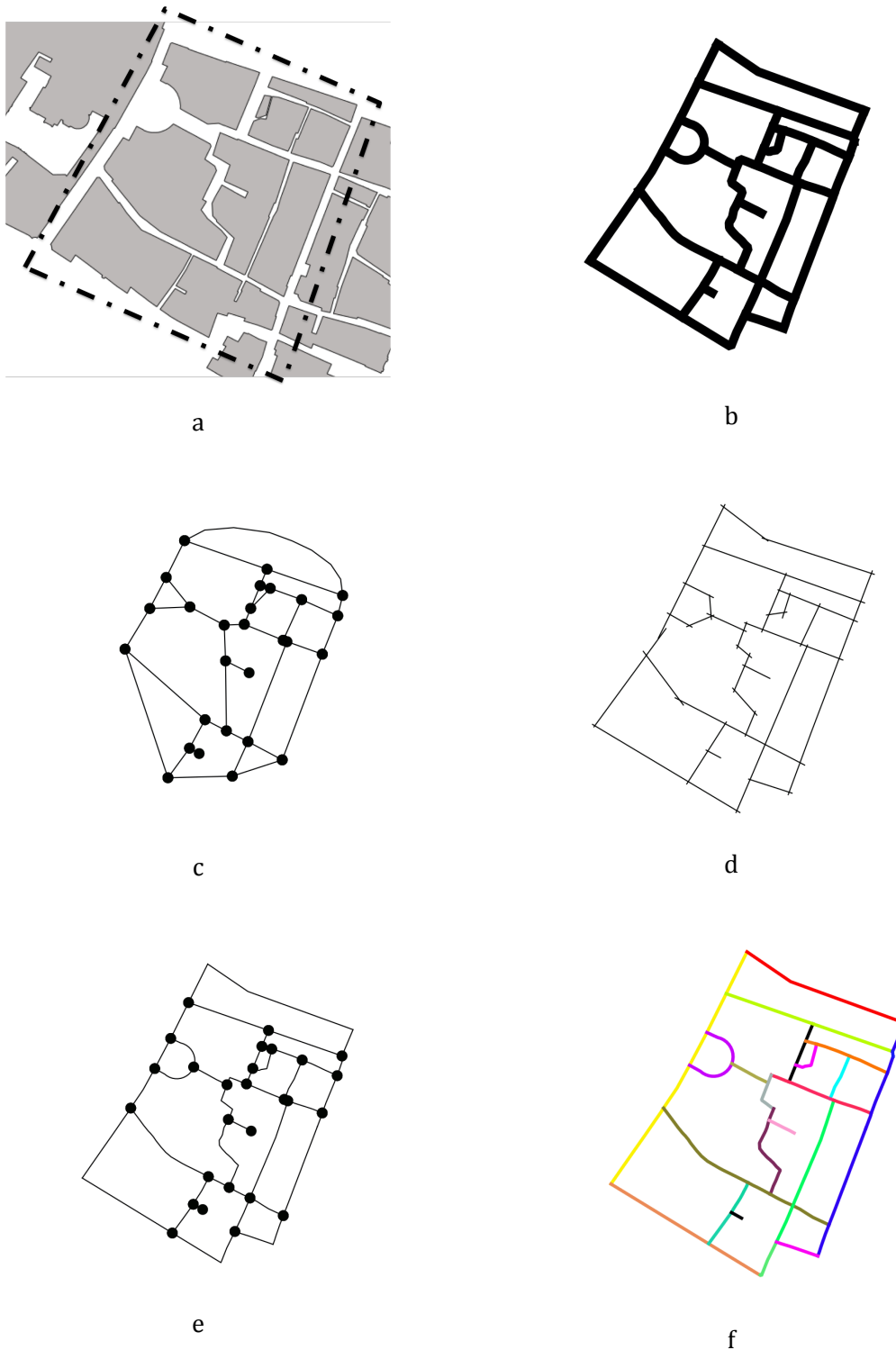


Figure 4.4 : Conversion en graphe d'une partie du réseau de l'île de la Cité à Paris (début XIXe siècle). a : Plan d'îlot (Source : Vasserot îlots (1810-1836) © Alpage, A.-L. Bethe 2010). b : Réseau viaire correspondant. c : Graphe topologique. d. Carte axiale. e. Graphe géométrique. f. Approche mixte (chaque axe a une couleur).

Signalons enfin qu'il existe d'autres représentations que celles vues jusqu'ici. Jiang & Claramunt (2004) par exemple se sont basés sur le nom des voies pour définir les arêtes du graphe : dès que le nom change, l'arête change.

Le graphe dual

Dans la théorie des graphes, les éléments sur lesquels portent l'attention sont ceux représentés par les sommets : les arêtes servent à montrer la mise en relation de ces sommets, la distance entre eux, etc. Dans le cas des réseaux viaires, cela signifie qu'en représentant les tronçons, ou les axes, par des arêtes, et les intersections et extrémités d'impasses par des sommets, les objets auxquels on s'intéresse dans le réseau sont ces intersections et ces extrémités d'impasses.

Les intersections sont un objet primordial dans un réseau viaire, elles jouent un rôle dans la répartition des déplacements, en offrant une alternative de chemins potentiellement plus avantageuse Prud'homme (2016). Néanmoins, l'intérêt des praticiens et des chercheurs porte parfois sur les objets linéaires (les tronçons, les axes) plutôt que sur ces objets ponctuels que sont les intersections. Cela s'explique du fait que ces objets linéaires sont une composante primordiale de l'espace urbain : comme nous l'avons dit en chapitre 1, les voies (donc les tronçons et les axes) sont le support des déplacements, des lieux de vie, ils donnent une image de la ville. Xie & Levinson (2007) vont jusqu'à dire que les voies sont les « éléments actifs » des réseaux viaires.

C'est la raison pour laquelle les approches décrites ci-dessus proposent toutes une formalisation *duale* du graphe¹²⁹ (Porta et al., 2006b). Dans le cas d'un graphe topologique, lors du passage à la formalisation duale, les tronçons deviennent les sommets du graphe, et les intersections deviennent les arêtes qui relient ces sommets (cf figures 4.5 et 4.6). Chaque arête n'existe que si elle relie deux tronçons, donc si elle est une intersection.

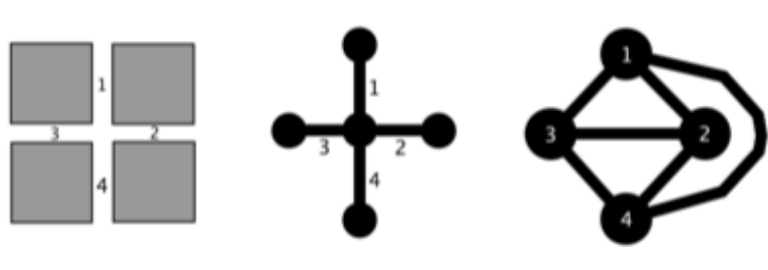


Figure 4.5 : Passage d'un réseau viaire à un graphe topologique, puis à un graphe topologique dual.

¹²⁹ Par opposition à la formalisation primaire vue jusqu'ici.

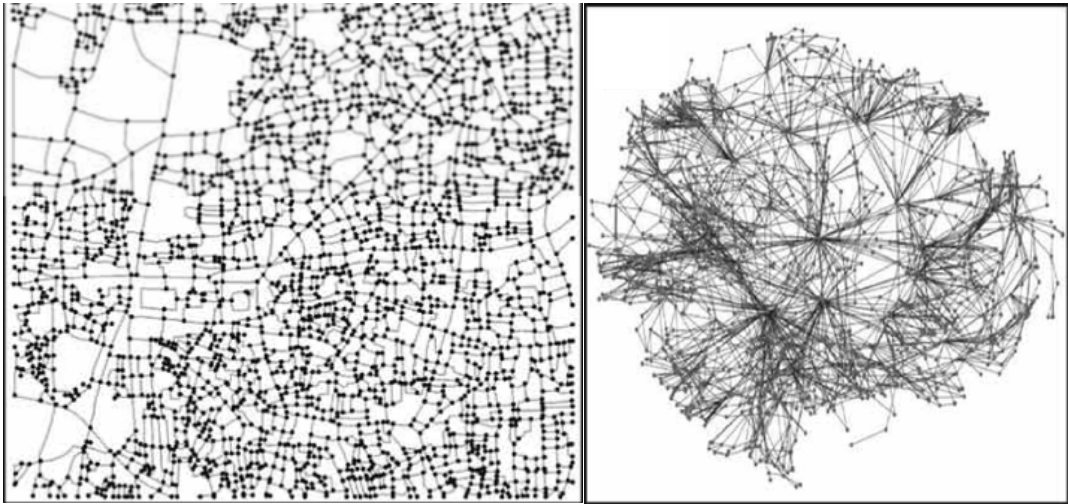


Figure 4.6 : Passage d'un graphe géométrique primaire (gauche) à un graphe dual (droite), réseau viaire d'Ahmedabad. Source : (Porta et al., 2006).

Dans le cas de la carte axiale (cf figure 4.7) et de l'approche mixte, les axes seront les sommets du graphe et les intersections de ces axes, autrement dit les changements de direction, seront les arêtes du graphe. Ces graphes sont critiqués par Porta et al. (2006a) car pour eux, ils « propulsent en réalité les systèmes routiers urbains (...) hors du champ de la géographie » : une voie, qu'elle soit très locale ou au contraire qu'elle traverse la ville de bout en bout, sera représentée par un sommet sur le graphe dual.

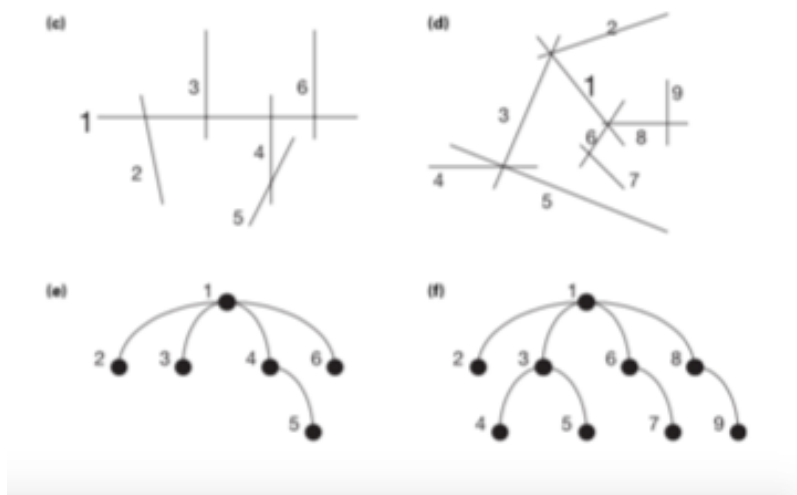


Figure 4.7 : Cartes axiales (c et d) et leur représentation duale (e et f). Les numéros permettent d'identifier à quel axe correspond chaque sommet du graphe dual. Source : (Marshall, 2005)

La représentation duale d'un graphe géométrique peut, à première vue, paraître identique à celle d'un graphe topologique. En effet, en réduisant les tronçons à des sommets, on perd théoriquement l'information qui fait la spécificité du graphe géométrique : les dimensions et la géométrie de chaque tronçon de voie. En réalité, il est possible de conserver ces informations lors du passage au graphe géométrique dual. **Ces informations (longueur du tronçon, courbure, orientation, etc.) deviennent alors les attributs des sommets (qui représentent désormais les tronçons).**

I.2.2. Quel type de représentation choisir ?

La manière de représenter un réseau viaire en graphe dépend de ce qu'on considère comme faisant partie du réseau viaire : la prise en compte ou non des rues piétonnes, des passages couverts, des culs-de-sac, etc. modifie le graphe obtenu. Il est donc important de bien définir au préalable ce que l'on considère comme étant une « voie », et ce que l'on souhaite englober sous le terme « réseau viaire ». Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 5.

Ensuite, comme le souligne Marshall (2005), le choix de tel ou tel formalisme lors du passage du réseau au graphe (graphe topologique, carte axiale, graphe géométrique, approche mixte, sous forme primaire ou duale) devrait dépendre de l'objectif recherché : la représentation choisie doit rendre compte du phénomène que l'on souhaite analyser. Si notre intérêt porte uniquement sur la topologie, le graphe topologique est suffisant ; si on s'intéresse au mouvement des individus, la carte axiale peut être plus pertinente.

Dans notre cas, le graphe doit représenter fidèlement les caractéristiques morphologiques du réseau viaire, pas uniquement leur topologie mais aussi leurs dimensions et leur géométrie. Cela nous fait exclure les graphes topologiques, et nous fait choisir les graphes géométriques. Ces graphes seront préférés aux cartes axiales et aux approches mixtes, car **les données géographiques disponibles sur les réseaux viaires sont déjà structurées selon ce formalisme des graphes géométriques**. Selon Porta, Crucitti, & Latora (2006a) et Cooper & Chiaradia (2015) ces graphes sont très proches du standard mondial en termes de construction et de diffusion des bases de données géographiques sur les réseaux viaires. Nous pourrions donc facilement exploiter ces données, comme nous le montrons dans le chapitre 5.

Signalons que les graphes géométriques que nous construisons seront non orientés et planaires¹³⁰. Par ailleurs, nous construisons uniquement des graphes connexes, c'est-à-dire des graphes dans lesquels l'ensemble des arêtes est relié.

Par ailleurs, notre intérêt porte depuis le début de ce travail sur les voies de circulation, autrement dit les éléments linéaires du réseau viaire. Nous convertirons donc les graphes géométriques primaires construits en **graphes géométriques duaux**. Nous conserverons toutefois l'ensemble des caractéristiques morphologiques des tronçons lors de ce passage du graphe primaire au graphe dual. Ces caractéristiques seront des attributs des sommets. Les graphes que nous construisons seront donc **valués**.

1.2.3. Décrire le réseau converti en graphe

Une fois un réseau viaire converti en graphe, il est possible de le décrire au moyen de plusieurs mesures, que nous appelons des **descripteurs de réseaux**. Ces descripteurs ont été utilisés pour l'analyse des réseaux de transport dès les années 60, notamment par Garrison & Marble (1962) dans leur rapport *The structure of transportation networks*, et par Kansky (1963) dans sa thèse *Structure of transportation networks : relationships between network geometry and regional characteristics*.

Depuis ces travaux pionniers, l'utilisation de descripteurs issus de la théorie des graphes pour étudier les réseaux de transport, et notamment les réseaux viaires, s'est largement répandue. Nous verrons que les travaux sur les réseaux viaires sont souvent le fait d'architectes partisans de la *Space Syntax*, mais aussi d'urbanistes, de géomaticiens, d'ingénieurs civils, ou encore de physiciens. Il existe également plusieurs collaborations interdisciplinaires. Nous verrons à la fin du chapitre que ces travaux peuvent être positionnés par rapport à deux tendances principales.

Les descripteurs de réseaux sont nombreux¹³¹, et plusieurs d'entre eux sont pertinents pour le cas des réseaux viaires. Rappelons que notre objectif est d'explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et les conditions d'accessibilité offertes aux usagers. Pour cette raison, nous choisissons d'avoir recours à deux catégories de descripteurs : des descripteurs que nous qualifions de **descripteurs morphologiques**, et des descripteurs que nous qualifions de **descripteurs d'accessibilité**. Cette catégorisation des descripteurs de réseaux est propre à notre travail : dans la littérature en analyse de réseaux, ces descripteurs sont souvent utilisés de manière indifférenciée pour décrire la

¹³⁰ Barthelemy (2011) et Lämmer et al. (2006) soutiennent que, même si les graphes planaires ne permettent pas de prendre en compte le cas des ponts et des tunnels, ils demeurent pertinents pour représenter les réseaux viaires.

¹³¹ Voir notamment les archives du groupe fmr sur halshs, pour une revue des différents descripteurs, notamment les articles de Ducruet : *Les mesures locales d'un réseau*, et *Les mesures globales d'un réseau*.

« structure¹³² des réseaux ». Toutefois, il nous semble intéressant de prendre appui sur Haggett & Chorley (1969), qui différencient descripteurs des caractéristiques grossières des réseaux (*measures based on gross characteristics*), qui sont des descripteurs morphologiques, et descripteurs des caractéristiques des plus courts chemins (*measures based on shortest-path characteristics*), qui sont l'équivalent de nos « descripteurs d'accessibilité ».

Les descripteurs de réseaux peuvent également être classés en fonction de l'échelle à laquelle ils sont calculés. Certains sont globaux, calculés à l'échelle de l'ensemble du réseau. D'autres sont locaux, c'est-à-dire qu'ils sont calculés à l'échelle de chaque tronçon de voie. Toutefois, diverses méthodes permettent de décrire un réseau dans son ensemble, à partir de descripteurs calculés à l'échelle des tronçons. On peut par exemple décrire la **distribution statistique du descripteur des tronçons**, sur un histogramme par exemple, ce qui donne une idée de la manière dont se répartissent les valeurs du descripteur entre les tronçons du réseau (les tronçons prennent-ils des valeurs proches ou éloignées, pour le descripteur considéré?). On peut également obtenir un **résumé numérique** du descripteur à l'échelle du réseau, en calculant la moyenne, la médiane (ou une autre valeur de référence) des valeurs prises par ce descripteur pour l'ensemble des tronçons. On peut enfin observer la **distribution spatiale** du descripteur, en représentant (par un code couleur par exemple) sa valeur pour chaque tronçon sur le graphe du réseau. Ces trois méthodes (description de la distribution statistique, résumé numérique, description de la distribution spatiale) sont souvent utilisées dans la littérature. Elles sont intéressantes dans le cadre de ce travail car elles correspondent à différentes manières de décrire les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire dans son ensemble, à partir d'observations réalisées sur ses tronçons.

Conclusion de la partie I

La théorie des graphes permet de représenter la morphologie des réseaux viaires de manière simplifiée. En effet, la morphologie d'un réseau viaire étant composée d'éléments linéaires (les voies) et d'éléments ponctuels (les intersections), le graphe, composé d'arêtes et de sommets, est intuitivement une bonne représentation de cette morphologie. Nous avons vu qu'il existait différentes manières de convertir la morphologie d'un réseau viaire en graphe. Certaines ne conservent que la topologie du réseau (graphe topologique) alors que d'autres en conservent la topologie et la géométrie (graphe géométrique). En outre, certaines représentations rendent la

¹³² Selon le CNRTL, une structure désigne l'agencement, entre eux, des éléments constitutifs d'un ensemble construit, qui fait de cet ensemble un tout cohérent et lui donne son aspect spécifique.

morphologie du réseau abstraite, en convertissant les éléments linéaires en sommets et les éléments ponctuels en arêtes (graphe dual).

Chacune de ces représentations est adaptée à un objectif précis. Dans notre cas, nous avons choisi la représentation en **graphe géométrique dual**, car celle-ci permet de conserver la topologie, la géométrie et le dimensionnement du réseau, tout en permettant une focalisation sur les éléments linéaires, en l'occurrence les tronçons de voies.

Dans la partie II ci-dessous, nous présentons les descripteurs morphologiques que nous sélectionnons pour décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires. Nous verrons que la conversion de ces réseaux en graphes géométriques permet une description riche de ces caractéristiques. En effet, plus on s'éloigne de la représentation du graphe « pur », topologique, plus la description de la morphologie du réseau est précise, et les descripteurs morphologiques nombreux.

II. La description morphologique

Nous allons nous intéresser dans cette partie aux descripteurs morphologiques, c'est-à-dire aux descripteurs qui rendent compte des caractéristiques topologiques, dimensionnelles et géométriques du réseau représenté par le graphe. Cette description constitue un enjeu important de notre travail : nous verrons dans quelle mesure des descripteurs quantitatifs permettent de rendre compte de caractéristiques morphologiques jusqu'ici décrites par des « mots ». Les descripteurs permettent-ils une description précise, sans ambiguïté, de ces caractéristiques ?

II.1. Quelles caractéristiques morphologiques ?

Nous choisissons de nous concentrer sur un ensemble de caractéristiques morphologiques souvent mobilisées par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (cf chapitre 3) pour décrire la morphologie des réseaux viaires qu'ils préconisent. Le choix de ces caractéristiques a également été guidé par le fait qu'elles soient **mesurables**. Ce critère de choix nous a fait exclure des caractéristiques telles que le caractère morphologiquement hiérarchisé d'un réseau viaire. Cette caractéristique est souvent décrite en urbanisme, mais nous n'avons pas été en mesure d'identifier un descripteur qui en rende compte. Nous nous concentrons donc sur les caractéristiques suivantes :

- la **connectivité** du réseau ;
- le **type d'intersections** dans le réseau, celles-ci peuvent être en T, en X, en étoile ;

- la **rectitude des voies** dans le réseau, celles-ci peuvent être droites, courbes, brisées ;
- l'**orientation** des voies, elle peut être orthogonale comme dans une grille, radiale, formant des figures étoilées ;
- l'**espacement** entre les voies du réseau, qui peuvent être rapprochées ou espacées.

Ces caractéristiques morphologiques sont décrites en urbanisme de manière qualitative, par des mots. Notre objectif dans cette partie est de les traduire en descripteurs quantitatifs, ce qui permettra d'harmoniser leur définition.

II.2. Quels descripteurs ?

Nous présentons dans cette partie un ensemble non exhaustif de descripteurs pouvant être calculés sur un graphe pour décrire les caractéristiques morphologiques d'un réseau. **Nous nous focalisons sur les descripteurs permettant de décrire les caractéristiques mentionnées dans la section précédente.** Certains de ces descripteurs ont spécifiquement été développés, par nos prédécesseurs, pour la description des réseaux viaires, d'autres sont des descripteurs utilisés dans l'analyse de tous types de réseaux (réseaux techniques, réseaux sociaux, ...). En plus des caractéristiques mentionnées ci-dessus, nous allons montrer comment est évaluée la taille d'un réseau viaire converti en graphe, car cette évaluation de la taille est nécessaire pour le calcul d'autres descripteurs.

Les descripteurs morphologiques sont de deux sortes : les descripteurs **topologiques** et les descripteurs **géométriques**. Les descripteurs topologiques décrivent la configuration du réseau, telle que représentée de manière abstraite par des arêtes et des sommets (comme dans le plan d'un métro par exemple). Les descripteurs géométriques décrivent la composition du réseau, en respectant le positionnement des voies et des intersections, les longueurs de voies, leur orientation, leur courbure, et bien d'autres caractéristiques.

II.3. Les descripteurs topologiques

II.3.1. Quantifier la taille du réseau

La taille d'un réseau peut être évaluée par l'intermédiaire du nombre de sommets et d'arêtes du graphe représentant ce réseau. Dans la littérature, le nombre d'arête est souvent noté E , et le nombre de sommets N . La taille est un descripteur plus intuitif sur un graphe primaire que sur un graphe dual. En effet, sur un graphe géométrique primaire, le nombre d'arêtes correspond au nombre de tronçons de voie, et le nombre de sommets correspond au nombre d'intersections et d'extrémités de

tronçons – c’est l’inverse sur un graphe géométrique dual. Nous choisissons donc d’évaluer la taille du réseau directement sur le graphe primaire.

Selon Barthelemy (2011), le nombre d’arêtes et de sommets dans les graphes représentant des réseaux viaires sont très fortement corrélés (cf figure 4.8). De fait, il n’est pas nécessaire de conserver ces deux descripteurs pour évaluer la taille d’un réseau, un seul d’entre eux suffit.

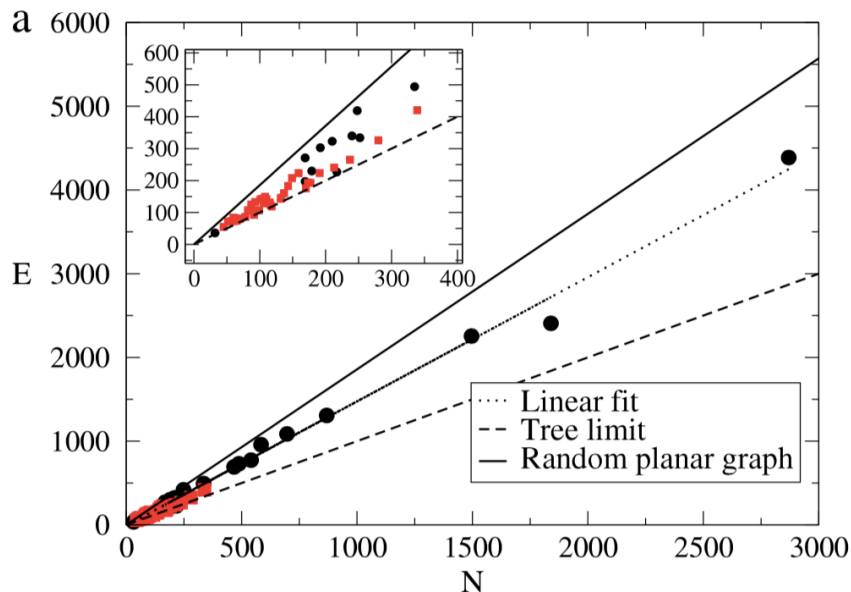


Figure 4.8 : Graphique du nombre de sommets (N) en fonction du nombre d’arêtes (E) pour un ensemble de réseaux viaires représentés par des graphes primaires. La courbe de tendance est linéaire. La ligne en pointillés représente la relation observée dans un graphe en arbre, et la ligne pleine représente la relation dans un graphe planaire aléatoire. On peut voir dans l’encadré un zoom sur les valeurs faibles. Source : (Barthelemy, 2011) d’après des données de (Cardillo et al., 2006) (points noirs) et de (Buhl et al., 2006) (carrés rouges).

II.3.2. Quantifier la connectivité du réseau

A l’origine, le terme « connectivité » désignait la possibilité de se rendre d’un sommet à l’autre du graphe, en suivant les connexions offertes par les arêtes (Freiria, Ribeiro, et Tavares 2015). Par extension, le terme décrit à quel point les sommets du graphe sont interconnectés : plus les sommets sont fortement reliés entre eux, plus on dira que la connectivité du réseau est élevée. A l’inverse, moins ils sont reliés entre eux, plus la connectivité est faible. Les descripteurs de connectivité existant dans la littérature sont généralement calculés sur un graphe primaire.

La connectivité des réseaux spatiaux a été étudiée dès le début des années 60 (Garrison et Marble 1962; Kansky 1963; Haggett et Chorley 1969) et celle des réseaux viaires l’a été depuis les années 2000 (Usui et Asami 2011; Levinson 2012; Xie et Levinson 2009; Buhl et al. 2006; Strano et al. 2013; Cardillo et al. 2006; Liu et

Zhao 2015). Les descripteurs de connectivité sont nombreux. Ainsi, en 1963, Kansky propose dans sa thèse quatorze descripteurs pour mesurer les caractéristiques topologiques des réseaux de transport. Les plus répandus de ces descripteurs sont ceux notés *Alpha*¹³³, *Beta*¹³⁴ et *Gamma*¹³⁵, qui évaluent, de trois manières différentes, à quel point les sommets d'un graphe sont reliés les uns aux autres. De son côté, Noda (1996, cité dans (Sreelekha et al., 2016; Usui & Asami, 2011)) propose le *Grid Tree Pattern index*, qui décrit à quel point le réseau se rapproche d'un arbre, ou d'une grille¹³⁶. Courtat et al. (2011) pour leur part développent le *ratio d'organicité*, qui rend compte de la proportion de culs-de-sac et d'intersections en T dans un réseau. Enfin, Berrigan et al. (2010) proposent le *Connected node ratio*, qui correspond au nombre de sommets représentant des intersections (dans un graphe primaire), divisé par le nombre total de sommets (c'est-à-dire en incluant les sommets qui représentent des extrémités de tronçon).

Ces descripteurs semblent bien adaptés à la description de la connectivité d'un réseau viaire. Pourtant, plusieurs auteurs soutiennent que les descripteurs de connectivité sont fortement corrélés entre eux (Berrigan et al., 2010; Ducruet, 2010; Sreelekha et al., 2016). Berrigan et al par exemple montrent qu'il existe une forte corrélation entre *Alpha*, *Beta*, *Gamma* et le *connected node ratio*. Comme nous voulons décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux au moyen de descripteurs non redondants, nous choisissons de nous concentrer sur un descripteur unique : Alpha, le coefficient de maillage. Ce descripteur nous apparaît comme le plus utilisé dans la littérature sur l'analyse des réseaux viaires (Buhl et al., 2006; Cardillo et al., 2006; Courtat et al., 2011; Liu & Zhao, 2015).

Alpha, le coefficient de maillage

Le coefficient de maillage (ou *meshedness coefficient*, noté alpha) correspond au rapport entre le nombre de « faces » ou de « mailles » que comprend le graphe représentant le réseau, et le nombre maximal de faces possibles (cf formule). Une face est un polygone constitué d'arêtes. Dans le cas d'un réseau viaire, les faces correspondent aux îlots du réseau, ils peuvent être de forme triangulaire, carrée, trapézoïdale ou autre. De son côté, le nombre maximal de faces possible s'obtient en créant une triangulation à partir du graphe représentant le réseau. Cette triangulation est dite *greedy triangulation*, elle est basée sur la connexion de couples de sommets (du graphe originel), dans un ordre ascendant en fonction de la distance qui les sépare, et de manière à ne créer aucun nouveau sommet (Cardillo et al.,

¹³³ Nous reviendrons sur ce descripteur.

¹³⁴ Ce descripteur correspond au rapport entre le nombre d'arêtes et le nombre de sommets.

¹³⁵ Consiste à comparer le nombre d'arêtes dans le graphe au nombre maximal d'arêtes possible entre les sommets, en respectant la planarité du graphe.

¹³⁶ Cet indice est nul dans le cas d'un réseau en arbre, et vaut 1 dans le cas d'une grille.

2006). Le nombre de faces dans cette triangulation est le nombre maximal de faces possible, lorsque le graphe est planaire. Il s'agit donc du graphe planaire à la connectivité maximale.

$$Alpha = \frac{E - N + P}{2N - 5}$$

où

(E-N+P) renvoie au nombre de faces dans le graphe (E est le nombre d'arêtes, N le nombre de sommets, et P le nombre de composantes connexes, 1 dans notre cas¹³⁷) ;

(2N-5) renvoie au nombre maximal de faces possibles dans un graphe planaire

Le coefficient de maillage est nul pour un réseau ne comprenant aucune face comme un réseau en arbre par exemple. Il vaut 1 dans une *greedy triangulation*. Ce coefficient a souvent été utilisé pour décrire la connectivité des réseaux viaires, autrement dit pour décrire à quel point les voies du réseau sont reliées les unes aux autres. Cardillo et al. (2006) et Rui et al. (2013) l'ont utilisé pour décrire une vingtaine de réseaux viaires réels. Ils trouvent en moyenne un coefficient de maillage de 0,219. Barthélemy (2011) explique que ce coefficient est relativement faible dans les réseaux viaires. Cela s'explique par le fait que les îlots dans un réseau viaire sont généralement rectangulaires, carrés ou trapézoïdaux, et assez peu triangulaires. De fait, même si un réseau comprend un grand nombre d'îlots, ce nombre est tout de même beaucoup plus faible que le nombre de triangles qu'il serait possible d'obtenir si le réseau correspondait à une triangulation. Ainsi, le rapport entre le nombre d'îlots dans le réseau viaire, et le nombre de triangles de la triangulation, autrement dit le coefficient de maillage, est généralement faible.

Selon Ducruet (2010) les descripteurs de connectivité sont problématiques car ils ne dépendent que du nombre d'arêtes et de sommets. De fait, leur valeur peut être identique pour des graphes très différents, sous réserve que leur nombre d'arêtes et de sommets varie proportionnellement. Pourtant, plusieurs auteurs ont montré que ces descripteurs, en particulier le coefficient de maillage, permettaient de distinguer des réseaux viaires morphologiquement différents. Par exemple, Cardillo et al. (2006) calculent le coefficient de maillage pour un ensemble de 20 réseaux viaires de différents types. Ils trouvent les coefficients de maillage les plus élevés pour Manhattan, et les plus faibles pour Walnut Creek, une ville de Californie composée de plusieurs lotissements. De leur côté, Liu et Zhao (2015), qui désignent le

¹³⁷ Tous les réseaux que nous étudions sont composés d'une seule composante connexe, de fait P est égal à 1.

coefficient de maillage comme un indice de circularité, ont étudié les réseaux viaires de 16 quartiers anciens japonais. Ils trouvent les connectivités les plus faibles dans les réseaux comprenant des structures en arbre (que nous avons appelé *réseaux arborescents*), et les plus élevées dans les réseaux formant des grilles (que nous avons appelé *réseaux quadrillés*). Ils attribuent cela à la présence de nombreuses faces – qu’ils désignent comme des *voies circulaires* – dans les réseaux en grille.

II.3.3. Quantifier le type d’intersections

Le degré des tronçons

Définition

Le degré d’un sommet désigne le nombre d’autres sommets auxquels il est relié. Par exemple, dans un réseau ferroviaire représenté par un graphe primaire, chaque station est un sommet du graphe. Calculer le degré d’une station revient donc à compter le nombre d’autres stations auxquelles elle est reliée.

Le degré est souvent utilisé pour l’analyse des réseaux viaires (Cardillo et al., 2006; Lagesse et al., 2015), en général sur un graphe primaire. Toutefois, ce descripteur est également pertinent sur un graphe géométrique dual, c’est-à-dire dans un graphe où les sommets représentent les tronçons du réseau, et les arêtes représentent les intersections entre ces tronçons. Dans ce cas, on calcule le degré d’un tronçon, qui correspond au nombre d’autres tronçons auxquels il est relié.

Nous présentons des exemples de quelques « degrés types » ci-dessous, et dans la figure 4.9 :

- Les tronçons en boucles tels que les raquettes (*lollipops*) des réseaux arborescents ont un degré de 1 ;
- Les culs-de-sac ont souvent un degré de 2 ou de 3 ;
- Un tronçon de degré 4 est souvent un tronçon qui forme des intersections en T avec les tronçons voisins ;
- Un tronçon de degré 5 forme d’un côté une intersection en T, et de l’autre une intersection en X, avec les tronçons voisins ;
- Un tronçon de degré 6 forme, en général, des intersections en X avec les sommets voisins ;
- Un tronçon de degré supérieur à 6 est un tronçon qui forme des intersections en étoile (cinq voies ou plus) sur au moins une de ses extrémités.

Signalons que dans les réseaux viaires, les intersections en étoile s’observent généralement à une extrémité du tronçon seulement. Dit autrement, les groupes de

tronçons au degré très élevé sont rarement reliés à d'autres groupes de tronçons au degré très élevé. En analyse de réseaux, cette propriété est appelée la *diassortativité* : les réseaux viaires sont diassortatifs (Buhl et al. 2006).

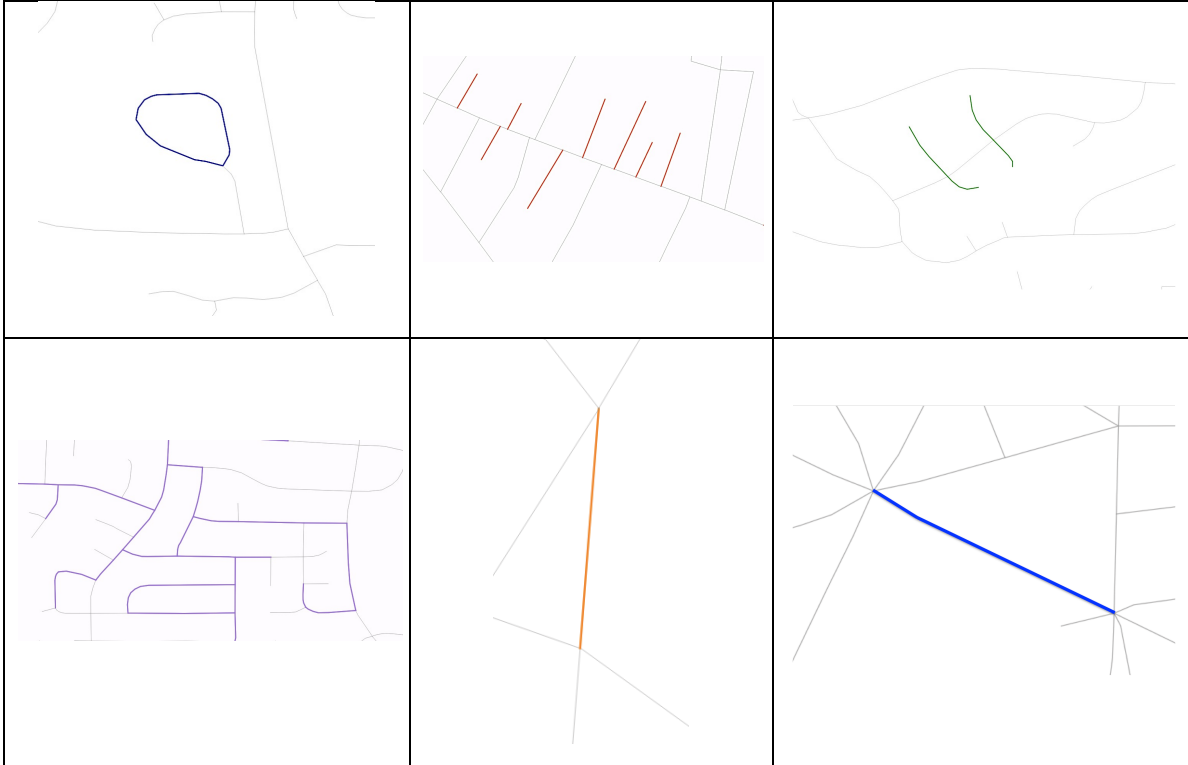


Figure 4.9 : Schémas illustrant des exemples de quelques degrés fréquents dans les réseaux viaires. De gauche à droite et de haut en bas : boucle de degré 1, culs-de-sac de degré 2, culs-de-sac de degré 3, tronçons de degré 4 formant des intersections en T, tronçon de degré 6 formant des intersections en X, tronçons de degré 12 formant des intersections en étoile.

Le degré est un descripteur calculé à échelle locale, c'est-à-dire pour chaque tronçon. Il est néanmoins possible d'obtenir une description globale du degré à l'échelle d'un réseau dans son ensemble, d'une part en étudiant la distribution statistique du degré calculé au niveau de chaque tronçon, et d'autre part en calculant son résumé numérique grâce à une valeur de référence.

La distribution statistique du degré

La distribution statistique du degré des tronçons d'un réseau viaire est peu étudiée en analyse de réseaux. Comme nous l'avons dit, la plupart des auteurs calculent le degré sur un graphe primaire, ils étudient donc le degré des intersections du réseau

viaire et non celui des tronçons (Cardillo et al. 2006; Buhl et al. 2006)¹³⁸. Toutefois, ces travaux sont utiles pour illustrer la manière de décrire un réseau dans son ensemble, à partir de la distribution statistique du degré de ses éléments.

Selon Xie & Levinson (2007), les réseaux, quels qu'ils soient, peuvent être classés en fonction de la distribution statistique de leur degré en deux catégories : les réseaux aléatoires (*random networks*) et les réseaux sans échelles (*scale-free networks*). Les réseaux aléatoires sont des réseaux dans lesquels tous les sommets (du graphe) ont approximativement le même nombre d'arêtes, donc approximativement le même degré. Il existe donc un « degré type » dans ces réseaux. A l'inverse, les réseaux sans échelles ont des sommets de degrés très variés : il n'y a pas de « degré type ». Le degré varie dans de très larges proportions, et sa distribution statistique est alors très étalée et suit une loi de puissance. Xie et Levinson affirment que **les réseaux viaires appartiennent à la première catégorie, celle des réseaux aléatoires**. En effet, dans un réseau viaire, le degré des sommets ne peut varier que dans de très faibles proportions. Cela s'explique selon eux par le coût lié à la construction de tronçons et d'intersections, qui fait que ces derniers sont généralement reliés uniquement à leur voisinage. Ceci génère des degrés assez faibles et peu variables.

La figure 4.10 issue de de Cardillo et al (2006) illustre la faible amplitude du degré dans les réseaux viaires. Les auteurs étudient un ensemble de 20 réseaux viaires, représentés par des graphes primaires. Leur analyse se limite à un échantillon de chacun de ces réseaux, d'une superficie de 1 mile-carré. Leurs résultats montrent que le degré des sommets varie peu, en particulier dans les réseaux d'Ahmedabad et du Caire (notés 1 et 5 sur la figure 4.10). De leur côté, Lagesse et al. (2015) ont étudié la distribution statistique du degré sur un graphe primaire, pour les réseaux viaires de Paris et Avignon. Ils ont trouvé des distributions déclinant beaucoup plus vite qu'une loi de puissance. Nous testerons dans le chapitre 6 si la même faiblesse d'amplitude s'observe dans le degré des tronçons, calculés sur un graphe géométrique dual.



Figure 4.10 : Graphique représentant, pour un ensemble de 20 réseaux viaires, le degré minimal, maximal et moyen des sommets (les calculs sont faits sur un graphe primaire). On constate la faible amplitude des degrés. Source : (Cardillo et al. 2006)¹³⁹

¹³⁸ Les quelques applications sur un graphe dual relèvent de la *Space Syntax* ou de l'approche mixte (Lagesse, 2015; A. Paolo Masucci & Molinero, 2016; Porta et al., 2006b), approches différentes de la notre.

¹³⁹ Les chiffres correspondent aux villes suivantes : 1 : Ahmedabad, 2 : Barcelone, 3 : Bologne, 4 : Brasilia, 5 : Le Caire, 6 : Irvine (quartier 1), 7 : Irvine (quartier 2), 8 : Los Angeles, 9 : Londres, 10 :

Le degré moyen d'un réseau viaire

La moyenne du degré est souvent utilisée dans les travaux d'analyse de réseaux viaires pour obtenir un résumé numérique du degré à l'échelle de tout le réseau (Buhl et al., 2006; Cardillo et al., 2006; Haggett & Chorley, 1969)¹⁴⁰. Buhl et ses collègues étudient un ensemble de 41 réseaux viaires qu'ils qualifient d'auto-organisés, correspondant à des villes ou des quartiers en Europe, en Afrique, en Amérique centrale, ou encore en Inde. Ils convertissent ces réseaux en graphes primaires, et calculent notamment le degré moyen des sommets de ces graphes. Ce degré moyen est de 2,02 tronçons par intersection dans le réseau d'El Agustino au Pérou, de 2,17 tronçons par intersection dans le réseau de la Casbah d'Alger, et de 2,81 tronçons par intersection, dans le réseau d'un quartier d'Amiens au XIXe siècle.

La revue de Barthelemy (2011) sur les réseaux spatiaux nous mène cependant à nuancer l'intérêt du degré moyen comme descripteur topologique d'un réseau dans son ensemble. Barthelemy montre (p. 25) sur plusieurs exemples issus de Cardillo et al. (2006), que le degré moyen donne la même information que le coefficient de maillage. Ce descripteur serait donc redondant. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 6.

II.4. Les descripteurs géométriques

Les descripteurs morphologiques présentés jusqu'ici étaient topologiques. Nous allons maintenant aborder des descripteurs de la géométrie et du dimensionnement des réseaux viaires, calculés sur leur représentation sous forme de graphe géométrique.

II.4.1. Quantifier la rectitude des voies

La courbure des tronçons

La rectitude des voies est assez peu étudiée dans les travaux consultés en analyse de réseaux, et en analyse de réseaux viaires. Pourtant, elle peut être évaluée grâce à un descripteur morphologique simple : la courbure des tronçons. Selon Cooper (2016), la courbure d'un tronçon correspond au cumul des angles formés le long de ce tronçon, elle est exprimée en degré.

New Delhi, 11 : New York, 12 : Paris, 13 : Richmond, 14 : Savannah, 15 : Seoul, 16 : San Francisco, 17 : Venise, 18 : Vienne, 19 : Washington, 20 : Walnut Creek.

¹⁴⁰ Signalons que cette moyenne est moins pertinente dans le cas de réseaux sans échelle, en particulier si la distribution du degré suit une loi de puissance. Cette distribution sera alors mieux résumée par la pente de la loi de puissance.

Une courbure nulle indique que le tronçon est parfaitement rectiligne. Plus la courbure est élevée, plus l'angle formé entre les deux extrémités du tronçon est important. Cela se produit si le tronçon est courbe (cf figure 4.11) ou brisé. Pour alléger le texte, nous utilisons le terme « courbe » pour désigner à la fois les tronçons courbes et les tronçons brisés. Les deux se caractérisent par une courbure angulaire élevée. Dans le cas d'un tronçon parfaitement circulaire, la courbure vaudra 360° , mais des tronçons très sinueux peuvent avoir une courbure nettement supérieure. Nous explorons plus en détail ce descripteur dans le chapitre 6.



Figure 4.11 : Graphe indiquant en rouge les tronçons les plus courbes du réseau.

II.4.2. Quantifier l'orientation des voies

L'orientation cardinale des tronçons

Contrairement à la courbure, l'orientation cardinale des tronçons fait l'objet d'un grand intérêt en analyse des réseaux viaires. L'orientation d'un tronçon est l'angle qu'il forme par rapport à une direction de référence, souvent le nord géographique. En analyse de réseaux, l'orientation cardinale des tronçons n'est pas étudiée pour elle-même, elle est généralement comparée à celle des autres tronçons du réseau. En effet, les chercheurs s'intéressent souvent à la variabilité des orientations cardinales au sein du réseau. Cette variabilité peut être décrite en observant la **distribution statistique** des orientations.

Par exemple, Courtat et al. (2011) se sont intéressés à la distribution des angles formés (par rapport au nord géographique) par les tronçons de voies du réseau viaire d'Amiens, converti en graphe primaire. Les auteurs ont représenté ces angles sur un diagramme en radar, ce qui leur a permis de montrer que les angles des tronçons étaient plus variables si on considérait l'ensemble de la ville d'Amiens, que si on considérait uniquement le centre-ville. Ils montrent également que dans le centre-ville, la plupart des voies sont orientées selon des orientations privilégiées, perpendiculaires entre elles (cf figure 4.12). A noter que les orientations parallèles, séparées de 180° sur le diagramme, correspondent en réalité à la même orientation.

Par exemple, des tronçons orientés à 45° et des tronçons orientés à 225° ont la même orientation.

De leur côté, Gudmundson et Mohajeri (2013) ont étudié un ensemble de 41 réseaux viaires de villes britanniques. Ils ont ainsi montré que les variations d'orientation des tronçons étaient plus importantes dans les réseaux correspondant à des formes d'urbanisation étalées. Ils observent néanmoins dans certains réseaux la présence d'orientation privilégiées, perpendiculaires entre elles (cf figure 4.13). Plus récemment, Boeing (2019) a proposé le même type d'analyse mais à grande échelle, en travaillant sur les réseaux viaires de 100 villes, réparties sur les cinq continents. Ses résultats montrent notamment la propagation des morphologies quadrillées à travers le monde, mais aussi leur diversité.

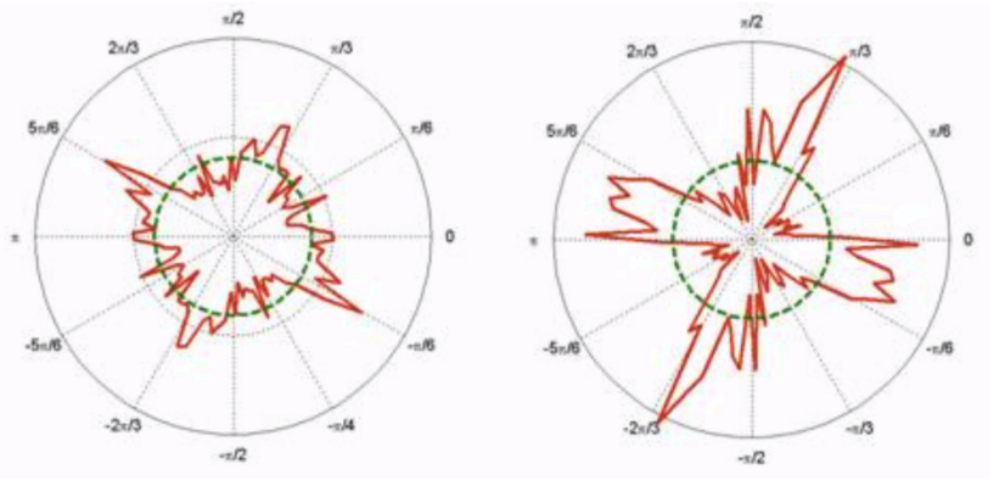


Figure 4.12 : Diagramme en radar (nommé aussi rose diagram) représentant l'orientation des tronçons dans le réseau viaire d'Amiens à gauche, et dans le centre-ville d'Amiens à droite. Source : (Courtat et al., 2011)

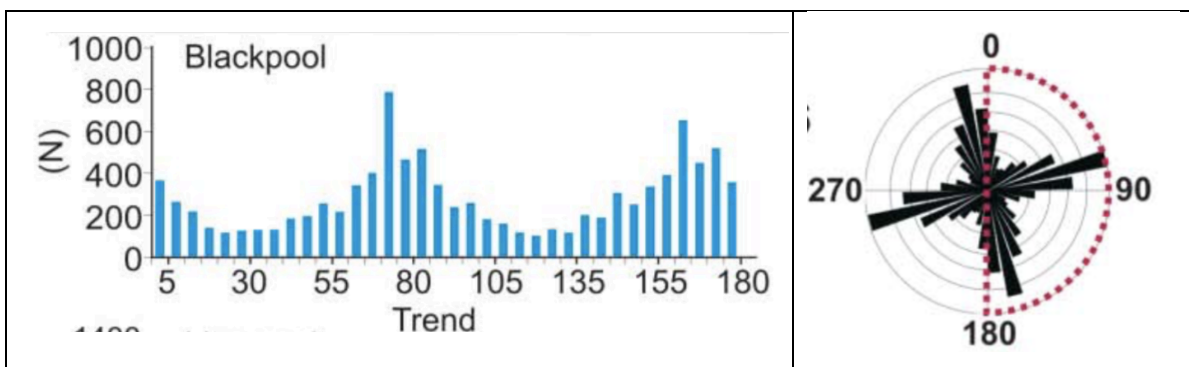


Figure 4.13 : Histogramme (gauche) et diagramme en radar (droite) de l'orientation des tronçons, pour la ville de Blackpool en Angleterre. On observe sur l'histogramme et le diagramme deux orientations privilégiées : une autour de 70° et une autour de 160° . Ces deux directions sont perpendiculaires. Source : (Gudmundsson & Mohajeri, 2013)

Enfin, Barthelemy et al. (2013) ont eux aussi étudié l'orientation des tronçons de voies, mais de manière diachronique. Ils ont en effet étudié l'évolution de cette orientation dans le réseau viaire parisien, converti en graphe primaire, en 1789, 1826, 1836 et 1888. Leurs graphiques sont présentés dans la figure 4.14. Les auteurs expliquent que jusqu'en 1836, l'orientation des tronçons est concentrée autour de deux directions privilégiées, mais qu'en 1888, cette orientation est plus variable : de nouvelles orientations de tronçons apparaissent. Il serait intéressant de confronter cette évolution aux interventions qui ont été faites sur le réseau viaire, entre 1836 et 1888. Nous y reviendrons dans le chapitre 6.

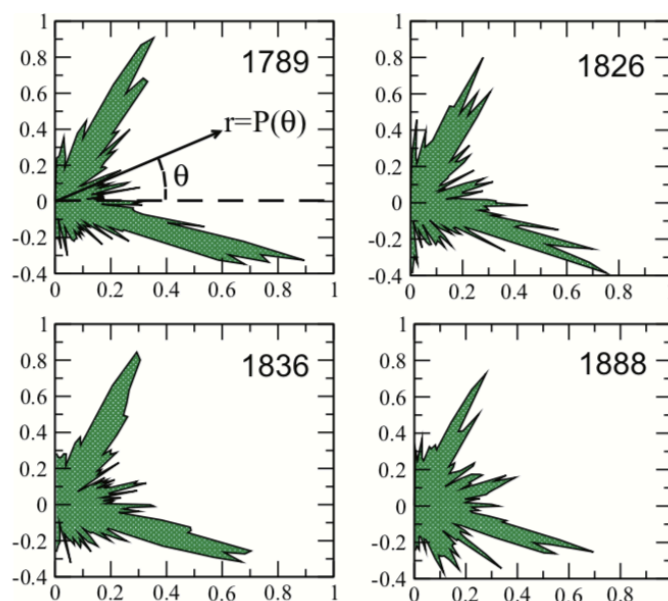


Figure 4.14 : Graphiques représentant la quantité de tronçon suivant chaque orientation cardinale, dans le réseau viaire de la ville de Paris en 1789, 1826, 1836 et 1888. On constate la prédominance de deux orientations perpendiculaires, dans lesquelles se situe la majorité des tronçons. Voir Barthelemy et al. (2013) pour une explication détaillée. Source : (Barthelemy et al., 2013).

II.4.3. Quantifier l'espacement des voies

Nous distinguons dans l'espacement des voies deux caractéristiques morphologiques distinctes. Les voies peuvent être faiblement espacées parce que leurs tronçons sont courts, ou parce qu'elles sont rapprochées les unes des autres. Ces deux caractéristiques s'observent souvent conjointement, mais leur définition, et leur évaluation quantitative, est différente. Nous choisissons donc de les évaluer par l'intermédiaire de deux descripteurs distincts : la longueur et l'espacement à proprement parler.

La longueur des tronçons

Définition

La longueur des tronçons d'un réseau viaire est un descripteur compréhensible intuitivement. Si le réseau est représenté par un graphe primaire, la longueur du tronçon s'obtient en calculant la longueur de l'arête entre deux sommets. Si ce graphe primaire est géométrique, cette arête ne forme pas une ligne droite entre les deux sommets, elle reprend la géométrie du tronçon, et se rapproche donc de ses dimensions réelles. Une fois ce graphe géométrique primaire converti en graphe dual, c'est-à-dire une fois les tronçons convertis en sommets du graphe, la longueur des tronçons devient un attribut des sommets.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la longueur des tronçons dans un réseau viaire. Gudmundsson et Mohajeri (2013) par exemple l'ont étudié pour un corpus de réseaux viaires de villes britanniques. Les auteurs expliquent que la longueur des tronçons est généralement faible dans les centres villes, mais qu'à mesure que la ville grandit, elle englobe de plus en plus de voies longues (boulevards, routes de campagne, ...). Néanmoins, des tronçons courts continuent d'être créés, car les périphéries contiennent également des zones résidentielles, dans lesquelles les tronçons sont courts. Ainsi, comme le signale Griffiths (2009) les villes contiennent généralement une majorité de tronçons courts, et quelques tronçons très longs. L'étude de la distribution statistique de la longueur des tronçons permet d'observer cela.

La distribution statistique de la longueur des tronçons

Lagesse et al. (2015) ont étudié les longueurs de tronçon des réseaux viaires dans les villes de Paris et Avignon. Ils trouvent, comme Gudmundsson et Mohajeri, qu'un grand nombre de tronçons a une longueur faible, inférieure à 60 mètres, mais que quelques tronçons ont une longueur très élevée, autour de 1 km, en particulier à Avignon. Sur les deux distributions statistiques (Paris et Avignon), le nombre de tronçons décline très vite à partir du seuil de 60 m. Masucci et al. (2009) trouvent eux aussi une distribution des longueurs déclinant très vite sur le réseau viaire de Londres.

Crucitti, Latora, et Porta (2006) observent le même type de distribution, sur un corpus de 18 réseaux viaires de 1 mile-carré issus du corpus construit par Cardillo et al. (2006). Néanmoins, Crucitti et ses collègues (2006) notent une différence entre les réseaux dits « auto-organisés » (que nous avons qualifié d'organiques dans le

chapitre 3) et les réseaux dits « planifiés » (essentiellement des réseaux quadrillés et arborescents). Ils trouvent ainsi des distributions unimodales pour les réseaux auto-organisés tels que Ahmedabad et Le Caire, tandis que pour les réseaux planifiés tels que Richmond et Los Angeles, la distribution est multimodale, avec plusieurs pics (cf figure 4.15). Les auteurs expliquent que cela est dû à la morphologie en grille de ces réseaux. Pour Los Angeles par exemple, les deux pics à 65 m et 205 m environ (cf figure 4.15) correspondent aux dimensions de la grille dans la partie centrale de la ville. La régularité de la grille explique qu'un grand nombre de tronçons aient cette longueur.

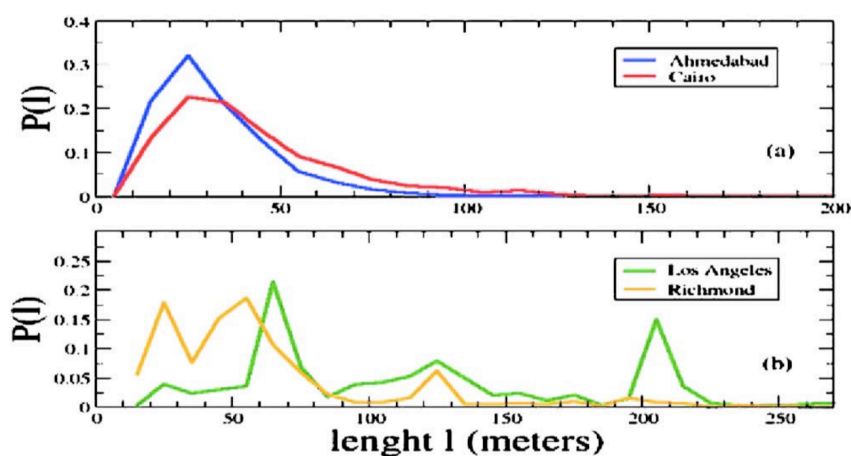


Figure 4.15 : Distribution statistique de la longueur des tronçons dans les réseaux viaires d'Ahmedabad (en bleu), du Caire (en rouge), de Los Angeles (en vert) et de Richmond (en jaune). Source : (Crucitti et al., 2006)

Longueur totale et longueur moyenne des tronçons

Pour obtenir un résumé numérique de la longueur des tronçons à l'échelle d'un réseau, on peut avoir recours à la longueur totale du réseau, que l'on obtient en additionnant les longueurs des tronçons. Ce descripteur est souvent utilisé dans le cas des réseaux de transports, notamment comme approximation de leur coût de construction (Barthelemy, 2011; Haggett & Chorley, 1969) : plus un réseau de transport comprend de mètres linéaires, plus il est coûteux.

Selon Barthélemy et Flammini (2009), la longueur totale d'un réseau viaire croît en fonction de la racine carrée du nombre de sommets (cf figure 4.16). La taille et la longueur totale d'un réseau sont donc fortement corrélées. Or, nous voulons conserver uniquement des descripteurs non redondants, nous choisissons donc de ne pas utiliser la longueur totale pour décrire les réseaux viaires et préférons retenir la longueur moyenne.

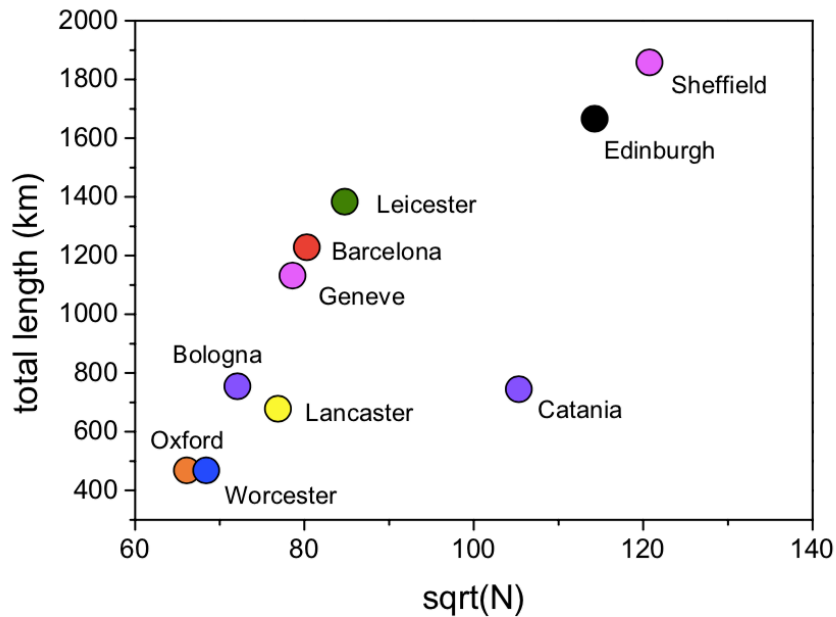


Figure 4.16 : Longueur totale (en km) en fonction de la racine carrée du nombre de sommets N , pour un ensemble de 10 réseaux viaires représentés par des graphes primaires. Source : (Strano et al., 2012).

La longueur des tronçons peut en effet également être décrite à l'échelle d'un réseau en utilisant une valeur centrale, souvent la moyenne. Crucitti et al. (2006) calculent la longueur moyenne sur leur corpus de 18 réseaux viaires. Leurs résultats nous permettent de constater que, malgré quelques exceptions, les réseaux organiques comme ceux d'Ahmedabad et du Caire ont globalement une longueur moyenne plus faible que les réseaux quadrillés (comme San Francisco et Los Angeles) et les réseaux arborescents (comme Walnut Creek). Toutefois, on peut s'interroger sur la pertinence d'utiliser la moyenne comme valeur de référence lorsque la distribution des longueurs est bimodale, comme dans le cas de Los Angeles et Richmond (cf figure 4.15). Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 6.

L'espacement des tronçons

L'espacement des tronçons est un descripteur peu mobilisé dans les travaux d'analyse de réseaux (réseaux viaires ou autre). Toutefois, il l'est par le géomaticien Crispin Cooper (2016), qui le désigne par l'expression *Mean crow flight*. Pour chaque tronçon, il correspond à la moyenne des distances à vol d'oiseau entre ce tronçon et tous les autres tronçons du réseau. Un tronçon situé sur le barycentre du réseau aura un espacement faible, puisqu'il sera le plus proche, à vol d'oiseau, de l'ensemble des autres tronçons. A l'inverse, un tronçon situé en périphérie du réseau aura un espacement élevé. Ainsi, l'espacement d'un tronçon nous donne indirectement une indication de la distance entre ce tronçon et le barycentre du réseau.

A l'échelle du réseau dans son ensemble, le descripteur d'espacement, résumé par une valeur centrale par exemple, nous permettra de décrire si les tronçons sont globalement rapprochés ou espacés les uns des autres, ce qui correspond à une caractéristique morphologique décrite par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

Conclusion de la partie II

Nous avons présenté dans cette partie les descripteurs morphologiques permettant de quantifier certaines des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires, à savoir **leur taille, leur connectivité, leur type d'intersections, la rectitude de leurs voies, l'orientation et l'espacement des voies**. Nous nous sommes concentré sur les caractéristiques pour lesquelles nous avons pu identifier des descripteurs quantitatifs mesurables sur un graphe. Cela nous a fait exclure certaines caractéristiques décrites en urbanisme (le caractère morphologiquement hiérarchisé du réseau par exemple). Signalons enfin que nous avons proposé de décliner l'espacement des voies en deux caractéristiques distinctes : la longueur des voies d'une part, et leur espacement les unes par rapport aux autres d'autre part.

La plupart des descripteurs présentés sont calculés à l'échelle des tronçons (formalisés comme les sommets du graphe). Toutefois, nous avons vu qu'il était possible de parvenir à une description à l'échelle du réseau dans son ensemble, en décrivant la distribution statistique du descripteur, ou en le résumant par une valeur de référence (sa moyenne par exemple).

Dans la partie suivante, nous aborderons comment la théorie des graphes permet de décrire les conditions d'accessibilité offertes par un réseau viaire.

III. La description des conditions d'accessibilité

Selon Stransky (1995), la théorie des graphes permet de qualifier un réseau du point de vue de la « connexion qu'il assure entre des points singuliers du territoire desservi » (p. 16). Il faut pour cela avoir recours à une catégorie de descripteurs, désignée par Haggett et Chorley (1969) comme étant les « mesures basées sur les caractéristiques des plus courts chemins » (*measures based on shortest path characteristics*). Ces descripteurs sont plus complexes que les descripteurs morphologiques dans la mesure où ils nécessitent la détection des **plus court chemin** entre chaque paire de sommets dans le graphe, et ce grâce à un algorithme dédié. Avant de présenter ces descripteurs, il convient de définir le concept de plus courts chemins. Selon Cooper & Chiaradia (2015), ce concept était présent dès 1931 dans le modèle gravitaire de Reilly, et dans les travaux de Christaller en 1933.

III.1. Le concept de plus court chemin

Dans un réseau, un chemin est l'espace à parcourir pour se rendre d'un point à un autre. Il peut exister plusieurs chemins pour relier deux points d'un réseau. La théorie des graphes permet d'identifier le plus court de ces chemins, grâce à un algorithme tel que celui de Dijkstra¹⁴¹. Il s'agit d'un problème d'intelligence artificielle, qui consiste à trouver comment se déplacer dans un environnement entre un point de départ et un point d'arrivée en minimisant une certaine quantité (le temps, la distance, ou autre)¹⁴². Cette quantité définit différents types de plus courts chemins.

III.1.1. Divers types de plus courts chemins

On distingue deux manières principales de définir les plus courts chemins dans un graphe (cf figure 4.17). D'abord, d'un point de vue **topologique** : le plus court chemin topologique entre deux sommets d'un graphe est le chemin qui minimise le nombre de sommets différents à parcourir pour se déplacer entre ces deux sommets. Ensuite, d'un point de vue **métrique** : le plus court chemin métrique entre deux sommets est celui qui minimise la distance métrique à parcourir pour relier ces deux sommets. Le calcul de ce plus court chemin nécessite que le graphe soit géométrique, c'est-à-dire qu'il contienne une information sur la distance métrique entre les sommets.

Il existe un troisième type de plus court chemin, le chemin le plus simple, ou plus court chemin **angulaire**. Celui-ci minimise les changements de direction à effectuer pour relier deux sommets. Dans le cas d'un réseau viaire représenté par un graphe géométrique, le plus court chemin angulaire entre deux sommets correspond au chemin du réseau qui minimise les tournants, aussi bien aux intersections qu'au niveau d'un même tronçon (Cooper, 2015).

Les plus courts chemins topologiques peuvent être calculés quel que soit le type de graphe que l'on choisit (graphe topologique, carte axiale, etc.). En revanche, pour calculer les plus courts chemins métriques et angulaires, il est nécessaire que le graphe respecte les caractéristiques dimensionnelles et géométriques du réseau. C'est le cas dans la représentation que nous avons choisie, à savoir le graphe géométrique. Nous pouvons donc choisir de définir les plus courts chemins aussi bien d'un point de vue topologique que métrique ou angulaire.

¹⁴¹ Inventé en 1959 par l'informaticien néerlandais Edsger Dijkstra.

¹⁴² Il peut exister plusieurs chemins de tailles identiques entre ces deux points, qui sont tous des « plus courts chemins ». Dans le cas de l'algorithme de Dijkstra, un seul de ces chemins est choisi de manière aléatoire (Levinson & Yerra, 2006).

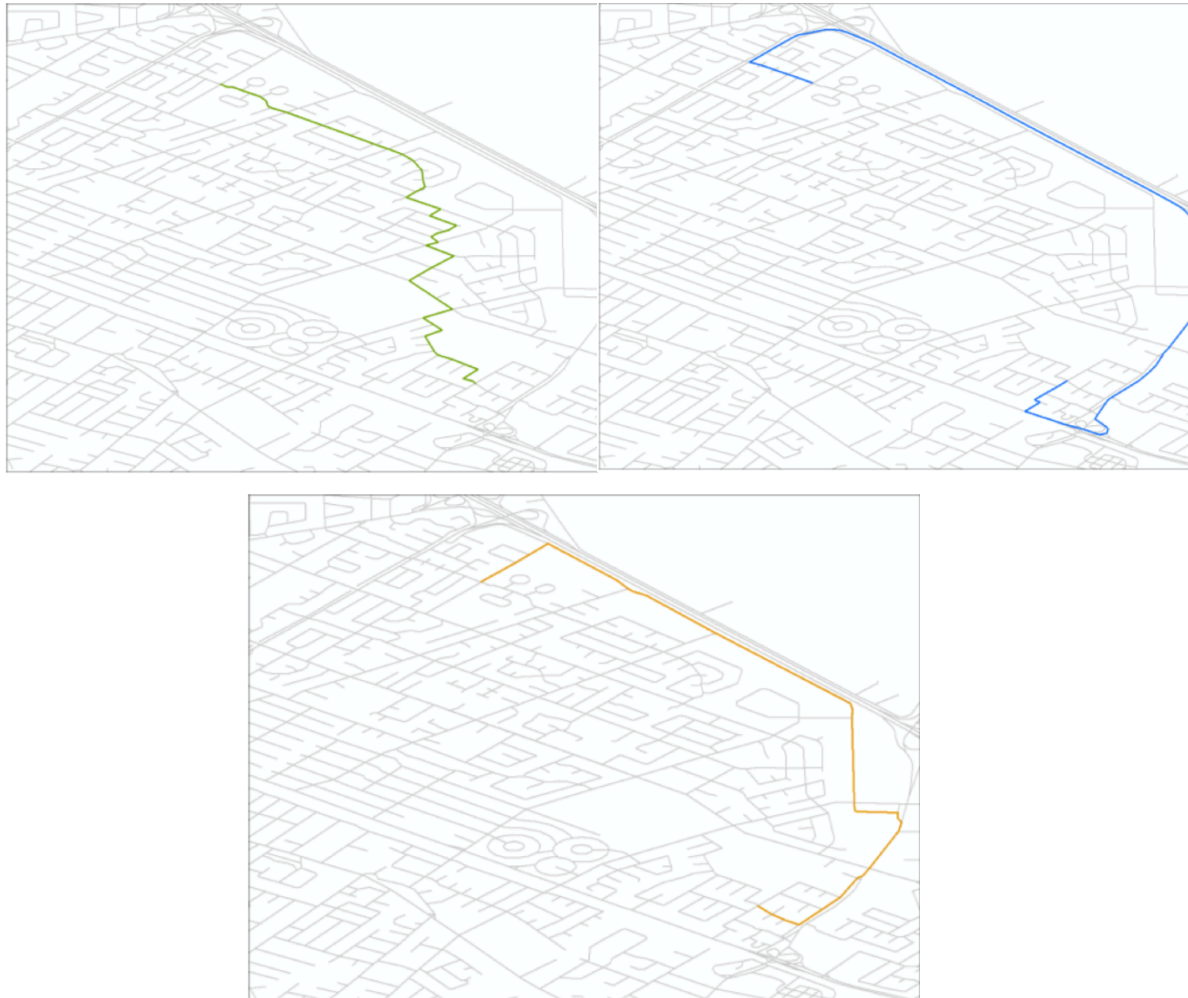


Figure 4.17 : Haut gauche : Plus court chemin métrique entre deux points (minimise la distance métrique à parcourir). Haut droite : Plus court chemin topologique entre les mêmes points (minimise le nombre de tronçons à traverser). Bas : Plus court chemin angulaire entre les mêmes points (minimise les changements de direction). Source : (Chiaradia et al., 2014).

D'autres types de contraintes peuvent être introduites lors du calcul des plus courts chemins. On peut par exemple introduire des données supplémentaires, pour identifier les chemins qui minimisent la pente du terrain, l'ensoleillement ou encore le nombre de feux tricolores rencontrés. Ces contraintes peuvent être introduites comme pondération des arêtes ou des sommets du graphe : le plus court chemin sera alors celui qui minimisera le poids des arêtes ou des sommets. Néanmoins, dans ces cas là, la structure des plus courts chemins ne dépend plus uniquement de la morphologie du réseau, mais aussi de ces différentes contraintes. Nous choisissons donc d'exclure ce type de plus courts chemins de notre travail.

III.1.2. Quel type de plus courts chemins choisir ?

Les descripteurs que nous présentons dans cette partie peuvent être calculés en considérant n'importe lequel des *plus courts chemins* mentionnés ci-dessus (plus courts chemins métriques, topologiques ou angulaires). Nous choisissons de ne pas opter pour un type unique de plus courts chemins, mais plutôt d'adapter ce type à la condition d'accessibilité considérée. Nous opterons pour le type qui nous semble le plus pertinent pour chaque condition d'accessibilité. Le type choisi sera précisé lors de la présentation des descripteurs (section III.3).

III.2. Les caractéristiques des chemins comme révélateurs des conditions d'accessibilité des réseaux

III.2.1. Réinterprétation des caractéristiques des chemins

Une fois les plus courts chemins détectés dans un graphe, plusieurs descripteurs permettent de rendre compte de leurs caractéristiques, leur longueur par exemple. Ces descripteurs sont désignés par Foltête et al. (2008) comme des descripteurs du **fonctionnement** des réseaux (par opposition aux descripteurs de forme). Porta et al. (2006) de leur côté les désignent comme des descripteurs de la **performance** des réseaux.

Ces appellations suggèrent que les descripteurs des caractéristiques des plus courts chemins peuvent être utilisés pour évaluer les conditions d'accessibilité offertes par un réseau. Cette idée est aussi défendue par Cardillo et al. (2006), qui expliquent que la longueur des plus courts chemins peut être utilisée pour rendre compte de la capacité d'un réseau à permettre l'échange efficace des biens ou des personnes. Pour Masucci & Molinero (2016), la longueur des chemins peut servir à évaluer la performance des réseaux viaires.

Nous choisissons donc d'utiliser les descripteurs de plus courts chemins pour évaluer les conditions d'accessibilité offertes par un réseau viaire, autrement dit sa capacité à permettre la simplicité des déplacements, leur proximité ou encore leur fluidité. Nous considérons par exemple que **plus les plus courts chemins dans un réseau sont courts, plus le réseau permet une proximité des déplacements. Plus ils sont simples, plus le réseau permet une simplicité des déplacements. Et ainsi de suite.** Pour alléger le texte, nous parlerons de conditions d'accessibilité *du* réseau, pour désigner les conditions d'accessibilité permises par le réseau.

Ainsi, nous établissons un lien direct entre les caractéristiques des chemins dans un graphe et les conditions d'accessibilité du réseau viaire représenté par ce graphe. Nous proposons donc une réinterprétation des descripteurs de plus courts chemins, pour en faire des « **descripteurs d'accessibilité** ». L'avantage de ces descripteurs est qu'ils rendent compte des conditions d'accessibilité permises par la morphologie

du réseau uniquement, c'est-à-dire en faisant fi des autres facteurs affectant l'accessibilité dans un réseau, telles que la localisation des activités, l'aménagement du réseau viaire, ou encore la densité.

III.2.2. Focus sur cinq conditions d'accessibilité

Nous avons identifié dans le chapitre 2 huit conditions d'accessibilité décrites dans les études de la mobilité urbaine, et qui correspondent à des besoins des usagers¹⁴³, à pied ou en véhicule, lors de leurs déplacements. Ces conditions sont le confort et la sécurité offerts aux usagers lors des déplacements, la simplicité de ces déplacements, leur isotropie (répartition uniforme), proximité, fluidité et rapidité. La revue de la littérature en analyse de réseaux nous mène à constater que dans certains cas, le descripteur (issu de la théorie des graphes) rend compte précisément d'une condition d'accessibilité du réseau, c'est le cas pour la proximité des déplacements. Dans d'autres cas, le descripteur rend compte d'une certaine acceptation de la condition d'accessibilité, c'est-à-dire d'un certain sens donné à cette condition d'accessibilité. C'est le cas pour la simplicité des déplacements, leur continuité, isotropie et fluidité. Enfin, dans le cas de trois conditions d'accessibilité, le confort, la sécurité et la rapidité des déplacements, nous n'avons pas été en mesure d'identifier un descripteur quantitatif qui permette de les décrire. **Nous nous focalisons donc dans la suite de notre travail sur cinq des huit conditions d'accessibilité qui avaient été identifiées dans le chapitre 2, à savoir la simplicité des déplacements, leur continuité, isotropie, proximité, et fluidité.**

III.3. Présentation des descripteurs d'accessibilité

Dans cette section, nous nous appuyons sur la littérature des analyses de réseaux viaires, pour présenter les descripteurs de la théorie des graphes qui peuvent être utilisés pour décrire les conditions d'accessibilité d'un réseau viaire. Bien que nous ayons choisi le formalisme du graphe géométrique dual pour représenter les réseaux viaires¹⁴⁴, nous aurons recours dans cette partie à des travaux qui représentent ces réseaux selon tout types de graphes. L'objectif est de montrer la fertilité de ces travaux, de présenter les méthodes qu'ils mobilisent, et de s'en inspirer pour notre travail. Nous préciserons à chaque fois en quoi notre approche diffère des approches mentionnées.

Nous abordons d'abord la proximité des déplacements, car celle-ci est une condition d'accessibilité qui peut directement être traduite en caractéristique des plus courts chemins, en l'occurrence leur longueur, comme nous le verrons ci-après.

¹⁴³ Pour rappel, nous utilisons le terme « usager » pour désigner les individus utilisant un certain mode de déplacement.

¹⁴⁴ Les tronçons de voie sont dotés d'une géométrie et de dimensions, et ils correspondent aux sommets du graphe.

III.3.1. Quantifier la proximité des déplacements permise par le réseau

Le concept de longueur des chemins

Pour savoir si un réseau viaire permet, de par sa morphologie, une proximité des déplacements, donc de faibles distances à parcourir pour les usagers, on peut directement calculer la longueur des plus courts chemins dans ce réseau. Plus ces plus courts chemins sont courts, plus le réseau permet une proximité des déplacements.

Nous choisissons ici d'adopter une définition du plus court chemin d'un point de vue métrique. Nous voulons donc évaluer à quel point les plus courts chemins métriques sont effectivement courts dans un réseau viaire. Un descripteur de la théorie des graphes permet d'évaluer cette longueur des chemins.

L'éloignement métrique pour évaluer la longueur des plus courts chemins

Le descripteur de la longueur (métrique) des chemins dans un graphe prend diverses appellations, la plus parlante est selon nous **l'éloignement métrique**, *farness* en anglais (Cooper, 2016). L'éloignement métrique d'un sommet dans un graphe désigne la moyenne des distances (métriques) à parcourir pour relier ce sommet à tous les autres sommets du graphe, et ce en empruntant les plus courts chemins. Il peut donc aussi être vu comme la moyenne des longueurs des plus courts chemins, entre un sommet et tous les autres. Dans les analyses de réseaux, on calcule souvent l'inverse de cet éloignement, qui est désigné « centralité¹⁴⁵ de proximité », ou « intégration » (dans le vocabulaire de la *Space Syntax*¹⁴⁶). La centralité de proximité (*closeness centrality*) est utilisée dès les années 50 par les sociologues structuralistes, puis propagée dans les années 70, notamment par Freeman (1978). Dans notre cas, **nous choisissons d'utiliser le descripteur d'éloignement métrique.**

Comme nous travaillons sur le graphe géométrique dual, nous calculerons l'éloignement des tronçons (qui sont pour nous les sommets du graphe). L'éloignement métrique d'un tronçon est donc égal à la longueur moyenne (en mètres) des plus courts chemins métriques entre ce tronçon et tous les autres tronçons du réseau.

¹⁴⁵ Considérant ce descripteur, être « central » signifie être proche des autres.

¹⁴⁶ Dans la *Space Syntax*, être « intégré » signifie être proche des autres.

Distribution statistique et résumé numérique de l'éloignement métrique

Masucci et al. (2009) ont étudié la distribution statistique de l'éloignement dans le réseau viaire londonien¹⁴⁷, représenté par un graphe géométrique primaire. Il s'agit donc de l'éloignement des intersections et extrémités de tronçons. Ils représentent cet éloignement sur l'axe des abscisses (en mètres), tandis que la proportion de sommets correspondant à chaque éloignement figure sur l'axe des ordonnées (cf figure 4.18). Ce graphique permet d'observer la tendance globale de l'éloignement des sommets : plus les points du graphique se situent en haut à gauche, plus une forte proportion de sommets a un éloignement faible. Plus les points se situent en haut à droite, plus une forte proportion de sommets a un éloignement élevé. Dans le cas de Londres, on observe qu'une proportion élevée de sommets est éloignée des autres sommets d'une distance allant de 18 à 32 km environ (18000 m à 32000 m sur la figure 4.18).

L'étude de la distribution permet également d'observer si les sommets du graphe ont des éloignements proches (points rapprochés sur le graphique), ou s'ils ont des éloignements très variés (point dispersés sur le graphique). On peut également observer des cas où les éloignements sont variés, mais avec une concentration autour de quelques valeurs. Enfin, ce graphique permet de facilement fixer des seuils d'éloignement, *inférieur à 20 km par exemple*, et d'observer la quantité de sommets qui sont distants de moins de 20 km de tous les autres.

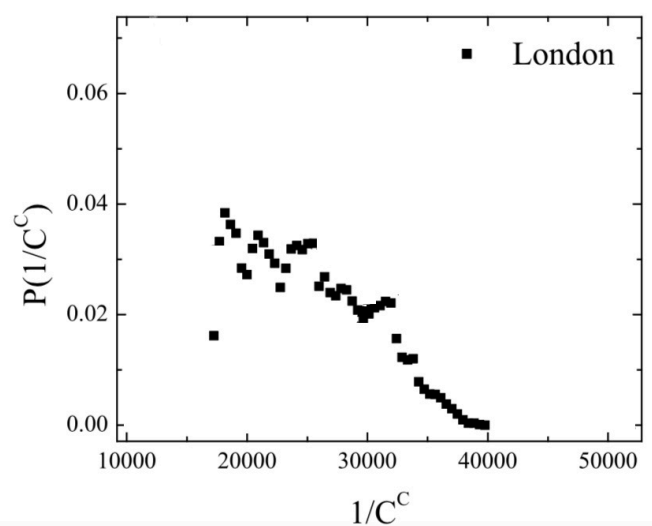


Figure 4.18 : Distribution statistique de l'éloignement métrique (inverse de la centralité de proximité, $1/C^c$), des tronçons du réseau viaire londonien. Source : (Masucci et al., 2009), simplifiée par R. Hachi.

¹⁴⁷ En réalité, ils ont choisi un échantillon de ce réseau, circonscrit dans un rayon de 28,26 km autour du quartier ancien de *City of London*.

Pour obtenir un résumé numérique de l'éloignement métrique des tronçons à l'échelle du réseau qu'ils forment, une approche fréquente consiste à calculer la moyenne de l'éloignement métrique des tronçons. Plus cette moyenne est élevée, plus les chemins sont métriquement longs. Selon Liu & Zhao (2015), cette moyenne décrit si le réseau dans son ensemble est accessible. Selon Porta et al. (2006), elle décrit le taux de communication entre les tronçons du réseau, ou encore l'efficacité de la communication entre ces tronçons : plus elle est élevée, moins la communication est efficace. Enfin, Porta et al. (2009) la décrivent comme le coût permettant de surmonter la séparation spatiale entre les espaces de la ville. Il faut néanmoins signaler que la « moyenne » n'est pas toujours significative, car elle présente le défaut d'être sensible aux valeurs extrêmes.

Strano et al. (2015) ont comparé la moyenne de l'éloignement métrique dans le réseau viaire de l'aire métropolitaine du Grand Londres et dans celle de New York. Ils trouvent une moyenne de 25,83 km à Londres contre 17,94 km à New York, ce qui, si la moyenne est représentative, indiquerait que **les plus courts chemins sont globalement plus courts à New York qu'à Londres**. Ce résultat peut être lié au fait que l'aire métropolitaine de New York est moins étendue que celle du Grand Londres.

Distribution spatiale de l'éloignement métrique

L'analyse de l'éloignement métrique s'accompagne souvent d'une représentation cartographique. On fait alors figurer sur le plan du réseau étudié l'éloignement de chaque tronçon, soit grâce à une variation de couleur, soit grâce à une variation de l'épaisseur du trait. L'intérêt de cette représentation est d'observer la localisation spatiale de l'éloignement. On peut par exemple observer si les tronçons dont l'éloignement métrique est faible correspondent au centre-ville, lieu fonctionnellement important, et pour lequel une bonne accessibilité est généralement recherchée (Chiaradia et al., 2012). Plus globalement, la représentation cartographique permet d'observer où se localisent les tronçons métriquement proches des autres : sont-ils tous localisés au même endroit, ou sont-ils dispersés ?

Néanmoins, la revue de la littérature révèle que l'éloignement métrique est fortement sensible à l'**effet de bord** (cf figure 4.19). Comme l'expliquent Hillier & Iida (2005), les tronçons situés au centre du plan du réseau seront toujours les plus proches, métriquement, de tous les autres tronçons, ils auront donc l'éloignement métrique le plus faible. Les tronçons situés en périphérie sur ce plan auront quant à eux l'éloignement le plus élevé. Ainsi, la localisation spatiale de l'éloignement métrique a assez peu d'intérêt, elle montre systématiquement un gradient centre-périphérie.

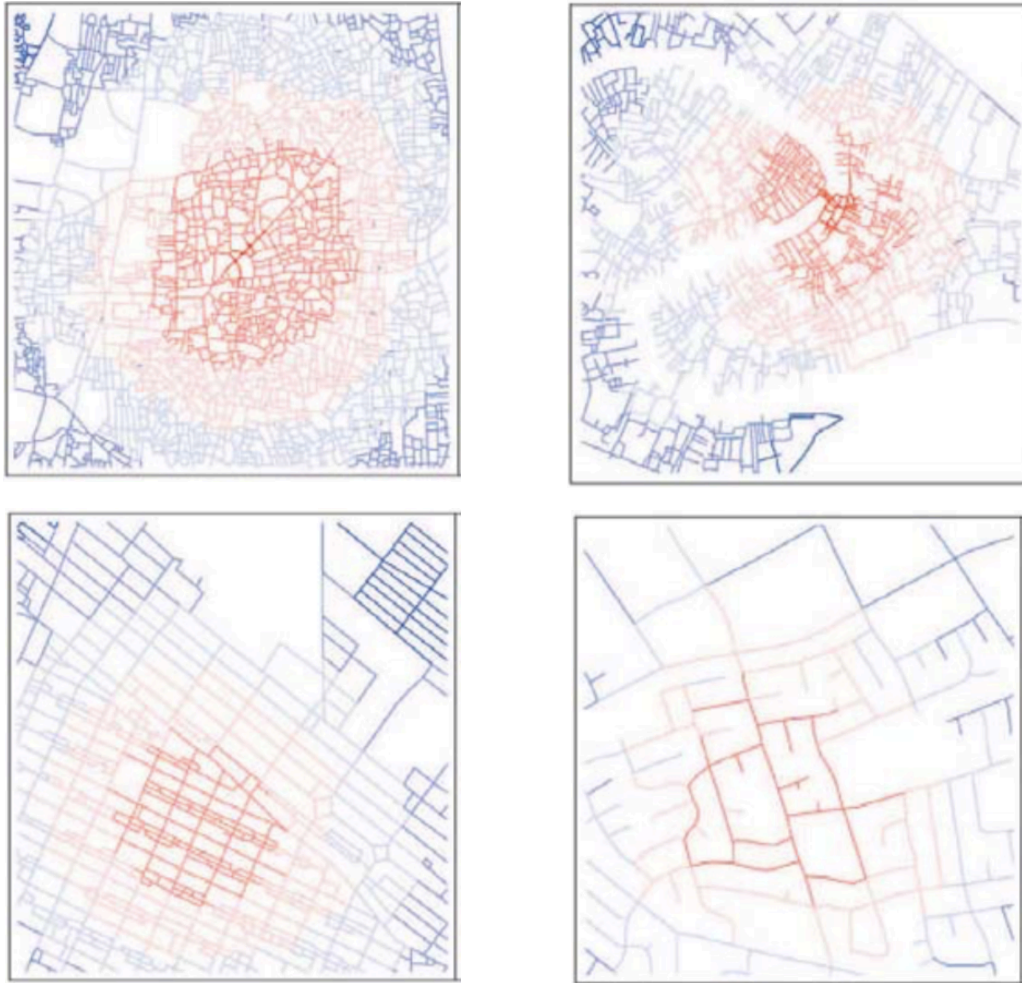


Figure 4.19 : Cartes représentant l'éloignement métrique des tronçons, sur les réseaux d'Ahmedabad (haut gauche), Venise (haut droit), Richmond (bas gauche) et Walnut Creek (bas droit). On observe un effet de bord sur chacune des cartes. Source : (Porta et al., 2006).

Selon Porta et al. (2006), cet effet de bord empêche de voir émerger des motifs tels que les artères, qui pourtant jouent un rôle fondamental dans l'accessibilité de l'espace urbain. Ils affirment que la centralité de proximité métrique (et donc l'éloignement métrique) échoue à mettre en évidence une hiérarchie de voies centrales. Certains auteurs suggèrent pour y remédier de calculer la centralité de proximité à une échelle locale (Porta et al., 2009), c'est-à-dire en considérant, pour chaque sommet, uniquement les chemins situés dans un rayon donné. Dans notre cas, nous choisissons de conserver le descripteur d'éloignement métrique calculé en considérant l'ensemble du réseau, mais de ne pas en étudier la distribution spatiale.

III.3.2. Quantifier la simplicité des déplacements permise par le réseau

Le concept de linéarité des chemins

Nous avons vu dans le chapitre 2 que la simplicité des déplacements se déclinait sous divers concepts dans les études sur la mobilité urbaine. Nous avons notamment évoqué le concept de **linéarité**, qui pour Victor (2016), rend compte de la volonté des usagers, de privilégier les chemins linéaires car ceux-ci ne sont pas complexes. Cette idée est reprise par Cooper (2015). Pour lui, les individus ont tendance à simplifier le modèle qu'ils ont de leur environnement, et de leur cheminement à travers celui-ci. Dans ce cadre, le chemin ayant le moins de tournants est une bonne stratégie, en particulier si l'environnement est complexe. Il ajoute que les chemins comportant peu de tournants diminuent la pression cognitive qui pèse sur un usager non familier du réseau. Ils sont également plus faciles à expliquer, car le nombre d'instructions à donner est faible (Mark, 1986). Ces chemins sont d'ailleurs désignés dans la littérature comme « les chemins les plus simples »

Ainsi, nous proposons pour évaluer la simplicité des chemins dans un réseau viaire de décrire la linéarité de ces chemins. Un descripteur de la théorie des graphes permet de quantifier cette linéarité des chemins, il s'agit de l'éloignement angulaire.

Pour ce descripteur, nous choisissons d'adopter une définition du plus court chemin d'un point de vue angulaire, autrement dit le chemin le plus simple. Nous voulons donc évaluer à quel point les chemins les plus simples sont effectivement simples.

L'éloignement angulaire pour évaluer la linéarité des plus courts chemins

L'éloignement angulaire d'un sommet renvoie aux changements angulaires (c'est-à-dire de tournants) à effectuer pour se déplacer depuis ce sommet vers tous les autres sommets du graphe. Dans un réseau viaire, ces changements angulaires peuvent survenir sur un tronçon de voie, ou au niveau d'une intersection. L'éloignement angulaire d'un tronçon s'obtient en calculant la moyenne des angles formés le long des chemins qui séparent ce tronçon de tous les autres. Il est donc exprimé en degré. Ce descripteur reflète la linéarité de ces chemins : plus ils sont linéaires, plus les angles qu'ils forment sont faibles, et plus l'éloignement angulaire du sommet est faible.

Une variante de cet éloignement angulaire est proposée par l'approche par carte axiale de la *Space Syntax* (voir notamment Chiaradia et al. (2012)). Rappelons que dans ce cas, le réseau est représenté par des axes en lignes droites, ainsi, à chaque changement de direction, il y a changement d'axe (cf section I.2.1). Le chemin le plus simple est alors celui qui minimise le nombre d'axes à traverser. Pour calculer

l'éloignement angulaire d'un axe, il suffit alors de calculer la moyenne du nombre d'axes à parcourir pour relier cet axe à tous les autres. On obtient alors un éloignement non pas exprimé en degré, mais en nombre d'axes. Cette mesure est désignée, dans la *Space Syntax*, comme étant l'« intégration topologique ». Il s'agit de la plus ancienne forme d'intégration, et la seule jusqu'en 2005 (Chiaradia et al., 2012). Le terme « topologique » renvoie au fait que, ce qui est calculé n'est pas une distance métrique, mais le nombre d'axes à traverser (et implicitement le nombre de changements de direction). L'intégration topologique montre à quel point les chemins sont directs et simples, ou tordus et complexes entre les sommets d'un graphe (Chiaradia et al., 2012).

Cette « intégration topologique » peut de la même manière être calculée dans un graphe obtenu selon l'approche mixte, c'est-à-dire un graphe dans lequel les tronçons sont regroupés pour former des axes linéaires (cf section I.2.1). Courtat et al. (2011) et Masucci et al. (2009) utilisent cette approche pour représenter le réseau viaire d'Avignon et de Troie dans un cas, et de Londres dans l'autre. Ils construisent un graphe dans lequel les sommets représentent des axes linéaires. Ils calculent ensuite pour chaque axe, la moyenne du nombre d'axes à traverser pour se rendre depuis cet axe vers tous les autres. Courtat et al. (2011) qualifient cette mesure de *simplest centrality* (centralité de simplicité).

Distribution statistique et résumé numérique de l'éloignement angulaire

La distribution statistique de l'éloignement angulaire est assez peu étudiée dans la littérature. Cela peut venir du fait que ce descripteur est essentiellement utilisé en *Space Syntax* (avec la mesure d'intégration topologique), et que **cette approche ne s'intéresse pas systématiquement à la distribution statistique des descripteurs étudiés** (nous y reviendrons en conclusion du chapitre).

Notons toutefois l'article de Masucci et al. (2009) évoqué ci-dessus. Dans cet article, les auteurs étudient la distribution statistique de l'éloignement angulaire du réseau viaire de Londres (calculé sur un graphe obtenu par l'approche mixte, cf section I.2.1). Ils trouvent une distribution statistique symétrique, proche d'une **gaussienne**. Les auteurs comparent également cette distribution à celles obtenues dans un réseau parfaitement quadrillé, et dans un réseau aléatoire. Cette comparaison leur permet de conclure qu'il est **plus simple de s'orienter à Londres que dans le réseau aléatoire, mais moins simple que dans le réseau quadrillé**. Cet exemple suggère qu'il est possible de comparer les conditions d'accessibilité offertes par des réseaux différents, en comparant la distribution statistique des descripteurs qui rendent compte de ces conditions d'accessibilité.

Enfin, comme pour l'éloignement métrique, il est possible – sous réserve que la distribution statistique soit symétrique – de calculer la moyenne de l'éloignement

angulaire des tronçons pour en obtenir un résumé à l'échelle du réseau. Dans ce cas, plus la moyenne de l'éloignement angulaire d'un réseau est élevée, moins les chemins sont linéaires, et donc moins les déplacements sont simples.

Distribution spatiale de l'éloignement angulaire

La représentation cartographique de l'éloignement angulaire est souvent étudiée dans la littérature en analyse de réseaux. Cette représentation montre l'absence d'effet de bord, qui était présent dans le cas de l'éloignement métrique. Pour Chiaradia et al. (2014), l'éloignement angulaire reflète la difficulté cognitive que les individus peuvent avoir lors de leurs déplacements. Ainsi, en représentant cartographiquement par un dégradé de couleurs l'éloignement angulaire, on voit ressortir (de la même couleur) les tronçons à partir desquels et vers lesquels la navigation demande le *même effort cognitif*. Cette représentation spatiale permet donc de localiser les parties dans lesquelles la facilité à s'orienter est la même.

Griffiths (2012), qui a calculé l'éloignement angulaire (plus précisément l'intégration topologique sur carte axiale) sur le réseau viaire de la ville de Sheffield, explique que sa distribution spatiale présente un motif dit *web-like*, que l'on pourrait traduire par en toile (ou *tissée*) (cf figure 4.20). Hillier & Iida (2005) obtiennent un motif assez similaire pour le quartier de Barnsbury à Londres (figure 4.20). Ce motif vient du fait que les axes parallèles, donc ayant la même orientation, ont des éloignements angulaires proches : les changements de direction à effectuer pour se déplacer depuis ces axes vers le reste du réseau sont similaires.

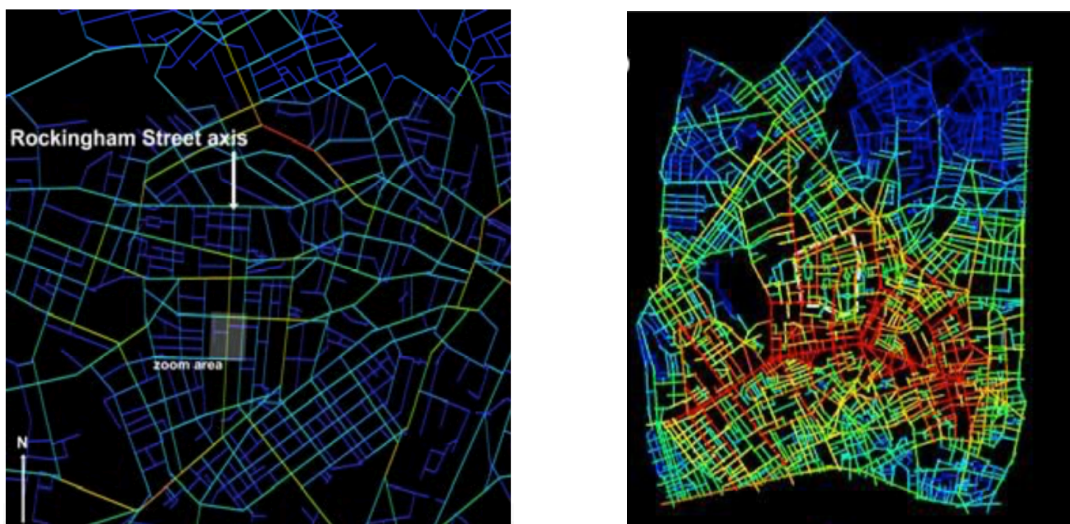


Figure 4.20 : Cartes représentant l'éloignement angulaire (intégration topologique des axes) dans le réseau de Sheffield à gauche, et dans celui de Barnsbury à droite. Source : gauche : (Griffiths, 2012), droite : (Hillier & Iida, 2005).

III.3.3. Quantifier la continuité des déplacements permise par le réseau

Le concept de continuité des chemins

La continuité des déplacements renvoie pour nous à l'absence d'obstacles, à l'existence de chemins directs pour se déplacer dans le réseau. Selon Piombini & Foltête (2007), l'allongement des déplacements dû à la présence d'obstacles dans un réseau peut être calculé en comparant la distance à vol d'oiseau qui sépare deux points du réseau à la distance *via réseau* qu'un usager doit parcourir pour relier ces deux points (cf figure 4.21). Un descripteur de la théorie des graphes correspond à ce calcul, il s'agit de l'indice de détour.

Nous choisissons pour ce descripteur d'adopter une définition du plus court chemin d'un point de vue métrique. Ce choix permet d'évaluer à quel point les plus courts chemins métriques sont continus dans un réseau viaire.

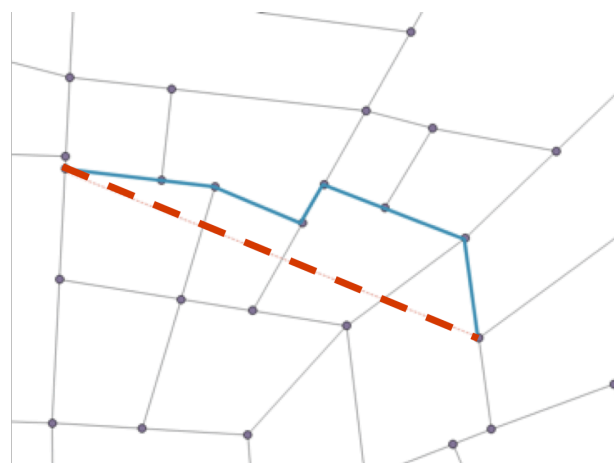


Figure 4.21 : Schéma (sur le graphe primaire d'un réseau fictif) représentant en rouge la distance à vol d'oiseau qui sépare deux points du réseau, et en bleu la distance *via réseau* qui les sépare.

L'indice de détour pour évaluer la continuité des plus courts chemins

Ce descripteur prend des appellations très diverses en fonction des auteurs, et de la manière dont il est calculé. Pour un sommet donné, on peut calculer la moyenne du rapport entre la distance *via réseau* qui le sépare des autres sommets, et la distance à vol d'oiseau. On obtient alors une valeur supérieure à 1, désignée comme « indice de détour » (Liu & Zhao, 2015), ou « indice de dispersion » (Haggett & Chorley, 1969), aussi dénommé en anglais *route factor*, *circuitry*, ou *directness* (Barthelemy, 2011). Lorsqu'on calcule la moyenne des indices de détours des sommets du graphe, on obtient un indice de détour moyen appelé aussi facteur d'allongement (Genre-Grandpierre, 2001).

A l'inverse, si on calcule la moyenne du rapport entre distance à vol d'oiseau et distance *via réseau*, on obtient pour chaque sommet une valeur variant de 0 à 1, dénommée « centralité de rectitude » (*straightness centrality*) (Crucitti et al., 2006; Porta et al., 2006a). Lorsqu'on calcule la moyenne des centralités de rectitude, on obtient ce qui est souvent désigné comme étant l'efficacité globale du réseau (Buhl et al., 2006; Rui et al., 2013).

Pour notre part, nous choisissons d'utiliser l'indice de détour. Nous calculons donc, pour chaque sommet, **la moyenne du rapport entre la distance *via réseau* et la distance à vol d'oiseau qui sépare ce sommet de tous les autres**. Plus l'indice de détour d'un sommet est élevé, plus la distance *via réseau* qui le sépare des autres sommets est supérieure à la distance à vol d'oiseau, donc plus il existe de détours entre ce sommet et les autres.

Distribution statistique et résumé numérique de l'indice de détour

La distribution statistique de l'indice de détour est assez peu étudiée dans la littérature consultée. Les auteurs ont davantage recours à la centralité de rectitude (*straightness centrality*) qui est l'inverse de l'indice de détour, et n'a donc pas la même distribution statistique. Porta et al. (2006) trouvent des distributions statistiques symétriques de la centralité de rectitude, aussi bien pour des villes « auto-organisées » comme Ahmedabad, que pour des villes « planifiées » comme Richmond. Crucitti et al (2006) trouvent des résultats analogues à partir d'un corpus de 18 réseaux viaires de types différents.

La moyenne de l'indice de détour des sommets, ou indice de détour moyen, est largement utilisée dans la littérature des analyses de réseaux viaires, pour évaluer la présence de détours dans ces réseaux. Buhl et al. (2006) et Cardillo et al. (2006) expliquent que les réseaux viaires ont généralement un indice de détour moyen faible, donc une bonne efficacité globale. Cette idée est reprise par Rui et al. (2013), qui affirment que la majorité des réseaux ont une efficacité globale élevée, variant de 0,7 à 0,8 (donc proche de 1, qui est la valeur maximale possible pour ce descripteur), ce qui correspond à un indice de détour moyen allant de 1,25 à 1,42.

Cardillo et al. (2006) calculent l'indice de détour moyen (plus précisément l'efficacité globale) sur un ensemble de 20 réseaux viaires classés par types¹⁴⁸. Leurs résultats montrent que les réseaux qu'ils qualifient de *modernist fabrics*, comme Brasilia et un quartier d'Irvine, ainsi que les réseaux qu'ils qualifient de *lollipop layouts*, ont les efficacités les plus faibles, donc les indices de détour moyens les plus élevés. A l'inverse, ils trouvent les meilleures efficacités (donc les indices de

¹⁴⁸ Ces types sont : *medieval fabrics*, *grid-iron fabrics*, *modernist fabrics*, *baroque fabrics*, *mixed fabrics*, et *lollipop layouts*.

détour moyens les plus faibles) pour des réseaux de type *gid-iron fabrics*, comme celui de New York, Savannah et San Francisco. Dans le même registre, Genre-Grandpierre (2001) soutient que les réseaux viaires des centres villes type Manhattan engendrent moins de détours que ceux des quartiers des années 60-70, constitués de grandes barres. Il trouve par exemple un indice de détour moyen de 1,25 pour le centre-ville de Lille, et de 1,65 pour Planoise, un quartier de Besançon des années 60-70. Nous constatons que la valeur prise pour Planoise est supérieure aux valeurs prises selon Rui et al. (2013) dans la majorité des réseaux (entre 1,25 et 1,42). Cela suggère que ce réseau implique plus de détours que la plupart des réseaux. De leur côté, Liu & Zhao (2015) ont analysé 16 quartiers japonais dont certains sont quadrillés, d'autres dits « en arbre » (*Tree type*). Ils retrouvent ces morphologies en arbre lorsque la topographie est accidentée (en montagne) ou sur les îles. Les auteurs montrent que les réseaux quadrillés ont un indice de détour bien plus faible que les réseaux en arbre.

Distribution spatiale de l'indice de détour

Selon Porta et al. (2006a) la distribution spatiale de l'indice de détour (plus précisément la centralité de rectitude) fait émerger des motifs intéressants car ce descripteur n'est pas sensible à l'effet de bord. Ils montrent sur le cas du réseau d'Ahmedabad et de Venise (représentés par des graphes primaires¹⁴⁹) que l'indice de détour est faible dans les « zones hyper-centrales ainsi que les axes centraux » (cf figure 4.22). Le même motif est décrit par Crucitti et al. (2006), notamment sur le réseau viaire du Caire et de Richmond (représentés par des graphes primaires). Ils montrent que l'indice de détour est faible sur les **axes principaux de la ville, et aux intersections entre ces axes.**

¹⁴⁹ Porta et ses collègues travaillent sur graphe primaire, ils calculent donc l'indice de détour des intersections du réseau. Ils utilisent ensuite cet indice de détour des intersections pour estimer celui des tronçons. Pour eux, l'indice de détour d'un tronçon est égal à la moyenne des indices de détour des intersections situées de part et d'autre de ce tronçon.



Figure 4.22 : Cartes de la centralité de rectitude (inverse de l'indice de détour) des tronçons sur le réseau viaire d'Ahmedabad (gauche) et de Venise (droite). Les tronçons en rouge ont l'indice de détour le plus faible et les tronçons en bleu ont l'indice de détour le plus élevé.

Source : (Porta et al., 2006a)

III.3.4. Quantifier l'isotropie et la fluidité des déplacements permises par le réseau

Le concept de concentration des déplacements

Foltête et al. (2008) soutiennent que certains réseaux viaires auraient intrinsèquement tendance à concentrer les flux de déplacement sur un petit nombre de voies. Commenges (2013) donne l'exemple des réseaux constitués d'un ensemble de lignes radiales, comme les réseaux en étoile, centralisés et très peu maillés. Pour lui, ce type de réseau (qu'il s'agisse de réseaux viaires ou de réseaux de transport en général) renforcera nécessairement la polarisation de l'espace, et se traduira par des inégalités d'accessibilité maximales. Ce type de réseau s'oppose donc à une répartition uniforme des déplacements, c'est-à-dire à leur isotropie. En outre, Foltête et ses collègues ajoutent que les réseaux qui concentrent les déplacements sur quelques voies apparaissent comme « naturellement » plus propices à la congestion. Ces exemples suggèrent qu'il existe une relation entre la **concentration des déplacements** induite par un réseau, et deux des conditions d'accessibilité que nous avons évoquées en chapitre 2 : l'isotropie des déplacements, et leur fluidité.

En effet, si le réseau de par sa morphologie concentre les déplacements sur un petit nombre de voies, ces déplacements ne **seront pas répartis de manière uniforme**, empêchant l'isotropie. En outre, une concentration des déplacements sur quelques voies engendre un **risque d'encombrement** de ces voies. Barrat et al. (2008) expliquent cela avec le vocabulaire de la théorie des graphes. Ils affirment que si un petit nombre de sommets dans un graphe concentre une grande part des plus courts chemins, le seuil à partir duquel le réseau connaîtra l'encombrement sera faible,

c'est-à-dire qu'il est probable que le réseau arrive à encombrement. Dans ce cas, le réseau ne facilite pas la fluidité des déplacements. A l'autre extrême, si les sommets ont approximativement la même participation aux plus courts chemins, ce seuil sera plus élevé, c'est-à-dire qu'il sera moins probable que le réseau soit encombré. Ainsi, la concentration des déplacements nous apparaît comme un concept pertinent pour décrire à la fois leur **isotropie et leur fluidité**.

De la concentration des déplacements à la concentration des chemins

Un descripteur de la théorie des graphes permet d'évaluer la concentration des déplacements induite par un réseau, et ce en évaluant la concentration des plus courts chemins dans le graphe qui représente le réseau. Il s'agit du descripteur de **centralité d'intermédiarité**. Calculée à l'échelle de chaque sommet d'un graphe, la centralité d'intermédiarité rend compte de la proportion de plus courts chemins qui passe par le sommet en question : plus un grand nombre de plus courts chemins passe par un sommet, plus sa centralité d'intermédiarité est élevée. A l'échelle du graphe dans son ensemble, on peut alors évaluer la **répartition de cette centralité d'intermédiarité** : si un petit nombre de sommets a une centralité d'intermédiarité beaucoup plus élevée que celle des autres sommets, cela signifie que les plus courts chemins sont concentrés sur ces sommets. On parlera dans ce cas de **répartition inégalitaire** de la centralité d'intermédiarité. A l'inverse, si les sommets du graphe ont des centralités d'intermédiarité similaires, cela signifie qu'ils participent équitablement aux plus courts chemins, donc que ces derniers ne sont pas concentrés. On parlera alors de **répartition égalitaire** de la centralité d'intermédiarité.

Ainsi, nous proposons d'utiliser la répartition de la centralité d'intermédiarité pour évaluer la concentration des plus courts chemins dans un graphe. Cette concentration des plus courts chemins est à son tour utilisée pour décrire la capacité d'un réseau viaire à permettre une isotropie et une fluidité des déplacements. Nous définissons plus précisément la centralité d'intermédiarité dans les sections ci-après, puis expliquons comment évaluer sa répartition plus ou moins inégalitaire.

Pour ce descripteur, nous choisissons d'adopter une définition du plus court chemin d'un point de vue topologique. Nous voulons donc évaluer à quel point les plus courts chemins topologiques sont concentrés dans un réseau viaire.

La centralité d'intermédiarité pour évaluer la concentration des plus courts chemins

La centralité d'intermédiarité (*betweenness centrality*) (Freeman, 1977) attribue une acception particulière au fait d'« être central ». Les sommets centraux du graphe sont ceux situés sur les plus courts chemins qui relient les autres sommets,

autrement dit, ceux qui ont une **position intermédiaire**, de relai (cf figure 4.23). On appelle aussi cette mesure « niveau de chevauchement des chemins » (*path overlap level*), « degré de passage » (*degree of through movement*), ou encore « choix » (*choice*) dans le vocabulaire de la *Space Syntax*¹⁵⁰.

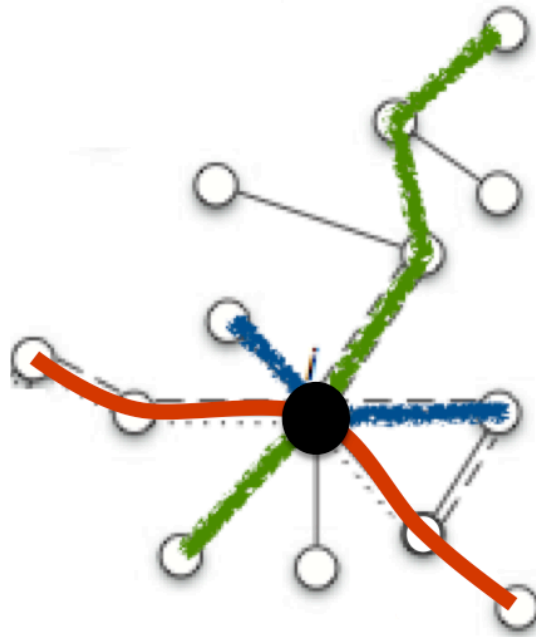


Figure 4.23 : Graphe d'un réseau fictif. Le sommet en noir a la centralité d'intermédierité la plus élevée car il occupe une position intermédiaire entre plusieurs parties du graphe. Il participe donc à un grand nombre de plus courts chemins (notamment ceux en vert, en bleu et en rouge).

La centralité d'intermédierité d'un sommet désigne la proportion de plus courts chemins qui passe par ce sommet. Pour calculer **la centralité d'intermédierité d'un tronçon x**, on calcule le rapport entre le nombre de fois où x est sur le plus court chemin entre deux autres tronçons y et z, et le nombre total de plus courts chemins existant entre ces deux tronçons. Ce rapport est calculé pour tous les tronçons y et z du réseau. On somme ensuite ces rapports pour obtenir la centralité d'intermédierité de x.

Plus la proportion de chemins passant par un tronçon est élevée, plus il aura une centralité d'intermédierité élevée. Cette mesure atteint sa valeur maximale lorsqu'un tronçon participe à tous les plus courts chemins existant dans le réseau. La centralité d'intermédierité est souvent utilisée dans la littérature sur l'analyse des réseaux viaires pour estimer la fréquentation des tronçons ou des intersections

¹⁵⁰ Cette appellation vient du fait que cette mesure fait ressortir les sommets souvent « choisis » (en raison de leur position intermédiaire) lors des déplacements (Vaughan, 2015).

(Barrat et al., 2008; Chiaradia et al., 2014; Jiang, 2009; Zhong et al., 2014). L'hypothèse sous-jacente dans ces travaux est que les individus ont tendance à emprunter les plus courts chemins (de divers types) lors de leurs déplacements. Par conséquent, un tronçon ou une intersection participant à un grand nombre de plus courts chemins sera fortement fréquenté. L'objectif de ces travaux est de montrer que la morphologie des réseaux viaires peut expliquer la répartition des déplacements réels. Nous ne nous attardons pas davantage sur ces travaux, car **notre intérêt ne porte pas sur les déplacements réels des usagers, mais plutôt sur les possibilités de déplacement qui s'offrent à eux (les conditions d'accessibilité).**

Une centralité d'intermédiarité simplifiée

La centralité d'intermédiarité telle que présentée ci-dessus nécessite un temps de calcul très important (Lagesse 2015, p. 87). Aussi, nous choisissons, à l'instar de plusieurs auteurs (Cooper et al., 2019; Lagesse, 2015; Lämmer et al., 2006), d'utiliser une méthode de calcul plus simple de cette centralité d'intermédiarité, et qui donne des résultats fortement corrélés à ceux de la méthode classique (Lagesse, 2015, p. 88). La différence entre cette mesure et la centralité d'intermédiarité classique utilisée en analyse de réseaux vient du fait qu'il peut exister plusieurs « plus courts chemins » entre deux points dans un réseau, c'est-à-dire plusieurs chemins courts de longueur identique. Dans le cas de la centralité d'intermédiarité classique, on compte le rapport entre le nombre de plus courts chemins entre deux sommets auxquels participe un sommet, et le nombre total de plus courts chemins existants entre ces deux sommets. Pour la centralité d'intermédiarité que nous utilisons, on compte simplement **le nombre de plus courts chemins entre deux sommets auxquels participe un sommet**, et ce sans tenir compte de fait qu'il puisse exister plusieurs plus courts chemins entre ces deux sommets. De cette manière, la centralité d'intermédiarité d'un sommet correspond non pas à la proportion, mais simplement au nombre de plus courts chemins auxquels participe un sommet.

Cette mesure est désignée par des termes variés dans la littérature, *Utilisation* (Lagesse, 2015), *Stress Centrality* (Brandes, 2008), ou simplement *Centralité d'intermédiarité* (Cooper, 2019). Nous choisissons d'utiliser cette dénomination. Celle-ci nécessite toutefois une précaution particulière. La centralité d'intermédiarité ainsi calculée ne permet pas d'identifier des sommets dont la suppression rallongerait les plus courts chemins, ou créerait une perte de connexité dans le réseau, car il existe potentiellement d'autres « plus courts chemins » dans le réseau. Elle permet plutôt d'identifier des sommets qui participent à un grand nombre de plus courts chemins dans le réseau, donc qui sont potentiellement fortement utilisés, même s'il existe d'autres plus courts chemins qui ne passent pas par eux. Les interprétations faites pour la centralité d'intermédiarité classique nous semblent s'appliquer aussi à cette centralité d'intermédiarité simplifiée. En effet, **si un petit nombre de tronçons participe à un grand nombre de plus courts**

chemins, et qu'un grand nombre de tronçons participe à peu de plus courts chemins, cela signifie que les plus courts chemins sont concentrés sur certains tronçons. Il en résulte une faible isotropie des déplacements, et un risque d'encombrement dans le réseau.

Distribution statistique et résumé numérique de la centralité d'intermédiarité

Des formes de distribution variées

La forme de la distribution statistique de la centralité d'intermédiarité varie selon les cas. Jiang (2009) sur Gävle en Suède (sur graphe géométrique dual), et Lämmer et al. (2006) sur plusieurs villes allemandes (aussi sur graphe dual), rapportent des distributions fortement dissymétriques, étalées, en loi de puissance inverse (cf figure 4.24, gauche). Cela signifie qu'une grande part des sommets du graphe a une centralité faible, et qu'une petite part a une centralité élevée. Ce type de distribution indique également une forte hiérarchisation et inégalité de la centralité (Barthelemy, 2018; Lämmer et al., 2006).

Cette distribution en loi de puissance de la centralité d'intermédiarité n'est pas universelle (Rui et al., 2013). Crucitti et al. (2006) et Porta et al. (2006) de leur côté trouvent des distributions à échelle unique (*single scale distribution*), c'est-à-dire où la centralité varie assez peu entre les sommets du graphe. Ils trouvent, sur graphe primaire, des distributions différentes en fonction du type de ville : **gaussiennes pour les villes planifiées** comme Richmond, Los Angeles et San Francisco, et **exponentielles pour les villes dites auto-organisées** comme Ahmedabad, Le Caire et Bologne. Crucitti et ses collègues ajoutent que des travaux de modélisation ont eux aussi montré des distributions gaussiennes pour des réseaux réguliers, modélisés sous forme de treillis triangulaire, carré ou rectangulaire, et des distributions exponentielles pour des réseaux qu'ils qualifient de « désordonnés ». Ces deux distributions (gaussienne et exponentielle) déclinent plus vite qu'une loi de puissance, la variabilité de la centralité des sommets y est donc plus faible.

La répartition de la centralité d'intermédiarité

La distribution statistique de la centralité d'intermédiarité peut fournir des renseignements précieux sur la répartition (inégalitaire ou pas) de cette centralité, et donc sur la concentration des plus courts chemins. Une distribution en loi de puissance renvoie systématiquement à une inégalité dans la répartition des chemins : un petit nombre de tronçons concentre une grande part des plus courts chemins. Lorsque la distribution statistique est de forme gaussienne, on peut s'attendre à une faible concentration des chemins car une grande partie des tronçons ont des

centralités d'intermédiarité proches. Enfin, si la distribution statistique de la centralité d'intermédiarité est exponentielle, sa répartition peut être plus ou moins inégalitaire selon les cas. Pour le mesurer, Rui et al. (2013) proposent de se baser sur la valeur de l'exposant de la courbe des fréquences cumulées. Plus cet exposant est élevé, plus la répartition de la centralité est inégalitaire.

Lämmer et al. (2006) et Crucitti et al. (2006) proposent une autre méthode pour évaluer la répartition de la centralité d'intermédiarité dans un réseau viaire. Ils considèrent d'un côté le nombre total de tronçons, de l'autre la somme totale des centralités d'intermédiarité. Ils représentent ces deux quantités sur une courbe de Lorenz, en associant à chaque tronçon la part qu'il détient dans la somme des centralités d'intermédiarité (cf figure 4.24, droite). Ils calculent ensuite sur cette courbe l'indice de Gini. Un indice de Gini élevé signifie qu'une petite part des tronçons concentre une grande part de la centralité d'intermédiarité totale. La centralité est alors inégalitaire. A l'inverse, un indice de Gini faible signifiera que les tronçons ont à peu près la même part dans le total de la centralité d'intermédiarité, donc que leur centralité est proche, ce qui indique une répartition égalitaire.

Cette méthode permet à Lämmer et al. (2006) d'évaluer la répartition de la centralité d'intermédiarité des tronçons sur le réseau viaire de la ville de Dresden (représenté par un graphe géométrique dual). Ils considèrent comme « population totale » représentée sur la courbe de Lorenz, non pas le nombre de tronçons, mais leur longueur totale. Les auteurs trouvent une répartition extrêmement inégalitaire de la centralité d'intermédiarité (cf figure 4.24) : 50% de la longueur totale des tronçons détient seulement 0,2% de la centralité totale, et presque 80% de cette centralité se concentre sur pas plus de 10% de la longueur totale. En outre, la moitié de la centralité totale est concentrée sur seulement 3,2% de la longueur totale des tronçons. L'indice de Gini correspondant, de 0,87, rend compte de cette forte inégalité dans la répartition de la centralité d'intermédiarité.

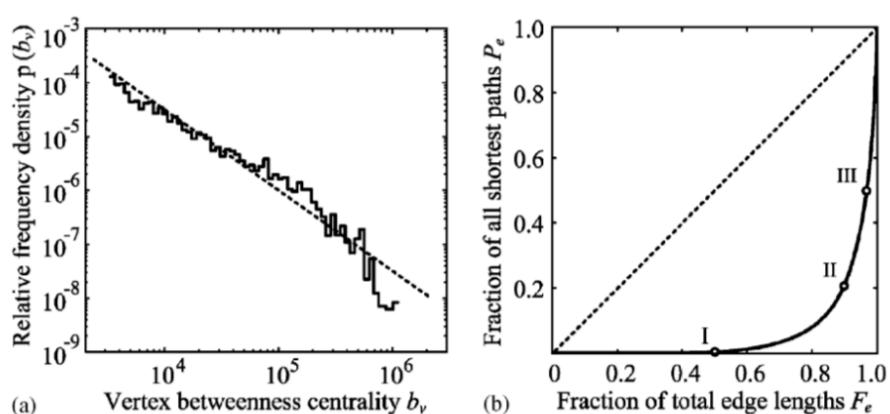


Figure 4.24 : Gauche : Distribution de la centralité d'intermédiarité des tronçons de voies du réseau viaire de Dresden. La distribution suit une loi de puissance. Droite : Courbe de Lorenz de la centralité d'intermédiarité des tronçons du réseau de Dresden. Source : (Lämmer et al., 2006).

Distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité

Plusieurs auteurs suggèrent que la représentation cartographique de la centralité d'intermédiarité des tronçons permet de mettre en exergue la hiérarchie du réseau viaire en termes de « types de voies », que l'on pourrait schématiser en : culs-de-sac, ruelles, rues, avenues, boulevards, et ainsi de suite. Ainsi, les voies au sommet de cette hiérarchie ressortent comme ayant la centralité d'intermédiarité la plus élevée, et cette centralité diminue à mesure que l'on descend dans la hiérarchie. Selon Barthelemy (2018), cette organisation hiérarchique de la centralité d'intermédiarité s'accompagne d'une distribution statistique très étalée, suivant une loi de puissance.

A Dresden par exemple, on voit émerger les voies artérielles qui émanent du centre-ville vers la périphérie dans toutes les directions (cf figure 4.25). A Vienne (figure 4.25) et à Groane en Italie (cf figure 4.26, droite), on voit clairement que la centralité d'intermédiarité fait émerger plusieurs « couches » de voies, chaque couche correspondant à un niveau hiérarchique.

On constate également en observant les figures ci-dessous que les tronçons à forte centralité d'intermédiarité sont souvent reliés entre eux, formant des **boucles dans le réseau**. Cette idée est reprise par Barthelemy (2018). Ce dernier conçoit un modèle de simulation, pour montrer que des boucles peuvent, sous certaines conditions, avoir une centralité d'intermédiarité plus élevée que les voies situées au centre du réseau. Enfin, Strano et al. (2012) montrent sur le cas de Groane que les tronçons à la centralité d'intermédiarité la plus élevée sont souvent ceux qui forment les voies les plus anciennes du réseau. Ces voies anciennes (notamment celles datant de 1833, en rouge dans la figure 4.26 gauche) participent donc à un grand nombre de plus courts chemins, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'elles correspondent aux voies principales qui traversent l'ensemble du réseau.



Figure 4.25 : Cartes de la centralité d'intermédiarité de Dresden (gauche) et Vienne (droite). Sources : (Lämmer et al., 2006) pour Dresden, (Graser et al., 2016) pour Vienne.

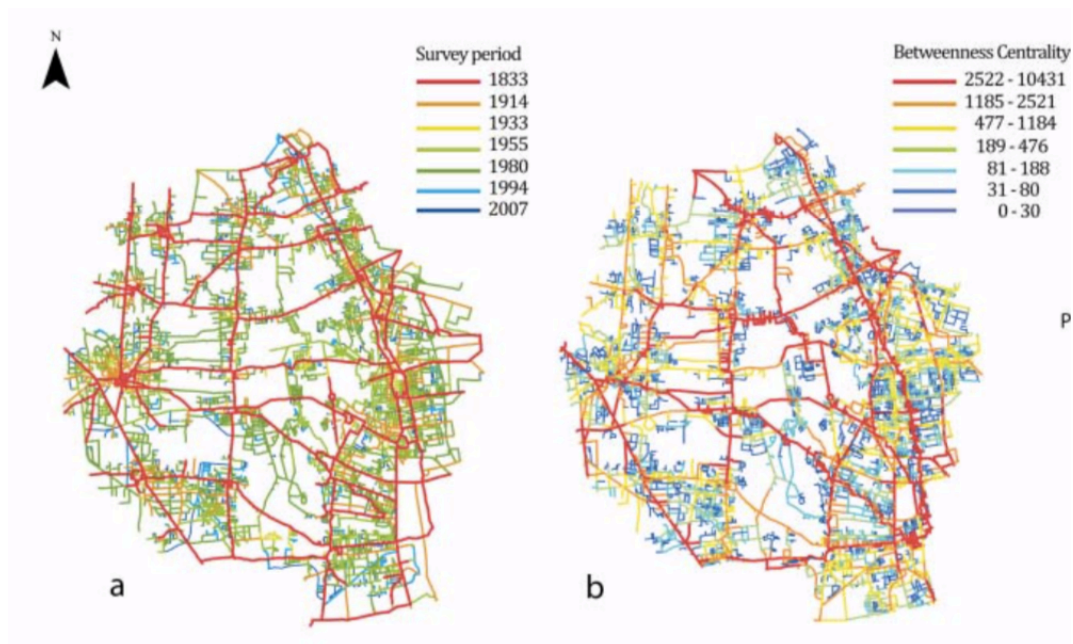


Figure 4.26 : Gauche : carte représentant (par un code couleur) la date de création de chaque tronçon de voie. Droite : carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons, calculée sur le graphe du réseau en 2007. Source : (Strano et al., 2012).

Conclusion de la partie III

La revue de la littérature présentée dans cette partie nous a permis d'identifier des descripteurs qui peuvent être réinterprétés pour décrire les conditions d'accessibilité permises par un réseau viaire. Nous avons présenté chacun de ces descripteurs, calculés à l'échelle des tronçons, et nous avons vu comment ils pouvaient être convertis en descripteurs de l'ensemble du réseau, grâce à l'étude de leur distribution statistique, de leur valeur de référence (une valeur centrale par exemple), et de leur distribution spatiale.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre visait à expliquer comment des descripteurs quantitatifs issus de la théorie des graphes permettaient de décrire d'une part les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et d'autre part leurs conditions d'accessibilité. Nous avons d'abord montré qu'il existait diverses approches pour convertir un réseau viaire en graphe, et avons adopté celle qui permettait de conserver les caractéristiques à la fois topologiques et géométriques de ce réseau : le graphe géométrique dual.

Nous avons ensuite montré qu'une fois le réseau converti en graphe, il était possible de **convertir des caractéristiques morphologiques décrites par les théoriciens**

et praticiens de l'urbanisme de manière qualitative (par des mots), en caractéristiques décrites de manière quantitative au moyen de descripteurs.

Les descripteurs morphologiques choisis sont les suivants :

- Le coefficient de maillage, pour décrire la connectivité du réseau ;
- Le degré des tronçons, pour décrire le type d'intersections dans le réseau (en T, en X, en étoile) ;
- La courbure angulaire des tronçons, pour décrire la rectitude des voies dans le réseau (voies droites, courbes, brisées) ;
- L'orientation cardinale des tronçons, pour décrire l'orientation des voies (orientation orthogonale, radiale, ...) ;
- La longueur et l'espacement des tronçons, pour décrire l'espacement entre les voies du réseau (voies rapprochées, espacées).

Dans la partie III, nous avons présenté des descripteurs quantitatifs qui permettent de rendre compte de la **capacité d'un réseau viaire à offrir des conditions d'accessibilité favorables aux usagers lors de leurs déplacements**. Nous nous sommes concentré sur cinq des huit conditions d'accessibilité évoquées en chapitre 2. En effet, nous n'avons pas pu identifier de descripteur quantitatif permettant de rendre compte du confort, de la sécurité et de la rapidité de déplacement permises par le réseau. Pour les autres conditions d'accessibilité, nous proposons d'utiliser les descripteurs suivants :

- L'éloignement angulaire, pour décrire la simplicité des déplacements permise par le réseau ;
- L'indice de détour, pour décrire la continuité des déplacements permise par le réseau ;
- La centralité d'intermédiarité, pour décrire l'isotropie et la fluidité des déplacements permises par le réseau ;
- L'éloignement métrique, pour décrire la proximité des déplacements permise par le réseau

Nous devons garder à l'esprit que les descripteurs d'accessibilité présentés ci-dessus décrivent les conditions d'accessibilité portées par le réseau, en faisant fi des autres facteurs pouvant, dans les faits, influencer sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers (la localisation des activités par exemple).

Une fois les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité des réseaux viaires décrites par des mesures quantitatives, deux types d'analyse sont possibles :

- Le premier concentre la réflexion sur l'échelle des tronçons, il consiste à observer comment les caractéristiques morphologiques des tronçons d'un réseau viaire sont liées à leurs conditions d'accessibilité. On peut par exemple observer si le degré des tronçons est lié à leur indice de détour, autrement dit, si les tronçons dont le degré est élevé ont un indice de détour faible, et inversement.
- Le deuxième type d'analyse concentre la réflexion sur l'échelle des réseaux. Il consiste à observer si les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire dans son ensemble sont liées à ses conditions d'accessibilité. Pour reprendre l'exemple précédent, cela revient à observer si un réseau dans lequel les tronçons ont globalement un degré élevé est aussi caractérisé, globalement, par des tronçons à l'indice de détour faible.

Le premier type d'analyse n'est pas adapté à notre travail car il oriente la réflexion sur les tronçons plutôt que sur les réseaux. Notre objectif n'est pas d'explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques d'un tronçon et la simplicité, la proximité ou encore l'isotropie des déplacements depuis ce tronçon. Nous voulons explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau dans son ensemble et la simplicité, proximité ou isotropie permise globalement par ce réseau.

Nous choisissons donc le second type d'analyse. Nous devons donc décrire les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité des réseaux dans leur ensemble. Nous avons vu dans ce chapitre que cela était possible, en analysant la distribution statistique, les valeurs de référence, et la distribution spatiale des descripteurs calculés à l'échelle des tronçons. Nous mobiliserons ces trois méthodes pour la description des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité des réseaux (cf chapitres 6 et 7).

Nous avons eu recours dans notre état de l'art à des travaux dans lesquels le type de graphe et le type de plus courts chemins considérés diffèrent de ceux que nous avons choisis. Par conséquent, nous ne nous attendons pas à des résultats (en termes de distribution statistique et spatiale par exemple) similaires à ceux des travaux présentés dans ce chapitre. Notre but en détaillant ces travaux était d'illustrer leur fertilité.

Le type de représentation choisi pour convertir un réseau en graphe influe sur les résultats des descripteurs présentés dans ce chapitre. Un exemple est particulièrement parlant : dans les réseaux arborescents, la présence de ronds points à l'extrémité des culs-de-sac engendre de nombreuses boucles lors de la construction du graphe (cf figure 4.9, tronçon de degré 1). Ces boucles font croître la valeur du coefficient de maillage, en créant artificiellement des « îlots » là où il n'y en a pas. De fait, le réseau peut apparaître comme beaucoup plus maillé qu'il ne l'est en

réalité. Pour éviter cela, une solution peut être de supprimer ces ronds points, qui relèvent davantage de l'aménagement local du réseau que de sa morphologie.

Cet exemple illustre l'intérêt d'un aller-retour entre les descripteurs morphologiques calculés sur le graphe et les caractéristiques morphologiques qu'ils sont censés décrire. Il illustre également la nécessité de porter une attention particulière à la construction des graphes viaires. En effet, les valeurs prises par les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité dépendent de **ce qu'on a initialement considéré comme faisant partie du réseau viaire, et de la manière dont ce réseau a ensuite été converti en graphe**. Dit autrement, les résultats de notre travail sont intrinsèquement liés aux choix faits lors des différents passages de l'objet empirique « réseau viaire » à l'objet conceptuel « réseau » puis à l'objet mathématique « graphe ». Nous détaillons ces différents choix dans le chapitre 5 ci-après. Nous présenterons également dans ce chapitre les **cas d'étude empiriques** que nous choisissons pour mener notre exploration de la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité.

Pour finir, ce chapitre nous permet un retour critique sur un champ scientifique en pleine expansion : l'analyse des réseaux viaires au moyen de la théorie des graphes. Nous présentons dans l'encadré ci-dessous quelques réflexions sur ce point.

Encadré : Critique d'un champ scientifique

En nous confrontant à la littérature portant sur l'analyse des réseaux viaires, nous nous sommes heurtés à de nombreuses difficultés. La principale étant que, dans l'abondance de travaux appliquant l'analyse de réseaux au cas des réseaux viaires, la terminologie employée n'est pas harmonisée. Comme l'avait signalé avant nous Laurent Beauguitte au sujet de l'analyse de réseaux en général, des termes différents sont utilisés pour qualifier la même mesure, et des termes similaires sont utilisés pour décrire des mesures différentes.

Nous en voulons pour preuve les multiples appellations de l'éloignement métrique ou de la centralité d'intermédiarité. Autre exemple, le fait que la distance « topologique » désigne dans les travaux de *Space Syntax* une distance angulaire, alors qu'elle désigne le nombre de sommets traversés dans la plupart des autres travaux. Nous constatons également une sorte d'appropriation du terme « graphe dual » pour désigner le graphe construit selon l'approche mixte, généralement grâce à la généralisation par ICN (Masucci et al., 2009; Porta et al., 2006b). Cette appropriation laisse sous entendre qu'il n'existe pas d'autre type de graphe dual. Nous avons été saisi par cette absence de consensus dans le vocabulaire. L'adoption d'une terminologie commune, harmonisée faciliterait la compréhension pour les

lecteurs non avertis, et encouragerait d'éventuelles collaborations entre des disciplines « éloignées ».

Dans l'état actuel des choses, nous constatons que malgré l'objet d'étude commun (le réseau viaire), et la méthode d'analyse commune (l'analyse de réseaux), les travaux que nous avons évoqués peuvent être positionnés par rapport à **deux courants bien distincts**, correspondant globalement à deux disciplines. Le premier courant est dominé par l'approche *Space Syntax*. Il s'agit souvent de travaux d'architectes (Griffiths & Lünen, 2016; Hillier & Hanson, 1989; Shpuza, 2014; Vaughan, 2015) collaborant parfois avec d'autres disciplines. Ces travaux ont leurs propres hypothèses et leur propre terminologie. Souvent, ils ne s'intéressent pas à la mesure de centralité pour elle-même, mais plutôt à sa corrélation avec d'autres phénomènes tels que les flux piétons ou automobiles réels (Hillier & Iida, 2005), ou l'occupation du sol (Cutini, 2001).

A l'autre extrême, nous avons les travaux menés par des physiciens (Barthelemy, 2015; Courtat et al., 2011), souvent en collaboration avec des géographes quantitativistes (Masucci et al., 2009) ou des géomaticiens (Barthelemy et al., 2013; Lagesse et al., 2015). Pour simplifier, nous parlerons d'*approche des physiciens*. Ces travaux sont facilement reconnaissables. Ils utilisent des méthodes statistiques qu'on ne retrouve que rarement en *Space Syntax*. En outre, ils comparent souvent le réseau étudié à des modèles de réseaux théoriques (appelés des modèles nuls), afin d'observer ce qui différencie les réseaux viaires d'autres réseaux qu'ils ont coutume d'étudier. Enfin, ces travaux visent souvent à identifier des sortes de *lois universelles* communes à tous les réseaux viaires.

Les autres travaux que nous avons cités peuvent être considérés comme des approches intermédiaires entre ces deux extrêmes. Le travail de l'urbaniste Sergio Porta par exemple se rapproche de celui des physiciens dans la mesure où des analyses statistiques poussées sont menées. Mais il se rapproche également de la *Space Syntax* dans la mesure où l'objectif visé est souvent la recherche de corrélation avec des phénomènes concrets, dans une **visée opérationnelle**.

Signalons que dans certains cas, l'approche des physiciens a des ambitions proches de celles des architectes et des urbanistes. Elle tente de glisser dans le champ de l'opérationnel, en suggérant que la théorie des graphes fournit des solutions clefs en main pour régler des problèmes concrets. Or, il faut prendre garde aux modèles implicites que ces disciplines peuvent avoir concernant ce qu'est un « bon » réseau, une « bonne » accessibilité. Comme le dit le designer John Maeda, la définition d'un designer de ce qui est « parfait » est différente de celle d'un informaticien¹⁵¹. Il importe donc de ne pas *plaquer* des modèles valables pour d'autres types de réseaux au cas particulier des réseaux viaires. Une collaboration avec d'autres disciplines, notamment avec des architectes, permettrait d'éviter cet écueil.

¹⁵¹ « A designer's definition of « perfect » is different for a computational designer ».

Par ailleurs, la revue de la littérature montre à quel point l'approche des physiciens peut être fertile pour l'analyse des réseaux viaires, en particulier pour les méthodes statistiques utilisées (étude de la distribution statistique, utilisation de l'indice de concentration de Gini). Nous pensons que ces méthodes devraient être diffusées auprès d'un public d'architectes et d'urbanistes, afin qu'ils puissent les intégrer dans leurs travaux. Ce travail de diffusion est assez peu mené par les physiciens, qui publient souvent leurs travaux dans des revues scientifiques de physique ou d'informatique.

L'un de nos objectifs est d'amorcer ce **travail de diffusion**. Nous avons commencé à le faire, de manière théorique, dans ce chapitre. Nous poursuivons lors de la présentation de nos résultats (chapitres 6 et 7), cette fois en analysant un corpus de réseaux viaires empiriques.

Chapitre 5 : Des données pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité

Introduction

Rappelons que notre objectif principal est d'explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire et ses conditions d'accessibilité, plus précisément la simplicité des déplacements dans ce réseau, leur continuité, isotropie, proximité et fluidité. Rappelons également que nous avons décliné notre objectif principal en trois sous-objectifs :

- Décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires ;
- Décrire les conditions d'accessibilité portées par ces réseaux ;
- Décrire la relation entre les deux.

Par ailleurs, nous avons identifié dans le chapitre 3 un ensemble de préconisations typiques faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, afin d'améliorer les conditions d'accessibilité dans un réseau viaire, en agissant sur ses caractéristiques morphologiques. Ces préconisations peuvent être classées en deux catégories : **préconiser de créer un réseau viaire à la morphologie typique, et préconiser un certain type d'intervention à mener sur la morphologie d'un réseau viaire existant**. Nous avons choisi de nous focaliser sur ces préconisations faites en urbanisme, ce qui nous permettra d'y porter un regard critique.

Le choix de travailler sur ces deux catégories de préconisations nous conduit à formuler nos deux premiers sous-objectifs différemment selon la catégorie de préconisation considérée :

- Pour la première catégorie de préconisation, nous allons plus précisément **décrire les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité de réseaux à la morphologie typique** ;
- Pour la seconde catégorie de préconisation, nous allons plus précisément **décrire l'évolution des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité qui accompagne l'intervention typique considérée**.

Nous avons vu dans le chapitre 4 comment quantifier plusieurs des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité des réseaux viaires. Pourtant, cette quantification n'est qu'une étape dans la description de ces caractéristiques et de ces conditions. En effet, dans le cas des réseaux à la morphologie typique, les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité seront décrites en **comparant** les valeurs prises par les descripteurs (morphologiques et d'accessibilité) pour un réseau type donné aux valeurs prises dans les réseaux de type différent. Chaque réseau type sera donc décrit relativement aux autres.

Dans le cas des interventions typiques, l'évolution des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité faisant suite à une intervention typique sera décrite en **comparant** l'évolution des valeurs prises par les descripteurs suite à l'intervention en question, à leur évolution suite à d'autres interventions, non typiques.

Ainsi, dans un cas comme dans l'autre, **nous choisissons la comparaison comme démarche** pour la description des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité des réseaux, ainsi que pour celle de leurs changements en cas d'intervention.

Ce choix nous guide dans la sélection de nos cas d'étude. Nous allons travailler sur **deux corpus distincts**, un pour la première catégorie de préconisation, et un pour la seconde. Dans le premier cas, nous allons sélectionner des cas d'étude correspondant à des réseaux à la morphologie typique. Nous choisissons **deux cas pour chaque type**, c'est-à-dire deux réseaux organiques, deux réseaux quadrillés, et deux réseaux arborescents. Cela nous permettra de comparer à la fois des réseaux de même type et des réseaux de types différents. Nous pourrions alors observer si les réseaux de même type ont des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité plus proches que des réseaux de type différent. Par ailleurs, les deux réseaux choisis pour chaque type seront de **tailles très différentes**, ce qui nous permettra d'identifier s'ils présentent des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité communes malgré leur différence en termes de taille.

Dans le deuxième cas, nous allons sélectionner un **réseau dans lequel a été menée une intervention typique**, et nous comparerons l'évolution de ses caractéristiques morphologiques et de ses conditions d'accessibilité suite à cette intervention, à leur évolution à **d'autres moments de son histoire**. Nous pourrions alors observer en quoi l'intervention typique considérée a engendré une évolution particulière comparée aux autres périodes. Cela nous permettra d'arriver à une description précise de l'intervention en question.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les cas d'étude choisis pour notre travail. Les éléments mentionnés ci-dessus induisent un premier critère de sélection de ces cas d'étude, mais un autre critère est essentiel : la disponibilité de données représentant la morphologie des réseaux viaires. Ce critère est primordial car il conditionne la possibilité d'analyser ces réseaux au moyen de la théorie des graphes.

Nous présentons donc dans la partie I ci-dessous le type de données nécessaires à notre travail. Nous présentons ensuite en partie II le choix de nos cas d'étude, et en partie III les données choisies pour chacun de ces cas d'étude.

I. Présentation du type de données requis pour l'analyse des réseaux

L'objectif de cette partie est de présenter les données nécessaires à notre travail. Nous nous demanderons quel type de données est nécessaire pour mener nos analyses de réseau, où se procurer ces données, comment elles sont construites, comment les convertir en graphes, et avec quel outil les analyser.

I.1. Les données filaires

I.1.1. Présentation

L'analyse de réseaux que nous allons mener nécessite le recours à des logiciels informatiques, par conséquent, nous avons besoin de données sur la morphologie des réseaux viaires pouvant être exploitées sur ces logiciels. Nous les désignons comme des données numériques. De telles données sont de plus en plus disponibles, mais leur construction porte de nombreux enjeux – nous reviendrons sur certains d'entre eux ultérieurement.

Parmi les données numériques représentant la morphologie des réseaux viaires figurent les **données géographiques**. Il s'agit de données disposant de coordonnées géographiques permettant de les positionner sur la surface du globe terrestre. Ces données sont en général vectorielles¹⁵². Selon Porta et al. (2006), le standard mondial de construction de ce type de données consiste à représenter chaque voie par une ligne située en son milieu, et qui reprend son orientation. Cette ligne est désignée en anglais *Street centerline*, que l'on pourrait traduire par « axe central » ou encore « **filaire** », terme que nous choisissons¹⁵³ – nous parlerons de *données filaires*. Plusieurs bases de données géographiques sont structurées selon ce paradigme des filaires. C'est le cas par exemple de la base de données TIGER (*Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing*), développée au bureau du recensement américain. En France, les données de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) sur les réseaux viaires sont elles aussi structurées selon ce paradigme. Il en est de même pour les données Openstreetmap, base de données collaborative qui couvre l'échelle mondiale. Nous choisissons d'utiliser ce type de données.

Ainsi, le choix de nos cas d'étude (présentés en partie II) sera notamment guidé par la disponibilité de données filaires. Nous utiliserons des données produites par des organismes étatiques ou des centres de recherche. Pour comprendre ces données et mieux se les approprier, il convient de s'intéresser à leur procédé de construction.

¹⁵² C'est-à-dire des données structurées par deux composantes : d'abord une composante graphique, ou géométrique, laquelle est discrète ; ensuite une composante attributaire permettant d'associer à chaque géométrie des informations.

¹⁵³ Le terme « filaire » est employé pour désigner ce type de données par plusieurs géographes et géomaticiens, notamment Costes (2016), et Lagesse (2015).

I.1.2. Comprendre la construction des données filaires

Nous présentons la construction des données filaires, en distinguant les deux principaux types de données dont elles sont issues : les données cartographiques d'une part, et les images satellites d'autre part.

Des données filaires construites à partir de données cartographiques

La construction des données filaires peut se faire en prenant pour base des données cartographiques (cartes et plans) représentant le réseau viaire. Dans ce cas, la compréhension de ces données filaires passe par l'identification des processus :

- de construction des données cartographiques qui leur servent de base ;
- de conversion de celles-ci en données filaires.

La construction des données cartographiques

Les données cartographiques renvoient aussi bien aux cartes qu'aux plans. En cartographie urbaine, le terme « carte » est réservé aux représentations territoriales tandis que le terme « plan » désigne une représentation de la forme urbaine (Pinon et Le Boudec, 2014, p. 22). Comme notre travail porte sur l'échelle intra-urbaine, nous nous intéressons davantage aux plans de ville qu'aux cartes.

La construction des plans de ville se fait soit par un relevé effectué sur terrain, soit par réélaboration d'un plan antérieur. Il existe différents types de plans de ville, identifiables selon leur objectif. Pour Pinon et Le Boudec, les principaux types permettant de donner une image globale de la ville sont les « plans portraits » et les « plans topographiques » (2014, p. 10). Les plans portraits correspondent aux **vues cavalières** du XVI^e siècle (cf figure 5.1). Ces plans valorisent la cité, ils témoignent de son étendue, de sa beauté. Ils révèlent « naïvement ce que l'initiateur, le commanditaire, l'artiste veulent montrer ». Pinon et Le Boudec ajoutent que ce type de plan s'efface progressivement au cours du XVII^e siècle. De leur côté, les plans topographiques correspondent à des **plans géométraux** (cf figure 5.2), considérés comme plus neutres, exacts. Ils apparaissent dès le XVI^e siècle en Italie¹⁵⁴ et sont produits encore aujourd'hui. Pinon et Le Boudec évoquent également d'autres types de plan, tels que les plans fonciers (cadastraux par exemple), les plans projets (en rapport avec les projets de transformation de la ville) et les plans analytiques (tels que les plans thématiques).

¹⁵⁴ Léonard de Vinci conçoit un tel plan pour la ville d'Imola en 1502.



Figure 5.1 : Vue cavalière sur Paris, dite « plan de Braun et Hogenberg », représentant le réseau vers 1530. Source : Wikipédia.



Figure 5.2 : Plan géométral de Paris, dit « Paris, ses fauxbourgs et ses environs où se trouve le détail des villages, châteaux, grands chemins pavez et autres, des hauteurs, bois, vignes, terres et prez, levez géométriquement ». Ce plan a été tracé par l'ingénieur Roussel entre 1730 et 1739. Source : Gallica.bnf.fr.

Pinon et Le Boudec affirment que la voirie est manifestement l'élément urbain que visent à montrer en priorité les plans de ville. Elle constitue le « minimum » de ce qui est représenté sur ces plans (p. 14). Cette importance de la voirie n'a fait que s'accroître au fil du temps, notamment en raison de l'attention croissante accordée aux problèmes de circulation.

Les plans de ville peuvent être contemporains du réseau représenté, ou être une reconstitution du réseau à des périodes antérieures. Ces reconstitutions sont construites par des historiens, des archéologues, des cartographes, qui prennent appui sur les traces laissées dans les topographies postérieures¹⁵⁵. C'est ainsi que plusieurs plans de Paris à l'Antiquité et au Moyen Âge ont été reconstitués. Le plan dit *Topographie historique du vieux Paris*¹⁵⁶, conçu par Berty en 1866 est un exemple de reconstitution du Paris médiéval.

Le plan n'est pas le réseau

« *La carte du réseau sans doute n'est pas le territoire* » (Lemoigne, 1990).

Les plans contemporains du réseau représenté ou les reconstitutions sont des données cartographiques représentant la morphologie du réseau telle que cartographiée par leurs auteurs. Elles ne reflètent donc pas nécessairement la réalité (Bonin, 2014; Oliveira, 2016). Ces données sont tributaires de choix cartographiques qui diffèrent d'un auteur à un autre, d'une période à une autre. Ces choix portent par exemple sur le type de voies représentées (l'auteur a-t-il représenté les voies non carrossables, les voies appartenant à des domaines privés, les voies à l'intérieur des parcs et jardins ?). C'est ce que l'on appelle la **sélection** (Béguin & Pumain, 2017). Ces choix portent également sur le degré de simplification adopté lors de la représentation du réseau (avec quelle précision la dimension et la géométrie des voies, des intersections et des places sont-elles représentées ?). C'est ce que l'on appelle la **simplification** (Béguin & Pumain, 2017). À ce titre, les vues cavalières sont problématiques car les voies n'y sont pas représentées dans leurs largeurs réelles. Concernant les plans géométriques, la voirie y est généralement figurée par « deux traits plus ou moins parallèles, limitant éventuellement des surfaces grisées quand les masses du bâti sont représentées » (Pinon et Le Boudec, 2014, p. 15). Pourtant, même dans ces plans, **la précision du tracé et surtout la réalité de la largeur des voies sont variables** (Pinon et Le Boudec, p. 14). Notons que généralement, plus l'échelle de représentation est fine, plus le réseau viaire sera précisément représenté.

¹⁵⁵ Voir Pinon et Le Boudec (2014, p. 23) pour plus d'explication.

¹⁵⁶ *Topographie historique du vieux Paris*. Paris : Imprimerie impériale, 1866-1867, 2 vol.

L'architecte Enrico Chapel (2017) s'est intéressé à la question du lien entre données cartographiques et réalité empirique. Il considère la carte comme une production sociale :

« Les historiens de la cartographie ont montré qu'une projection plane est avant tout un construit dont la fabrication dépend des contextes techniques, politiques et culturels (Harley, Woodward, 1987). Cette projection est en même temps une médiation entre le monde et l'individu, entre l'espace réel et notre façon de le voir ou de l'imaginer (Jacob, 1992). Elle livre des renseignements sur les façons de comprendre le monde ».

Chapel donne pour exemple le cas de l'Europe au Moyen Âge. À cette époque, une « théologie de l'espace » détermine le dessin des cartes et des plans. La symbolique du rapport entre monde céleste et monde terrestre est omniprésente dans les représentations qui sont faites de la ville. À la Renaissance en revanche, la carte est vue comme un objet esthétique qui doit montrer une prouesse technique. À partir du XVIII^e siècle, on observe selon Marion (2018) une « recherche accrue de scientificité et de proximité avec le réel. Le recours à des relevés et à des travaux géométriques devient systématique ». Pourtant, selon Chapel (2017), la carte reste, aujourd'hui encore, un produit chargé d'intentions et de présupposés implicites. **Elle n'est pas l'objet neutre, objectif et scientifique que l'on pourrait croire.** Il conclut qu'il est important de questionner les conditions concrètes de production des cartes, et de les lier aux intérêts et stratégies des acteurs qui les ont utilisé ou les utilisent.

Ainsi, les données cartographiques ne constituent qu'une représentation des réseaux viaires empiriques, représentation sujette à des **choix et portant des intentions**. Le passage de ces données cartographiques à des données filaires implique lui aussi des choix, que nous présentons ci-après.

La conversion des données cartographiques en données filaires

La conversion des données cartographiques en données filaires peut se faire manuellement, en ayant recours à un Système d'information géographique (SIG). Il s'agit d'une famille de logiciels qui traitent d'une information géographique, c'est-à-dire que les objets qui y sont représentés ont des coordonnées géographiques, une géométrie, des dimensions. Pour convertir manuellement les données cartographiques en données filaires, il faut d'abord géoréférencer les données cartographiques (un plan de rues par exemple) sur un SIG, puis saisir manuellement, voie par voie, le réseau viaire.

La conversion manuelle des données cartographiques en données filaires nécessite de nombreux choix. En premier lieu, le choix des données cartographiques utilisées

comme base : la fidélité de ces données à la morphologie réelle du réseau conditionne la qualité des données filaires produites. Par ailleurs, la construction des données filaires (comme celle des données cartographiques) nécessite des choix en termes de sélection et de simplification. Par exemple, dans certains cas, les auteurs simplifient la géométrie des voies en les représentant par des lignes droites entre deux intersections. Dans d'autres cas, le filaire suit la géométrie des voies avec précision. Enfin, dans d'autres cas, les voies à double sens de circulation sont représentées par deux lignes distinctes sur le filaire.

Il est également possible de convertir les données cartographiques en données filaires de manière semi automatique, en ayant recours à la photo-interprétation automatique. Ce procédé est également utilisé lorsqu'on dispose d'images satellites du réseau.

Des données filaires construites à partir d'images satellites

En plus des données cartographiques, la construction de données filaires peut s'appuyer sur des images satellites représentant un territoire donné (une ville par exemple). La précision de ces images est alors un élément essentiel.

La conversion des images satellites en données filaires se fait soit manuellement (selon le procédé présenté ci-dessus), soit de manière semi automatique. Ce procédé de construction semi automatique des filaires fait l'objet de nombreux travaux de la part des organismes étatiques et des centres de recherche (Cura, 2016; Marsault, 2012). Une technique répandue (utilisée notamment par l'IGN) a recours à la photo-interprétation automatique d'images aériennes hautes résolutions. Ces images sont d'abord géoréférencées, puis une grande partie des axes centraux des voies sont extraits par photo-interprétation. Des corrections sont faites manuellement par la suite, afin de combler les lacunes de ce procédé automatique. Les situations complexes telles que les secteurs très denses en réseaux, ou ceux partiellement cachés par le couvert végétal ou par des ombres sont autant d'éléments à reprendre manuellement.

Synthèse

La figure 5.3 résume le passage d'un objet empirique, le réseau viaire, à sa représentation sous forme de données géographiques filaires, en passant par une représentation cartographique (carte, plan), ou par une image satellite. Comme nous l'avons expliqué dans les sections ci-dessus, différents choix sont réalisés lors de ces passages. La compréhension de ces choix est essentielle afin de questionner **la capacité de ces données filaires à représenter le phénomène qui nous intéresse – la morphologie du réseau viaire.**

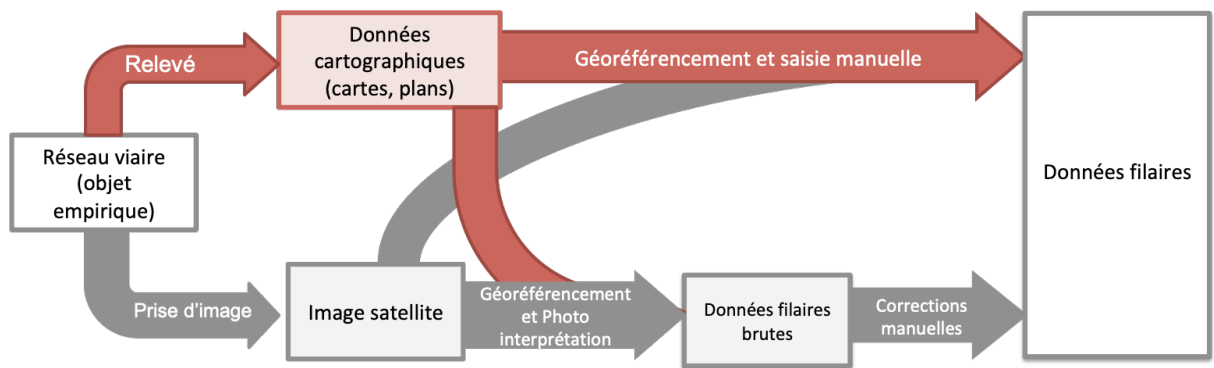


Figure 5.3 : Schéma de synthèse sur la construction des données filaires. NB. sur le schéma, les « données filaires brutes » sont les données issues de la photo-interprétation automatique, elles nécessitent des corrections manuelles.

I.2. Des données filaires aux graphes viaires

I.2.1. Création des graphes viaires

Les données filaires contiennent toutes les informations nécessaires à la construction d'un graphe géométrique primaire¹⁵⁷. Les lignes du filaire représentent les arêtes du graphe primaire, et les jonctions entre ces lignes ainsi que leurs extrémités sont les sommets du graphe. Une fois le graphe primaire obtenu, la construction d'un graphe géométrique dual – représentation que nous avons choisie – est possible. La construction d'un graphe – primaire ou dual – nécessite au préalable une **préparation** des données filaires, visant à corriger les erreurs de topologie et de géométrie. Nous présentons brièvement ce procédé de préparation dans l'annexe B.

De nombreux outils ont été développés ces dernières années pour convertir les données filaires en graphes viaires primaires ou duaux. Citons notamment le protocole développé sur Arcgis par Karduni et al. (2016), le plugin *Network Analysis* développé par Serge Lhomme sur Qgis, ou encore l'outil *OSMnx* développé par Boeing (2017) dans le langage de programmation Python. Ces initiatives ont engendré ces dernières années un essor de l'utilisation de la théorie des graphes pour analyser de larges corpus de réseaux viaires.

I.2.2. Analyse des graphes viaires

Quel outil ?

Une fois les données filaires converties en graphes viaires, comment calculer les divers descripteurs de la théorie des graphes ? Il faut pour cela recourir à des outils

¹⁵⁷ On parle d'ailleurs parfois de « représentation en graphe » pour qualifier la représentation en filaires.

d'analyse de réseaux. Ceux-ci sont nombreux¹⁵⁸, mais la plupart ont été conçus pour des réseaux n'ayant pas de géométrie propre, tels que les réseaux sociaux ou les réseaux d'échanges commerciaux. Or nous avons choisi une représentation des réseaux viaires sous forme de graphe géométrique. L'outil sélectionné devra donc tenir compte de la géométrie du réseau lors du calcul des descripteurs. Notre choix se porte alors sur les outils d'analyse de réseaux intégrés à des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les objets qui y sont représentés ont une géométrie et des dimensions, ils sont donc adaptés à l'étude des graphes viaires géométriques.

Plusieurs outils d'analyse de réseaux ont été développés dans les SIG. Citons notamment la boîte à outils *Urban Network Analysis*¹⁵⁹ sur Arcgis, le plugin *Space Syntax Toolkit* sur Qgis¹⁶⁰, le plugin *Network Analysis* sur Qgis¹⁶¹, le plugin *Morpheo*¹⁶² sur Qgis, ou encore l'outil *Spatial Design Network Analysis (sDNA)*. Ce dernier existe sur Arcgis, Qgis Autocad, Python, et en ligne de commande. Il a été développé en 2016 par Alain Chiaradia, Crispin Cooper et Chris Webster, et permet d'analyser les réseaux viaires en tant que graphes géométriques duaux. C'est la raison pour laquelle nous choisissons cet outil pour notre travail. Nous le présentons plus en détail en annexe B.

I.3. Choix des standards cartographiques considérés

Les sections ci-dessus nous ont permis de présenter les choix à faire lors de la construction de données cartographiques, et lors du passage des données cartographiques aux données filaires. Nous regroupons ces choix sous l'expression « standard cartographique ».

Afin de constituer un corpus de données cohérent, les différents filaires que nous utilisons dans le cadre de notre travail doivent être similaires en termes de standard cartographique. Autrement dit, les choix faits lors de la construction de ces données, tant en matière de sélection que de simplification, doivent être équivalents pour l'ensemble des réseaux étudiés afin de les rendre **comparables**. Nous fixons les standards suivants, sur lesquels nous nous basons pour choisir les données filaires utilisées :

En termes de **sélection**, nous considérons que tout le sol public servant à la circulation des usagers doit être représenté sur le filaire : les voies de circulation

¹⁵⁸ Voir Beauguitte (2013) pour un aperçu rapide.

¹⁵⁹ Développée par Sevtsuk et Mekonnen en 2012.

¹⁶⁰ Développé par Jorge Gil pour analyser des réseaux selon l'approche *Space Syntax*.

¹⁶¹ Développé par Serge Lhomme.

¹⁶² Développé par Claire Lagesse pour analyser des réseaux selon l'approche mixte.

mais aussi les ponts, places, et autres espaces libres. Cela nous place dans une définition des voies proche de celle de l'architecte italien Alberti (1485 *cité dans* Alonzo (2018)), qui considérait ces différents espaces comme autant de variantes, prolongements, et métamorphoses de la voie (cf chapitre 1). Toutefois, comme notre intérêt porte sur la circulation intra-urbaine, nous choisissons d'exclure les voies servant à la circulation interurbaine, comme les autoroutes, les roades, ou certaines voies rapides (cf figure 5.4). Par ailleurs, les voies situées à l'intérieur des parcs et jardins sont elles aussi exclues, à l'exception de celles qui sont intégrées au réseau viaire (voies carrossables permettant de traverser un parc par exemple).

Concernant la **simplification**, les standards choisis visent à nous faciliter la construction des graphes géométriques (cf section I.2). Ainsi, dans les filaires choisis, chaque voie du réseau viaire doit être représentée par une ligne unique sur le filaire. Nous excluons de fait les filaires dans lesquels les voies à double sens sont représentées par deux lignes différentes. Par ailleurs, la géométrie des voies doit être représentée dans le filaire, nous excluons donc les filaires dans lesquels les voies non rectilignes sont simplifiées sous forme de lignes droites.



Figure 5.4 : Filaires représentant une partie des réseaux viaires actuels de Manhattan (à gauche) et de Détroit (à droite). On y observe de nombreuses roades et autoroutes urbaines. Source : Manhattan : base de données *Historical Urban Ecological (HUE) data*. Détroit : (Karduni et al., 2016).

Conclusion de la partie I

Nous avons présenté dans cette partie le type de données que nécessite l'analyse de réseaux que nous proposons de mener grâce à la théorie des graphes. Il s'agit de données filaires, représentant la morphologie des réseaux viaires, avec leurs caractéristiques topologiques et géométriques. Ces données filaires présentent donc toutes les caractéristiques nécessaires à la construction de graphes géométriques.

Nous avons également vu que la construction des données filaires nécessitait plusieurs choix, notamment en termes de sélection des voies qui seront représentées sur le filaire : faut-il inclure les voies traversant les parcs, les places, les tunnels ? Des choix s'imposent également concernant la simplification du tracé de ces voies sur le filaire : sont-elles représentées par une ligne unique, une double ligne ? Nous avons regroupé ces choix en termes de sélection et de simplification sous l'expression « standards cartographiques ». Dans notre cas, **seul le sol public servant exclusivement à la circulation intra-urbaine sera considéré comme une voie du réseau viaire, et sera donc représenté sur le filaire. Ces voies seront représentées par des lignes qui en reprennent la géométrie.** Un grand nombre de données filaires correspondent à ces standards.

Dans la partie II ci-dessous, nous présentons les cas d'étude sur lesquels portera notre travail. Ces cas d'étude ont notamment été choisis pour la disponibilité de données filaires représentant la morphologie de leur réseau viaire suivant les standards établis ci-dessus.

II. Construction d'un corpus de cas d'étude représentatifs des préconisations faites en urbanisme

L'objectif de cette partie est de sélectionner des cas d'étude qui soient représentatifs de diverses préconisations théoriques faites en urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité permises par les réseaux viaires (cf chapitre 3).

Comme indiqué en introduction du chapitre, nous avons choisi de travailler sur **deux corpus** distincts de cas d'étude, correspondant à deux catégories de préconisations : les réseaux à la morphologie typique, et les interventions typiques sur la morphologie d'un réseau existant. Ainsi, notre premier corpus comprendra des réseaux à la morphologie typique : deux réseaux organiques, deux réseaux quadrillés, et deux réseaux arborescents.

Notre second corpus comprendra un réseau viaire dans lequel a été menée une intervention typique. Nous étudierons ce réseau avant et après cette intervention, mais aussi à d'autres moments de son histoire, afin de décrire cette intervention relativement à d'autres qui auront pu être faites sur ce réseau.

Nous faisons le choix de travailler sur des **réseaux viaires empiriques** plutôt que des projets non réalisés. Comme le soulignent Panerai et al. (1997), le fait d'étudier des cas empiriques, autrement dit des réseaux viaires « réels » permet « **de ne pas réfléchir seulement sur des projets ou des intentions mais de confronter les projets, voire les théories qui les accompagnent à la réalité bâtie et habitée** ».

En plus d'être représentatifs des préconisations faites en urbanisme, le choix de nos cas d'étude a été guidé par la disponibilité de données filaires conformes à nos standards cartographiques (cf section I.3), pouvant servir à la construction de graphes viaires géométriques, graphes sur lesquels seront menées nos analyses. Par ailleurs, pour le premier corpus, nous avons choisi pour chaque type deux réseaux de tailles très différentes, afin d'identifier s'ils présentent des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité communes malgré leur différence en termes de taille.

II.1. Corpus 1 : Les réseaux à la morphologie typique

Le choix de cas d'étude empiriques représentatifs de trois types de réseaux préconisés en urbanisme, le type organique, le type quadrillé et le type arborescent, représente un enjeu dans la mesure où la morphologie des réseaux viaires choisis doit être **suffisamment homogène** pour être représentative de ces types. Il est effectivement rare qu'un réseau empirique corresponde parfaitement, dans sa globalité, à un réseau type. Le choix des réseaux constituant le corpus devra tenir compte de cette difficulté.

II.1.1. Des préconisations théoriques aux cas d'étude empiriques

Du type à sa mise en œuvre

L'écart entre un type de réseau préconisé et sa mise en œuvre empirique est assez bien décrit par Novarina & Sadoux (2018) pour le cas de la Cité-jardin d'Ebezener Howard (cf chapitre 1), qu'ils qualifient de modèle¹⁶³. Les auteurs analysent la circulation de ce modèle en Grande-Bretagne et aux États-Unis, depuis le début du XXe siècle jusqu'à nos jours, et montrent la diversité de ses mises en œuvre empiriques. Ils concluent :

« Loin d'avoir donné lieu à des réalisations standardisées, le modèle des cités-jardins, défini par Ebenezer Howard et mis en œuvre par différents architectes, en particulier Raymond Unwin et Barry Parker, est un réservoir de références propices à la réinterprétation ».

Cet écart entre « théorie » et « empirie » s'explique du fait que la fabrique d'un réseau viaire se heurte en réalité à de nombreuses contraintes liées au site, au foncier, aux moyens financiers à disposition, etc. Autant de facteurs qui éloignent les cas empiriques des morphologies typiques, « pures », décrites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Cela explique que la plupart des réseaux viaires empiriques aient une morphologie « unique ». Ainsi, l'un des objectifs subsidiaires de notre travail sera d'observer les différences qui peuvent exister entre un certain

¹⁶³ Le terme modèle renvoie ici à ce que nous avons désigné comme étant un type.

type de réseau, présent à l'esprit des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, et son existence concrète à travers des cas empiriques. Ces cas empiriques sont un cas de figure parmi d'autres du type en question.

Des types altérés par le temps

L'identification de réseaux viaires empiriques à la morphologie suffisamment homogène pour être représentatifs d'un type se heurte à une difficulté majeure. Les réseaux viaires actuels, en particulier ceux des villes, sont formés d'une juxtaposition et d'une superposition de sous-parties, à la morphologie différente. En effet, les réseaux viaires sont évolutifs, un réseau de type organique par exemple peut être totalement remodelé au fil du temps, pour s'adapter aux nouveaux modes de transport par exemple. Ses voies peuvent être alignées, ses intersections modifiées, lui faisant perdre ses caractéristiques morphologiques typiques. Ces adaptations ultérieures rendent difficile l'identification de réseaux viaires à la morphologie homogène. Même dans les réseaux rigoureusement quadrillés, dont le plan est contraignant et peu propice aux adaptations, des rocade, autoroutes urbaines, tunnels, sont introduits, modifiant les caractéristiques morphologiques du réseau d'origine¹⁶⁴.

Considérant cela, deux solutions s'offrent à nous :

- Soit nous choisissons des réseaux viaires « dans leur jus », c'est-à-dire avant qu'ils aient subi des adaptations pouvant altérer leurs caractéristiques morphologiques typiques. Cela implique de disposer de données sur SIG représentant le réseau viaire à l'époque où sa morphologie correspondait à celle d'un réseau type ;
- Soit nous choisissons des sous-parties homogènes d'un réseau viaire, ce qui implique un découpage du réseau en fonction de ce critère d'homogénéité.

Nous choisissons la première solution pour le cas des réseaux organiques et quadrillés. Les réseaux organiques étant particulièrement répandus au Moyen Age, ils ont depuis subi de nombreuses adaptations qui rendent difficile l'identification d'un réseau viaire actuel typiquement organique. Nous choisissons donc pour cas d'étude des réseaux viaires tels qu'ils étaient au Moyen Age.

Concernant les réseaux quadrillés, nous choisissons des réseaux datant du XIXe siècle, ou du début du XXe siècle. Ce choix nous permet de nous rapprocher des premières manifestations des réseaux en grille, très utilisés aux Etats-Unis à cette époque.

Nous choisissons la seconde approche pour ce qui est du type arborescent. Nous allons sélectionner des sous-parties homogènes, correspondant à des réseaux arborescents, dans des réseaux viaires actuels. Ce choix est justifié par le fait que les réseaux arborescents sont un type encore largement utilisé aujourd'hui dans les

¹⁶⁴ On le voit notamment sur le réseau viaire de Manhattan en 2016 (cf figure 5.4).

banlieues suburbaines, notamment en Amériques du nord. Il est donc possible d'extraire de ces réseaux des parties (quartiers, ensembles de quartiers) représentatives du type arborescent.

II.1.2. Les réseaux choisis

A partir de notre expertise sur les réseaux viaires et l'observation de leur morphologie (sur des plans de rues), nous avons sélectionné des réseaux viaires caractéristiques de chacun des types qui nous intéressent. Cette approche est utilisée par Zhang et al. (2011), qui parlent d'une classification des réseaux viaires basée sur l'observation de leurs caractéristiques « graphiques » (*graphical characteristics*). Nous adoptons une telle approche pour une première présentation des réseaux sélectionnés.

Deux réseaux de type organique

Le réseau viaire de Paris au Moyen Âge

Notre premier cas d'étude est à l'échelle d'une ville. Il s'agit du Paris médiéval. Ce choix est justifié par le fait qu'il s'agit d'un réseau à la morphologie homogène, qui correspond *a priori* au type organique. Il est également justifié par l'existence de données au format SIG et conformes à nos standards cartographiques, représentant la morphologie de ce réseau viaire.

Plusieurs travaux permettent de dresser une reconstitution du réseau viaire parisien à la période médiévale. Pinon et Le Boudec (2014) évoquent en particulier le travail conséquent de reconstitution cartographique d'Adolphe Berty : *Topographie historique du Vieux Paris*, mené entre 1876 et 1897. Alors que le réseau viaire de la ville à la période romaine suivait un quadrillage orthogonal (Pinon et Le Boudec, 2014, p. 26), le réseau médiéval apparaît comme beaucoup plus irrégulier, notamment parce que la ville antique est presque entièrement détruite par les normands à la fin du IXe siècle. Toutefois, le réseau viaire médiéval hérite de quelques éléments de son passé antique : en analysant le parcellaire ancien de Paris, Robert et al. (2013) ont montré que l'orientation des voies qui dominait à l'antiquité en rive gauche (notamment celle du *cardo maximus*, formé par les rues Saint-Martin et Saint-Jacques) s'observe au Moyen Âge, cette fois-ci en rive droite. Au Xe siècle, la ville se développe mais reste largement rurale. Au cours des XIe, XIIe et XIIIe siècles, elle est marquée par un développement important des activités artisanales et commerciales (sur la rive droite autour de la place de Grève), une forte croissance démographique, et un développement intellectuel, technique et artistique conséquents. Ainsi, sous Philippe-le-Bel (1285-1314), la ville encore encerclée par l'enceinte de Philippe Auguste (XIIe siècle) est très dense. Les densités les plus élevées s'observent sur l'île de la Cité et dans le quart nord-ouest de la rive droite. Selon Bourlet et Layec (2013), la densité peut y atteindre 1400 habitants à l'hectare

en certains points, ce qui incite Bove (2013) à parler d'un hyper-centre. A cette période, l'urbanisation de Paris déborde également au-delà de l'enceinte de Philippe Auguste, elle se fait en doigt de gant le long des axes de circulation.

En observant une reconstitution du plan du réseau viaire parisien sous Philippe-le-Bel (XIV^e siècle) (cf figure 5.5), nous constatons qu'il présente les **caractéristiques morphologiques** que nous avons considérées comme typiques des réseaux organiques : il a une composition irrégulière, les voies (à l'exception de quelques axes notables tels que les rues Saint-Jacques et Saint-Martin) y sont souvent **courtes et tortueuses**, en particulier autour des Halles (cf figure 5.6), sur l'île de la Cité (cf figure 5.6), et près de la montagne Sainte-Genève. Les voies se croisent par des **intersections en X et en T**. On constate également que **l'orientation des voies est variable** : certaines suivent le tracé de la Seine, d'autres celui de l'enceinte de Philippe Auguste, d'autres suivent l'orientation des voies d'accès à la ville.

Cette description des caractéristiques morphologiques s'est faite « par des mots ». Nous verrons dans le chapitre 6 si le recours à des mesures quantitatives (présentées en chapitre 4), fournira la même description.

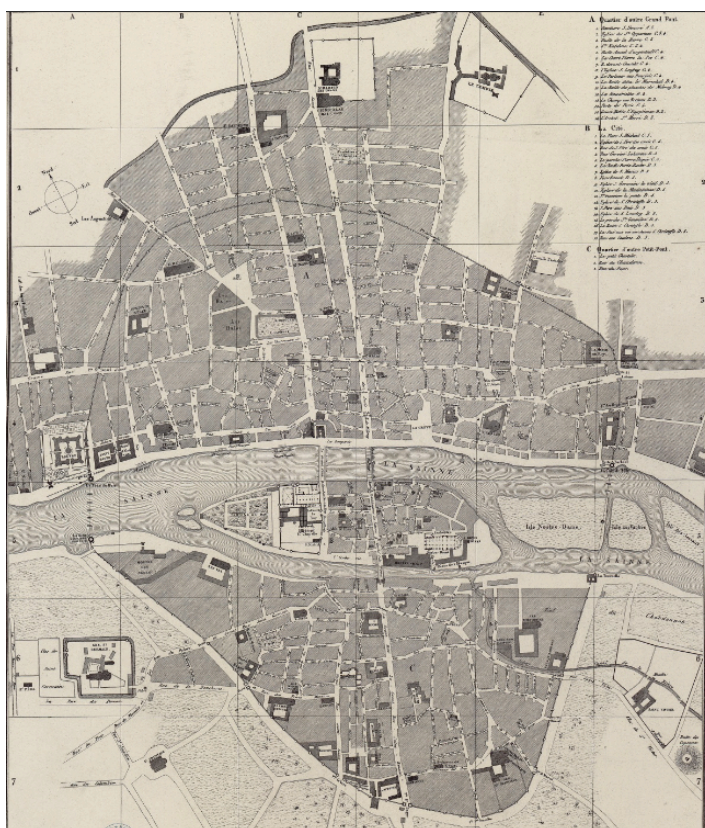


Figure 5.5 : « Plan de la ville de Paris sous Philippe le Bel » (XIV^e siècle), tracé par Albert Lenoir en 1837. Source : (Pinon et Le Boudec, 2014).

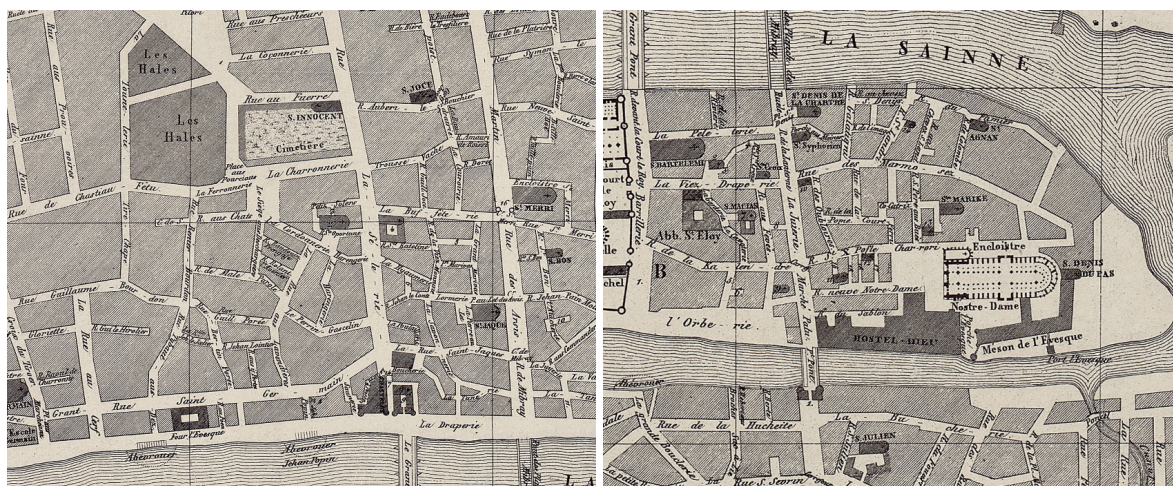


Figure 5.6 : « Zoom » sur le quartier des Halles et l'île de la Cité, à partir du « Plan de la ville de Paris » tracé par Albert Lenoir. Source : (Pinon et Le Boudec, 2014).

Le réseau viaire de Chester au Moyen Age

Chester est une ville du nord-ouest de l'Angleterre, fondée à l'époque romaine. Nous nous intéressons à cette ville au Moyen Age, d'une part parce que son réseau présente *a priori* les caractéristiques morphologiques d'un réseau organique, et d'autre part parce qu'il a fait l'objet de reconstitutions précises dans le cadre du projet *Mapping Medieval Chester*, piloté par l'historienne britannique Catherine Clarke. Ce projet a notamment construit sur SIG des données sur le réseau viaire de la ville au Moyen Age. Nous présentons plus en détail ces données dans la partie III.

Dans son ouvrage *Mapping the Medieval City: Space, Place and Identity in Chester c.1200–1600*, Clarke décrit la morphologie de la ville de Chester au Moyen Age. Prenant appui sur un texte de William Webb (1615), elle décrit une ville médiévale de forme quadrangulaire, entourée d'une muraille, mais avec des *suburbs* qui s'étendent au-delà de cette muraille. Elle décrit également les rues de cette ville, prenant cette fois appui sur un texte de Henry James (1981) : « les rues de Chester offrent un intérêt et un amusement pittoresques (...) avec leurs virages aléatoires, leurs saillies et leurs renforcements » (p. 3)¹⁶⁵. Elle décrit également deux voies perpendiculaires, formant une croix, qui traversent la ville du centre jusqu'à chaque porte de la muraille (p. 7).

Cette description suggère que le réseau viaire de Chester présente l'irrégularité d'un réseau de type organique. L'observation du plan portrait¹⁶⁶ tracé en 1588 par William Smith (cf figure 5.7), bien qu'il soit postérieur au Moyen Age, nous permet d'observer cette irrégularité, notamment dans la taille des îlots et l'orientation des voies. Le plan de Joseph Hemingway, tracé en 1645, se rapproche d'un plan

¹⁶⁵ « *The streets of Chester do offer picturesque interest and amusement (...) with their random corners, projections and recesses* ».

¹⁶⁶ Ou *vue cavalière*, cf section I.1.2.

géométral (cf figure 5.8). Il offre une description plus précise encore de ce qu'était la ville au sortir du Moyen Age. On constate **la tortuosité des voies, la présence de nombreuses intersections en T, et de tronçons de voie courts.**



Figure 5.7 : Plan portait de Chester en 1588, par William Smith. Source : Chesterwalls.fr.

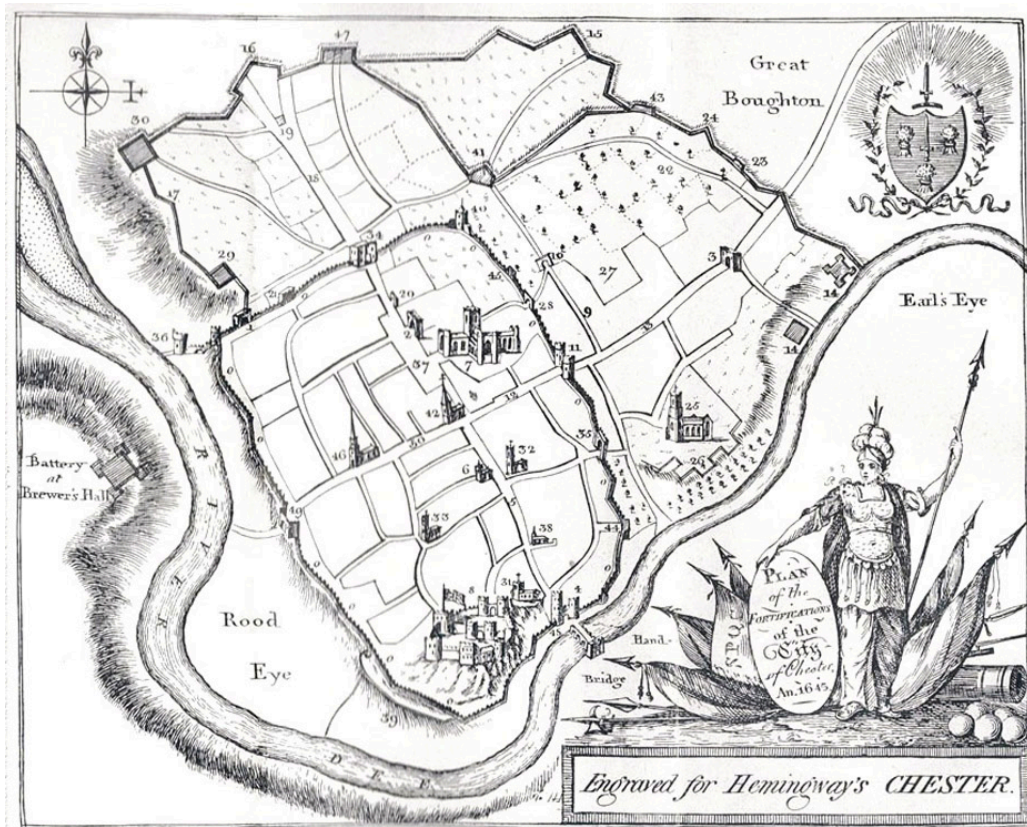


Figure 5.8 : Reconstitution du plan de la ville de Chester en 1645, tracé par Joseph Hemingway en 1836. Source : Chesterwalls.info.

Deux réseaux de type quadrillé

La grille de Manhattan

Notre troisième cas d'étude n'est pas à l'échelle d'une ville entière, mais d'un *borough*, que l'on pourrait traduire par arrondissement, ou ensemble de quartiers. Il s'agit de **la grille de Manhattan** à New York. Ce réseau est emblématique du type de morphologie quadrillée. En outre, comme nous le verrons en partie III, des données conformes à nos standards cartographiques ont été construites sur SIG pour représenter ce réseau. Cela justifie le choix de ce cas d'étude.

La grille de Manhattan date du 1807, lorsqu'une commission est chargée à New York de tracer le nouveau plan de l'île de Manhattan. Ce plan dit *Commissioner's Plan* sera appliqué à partir de 1811 par John Randel (cf figure 5.9). Il s'agit d'un plan quadrillé, qui organise la partie située au nord de la 14^{ème} rue, en **deux-cents blocs rectangulaires** d'environ 200 par 800 pieds (environ 60 par 244 mètres). Il en résulte une grille à mailles rectangulaires, composée de 12 avenues orientées nord-sud, et de 155 rues orientées est-ouest (Plunz, 2016).

La grille de Manhattan a été appliquée sur la quasi totalité de l'île, et ce, sans tenir compte de la topographie accidentée du site par endroits (cf figure 5.10). Certaines

parties ont néanmoins échappé au *Commissioner's Plan*. C'est le cas du sud de l'île, dont l'occupation date du XVII^e siècle, et qui présente une morphologie quadrillée mais irrégulière. C'est également le cas de Central Park, immense parc urbain aménagé au centre de Manhattan en 1853. C'est aussi le cas de Broadway, voie diagonale qui correspond à un ancien chemin datant de l'époque pré-colombienne.

Malgré ces « écarts » à la grille, le réseau viaire de Manhattan est considéré comme une illustration d'un réseau de type quadrillé appliqué à grande échelle. En effet, en observant le plan de Manhattan, nous constatons qu'il présente les caractéristiques morphologiques d'un réseau de type quadrillé. Il présente **deux séries de voies parallèles se coupant à angle droit** et formant – en général – des blocs rectangulaires. Ces voies sont **rectilignes et alignées les unes aux autres, elles forment des intersections en X**.

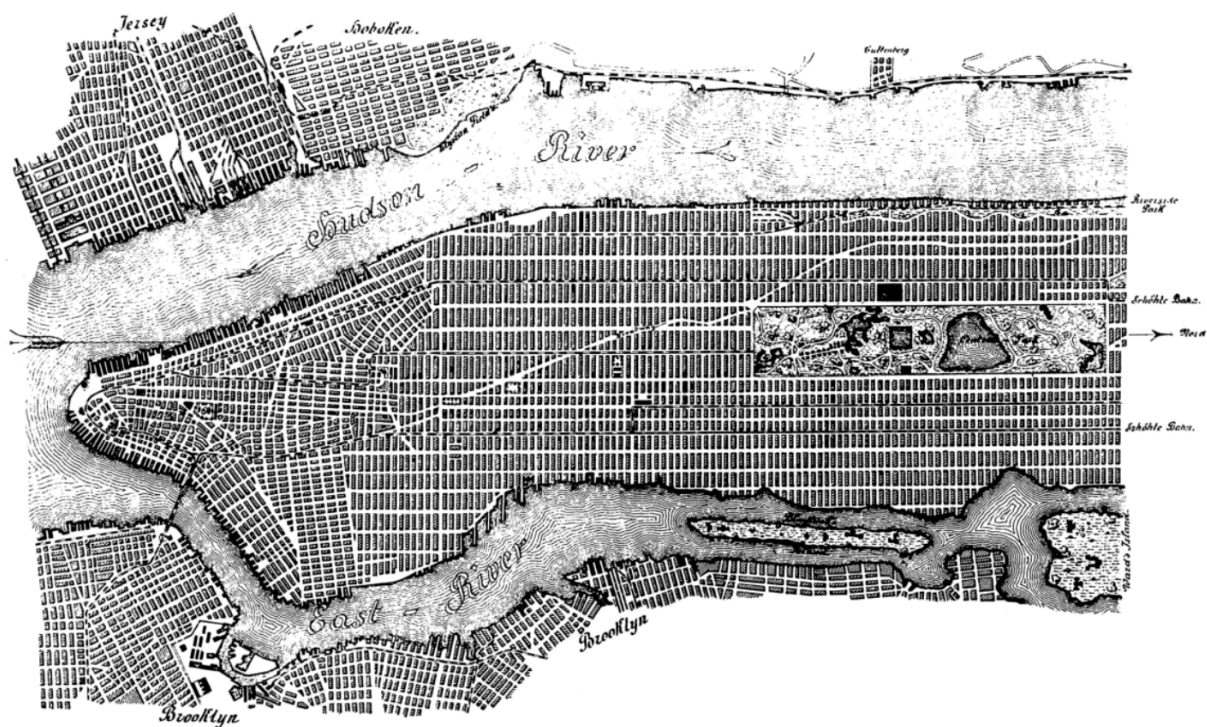


Figure 5.9 : Plan d'une partie de Manhattan, montrant la grille régulière du *Commissioner's Plan*, et le quadrillage plus irrégulier au sud de l'île. Source : (Plunz, 2016).



Figure 5.10 : Vue sur la Seconde Avenue depuis la 42ème rue de Manhattan, en 1861. On constate que le tracé de la grille s'est fait sans tenir compte de la topographie du site.
Source : Entrée « *Commissioners' Plan* de 1811 » sur Wikipédia.

La grille de Détroit

Notre quatrième cas d'étude est à l'échelle d'une ville, il s'agit du réseau viaire de Détroit, dans le Michigan. Ce réseau est lui aussi représentatif du type quadrillé, bien qu'il présente plus d'écarts à ce type que le réseau de Manhattan, comme nous le verrons ci-après. Ici aussi, notre choix a été en partie motivé par la disponibilité de données sur SIG représentant ce réseau viaire, et pouvant correspondre à nos standards cartographiques.

Le plan initial de Détroit a été dessiné par Augustus B. Woodward en 1807. Ce dernier a conçu un plan ambitieux et extensible, en s'inspirant du plan réalisé par L'Enfant pour la ville de Washington. Il s'agit d'un système d'îlots hexagonaux, avec le *Grand Circus Park* à son centre. Des avenues larges émanent de grandes places circulaires comme les rayons d'une roue. Seule une partie de ce plan a été réalisée, la plus significative correspond à quatre avenues radiales, encore visibles aujourd'hui, et qui « filent » vers l'extérieur de la ville. Lorsque le plan de Woodward fut abandonné, **la croissance de la ville, puis de ses banlieues, s'est poursuivie selon un quadrillage orthogonal** (cf figure 5.11). Selon Southworth & Owens (1993), la croissance par ajout de grilles correspond à la tradition des villes américaines et des territoires ruraux avant la Seconde guerre mondiale. Ces grilles étaient extensibles à l'infini, ce qui était un attribut intéressant dans un contexte où l'extension des villes était importante. Southworth et Owens soulignent que seuls des éléments difficiles à traverser empêchaient la continuité de ces grilles (chemins

de fer, espaces verts, rivières). Néanmoins, les auteurs ajoutent que ce type d'extension ne se faisait pas selon un plan d'ensemble : différentes grilles étaient tracées dans différentes parties de la ville, et lorsque deux grilles d'orientation différente se rencontraient, la jonction entre elles se faisait soit par des voies intermédiaires en diagonale, soit par la déformation de certaines voies de ces deux grilles.

Cette description correspond bien à la croissance du réseau viaire de Détroit : plusieurs grilles à l'orientation différente sont visibles sur le réseau viaire actuel (cf figure 5.12). Nous identifions deux orientations principales : la première est perpendiculaire à la rivière de Détroit et suit les parcelles agricoles datant de l'occupation française (Psarra et al., 2013). La seconde suit le quadrillage du *Public Land Survey System*¹⁶⁷ du Michigan, adopté en 1815. Ainsi, l'orientation de ces grilles a pour point de départ des voies rurales préexistantes. La jonction entre ces grilles forme des îlots triangulaires ou trapézoïdaux (cf figure 5.13). Seuls quelques espaces, correspondant notamment aux voies de chemin de fer, interrompent la continuité de ces grilles.

Ainsi, le réseau viaire de Détroit présente des différences d'orientation entre les parties en grille qui le composent. Il présente également quatre voies radiales, issues du plan de Woodward. Malgré cela, plusieurs de ses caractéristiques morphologiques sont typiques de celles des réseaux quadrillés : il présente des **séries de voies parallèles se coupant à angle droit, formant des blocs généralement rectangulaires. Ces voies sont rectilignes et alignées, et forment des intersections en X.** Ainsi, le réseau viaire de Détroit est intéressant pour illustrer le cas d'un quadrillage **plus souple que celui de Manhattan.** Il nous permet d'explorer un cas de figure où la grille n'a pas été appliquée de manière uniforme sur le territoire, mais a connu des adaptations, comme dans de nombreux cas empiriques.

¹⁶⁷ Il s'agit d'une méthode de division du foncier selon un quadrillage régulier, prenant comme référence des parallèles à l'équateur et des méridiens. Ce système fut utilisé dans les trois-quarts du territoire des Etats-Unis dès la fin du XVIIIe siècle.



Figure 5.11 : Plan de Détroit en 1891 par Appleton D. & Co., Source : Davidrumsey.com.

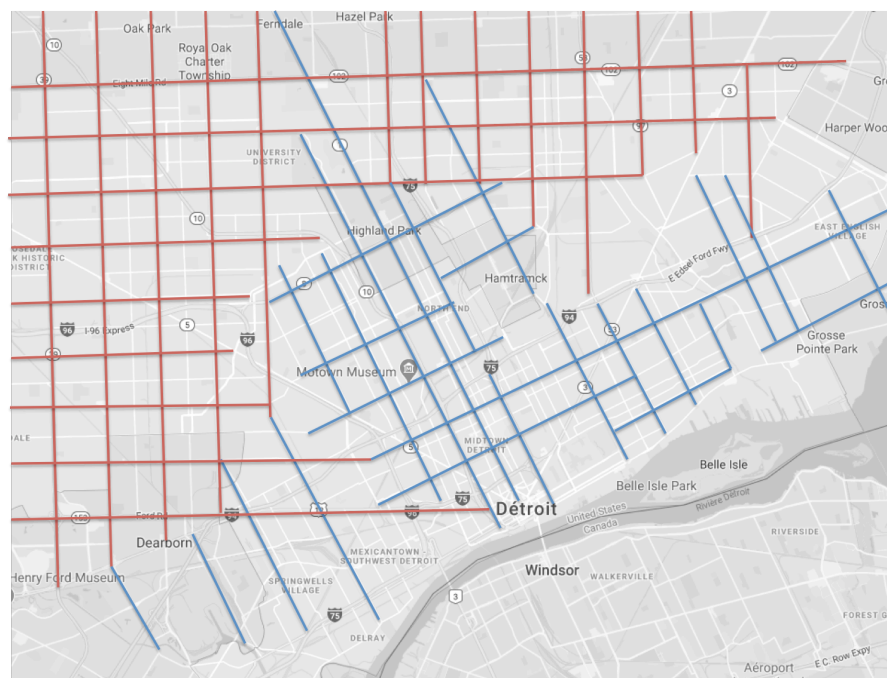


Figure 5.12 : Quadrillage faisant ressortir les deux orientations principales (en rouge et en bleu) observables dans le réseau viaire de Détroit. Source : fond de carte Google map.



Figure 5.13 : Plans illustrant des exemples de jonction entre des parties en grille d'orientations différentes. Source : Google map.

Deux réseaux de type arborescent

Le réseau viaire de la banlieue de Waterloo

Notre cinquième cas d'étude est le réseau viaire d'un ensemble de quartiers suburbains, situés dans la banlieue ouest du comté de Waterloo¹⁶⁸ dans l'Ontario (Canada) (cf figure 5.14). Cette banlieue s'est beaucoup développée dans la seconde moitié du XXe siècle avec l'essor de l'automobile. Son réseau a été choisi pour sa morphologie homogène, de type arborescent (cf figure 5.15), et en raison de la disponibilité de données SIG le représentant. Ces données sont conformes à nos standards cartographiques, et sont disponibles en accès libre sur internet. Nous les présentons plus en détail dans la partie III.

¹⁶⁸ Ce comté comprend les villes de Waterloo, Kitchener, et Cambridge, ainsi que plusieurs cantons.

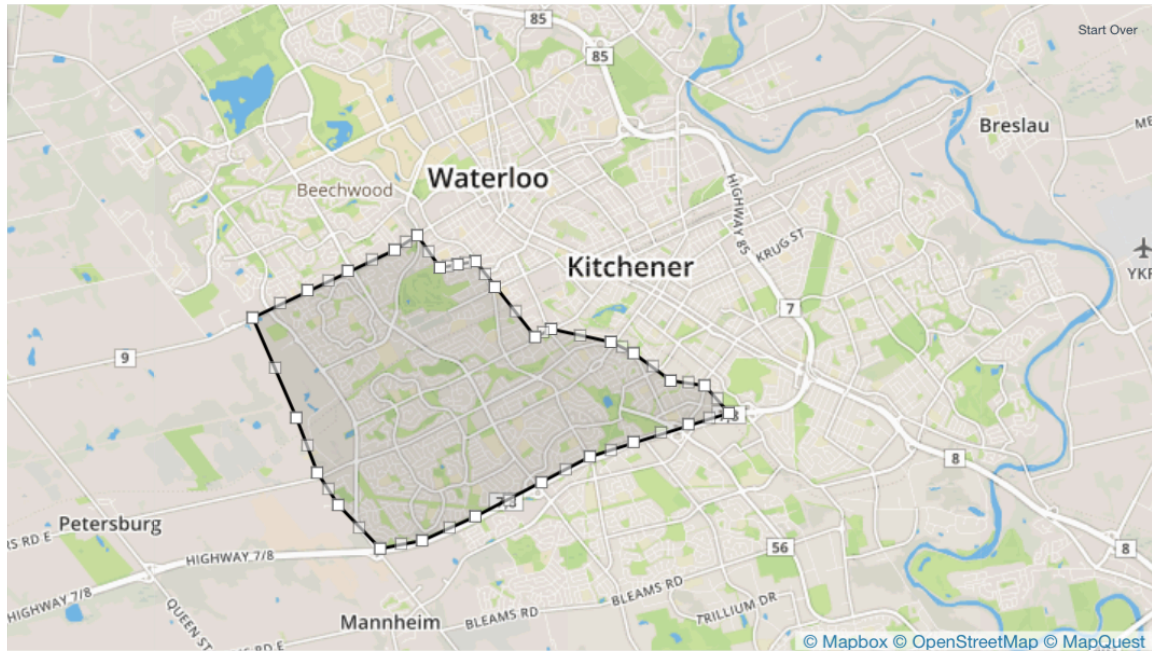


Figure 5.14 : Plan de localisation de notre cas d'étude : le réseau viaire de la banlieue ouest du comté de Waterloo. Source : fond de carte Openstreetmap.

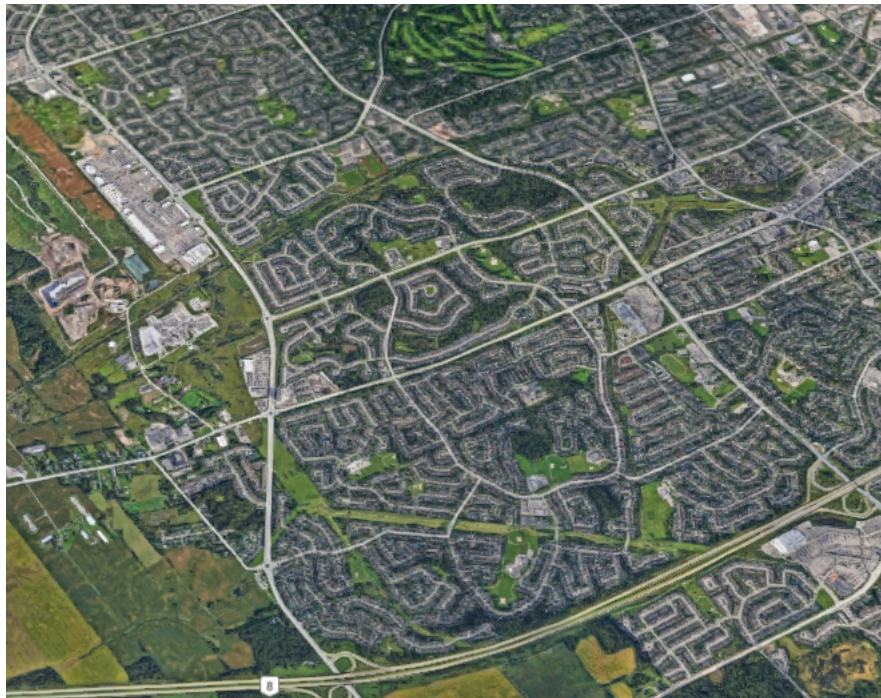


Figure 5.15 : Vue aérienne sur le réseau viaire de la banlieue ouest de Waterloo. Source : Google map.

Le réseau choisi est délimité par *Erb Street* au nord, par le *Conestoga Parkway* au sud, par *Westmount Road* à l'est, et par le boulevard *Ira Needles* à l'ouest. Il s'étend sur plusieurs quartiers suburbains des villes de Waterloo et de Kitchener (cf figure

5.16). La présentation de ces quartiers nous permet de donner un aperçu du contexte d'urbanisation de cette banlieue. Parmi ces quartiers suburbains figurent *Maple Hills*, quartier datant d'avant 1980, qui s'est développé progressivement ; *Westvale*, dont la plupart des maisons sont antérieures aux années 2000 ; *Forest Heights*, qui a connu un développement rapide à partir des années 1970 ; ou encore *Victoria Hills*, dont la plupart des maisons datent des années 1970-1980¹⁶⁹.

Bien que correspondant à des quartiers différents, nous remarquons que la morphologie du réseau viaire de la banlieue ouest de Waterloo est particulièrement homogène (cf figure 5.16). Cela s'explique notamment par le fait que sa formation se soit faite sur un temps relativement court, entre 1970 et le début des années 2000. Selon Southworth et Owens (1993), lorsque la croissance urbaine est rapide (*instant growth*), le tissu urbain créé est homogène et répétitif. Ils ajoutent que ce type de croissance est généralement le fruit d'entreprises de développement qui construisent les mêmes lotissements en plusieurs lieux, sur une période temporelle courte.

Le réseau viaire de cet ensemble de quartiers porte les caractéristiques morphologiques d'un réseau de type arborescent. Il présente plusieurs voies principales, des *artères*, qui filent entre les espaces urbanisés. Chacun de ces espaces est subdivisé par une hiérarchie de voies ondulantes, qui définissent des espaces plus petits. Nous appelons ces voies des *collecteurs*. On observe enfin des *voies locales* qui desservent les bâtiments. Ce réseau est donc hiérarchisé. Par ailleurs, comme dans un réseau arborescent, les voies de ce réseau sont pour la plupart **courbes**, à l'exception des artères principales qui sont parfois rectilignes. Les autres voies ondulent et certaines forment des boucles. On remarque également la présence de nombreuses voies en **culs-de-sac**, et **d'intersections en T**. Enfin, les voies de ce réseau viaire ont des **orientations variables**, ce qui est aussi une caractéristique des réseaux arborescents.

¹⁶⁹ Faute de littérature scientifique concernant ces quartiers, nous avons utilisé les informations fournies, pour certains d'entre eux, sur le site internet de l'Agence immobilière WRX Property Group, spécialiste de l'immobilier à Waterloo et Kitchener (<https://www.wrxpropertygroup.com>).

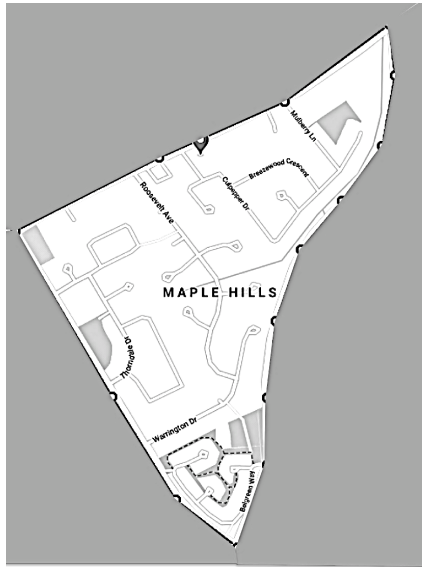


Figure 5.16 : Zoom sur quatre quartiers de la banlieue ouest de Waterloo. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : le quartier de *Maple Hills*, celui de *Westvale*, celui de *Forest Heights*, et celui de *Victoria Hills*. Nous remarquons que le réseau viaire de ces quartiers présente plusieurs caractéristiques morphologiques communes. Source : fond de carte Google map.

Le réseau viaire de la banlieue de Raleigh

Notre sixième et dernier cas d'étude est lui aussi à l'échelle d'un ensemble de quartiers suburbains, situés dans le comté de Wake en Caroline du Nord (Etats-Unis), plus précisément au nord de la ville de Raleigh. Il s'agit de la banlieue de Raleigh qui se localise entre le lac *Falls* (au nord) et la *Raleigh Beltline*¹⁷⁰ (au sud) (cf figure 5.17). Cette banlieue s'est essentiellement développée dans la seconde moitié du XXe siècle avec l'essor de l'automobile.

¹⁷⁰ La *Raleigh Beltline* est une autoroute inter-Etats (Interstate 404) qui délimite le centre-ville de Raleigh.

Le choix de ce cas d'étude a été guidé par le fait qu'il présente une morphologie typique d'un réseau arborescent (cf figure 5.18). Par ailleurs, des données SIG de ce réseau viarie, correspondant à nos standards cartographiques, sont disponibles en ligne. Nous les présentons dans la partie III.

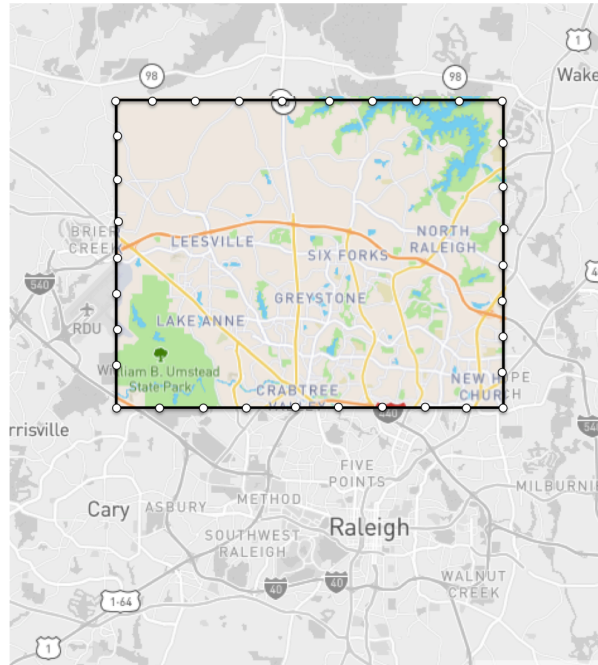


Figure 5.17 : Plan de localisation du réseau viarie de la banlieue nord de Raleigh. Source : fond de carte Openstreetmap.

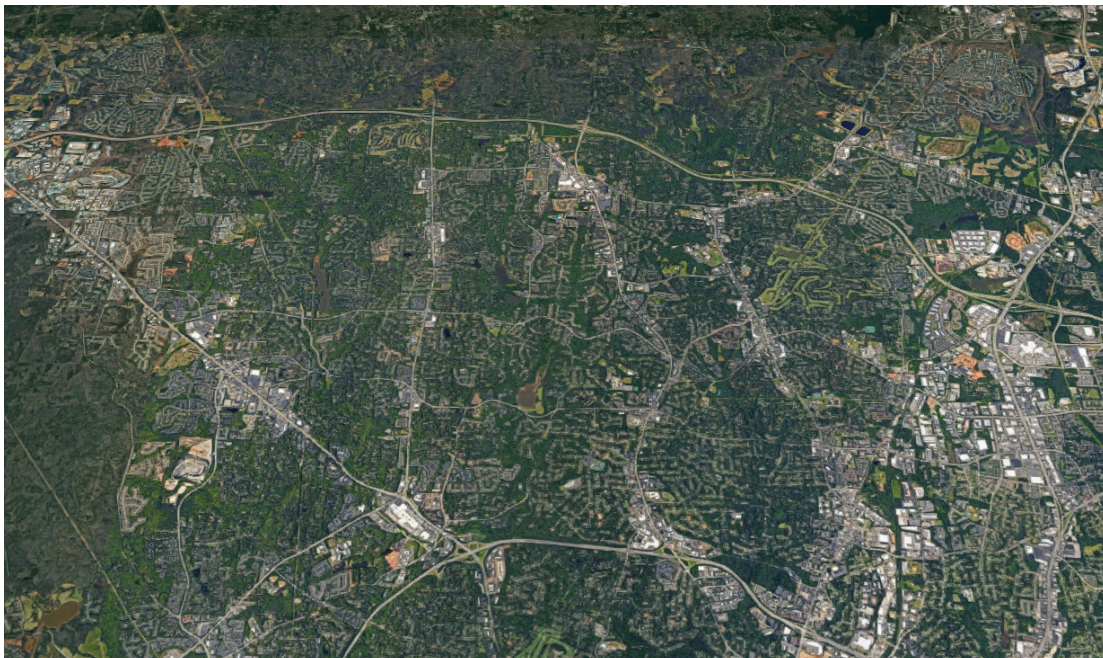


Figure 5.18 : Image satellite de la banlieue nord de Raleigh. Source : Googlemap.

La banlieue nord de Raleigh s'étend sur une vaste superficie (188 km²). Elle comprend plusieurs quartiers suburbains construits à des périodes différentes (cf

figure 5.19). Parmi eux¹⁷¹ : *Glen Forest*, au nord-ouest de la *Beltline* de Raleigh, construit entre 1940 et 1999 ; *Millbrook*, ancien village au nord-est de la *Beltline* qui a été englouti par la croissance de la ville dans les années 1970, sa construction s'est faite entre 1940 et 1999 ; *New Hope* est lui aussi un quartier du nord-est de Raleigh, construit entre 1940 et 1999. Au nord du réseau choisi, les quartiers de *Six Forks* et de *Leesville* sont plus récents, leur construction s'est faite à partir des années 1970 et se poursuit jusqu'au-delà des années 2000. Ces deux quartiers sont très étendus, peu denses et apparaissent comme isolés dans la campagne. Ils s'étendent dans la *Bayleaf*, un secteur non constitué en municipalité (*unincorporated community*) du comté de Wake.

La banlieue de Raleigh s'est globalement constituée du sud vers le nord. Plusieurs des quartiers situés au sud ont été construits entre 1940 et la fin du XXe siècle tandis que ceux situés au nord l'ont souvent été entre 1970 et la période actuelle. Ainsi, le réseau viaire de la banlieue de Raleigh s'est constitué sur une période historique relativement longue. Cela peut expliquer une certaine variété dans le réseau viaire de ses différents quartiers (cf figure 5.19). En effet, selon Southworth et Owens (1993), lorsque la croissance du réseau se fait de manière incrémentielle, progressive, le tissu urbain obtenu est beaucoup plus diversifié que lorsque la croissance se fait plus rapidement – ce qui était le cas dans la banlieue de Waterloo.

Pourtant, malgré cette apparente variété, le réseau viaire des différents quartiers de la banlieue de Raleigh présente des caractéristiques morphologiques communes, correspondant à celles d'un réseau de type arborescent. Comme dans la banlieue de Waterloo, on observe dans la banlieue de Raleigh des artères principales qui filent entre les espaces urbanisés, des collecteurs qui subdivisent ces espaces urbanisés, et des voies locales. Ce réseau est donc morphologiquement hiérarchisé. En outre, à l'exception de certaines artères, les voies de ce réseau sont généralement **courbes**, formant parfois des boucles. On remarque également la présence de nombreux culs-de-sac, et **d'intersections en T**. Enfin, les voies de ce réseau ont des orientations très variables. Tout ceci nous incite à classer ce réseau dans la catégorie des réseaux arborescents.

¹⁷¹ Faute de littérature scientifique concernant ces quartiers, nous avons utilisé les informations fournies, pour certains d'entre eux, par la plateforme *NeighborhoodScout*, qui contient des données fines sur l'immobilier, mais aussi la démographie ou la criminalité, à l'échelle des quartiers aux Etats-Unis (<https://www.neighborhoodscout.com/nc/raleigh>).



Figure 5.19 : Zoom sur cinq quartiers de la banlieue nord de Raleigh. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : *New Hope*, *Glen Forest*, *Millbrook*, *Leesville*, et *Six Forks*. Les réseaux viaires de ces quartiers présentent plusieurs points communs. Source : fond de carte Google map.

II.2. Corpus 2 : Des réseaux où ont été menées des interventions typiques

Nous devons maintenant choisir un réseau viaire empirique dans lequel a été menée l'intervention typique qui nous intéresse, à savoir la création de **percées configurées en étoile**. Notre choix est notamment guidé par la disponibilité de données représentant ce réseau viaire avant et après l'intervention en question.

II.2.1. Des préconisations théoriques aux cas d'étude empiriques

Comme nous l'avons déjà souligné, des écarts peuvent exister entre des préconisations théoriques faites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, et leur mise en œuvre empirique sur un réseau existant. Les causes de ces écarts sont nombreuses : d'abord, l'état préexistant agit sur la mise en œuvre des interventions typiques préconisées, il la contraint, l'oriente. Ce phénomène est connu sous le nom de *path dependency*. A Détroit par exemple, le quadrillage préexistant du *Public Land Survey System* a fortement contraint la croissance de la grille, qui en a suivi les directions à plusieurs endroits. Autres contraintes, celles liées au site, au foncier, ou encore aux moyens financiers disponibles, qui complexifient la mise en œuvre des interventions. Enfin, tandis que des interventions typiques sont mises en œuvre sur un réseau existant, d'autres interventions non typiques se font potentiellement en parallèle. Par exemple, tandis qu'Hausmann traçait l'Avenue de l'opéra à Paris, des lotissements étaient créés par des promoteurs privés à d'autres endroits de la capitale.

Tout ceci concourt à ce que les théoriciens et praticiens de l'urbanisme **n'aient pas la maîtrise totale de la mise en œuvre des interventions qu'ils préconisent**. Ainsi, un objectif subsidiaire de notre travail sera d'observer les différentes adaptations que nécessite la mise en œuvre d'une intervention typique prônée en urbanisme.

II.2.2. Paris comme terrain d'application de préconisations typiques

La ville de Paris a souvent été un terrain de réflexion pour les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (Laugier, Patte, Blondel, et bien d'autres). L'embellissement et l'assainissement de la capitale ont fait l'objet de plusieurs écrits et projets, en particulier au XVIIIe siècle. Pourtant, selon Carbonnier (2009), ces projets demeurent inachevés, partiels et sans cohérence. Il faut attendre le XIXe siècle pour que bien des ambitions, voire des utopies du XVIIIe siècle, se réalisent.

Ainsi, malgré les améliorations préconisées au Siècle des lumières, les rues de la capitale demeurent, à l'aube du XIXe siècle, étroites, sans lumière et sans arbres, sans parcs ni jardins publics (Antoni, 2016; Porta et al., 2014). Pour illustrer cela, Carbonnier (2009) cite une enquête menée en 1822 par Lachaise, sur la salubrité

des différents quartiers de Paris. L'enquête montre que les quartiers qui comptent essentiellement des rues étroites et sinueuses sont les plus mal classés en termes de salubrité. Elle montre également qu'en dehors de la pointe occidentale de l'île de la Cité et de l'île Saint-Louis, l'ensemble du centre de Paris souffre d'une salubrité inférieure à la moyenne. Cela va changer au XIXe siècle.

La première moitié du XIXe siècle, une croissance par fragments

En observant le plan des lotissements créés à Paris entre 1790 et 1850 reconstitué par Michel Huard (2019) (cf figure 5.20), on constate que le réseau viaire de certains de ces lotissements présente des percées en étoile. Toutefois, l'évolution de la morphologie du réseau viaire parisien dans la première moitié du XIXe siècle est qualifiée par Panerai et al. (1997) de fragmentaire :

*« En l'absence d'autre réseau global que les boulevards, incomplets, et la barrière des Fermiers généraux qui deviendra, par substitution, elle aussi boulevard, une **croissance par fragments**. Chaque moment tend à être une unité finie, capable de croissance, mais pour reconstituer en principe une autre unité finie plus étendue. Le lien des fragments est une simple juxtaposition. La ville est une collection de fragments dispersés ou contigus (...) A Paris, les fragments s'enchevêtrent parmi les croissances spontanées qui suivent les axes de circulation. Mais ils sont reconnaissables comme autant de lotissements aux formes souvent rationalisées ».*

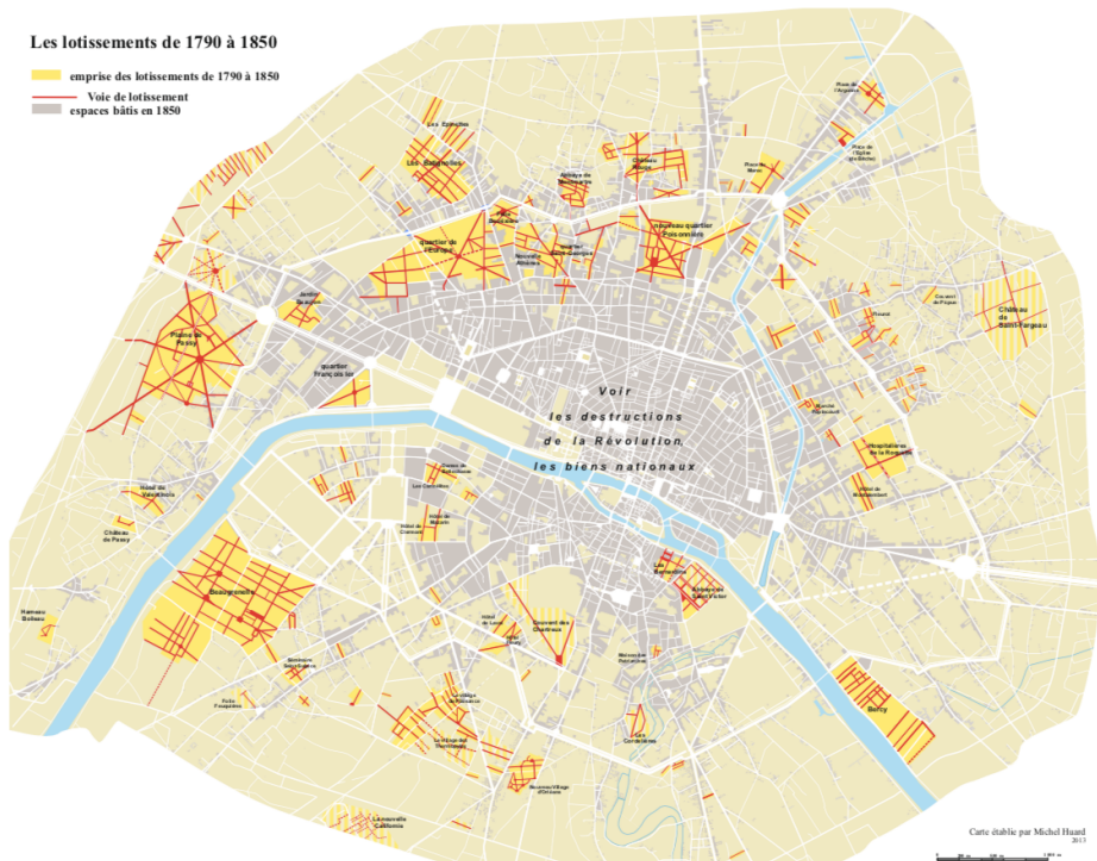


Figure 5.20 : Plan des lotissements conçus entre 1790 et 1850 à Paris. On observe sur ce plan quelques percées configurées en étoile. Source : (Huard, 2019).

L'œuvre d'Haussmann

En 1853, Napoléon III charge une Commission présidée par le comte Siméon de concevoir un plan d'ensemble des nouvelles voies à ouvrir dans Paris. L'objectif de Napoléon est de « désenclaver le centre, le relier aux portes, et notamment ouvrir de « grandes artères » aboutissant aux nouvelles gares des lignes de chemin de fer » (Pinon et Le Boudec, 2014). Georges Eugène Haussmann, préfet de la Seine de 1853 à 1870, est alors chargé par Napoléon III de mettre en œuvre ce plan.

Même si Haussmann s'est inspiré du plan de la Commission Siméon, pour Panerai et al. (1997), on est tenté de qualifier globalement d'haussmanniennes les transformations de la capitale à cette époque. Selon eux, il y avait un accord profond entre le préfet, les fonctionnaires des services techniques, et les architectes des diverses opérations. Ils ajoutent : « si l'initiative de Napoléon III est importante, c'est bien à Haussmann que l'on doit la « manière » ». L'œuvre d'Haussmann se situe à de nombreux niveaux (législatif notamment), mais nous nous concentrons ici uniquement sur la manière dont il a agi sur la morphologie du réseau viaire parisien.

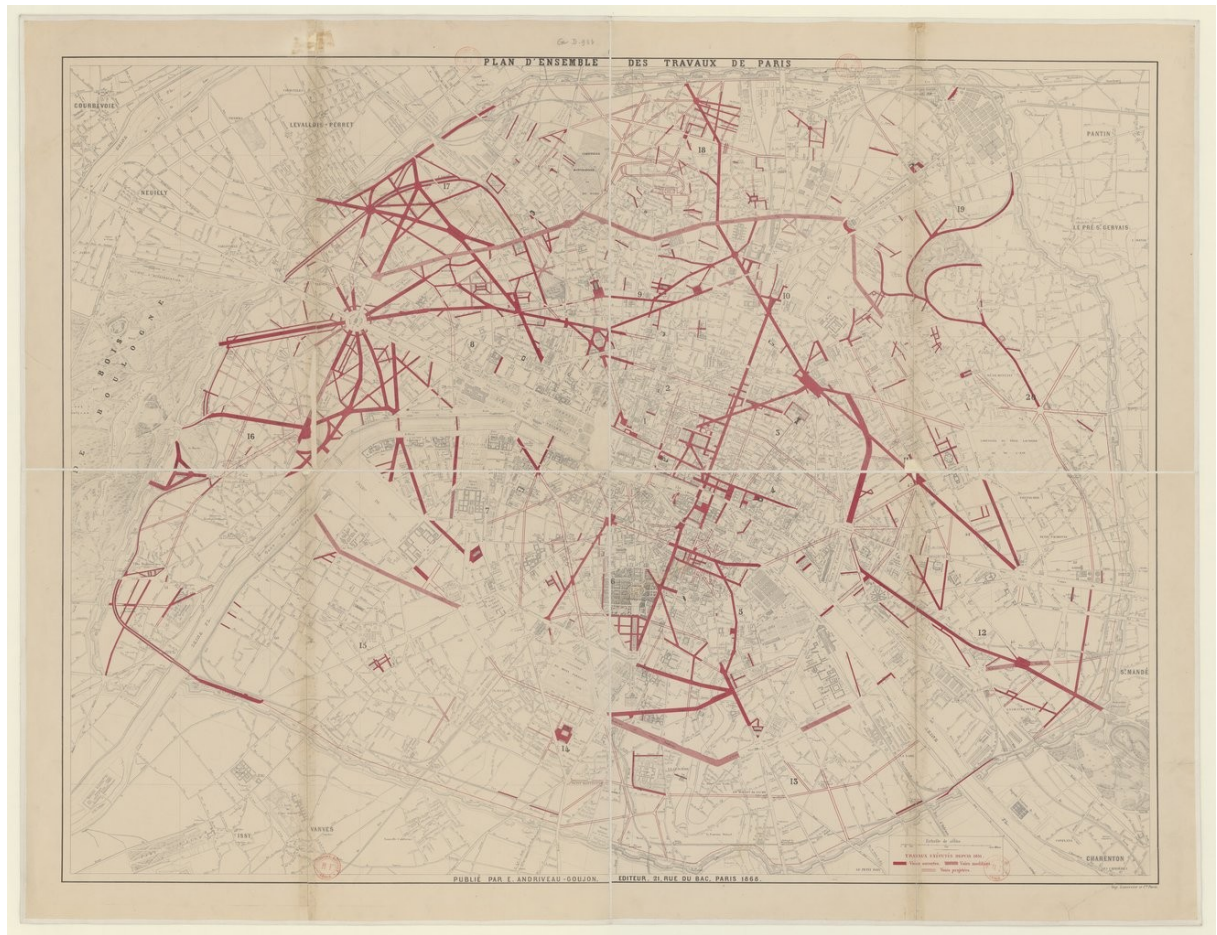
Des interventions sous influence

Panerai et al. (1997) présentent l'œuvre d'Hausmann comme ayant été influencée par de nombreux courants. En effet, le baron Hausmann n'était pas un théoricien de l'urbanisme, mais un praticien qui s'est inspiré des théories développées en Europe notamment à l'âge classique et au Siècle des Lumières. D'abord, le baron Hausmann avait un goût, reproché par Napoléon III, pour les ordonnances et les perspectives, typiques de l'âge classique. Pour lui, les trois principes de l'urbanisme classique, que sont la rectitude, l'ordonnance, et la perspective, étaient sacrés¹⁷². Ensuite, l'œuvre d'Hausmann a fortement été influencée par l'hygiénisme, hérité du Siècle des Lumières. Le préfet a pour mission d'« améliorer les conditions de vie et la santé publique par une intervention hygiéniste sur l'urbanisme » (Antoni, 2016). Selon Antoni, le plan de la ville sous Hausmann reflète un organisme vivant qui doit respirer et dans lequel tout doit circuler (eau, égouts, énergie, voirie, transports en commun).

Un réseau de percées et de figures étoilées, influences de l'âge classique et du Siècle des Lumières

Bien qu'Hausmann soit intervenu dans un espace déjà très structuré (Panerai et al., 1997), son action a fortement modifié la morphologie du réseau viaire parisien. Son intervention majeure sur ce réseau a été **le cisaillement de Paris par des voies rayonnant en étoile autour de quelques grands nœuds stratégiques** (cf figure 5.21). L'intervention d'Hausmann se caractérise par son envergure : il décrète 70 percements de voies nouvelles en vingt ans (Pinon et Le Boudec, 2014, p. 106). **Des liaisons rectilignes sont ainsi créées**, entraînant le remodelage de plusieurs quartiers (Panerai et al, 1997). Tout ceci crée un **réseau de percées configurées en étoile**, qui n'est pas sans rappeler celui visible sur les plans datant de l'âge classique et du Siècle des Lumières (cf chapitre 3).

¹⁷² Lavedan (1960) citée dans Panerai et al. (1997).



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 5.21: Plan d'ensemble d'Eugène Andriveau-Goujon (1868) des travaux de Paris, indiquant les voies exécutées et projetées de 1851 à 1868. On y distingue plusieurs percées configurées en étoile, en particulier dans la partie ouest de la ville. Source : Gallica.bnf.fr.

En effet, les **figures étoilées** observables sur le Paris haussmannien ont des sources classiques : Rome, Versailles, les tracés de Le Nôtre. On pourrait également leur trouver un lien avec celles prônées au Siècle des Lumières notamment par l'abbé Laugier. De leur côté, les **percées haussmanniennes** (cf figure 5.22 et 5.23) rappellent les longues voies rectilignes préconisées notamment par Laugier et Blondel. Pour Panerai et ses collègues (1997), les percées haussmanniennes rappellent également celles réalisées à Rome par Sixte V à la fin du XVIe siècle. Elles en reprennent jusqu'à la justification fonctionnelle : relier entre eux des pôles éloignés du territoire urbain, les basiliques romaines chez Sixte V, les gares et quelques grands nœuds stratégiques chez Haussmann. Panerai et ses collègues ajoutent que l'étirement des voies est le même. Ces voies visent chacune un édifice ou un repère monumental, perçu comme un « bref point de vue d'extrémité, incapable de transcrire un quelconque rapport entre architecture et espace urbain ».

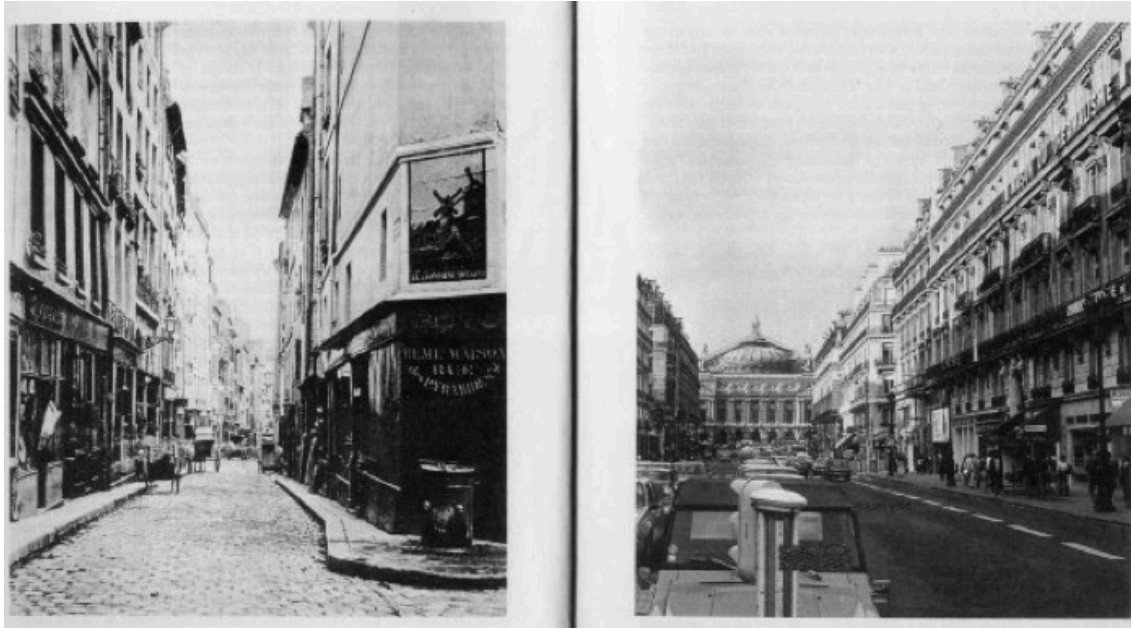


Figure 5.22 : Haut : Photographies de l'Avenue de l'Opéra avant et après son percement.
 Source: Catalogue de l'exposition « le pari d'Hausmann », 1991. Bas: Plan illustrant le percement de l'Avenue de l'Opéra. Source: (Benevolo, 1983). L'avenue de l'Opéra est un des exemples les plus représentatifs des « percées haussmanniennes ». Son percement a conduit à la démolition des immeubles et ruelles qui l'entouraient.

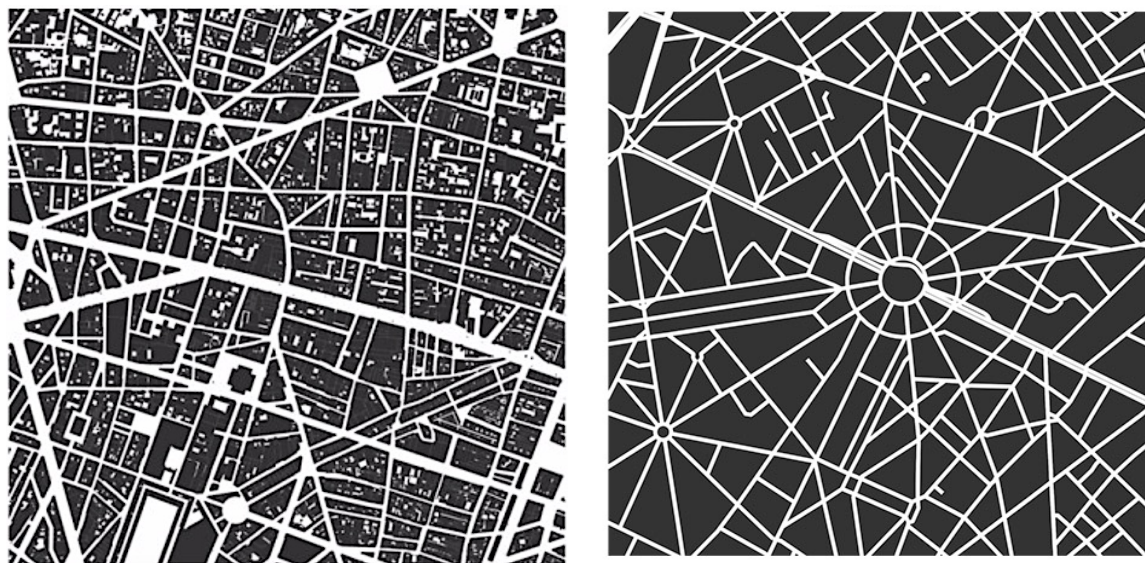


Figure 5.23 : Deux extraits du plan actuel de Paris : au nord du Palais royal (à gauche) et autour de la place de l'Etoile (à droite). On constate que les percées configurées en étoile sont encore visibles aujourd'hui dans le réseau viaire parisien. Source : Geoffboeing.com.

II.2.3. Le choix de Paris à la période haussmannienne

Ainsi, il semble que l'intervention d'Hausmann à Paris soit représentative de la création de percées configurées en étoile dans un réseau viaire existant. Les percées haussmanniennes présentent les caractéristiques morphologiques des percées configurées en étoile (cf chapitre 3) : **elles sont rectilignes, d'orientation variable, et forment souvent des intersections en étoile avec les autres voies.**

Le cas de Paris à la période haussmannienne est également intéressant car il permet de montrer **la longévité de certaines préconisations théoriques faites en urbanisme.** En effet, la création de percées configurées en étoile était préconisée en Europe dès l'âge classique et reprise au Siècle des Lumières (cf chapitre 3). Pourtant, sa mise en œuvre à Paris ne s'est faite que dans la seconde moitié du XIXe siècle.

En plus d'être représentative d'interventions préconisées à l'âge classique et au Siècle des Lumières, la transformation de Paris sous Hausmann est représentative d'opérations menées plus tard dans d'autres villes. Badariotti (2006) cite l'exemple des opérations de percées menées à Rouen sous Napoléon III, à Strasbourg au début du XXe siècle, mais aussi à Bruxelles, Mexico et Barcelone. Pour lui, ces opérations « se contentent de suivre l'exemple parisien et la méthode des percées de Hausmann ». Cette propagation des percées haussmanniennes renforce notre intérêt pour l'étude de Paris, car en étudiant l'œuvre d'Hausmann à Paris, nous étudions en réalité un mode d'intervention qui a été adopté dans de nombreuses villes par la suite.

Ainsi, nous choisissons le réseau viaire parisien à la période haussmannienne (1853-1870) comme cas d'étude représentatif de la création de percées configurées en étoile dans un réseau viaire existant.

Conclusion de la partie II

Après avoir choisi dans le chapitre 3 un ensemble de préconisations faites en urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité des réseaux viaires, nous avons présenté dans cette partie le passage de ces préconisations à un corpus de cas d'étude empiriques. Notre choix s'est porté sur les cas d'étude suivant (tableau 5.1) :

Catégorie de préconisation	Préconisation	Cas d'étude
Des réseaux à la morphologie typique	Réseaux organiques	Paris au Moyen Age
		Chester au Moyen Age
	Réseaux quadrillés	Manhattan
		Détroit
	Réseaux arborescents	Banlieue de Waterloo
		Banlieue de Raleigh
Des interventions sur la morphologie d'un réseau existant	Création de percées configurées en étoile	Paris à la période haussmannienne

Tableau 5.1 : Tableau synthétisant les cas d'étude empiriques choisis pour chacune des préconisations théoriques identifiées en chapitre 3.

III. Des corpus de cas d'étude aux corpus de données

Rappelons que le choix de nos cas d'étude a notamment été guidé par la disponibilité de données filaires représentant leur réseau viaire, selon les standards cartographiques que nous nous sommes fixés (cf section I.3). Nous présentons ces données filaires dans cette partie.

III.1. Choix des données filaires utilisées

III.1.1. Les données du corpus 1

Pour notre premier corpus de cas d'étude, nous avons choisi aussi bien des réseaux correspondant à des périodes historiques reculées, que des réseaux actuels (cf section II.1.1). Ainsi, pour le cas de Paris et de Chester, il nous fallait des données filaires représentant le réseau viaire de ces villes au Moyen Age. Nous avons pu nous procurer des données sur le réseau parisien en 1300, et sur le réseau de Chester en 1500. L'obtention de telles données a été possible grâce à des projets de recherche (en archéologie et en histoire) portant sur ces deux villes, et dont l'objectif était expressément de construire des données filaires représentant leur réseau viaire ancien. Nous les présentons en section III.2.

Pour le cas de Manhattan et de Détroit, il nous fallait des données filaires représentant ces réseaux dans un état proche de leur état d'origine, c'est-à-dire avant les adaptations ultérieures qu'ils ont pu subir. Nous avons pu nous procurer des données filaires sur le réseau viaire de Détroit en 1837, et sur celui de Manhattan en 1930.

Pour le cas des banlieues de Waterloo et de Raleigh, nous avons choisi d'utiliser des données filaires représentant ces réseaux à des périodes récentes, car ces banlieues correspondent à un type de réseau (arborescent) encore largement utilisé. Nous présentons ces données dans la section III.2.

III.1.2. Les données du corpus 2

Pour notre second corpus de cas d'étude, il nous fallait des données filaires sur le réseau viaire parisien avant et après l'intervention d'Hausmann. Il nous fallait également des données sur ce réseau à d'autres dates, afin de comparer les évolutions observées à la période haussmannienne à celles observées à d'autres moments de l'histoire de Paris, et ainsi parvenir à une description précise de l'intervention d'Hausmann (cf introduction du chapitre).

La disponibilité de plusieurs données filaires sur le réseau parisien au XIXe siècle nous incite à choisir, comme point de comparaison à la période haussmannienne (1853-1870), la **première moitié du XIXe siècle, et la fin de ce siècle**, autrement dit les périodes précédant et suivant l'intervention d'Hausmann. Même si quelques percées en étoile ont pu être tracées dans le réseau viaire parisien durant ces périodes, leur ampleur apparaît comme nettement inférieure à celle des percées tracées par le baron Hausmann (70 percements de voies nouvelles en vingt ans). Nous nous attendons donc à une évolution plus marquée (des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité) à la période haussmannienne qu'aux périodes qui l'ont précédée et suivie.

Ce second corpus de cas d'étude comprend donc un réseau viaire unique, celui de Paris, mais à des dates différentes du XIXe siècle. Les filaires correspondant à chaque date seront comparés les uns aux autres. Ce type de comparaison, que l'on peut qualifier de diachronique, porte des enjeux spécifiques en termes de données.

Précautions sur les données servant à des comparaisons diachroniques

L'enjeu principal porte sur la comparabilité de données filaires correspondant à des périodes historiques différentes. Les données cartographiques servant de base à la construction des données filaires diachroniques appartiennent, par définition, à des périodes historiques différentes. Elles ont donc été conçues selon des standards cartographiques potentiellement différents, tant en termes de sélection que de simplification. Il en est de même lors de la conversion de ces données cartographiques en données filaires. La figure 5.24 ci-dessous illustre cela. Nous observons trois filaires représentant une même partie du réseau viaire parisien à trois dates différentes, conçus selon des données cartographiques différentes. On remarque que sur le filaire (a), représentant le réseau viaire de 1790 issu du Plan Verniquet, la place de la Concorde (ancienne place Louis XV) apparaît, tandis que sur le filaire (b), tracé selon un plan du début du XIXe siècle, l'Atlas Vasserot (1810-1836), la place est absente. Elle réapparaît sur le filaire (c) issu d'un plan de 1854, avec un tracé différent de celui du filaire (a). Dans les faits, le tracé de la place de la Concorde n'a pas évolué depuis la seconde moitié du XVIIIe siècle (elle a été dessinée par l'architecte Ange-Jacques Gabriel en 1748). Ces différences de représentation – voire son absence de représentation sur le filaire (b) – tiennent donc à des choix cartographiques différents, faits soit lors de la construction du plan d'origine, soit lors de la construction du filaire.

Cet exemple illustre que, si les standards cartographiques adoptés sont différents, des modifications observées entre des filaires peuvent ne pas correspondre à des modifications réelles survenues sur un réseau viaire. À l'inverse, des modifications réelles survenues sur un réseau viaire peuvent ne pas s'observer sur les filaires. Bonin (2014) souligne à ce propos qu'il n'est pas facile de faire la part entre évolution réelle sur le terrain et évolution des pratiques des cartographes. Il ajoute néanmoins que l'analyse de la production cartographique aux périodes concernées peut donner des éléments pour aider à faire la part entre les deux. Cette analyse permet selon lui de « comprendre la part de significativité dans les écarts mesurés entre deux bases de données distantes dans le temps ».

Nous pouvons tenter de limiter les différences en termes de standard cartographique, et les erreurs d'interprétation pouvant en découler, en choisissant des données construites par le même auteur, selon les mêmes standards cartographiques. C'est la solution que nous choisissons, tout en gardant à l'esprit que les écueils présentés ci-dessus ne peuvent être entièrement évités, et que nos données sont imparfaites.

<p>(a) : Filaire conçu selon le plan Verniquet (1790), représentant le réseau viaire autour de l'actuelle place de la Concorde (autrefois place Louis XV). Source : GeoHistoricalData.</p>	<p>(b) : Filaire conçu selon l'atlas Vasserot (1810-1836), représentant le réseau viaire autour de la place de la Concorde. Source : Vasserot voies (1810-1836) © ALPAGE : A.-L. Bethé, 2010.</p>	<p>(c) : Filaire conçu selon un plan de 1854 représentant le réseau viaire autour de la place de la Concorde. Source : GeoHistoricalData.</p>

Figure 5.24 : Trois filaires représentant le réseau viaire parisien autour de la Place de la Concorde, construits selon des plans de 1790, de 1810-1836 et de 1854. On voit que la représentation de la place diffère d'un filaire à l'autre, alors que sa morphologie est stable en réalité.

III.1.3. La délimitation des filaires

Le réseau viaire d'un quartier, d'une ville, ou d'un comté peut être vu comme une partie d'un réseau plus vaste à échelle régionale, nationale voire supranationale. Néanmoins, les données cartographiques représentant ce réseau viaire ont nécessairement une emprise, une délimitation finie, ne serait-ce qu'en raison des limites des bords de la carte. Il en est de même pour les données filaires issues de ces données cartographiques. La délimitation de ces données (cartographiques et filaires) résulte d'un choix fait par leurs auteurs. Cette délimitation se base souvent sur les limites administratives de l'espace que l'auteur veut représenter : limites du quartier, de la ville, du pays.

Dans notre cas, l'enjeu de la délimitation est différent selon le corpus considéré. Pour le corpus de réseaux à la morphologie typique, la délimitation des filaires a été faite de manière à englober un réseau à la morphologie homogène, représentative d'un type (organique, quadrillé ou arborescent).

Le cas du réseau parisien à différentes dates nous impose des choix en termes de délimitation. En effet, l'emprise du réseau viaire parisien évolue entre la première moitié du XIXe siècle et la deuxième moitié. La ville est entourée de l'enceinte des Fermiers Généraux jusqu'en 1860, puis de l'enceinte de Thiers. Elle passe alors de 35 à près de 80 km². Cette croissance du réseau viaire parisien a probablement eu des répercussions à la fois sur ses caractéristiques morphologiques et sur ses

conditions d'accessibilité. De fait, l'effet des interventions d'Hausmann sur ces deux aspects pourrait être confondu avec l'effet de cette croissance du réseau. C'est la raison pour laquelle nous choisissons de délimiter le filaire du réseau parisien en fonction de **l'enceinte des Fermiers Généraux**, que ce soit pour la première moitié du XIXe siècle ou pour la deuxième moitié. Nous ne tiendrons pas compte de la croissance du réseau durant ce siècle. Ce choix a également été fait par Barthelemy et al. (2013), pour leur analyse du réseau viaire parisien. Ces auteurs justifient leur choix en signalant que la plupart des percées haussmanniennes ont été faites dans l'espace situé à l'intérieur de l'enceinte des Fermiers Généraux.

III.2. Présentation des données filaires utilisées

III.2.1. Paris en 1300

Le réseau viaire de Paris au Moyen Âge nous sert de cas d'étude représentatif d'un réseau de type organique. Des données filaires reconstituant ce réseau ont été construites dans le cadre du projet ANR Alpage (Analyse diachronique de l'espace parisien : approche géomatique) (2006-2010), initié par Hélène Noizet du Laboratoire de Médiévisité Occidentale de Paris (Lamop)¹⁷³. L'objectif du projet était notamment de créer un SIG pour étudier l'espace urbain parisien à la période préindustrielle. Plusieurs données jusqu'alors disponibles uniquement en format papier ou raster numérique¹⁷⁴ ont ainsi été vectorisées (îlots, bâtiments, églises, cours d'eau, limites administratives, ...). Elles sont disponibles en libre accès, sous licence *Open Database License 1.0*, sur la plateforme cartographique d'Alpage¹⁷⁵.

Le projet Alpage a notamment permis la création du filaire du réseau viaire parisien en 1300, donc au Moyen Âge¹⁷⁶ (cf figure 5.25). **Notre choix a porté sur ce filaire** car il correspond à nos standards cartographiques. Pour construire le filaire du réseau viaire parisien de 1300, les chercheurs d'Alpage ont utilisé plusieurs plans : un plan géoréférencé conçu par l'Atelier parisien d'urbanisme (APUR), le plan dit de Berté¹⁷⁷, qui constitue une vision synthétique de la ville du XIIIe au XVIIe siècle, et la *Carte de Paris vers la fin du XIVe siècle*, dit Plan du CNRS, réalisé en 1975. Selon Noizet et al. (2013, p. 155), aucun de ces plans ne permet à lui seul de restituer un plan historiquement et géométriquement exact du Paris médiéval, néanmoins, pris

¹⁷³ L'équipe du projet regroupait des chercheurs dont les tutelles sont l'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, l'Université de La Rochelle et le CNRS.

¹⁷⁴ C'est-à-dire des données continues constituées de pixels.

¹⁷⁵ <http://alpage.huma-num.fr/fr/>.

¹⁷⁶ D'autres données filaires couvrant un intervalle temporel allant du XIVe au XIXe siècle ont également été créées.

¹⁷⁷ Berté, *Topographie historique du vieux Paris*. Paris : Imprimerie impériale, 1866-1867, 2 vol.

ensemble en superposition et complétés par des connaissances, **ces plans forment « une base solide sur laquelle il est possible de construire un plan hybride donnant une représentation acceptable ».**



Figure 5.25: Filiaire du réseau viaire de Paris en 1300 après nettoyage. Source : Voies en 1300 © ALPAGE : C. Bourlet, A.-L. Bethe, 2010.

III.2.2. Chester en 1500

La ville de Chester au Moyen Age est notre deuxième cas d'étude représentatif des réseaux de type organique. Des données représentant ce réseau ont été produites dans le cadre du projet *Mapping Medieval Chester*, porté par l'historienne Catherine Clarke¹⁷⁸. Partant de sources textuelles et cartographiques, les chercheurs du projet ont construit un ensemble de données sur SIG (cf figure 5.26) représentant notamment les bâtiments religieux, les structures défensives, les rues, ou encore l'hydrographie de la ville de Chester tels qu'ils étaient en l'an 1500. Selon les chercheurs, le réseau à cette date correspond à celui du Moyen Age. Ces données sont diffusées en accès libre¹⁷⁹.

¹⁷⁸ Ce projet a impliqué des chercheurs de la *Swansea University*, *Queen's University Belfast*, du *Center for Computing in the Humanities*, et du *King's College London*.

¹⁷⁹ Selon une licence *Creative Commons*.

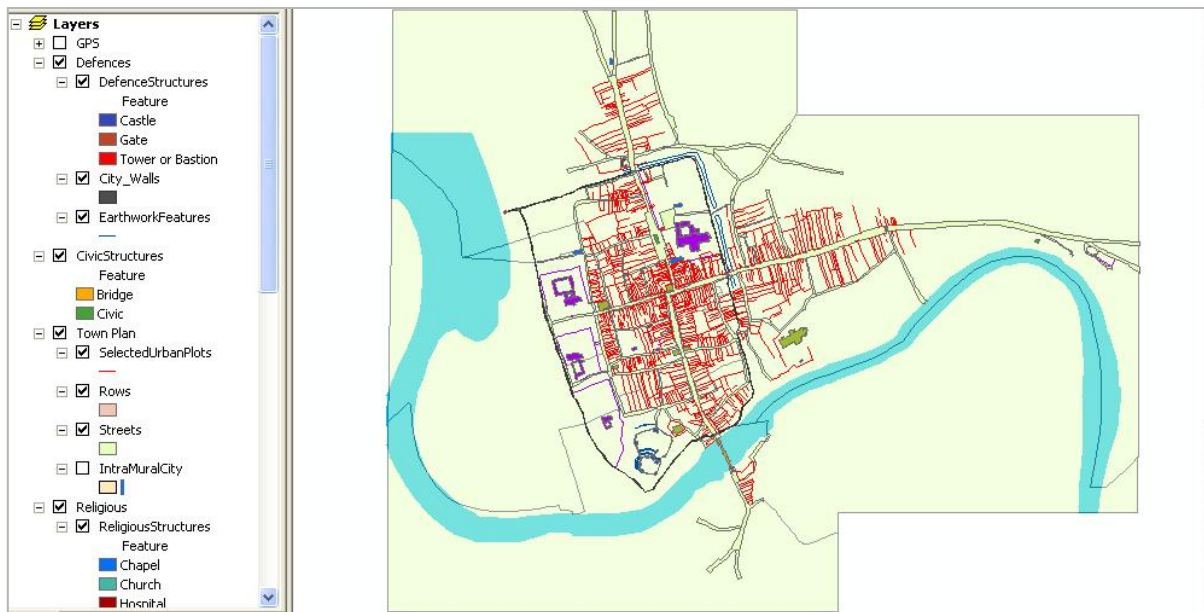


Figure 5.26 : Aperçu des données sur SIG produites par le projet *Mapping Medieval Chester*. Sont représentés aussi bien des données sur la topographie de la ville, que des données sur l'espace urbain.

Parmi ces données figure le réseau viaire de Chester en 1500. Les chercheurs l'ont reconstitué en prenant appui sur un plan de la ville en 1588, qui est selon eux le plus ancien plan de Chester (cf figure 5.7). Toutefois, ils soulignent que ce plan est une vue cavalière qui ne représente pas le réseau à l'échelle, et dans lequel plusieurs éléments de l'espace urbain sont omis. Le recours à d'autres sources, textuelles et cartographiques, leur a cependant permis de parvenir à une reconstitution du réseau en 1500.

Les données sur le réseau viaire produites par cette équipe de chercheurs ne sont pas de type filaire, elles se présentent sous forme de polygones représentant l'emprise des voies. Nous avons donc converti ces polygones en filaires, en saisissant manuellement chaque voie grâce à un SIG. La figure 5.27 ci-dessous représente ce filaire.



Figure 5.27 : Filaire du réseau viaire de Chester en 1500 après nettoyage. Source : Streets, Mapping Medieval Chester Project.

III.2.3. Manhattan en 1930

Manhattan nous sert de cas d'étude représentatif d'un réseau de type quadrillé. Nous avons choisi les données filaires représentant le réseau en 1930 car celles-ci font apparaître la grille dans un état proche du plan d'origine conçu en 1811 par John Randel. Cela n'est pas le cas des données filaires récentes, qui font apparaître de nombreuses modifications ultérieures telles que des autoroutes urbaines.

Les données filaires choisies pour Manhattan ont été obtenues à partir de la base de données *Historical Urban Ecological (HUE) data*¹⁸⁰. Cette base a été constituée dans le cadre du projet *Early Indicators Project* et est disponible en libre accès sur le site internet du projet¹⁸¹. Ce projet visait à collecter des données historiques servant à des études économiques, démographiques et épidémiologiques aux Etats-Unis. La base de données HUE comprend plusieurs données historiques en format SIG, notamment les limites des quartiers, le tracé du système d'assainissement, ou encore le réseau viaire, et ce pour plusieurs villes (Cincinnati, Boston, et bien d'autres).

¹⁸⁰ <http://uadata.org/hue/>.

¹⁸¹ La licence des données n'est pas précisée, mais il est indiqué qu'elles peuvent être utilisées librement dans le cadre d'activités d'enseignement et de recherche, à condition d'en citer la source et le financeur, les *National Institutes of Health*.

Les données de Manhattan, ont été reconstituées sur SIG, notamment à l'aide d'un plan de Manhattan conçu par Tuttle Arthur S. en 1932, intitulé « Borough of Manhattan »¹⁸², et à des ortho photographies datant du début du XXe siècle.

La comparaison du filaire de 1930 avec des plans et ortho photographies de Manhattan à cette époque indique l'omission de quatre voies carrossables traversant Central Park d'est en ouest. Celles-ci existent pourtant dès l'ouverture du parc en 1873. Nous avons donc saisi manuellement ces quatre voies. Ce filaire est représenté dans la figure 5.28 ci-dessous.

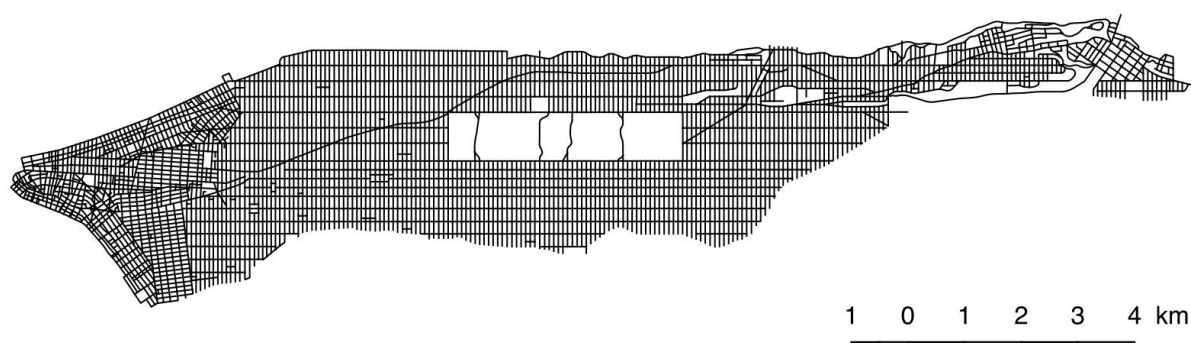


Figure 5.28 : Filaire du réseau viaire de Manhattan en 1930 après nettoyage. Source : Robert W Fogel, Dora L Costa, Carlos Villarreal, Brian Bettenhausen, Eric Hanss, Christopher Roudiez, Noelle Yetter, and Andrea Zemp (2014), *Historical Urban Ecological data set*. Chicago: Center for Population Economics, University of Chicago Booth School of Business, and The National Bureau of Economic Research.

III.2.4. Détroit en 1837

Pour Détroit, nous nous sommes procuré des données filaires représentant le réseau viaire en 1837, 1879, 1921 et 1952. Toutefois, nous avons choisi de conserver uniquement le filaire de 1837, car celui-ci est le plus proche (parmi les quatre) de la grille originelle de Détroit (cf figure 5.29). Ces données nous ont été fournies par des chercheurs issus de la communauté *Space Syntax*. Elles ont été construites par Conrad Kickert, qui s'est appuyé sur les plans reconstitués par Leon et al. (2015). Ces derniers ont produit des données cartographiques représentant le réseau viaire de Détroit à différentes dates entre 1796 et 2009. À partir de ces données, Kickert a produit, non pas des données filaires « classiques », mais des cartes axiales (cf chapitre 4), c'est-à-dire des filaires dans lesquelles les lignes ne représentent pas uniquement les voies, mais se prolongent pour représenter le champ visuel des usagers mobiles. Ce format était nécessaire aux analyses syntaxiques que l'auteur propose dans Psarra et al. (2013). Pour nos travaux, nous avons dû modifier ces cartes axiales, en supprimant les lignes correspondant aux champs visuels. Cette

¹⁸² Tuttle, Arthur S. "Borough of Manhattan" [map]. 1:14,400. New York: Office of the President, Borough of Manhattan, 1932.

opération a été réalisée sous SIG à l'aide d'un outil de correction topologique (cf annexe B).

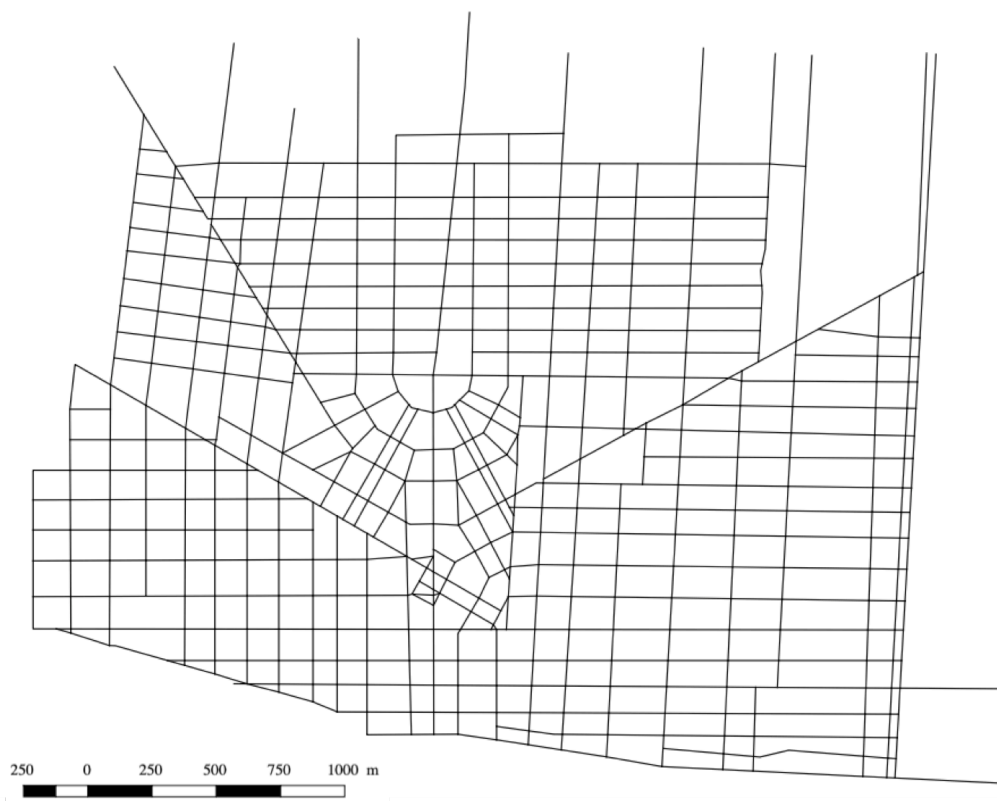


Figure 5.29 : Filiale du réseau viaire de Détroit en 1837 après nettoyage. Source : (Psarra, Kickert, Pluviano, 2013).

III.2.5. Banlieue de Waterloo en 2016

Concernant la banlieue de Waterloo, nous nous sommes procuré des données filaires représentant le réseau viaire de l'ensemble du comté de Waterloo en 2016. Nous en avons ensuite extrait le réseau viaire qui nous intéressait, correspondant à une partie de la banlieue ouest de Waterloo (cf figure 5.30).

Les données filaires représentant le réseau viaire du comté de Waterloo en 2016 ont été construites par le *Geospatial Center* de l'Université de Waterloo, dans le cadre du projet *Waterloo County historical street project*. Ce projet visait à produire des données sur le réseau viaire du comté de Waterloo à différentes dates (1955, 2011

et 2016) afin d'analyser l'évolution de ce réseau. Les données filaires produites sont disponibles en libre accès à des fins d'enseignement et de recherche¹⁸³.



Figure 5.30 : Filaire du réseau viare de la banlieue de Waterloo en 2016 après nettoyage.
Source : Geospatial Center, *Extent of Urban Built-up Area*, University of Waterloo, 2017.

III.2.6. Banlieue de Raleigh en 1999

Pour la banlieue de Raleigh, nous disposons de données filaires produites par le *Wake County Geographic Information Services (Wake County GIS)* pour l'ensemble du comté de Wake (comté dans lequel se situe Raleigh). Nous avons extrait de ces données le filaire correspondant à notre cas d'étude, la banlieue nord de Raleigh (cf figure 5.31). Le *Wake County GIS* a produit des données filaires de Wake pour une période allant de 1999 à 2020. Ces données ont été produites manuellement à partir de la base cadastrale de la ville¹⁸⁴. Les données sont disponibles en accès libre sur le site de l'agence *Wake County GIS*¹⁸⁵.

Notre choix s'est porté sur le filaire représentant le réseau viare du comté de Wake en 1999. Celui-ci est conforme aux standards cartographiques que nous nous

¹⁸³ <https://uwaterloo.ca/library/geospatial/gis-data-download>.

¹⁸⁴ Des informations supplémentaires telles que le nom des voies et leur type ont été ajoutées en croisant le cadastre avec d'autres sources.

¹⁸⁵ <http://www.wakegov.com/gis/services/Pages/data.aspx>.

sommes fixés. En particulier, aucune autoroute ou voie rapide n'y est représentée. La *Northern Wake Expressway* qui traverse la banlieue nord de Raleigh d'est en ouest n'existe pas encore en 1999, elle est progressivement tracée à partir de l'an 2000.

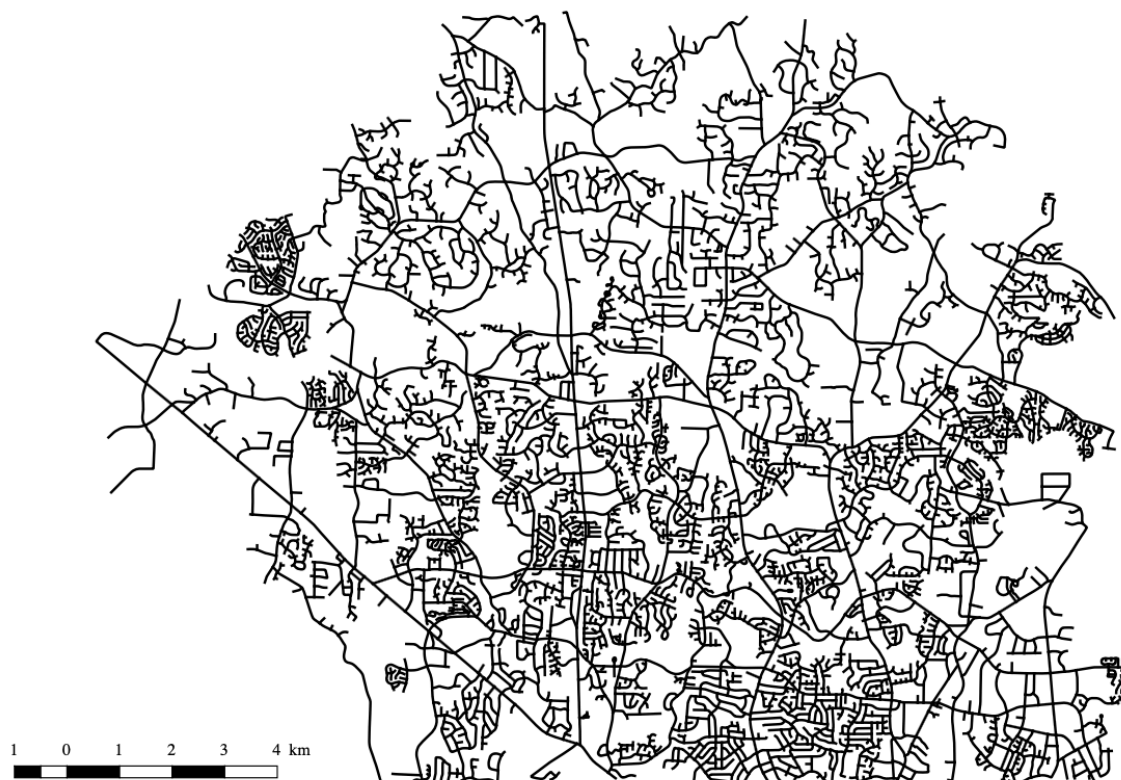


Figure 5.31 : Filiaire du réseau viaire de la banlieue de Raleigh en 1999 après nettoyage.
Source : Wake County GIS, *Wake Streets 1999*, Raleigh, 2009.

III.2.7. Paris au XIXe siècle

Rappelons que, pour notre second corpus de cas d'étude, il nous fallait des données filaires sur le réseau viaire parisien à la fois à la période haussmannienne (1853-1870), mais aussi aux périodes qui l'ont précédée (première moitié du XIXe siècle) et suivie (fin du XIXe siècle). Nous choisissons des données produites dans le cadre du projet GeoHistoricalData¹⁸⁶, projet dont l'un des objectifs était l'étude de l'espace urbain parisien au XIXe siècle.

¹⁸⁶ <http://geohistoricaldata.org>.

Le projet GeoHistoricalData

Présentation

Le projet GeoHistoricalData est un projet collaboratif regroupant une vingtaine de chercheurs, coordonné par Marc Barthelemy (CEA), Maurizio Gribaudo et Julien Perret (EHESS). L'objectif du projet est l'étude des évolutions territoriales à différentes échelles (de la parcelle cadastrale au territoire national) ainsi que la création d'outils spécialisés et flexibles permettant de traiter ces questions. Dans ce cadre, des données géographiques sur la France et sur Paris, au XVIIIe et au XIXe siècle ont été construites et diffusées en accès libre¹⁸⁷ sur une plateforme en ligne (cf figure 5.32).

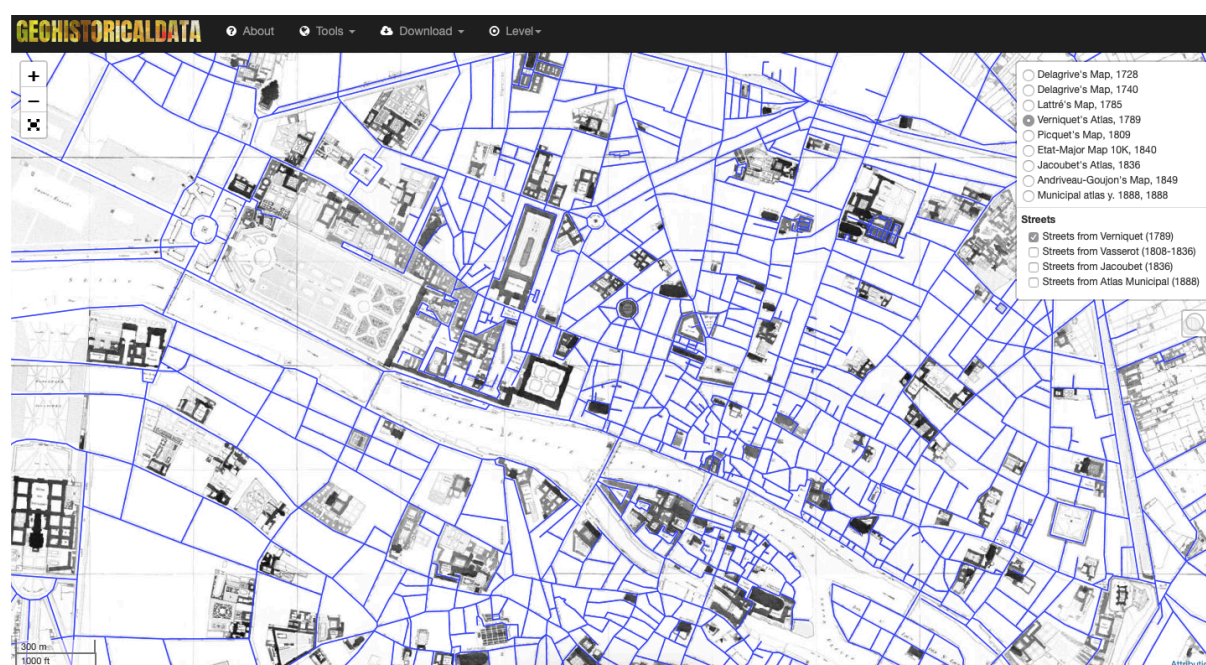


Figure 5.32 : Aperçu de la plateforme en ligne GeoHistoricalData. Sont représentés ici le plan Verniquet (1789) géoréférencé et le filaire construit à partir de ce plan (en bleu).

Des données filaires sur le réseau viaire ancien de Paris

Parmi les contributeurs de GeoHistoricalData figure Benoit Costes, qui a mené dans le cadre de sa thèse (Costes, 2016) un vaste travail d'élaboration d'un référentiel géographique ancien pour l'étude du réseau viaire parisien. Pour ce faire, Costes a construit des données filaires représentant le réseau viaire parisien à différentes dates. La construction de ces données s'est faite soit en partant de zéro, soit en s'appuyant sur un filaire existant. Dans le premier cas, le plan de ville servant de référence pour la saisie du filaire est géoréférencé, puis le filaire est saisi sous

¹⁸⁷ Sous licence *Creative Commons Attribution 2.0*.

format vectoriel. Dans le second cas, le plan de ville servant de référence est géoréférencé en fonction d'un filaire existant (issu d'un autre plan), ce filaire existant est ensuite modifié de manière à créer un nouveau filaire correspondant au plan de ville. Selon Costes (2016, p. 170), cette deuxième méthode est plus performante : le filaire est saisi plus vite car il suffit d'ajouter ou de supprimer des tronçons dans un filaire existant. La géométrie des tronçons stables entre les deux filaires peut ne pas être modifiée. Par ailleurs, cette méthode permet de conserver les attributs, notamment les noms de rues, qui en général varient peu entre deux dates.

En plus des filaires qu'il a saisis lui-même, Costes s'est également procuré certaines données filaires par l'intermédiaire de chercheurs de l'EHESS et de l'IGN. Une fois ces différents filaires obtenus, Costes procède à **leur appariement puis à leur confrontation**. Il développe une méthode pour identifier et fusionner les tronçons de voies qui se correspondent dans le temps. Cela lui permet de repérer des hétérogénéités dans les données, et d'en rechercher la cause : omissions de saisie, incomplétudes des sources, voies en projet et jamais construites, etc. Il procède ensuite à la **correction de ces hétérogénéités**, de manière à ce que les données filaires représentent le plus fidèlement possible les plans dont elles sont issues. Il s'agit toutefois d'un travail chronophage¹⁸⁸ et l'auteur admet que des imperfections demeurent dans les données corrigées.

Justification du choix des données

Pour nous, l'intérêt des données filaires produites par Costes est qu'elles ont été confrontées puis **corrigées les unes par rapport aux autres**. Cela en fait des données **comparables**, même si certaines hétérogénéités demeurent entre elles. Par ailleurs, les standards cartographiques adoptés par Costes sont similaires à ceux que nous nous sommes fixés : seules les voies appartenant au réseau viaire sont représentées, et elles le sont par des lignes uniques sur le filaire. Enfin, ces données ont fait l'objet d'un contrôle collectif de la part des collaborateurs du projet GeoHistoricalData, et les choix faits lors de leur construction ont été systématiquement documentés. Nous choisissons donc d'utiliser ces données filaires pour la comparaison diachronique du réseau viaire parisien¹⁸⁹.

Quatre de ces filaires ont été sélectionnés, de manière à recouvrir aussi bien la première moitié du XIXe siècle, la période haussmannienne, et la fin du XIXe siècle.

¹⁸⁸ Costes estime à environ trois mois la durée nécessaire à la construction de son corpus de données (géoréférencement, saisie, correction).

¹⁸⁹ Nous remercions Maurizio Gribaudo et Bertrand Dumenieu qui nous ont donné accès à ces données filaires avant leur diffusion en accès libre, et Benoit Costes pour les explications concernant la construction des données.

Nous choisissons les filaires représentant le réseau en 1790, 1854, 1871 et 1888. Cela nous permet d'étudier trois périodes :

- Le réseau entre 1790 et 1854, soit avant Haussmann ;
- Le réseau entre 1854 et 1871, période haussmannienne ;
- Le réseau entre 1871 et 1888, soit après Haussmann

Filaire de Paris en 1790

Le filaire de Paris en 1790 a été construit par des chercheurs de l'EHESS et de l'IGN, notamment Eric Mermet et Anne Varet-Vitu. Il correspond au réseau viaire parisien tel que représenté sur le plan de Verniquet, plan conçu par Edme Verniquet¹⁹⁰. Celui-ci entreprend dès l'été 1783 un lever des plans de « toutes les rues de la ville et faubourgs de Paris » qui n'ont pas encore été cartographiées. Le plan de Verniquet repose sur de nombreux relevés et sur des calculs trigonométriques complexes (Mermet & Varet-Vitu, s. d.). Cela en fait, selon Costes (2016), un plan géométriquement très précis, qui pourrait servir de socle de référence pour les données anciennes antérieures au XIXe siècle décrivant Paris.

Pour construire le filaire de Verniquet, les chercheurs de l'EHESS et de l'IGN ont pris pour base un autre filaire ancien précédemment construit¹⁹¹. Ils ont géoréférencé le plan de Verniquet en fonction de ce filaire, puis ils ont effectué des modifications sur ce filaire pour qu'il corresponde à l'état du réseau tel que représenté sur le plan de Verniquet. Selon Costes, le filaire ainsi produit était globalement de bonne qualité.

Filaire de Paris en 1854

Le filaire de 1854 a été construit par Costes. Il correspond au réseau viaire parisien tel que représenté sur le *Plan des travaux de voirie réalisés entre 1789 et 1854*. Ce plan est extrait d'un ouvrage rédigé notamment par l'inspecteur général des Ponts et Chaussées Alphand recensant les transformations majeures subies par l'espace parisien entre 1789 et 1889 : égouts, voies, canaux, transports en commun, etc. La construction du filaire de 1854 est similaire à celle du filaire de Verniquet. Costes a pris pour base un autre filaire précédemment construit¹⁹². Il a ensuite géoréférencé le plan de 1854 en fonction de ce filaire, et a effectué des modifications sur ce filaire de manière à ce qu'il corresponde à l'état du réseau tel que représenté sur le plan de 1854.

¹⁹⁰ Architecte du Jardin du Roi à partir de 1772.

¹⁹¹ Il s'agissait d'un filaire issu du plan de Jacoubet, représentant le réseau viaire parisien entre 1830 et 1836.

¹⁹² Ici aussi, il s'agissait du filaire issu du plan de Jacoubet.

Filaire de Paris en 1871

Le filaire de 1871 a lui aussi été construit par Costes. Il correspond au réseau viaire parisien tel que représenté sur le *Plan des travaux de voirie effectués entre 1854 et 1871*. Ce plan est lui aussi extrait de l'ouvrage d'Alphand recensant les transformations majeures subies par l'espace parisien entre 1789 et 1889. Ici encore, Costes a pris pour base un autre filaire ancien précédemment construit¹⁹³. Il a géoréférencé le plan de 1871 en fonction de ce filaire, puis a effectué des modifications sur ce filaire pour qu'il corresponde à l'état du réseau tel que représenté sur le plan de 1871. Nous avons découpé ce filaire pour que son emprise corresponde à celle de l'enceinte des Fermiers Généraux (cf section III.1.3).

Filaire de Paris en 1888

Le filaire de Paris en 1888 a été construit par des chercheurs de l'IGN. Il correspond au réseau viaire parisien tel que représenté sur l'Atlas municipal de Paris dit plan Alphand-Poubelle (Alphand et Fauve, 1888). Les chercheurs de l'IGN ont construit ce filaire en prenant pour base le filaire de *Géoroute* (1999, IGN), qu'ils ont modifié pour qu'il corresponde à l'état du réseau tel que représenté sur le plan de 1888.

Costes explique (p. 170) que ce filaire n'était pas de bonne qualité et qu'il a nécessité de nombreuses corrections. Par exemple, un grand nombre de tronçons étaient représentés sur le filaire alors qu'ils ne figuraient pas sur le plan Alphand-Poubelle (environ 30% du nombre total de tronçons). A l'inverse, quelques tronçons figurant sur le plan Alphand-Poubelle avaient été omis lors de la vectorisation. Ici aussi, nous avons découpé ce filaire pour que son emprise corresponde à celle de l'enceinte des Fermiers Généraux (cf section III.1.3).

La figure 5.33 ci-dessous représente les quatre filaires après nettoyage et découpage selon l'enceinte des Fermiers Généraux (pour les filaires de 1871 et 1888).

¹⁹³ Il s'agit cette fois d'un filaire issu du plan Alphand-Poubelle, représentant le réseau viaire parisien entre 1887 et 1889.

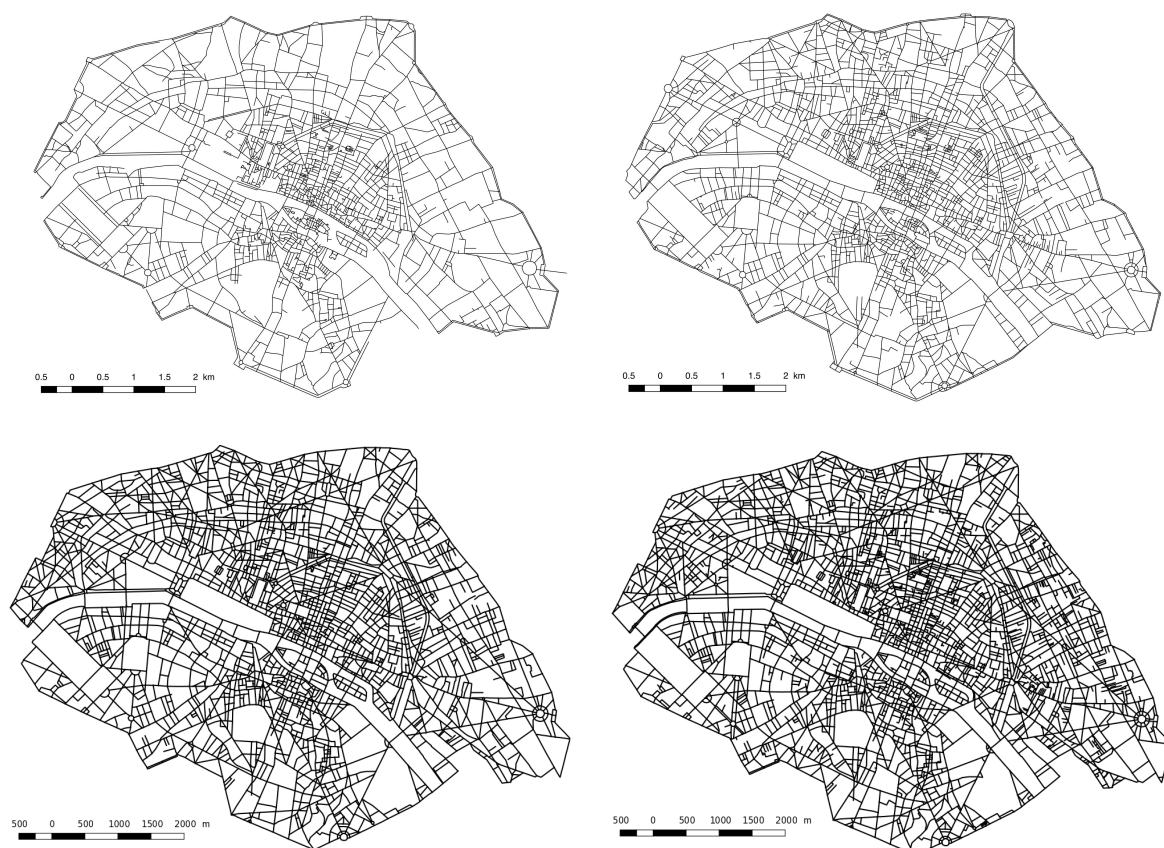


Figure 5.33 : Filaires représentant le réseau viaire parisien (de gauche à droite et de haut en bas) en 1790, 1854, 1871 et 1888, après nettoyage et délimitation selon l'enceinte des Fermiers Généraux. Source : GeoHistoricalData.

Conclusion de la partie III

Cette partie nous a permis de présenter les données filaires sélectionnées pour chacun de nos cas d'étude. Pour les réseaux à la morphologie typique, nous avons recours à plusieurs sources (organismes de recherche ou structures publiques). Pour le réseau viaire parisien au XIXe siècle, notre choix a porté sur les données filaires construites ou corrigées par Benoit Costes dans le cadre du projet GeoHistoricalData. Ce choix a principalement été motivé par le fait que ces données ont été corrigées les unes en fonctions des autres, ce qui en réduit l'hétérogénéité.

Le tableau 5.2 ci-dessous synthétise ces données filaires. Il présente également leur emprise (en km²) et le nombre de tronçons de voies qu'ils contiennent. On constate que ces données ont des tailles très variables, tant en termes d'emprise que de nombre de tronçons, ce qui s'explique par la variété des échelles spatiales de nos cas d'étude. Nos données sont également diverses en termes de répartition temporelle, comme le montre la figure 5.34 ci-dessous.

Cas d'étude	Nombre de tronçons	Emprise (km ²)
Paris en 1300	1068	4,4
Chester en 1500	100	0,9
Manhattan 1930	7204	54
Détroit en 1837	1013	6,7
Banlieue de Waterloo en 2016	1103	19,9
Banlieue de Raleigh en 1999	5923	188
Paris en 1790	3349	35
Paris en 1854	5096	35
Paris en 1871	5256	35
Paris en 1888	6584	35

Tableau 5.2 : Tableau synthétisant les données filaires choisies, le nombre de tronçons de voies qu'elles comprennent, et leur emprise.

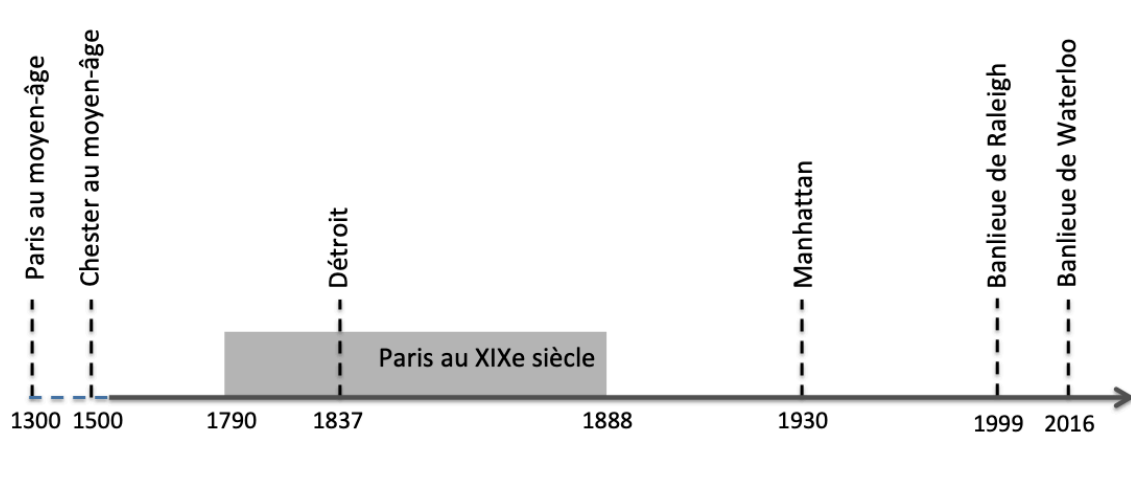


Figure 5.34 : Schéma illustrant la répartition temporelle de nos données filaires. L'échelle temporelle est respectée, sauf pour le cas de Paris et Chester au Moyen Age (d'où les pointillés).

Conclusion du chapitre

Nous avons choisi dans le chapitre 3 un ensemble de préconisations fréquentes en urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité dans un réseau viaire en agissant sur sa morphologie. Les préconisations choisies sont la conception de réseaux viaires à la morphologie typique (organique, quadrillée ou arborescente), et la création de percées configurées en étoile dans un réseau existant.

L'objectif de ce chapitre était de construire un corpus de cas d'étude représentatifs de ces préconisations. Ce corpus est constitué de réseaux viaires empiriques, ce qui nous permet de traiter non pas de projets utopiques conçus par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, mais de réalisations concrètes. Le passage des préconisations théoriques aux cas d'étude empiriques est facilité par le fait que nous ne nous sommes pas fixés d'échelle spatiale ou temporelle unique, notre principal critère de sélection des cas d'étude a été la **représentativité des préconisations** qui nous intéressent. Aussi, les cas d'étude choisis correspondent à des échelles spatiales différentes, allant d'un ensemble de quartiers à une ville entière. Ils s'étendent sur une période temporelle allant du Moyen Âge au XXI^e siècle (cf figure 5.34).

Nous avons également présenté dans ce chapitre le type de données nécessaire pour analyser ces cas d'étude grâce à la théorie des graphes, méthode que nous avons choisie (cf chapitre 4). Nous aurons recours à des données filaires, représentant la morphologie des réseaux viaires. Ce type de données est largement disponible, des bases de données comme Openstreetmap permettent d'y avoir accès en ligne et gratuitement. Dans notre cas, nous avons choisi des données **produites et mises à disposition gratuitement par des centres de recherche ou des organismes publics**. La multiplication de ce type de données, y compris pour des périodes historiques reculées, a été un réel atout pour notre travail.

Le schéma ci-dessous (figure 5.35) résume les différents passages, des préconisations théoriques au corpus de cas d'étude empiriques puis au corpus de données filaires. Les données filaires constituent pour nous une première étape avant la construction de graphes viaires, selon le procédé décrit en chapitre 4. Rappelons que la construction des graphes est essentielle à notre travail car elle permet le passage à un objet mathématique sur lequel nous pouvons procéder à des mesures des caractéristiques morphologiques d'une part, et des conditions d'accessibilité d'autre part.

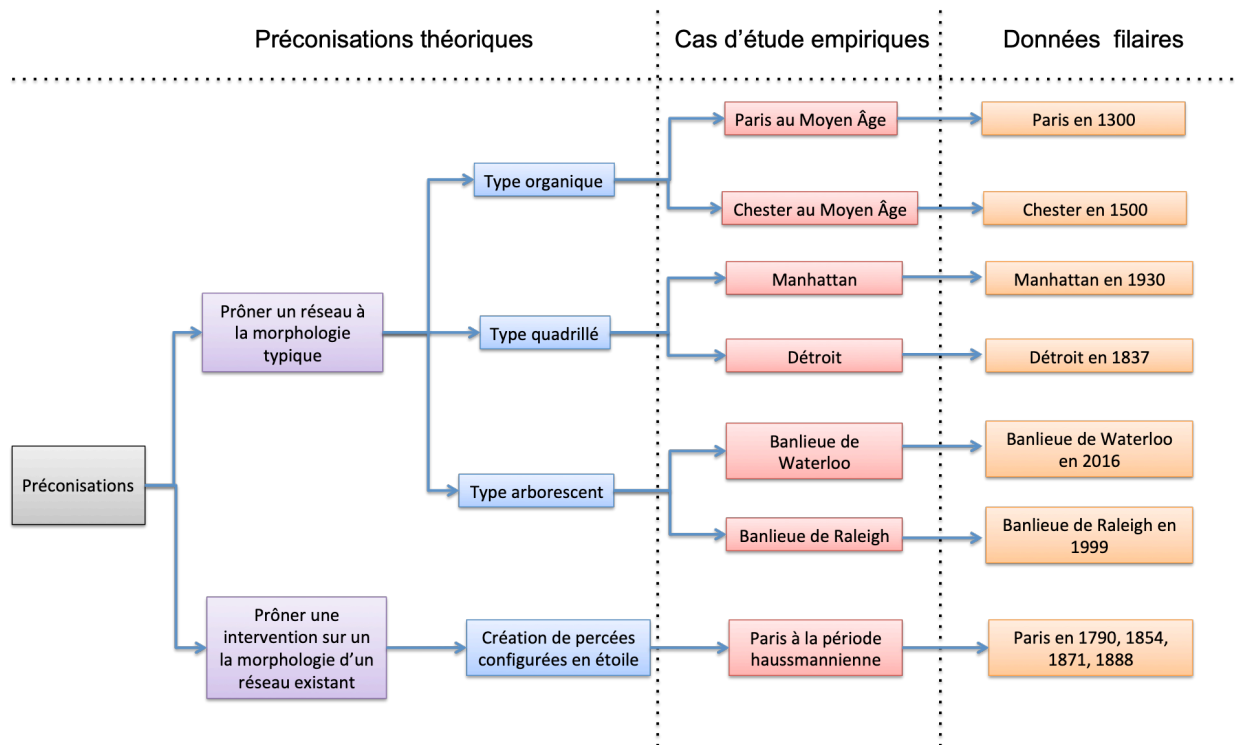


Figure 5.35 : Schéma résumant le passage des préconisations typiques aux cas d'étude empiriques qui en sont représentatifs (en rouge), puis aux données filaires sur ces cas d'étude (en orange).

Chapitre 6 : Traduction des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe

Introduction

“ The first essential step in the direction of learning any subject is to find principles of numerical reckoning and practicable methods for measuring some quality connected with it. I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of Science, whatever the matter may be.”

(Thomson, 1883).

Quantifier signifie « exprimer et faire exister sous une forme numérique ce qui, auparavant, était exprimé par des mots et non par des nombres » (Desrosières 2012).

Nous avons construit dans le chapitre 5 deux corpus de cas d'étude, choisis pour être représentatifs des préconisations faites en urbanisme pour améliorer l'accessibilité offerte aux usagers lors de leurs déplacements. Le premier corpus est constitué de réseaux viaires que nous considérons comme représentatifs de types largement préconisés en urbanisme : deux réseaux de type organique (Paris et Chester au Moyen Age), deux réseaux de type quadrillé (Détroit et Manhattan), et deux réseaux de type arborescent (la banlieue de Raleigh et celle de Waterloo). Le second corpus est composé du réseau viaire parisien à une période qui selon nous est représentative de la création de percées configurées en étoile, à savoir la période haussmannienne (1854-1871). Nous comparons l'évolution du réseau durant cette période, à son évolution aux périodes qui l'ont précédée et suivie, afin d'observer en

quoi elle s'en distingue. Notre second corpus est donc composé du réseau viaire parisien en 1790, 1854, 1871 et 1888¹⁹⁴.

Nous avons également présenté dans le chapitre 5 les données filaires utilisées pour représenter la morphologie de chacun des réseaux de ces corpus. Dans ce chapitre, ces données filaires vont être analysées au moyen de la théorie des graphes, présentée en chapitre 4. L'objectif principal du chapitre est de **montrer que des descripteurs calculés sur un graphe permettent de décrire, de manière quantitative, les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires des deux corpus**. Ces descripteurs ont été présentés dans le chapitre 4, nous les désignons comme des descripteurs morphologiques¹⁹⁵.

Le calcul de ces descripteurs sur les deux corpus de cas d'étude va nous permettre de :

- quantifier les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires du corpus 1 ;
- quantifier l'évolution des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires du corpus 2

Dans le chapitre 3, nous avons présenté quelques-unes des caractéristiques morphologiques qui sont attribuées dans la littérature aux réseaux de type organique, quadrillé, arborescent, et aux percées configurées en étoile. Nous les synthétisons dans le tableau 6.1. Cette description des caractéristiques morphologiques était faite « par des mots », et elle portait sur ces réseaux considérés de manière théorique, sans viser un cas d'étude en particulier. Nous la désignons comme une description par **connaissances thématiques**. Un des objectifs subsidiaires de ce chapitre sera de **vérifier si la description à laquelle nous parvenons sur nos cas d'étude coïncide avec cette description par connaissances thématiques**. Cela permettra d'une part d'observer les écarts qui existent entre les réseaux décrits dans la littérature et nos cas d'étude empiriques, et d'autre part d'observer les écarts entre une description « par des mots » et la description « par des chiffres » que nous proposons.

¹⁹⁴ Rappel : nous étudions le réseau viaire parisien en nous limitant à l'enceinte des Fermiers Généraux. Cela nous permet de ne pas tenir compte de la croissance de l'enceinte de Paris survenue entre 1854 et 1871, car celle-ci risque de masquer l'effet des interventions qui nous intéressent, à savoir la création de percées configurées en étoile.

¹⁹⁵ Rappel : nous allons calculer ces descripteurs morphologiques en utilisant le Plugin sDNA : Cooper, C., Chiaradia, A., Webster, C. (2016) Spatial Design Network Analysis software, version 3.4, Cardiff University, <http://www.cardiff.ac.uk/sdna/>.

	Connectivité	Type d'intersection	Rectitude des voies	Orientation des voies	Espacement des voies
Type organique	Modérée	En T et en X	Voies tortueuses	Orientations variées	Espacement faible
Type quadrillé	Forte	En X	Voies rectilignes	Deux séries de voies perpendiculaires entre elles	n.d.
Type arborescent	Faible	En T	Voies courbes	n.d.	Espacement élevé
Percées configurées en étoile	n.d.	Intersections à cinq voies et plus (en étoile)	Voies rectilignes	Orientations variées	n.d.

n.d. non décrit dans la littérature consultée.

Tableau 6.1 : Tableau synthétisant les caractéristiques morphologiques décrites dans la littérature pour les réseaux viaires organiques, quadrillés, arborescents, et les percées en étoile. Ce tableau est une synthèse de la description présentée en chapitre 3.

Dans la partie I de ce chapitre, nous rappelons les descripteurs morphologiques choisis et la démarche adoptée, afin de décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux de nos deux corpus. Dans la partie II, nous présentons et interprétons les résultats du calcul de ces descripteurs pour les réseaux viaires de ces deux corpus. Dans la partie III, nous allons décrire les caractéristiques morphologiques de chaque type de réseau du corpus 1 en le positionnant par rapport aux autres de types différents. Nous allons également décrire l'évolution des caractéristiques morphologiques faisant suite à l'intervention d'Hausmann, en la positionnant par rapport à l'évolution survenue aux autres périodes. Pour finir, nous confronterons nos résultats aux caractéristiques morphologiques décrites par connaissances thématiques dans la littérature.

I. Des caractéristiques morphologiques aux descripteurs morphologiques

Notre analyse porte sur un nombre restreint de caractéristiques morphologiques des réseaux viaires. Celles-ci ont été choisies d'une part parce qu'elles sont mobilisées en urbanisme pour décrire les réseaux viaires, mais surtout parce qu'elles sont mesurables. En effet, nous avons identifié dans le chapitre 4 des descripteurs permettant de quantifier chacune de ces caractéristiques morphologiques. Nous rappelons ces caractéristiques et ces descripteurs dans le tableau 6.2.

Caractéristiques morphologiques	Topologie (configuration)		Géométrie (composition)			
	Connectivité	Type d'intersection	Rectitude des voies	Orientation des voies	Espacement des voies	
Descripteurs morphologiques	Coefficient de maillage du réseau	Degré des tronçons	Courbure des tronçons	Orientation cardinale des tronçons	Longueur des tronçons	Espacement des tronçons

Tableau 6.2 : Tableau indiquant pour chaque caractéristique morphologique le descripteur morphologique correspondant.

I.1. Rappel des descripteurs morphologiques

Le coefficient de maillage (ou *meshedness coefficient*, noté alpha) correspond au rapport entre le nombre de « faces » ou « mailles » que comprend le graphe représentant le réseau, et le nombre maximal de faces possibles dans ce graphe. Dans notre cas, plus le coefficient de maillage est élevé, plus la connectivité du réseau est élevée, autrement dit plus les tronçons du réseau sont reliés les uns aux autres.

Le **degré d'un tronçon**¹⁹⁶ correspond au nombre d'autres tronçons auxquels il est relié. Nous rappelons ci-dessous à quoi peuvent correspondre certains degrés fréquents dans les réseaux viaires :

- degré 1 : tronçon en boucle qui se « referme » sur lui-même ;
- degré 2 : cul-de-sac formant intersection en T avec les autres tronçons ;
- degré 3 : cul-de-sac formant une intersection en X avec les autres tronçons ;
- degré 4 : tronçon formant des intersections en T sur ses deux extrémités ;
- degré 5 : tronçon formant des intersections en T à une extrémité, et en X à l'autre extrémité ;
- degré 6 : tronçon formant des intersections en X sur ses deux extrémités ;
- degré supérieur à 6 : tronçon formant des intersections en étoile (à cinq branches ou plus) sur au moins une de ses extrémités.

La **courbure d'un tronçon**¹⁹⁷ correspond au cumul des angles formés le long de ce tronçon, elle est exprimée en degré. Un tronçon rectiligne aura une courbure nulle. Plus la courbure est élevée, plus l'angle formé entre les deux extrémités du tronçon est important, et donc plus le tronçon est courbe. La courbure peut atteindre 600°, voire plus, dans le cas de tronçons particulièrement sinueux.

L'orientation cardinale d'un tronçon¹⁹⁸ est l'angle qu'il forme par rapport au nord géographique. Signalons que sur sDNA (l'outil d'analyse de réseaux que nous avons choisi¹⁹⁹), l'orientation cardinale d'un tronçon varie de 0° lorsque l'orientation du tronçon correspond parfaitement au nord géographique, à 359,99° pour un tronçon déviant de moins de 1° à gauche du nord géographique. Néanmoins, dans le cas d'un réseau viaire, seule un certain spectre d'orientation cardinale est pertinent, celui situé dans l'intervalle [0° ; 180°]. En effet, un tronçon dont l'orientation cardinale est de 90° et un dont l'orientation est de 270° sont en réalité orientés de la même manière. De même, un tronçon dont l'orientation est de 45° et un dont l'orientation est de 225° sont orientés de la même manière. Ainsi, toutes les orientations cardinales supérieures ou égales à 180° ont une orientation équivalente dans l'intervalle [0° ; 180°]. Cette orientation équivalente est symétrique à l'orientation d'origine, elle s'obtient en lui soustrayant 180°. Ainsi, nous avons soustrait 180° à toutes les orientations cardinales supérieures ou égales à 180°.

¹⁹⁶ Désigné *Line connectivity* sur le plugin sDNA, outil que nous avons utilisé pour l'analyse des réseaux.

¹⁹⁷ Désignée *Line angular curvature* sur le plugin sDNA.

¹⁹⁸ Désignée *Line bearing* sur sDNA.

¹⁹⁹ Nous le présentons en annexe B.

Par ailleurs, sur sDNA, les tronçons formant des boucles, c'est-à-dire ceux se refermant sur eux-mêmes, ont une orientation cardinale infinie. Pour éviter d'avoir des valeurs infinies dans nos données, nous avons attribué à ces tronçons en boucles une orientation cardinale. Bien que ces tronçons en boucles soient très peu nombreux dans les réseaux sélectionnés, il nous fallait rendre compte de leur particularité, en leur attribuant une orientation différente de celle des autres tronçons. Nous choisissons une valeur avec un niveau élevé de précision, 1,111, car cette valeur ne s'observe dans aucun autre tronçon des réseaux. Le fait de leur avoir attribuer une modalité quantitative plutôt que qualitative nous permet d'avoir le même nombre de modalités pour ce descripteur que pour les autres descripteurs utilisés, ce qui se révèlera nécessaire dans le chapitre 8 lorsque nous analyserons la relation entre les descripteurs.

La **longueur d'un tronçon**²⁰⁰ correspond à la distance qui sépare ses deux extrémités. Elle peut être exprimée en mètres, en kilomètres, ou encore en pieds. De son côté, **l'espace d'un tronçon**²⁰¹ est un descripteur plus complexe que sa longueur. Il correspond à la moyenne des distances à vol d'oiseau entre ce tronçon et tous les autres tronçons du réseau.

I.2. Une description basée sur la comparaison

Comme expliqué dans l'introduction du chapitre 5, la quantification permise par les descripteurs susmentionnés ne constitue qu'une étape dans la description des caractéristiques morphologiques des réseaux. En effet, pour plusieurs de ces descripteurs, il n'existe pas de référentiel permettant d'interpréter les valeurs qu'ils prennent, comme étant élevées ou faibles. Pour pallier cette absence, nous avons opté pour une **démarche comparative**. Ainsi, dans le cas des réseaux à la morphologie typique, les caractéristiques morphologiques seront décrites en comparant les valeurs prises par les descripteurs pour un réseau donné aux valeurs prises dans les autres réseaux. Chaque réseau type est donc décrit relativement aux autres.

Dans le cas du réseau parisien entre 1790 et 1888, l'évolution des caractéristiques morphologiques durant la période haussmannienne sera décrite en comparant l'évolution des valeurs prises par les descripteurs morphologiques durant cette période, à leur évolution durant les autres périodes. De ce fait, l'évolution des caractéristiques morphologiques à la période haussmannienne sera décrite relativement aux autres périodes.

²⁰⁰ *Line length* sur sDNA.

²⁰¹ *Mean crow flight* sur sDNA.

Nous avons donc choisi la **comparaison** comme démarche pour la description des caractéristiques morphologiques des réseaux. Les caractéristiques morphologiques de chaque réseau seront décrites *par rapport* à celles des autres.

Pour pouvoir comparer entre eux des réseaux, nous avons besoin d'une description de chaque caractéristique morphologique à l'échelle de chaque réseau. Or, plusieurs des descripteurs morphologiques mentionnés ci-dessus sont calculés à l'échelle des tronçons de voies du réseau viaire. Nous devons donc passer des descripteurs de tronçons à des descripteurs de réseaux.

I.3. D'une description des tronçons à une description du réseau

Nous avons identifié dans le chapitre 4 trois méthodes pour passer d'une description à l'échelle des tronçons à une description à l'échelle du réseau :

- décrire la **distribution statistique du descripteur**, sur un histogramme par exemple, ce qui nous donne une idée de la manière dont se répartissent les valeurs du descripteur entre tronçons du réseau (les tronçons prennent-ils des valeurs proches ou éloignées, pour le descripteur considéré ?) ;
- utiliser un **résumé numérique** du descripteur à l'échelle du réseau, en calculant la moyenne, la médiane, l'écart type (ou toute autre valeur de référence) des valeurs prises par ce descripteur pour l'ensemble des tronçons ;
- décrire la **distribution spatiale** du descripteur, en représentant (par un code couleur par exemple) sa valeur pour chaque tronçon sur le graphe du réseau.

Concernant le résumé numérique du descripteur, son choix dépendra de la forme de la distribution statistique observée pour ce descripteur. Nous choisirons la valeur de référence qui nous semble la plus adaptée pour résumer, à l'échelle du réseau, le degré des tronçons, leur courbure, leur longueur et leur espacement. Concernant l'orientation cardinale des tronçons, nous construisons une valeur de référence particulière. Notre intérêt porte en effet sur la variabilité de cette orientation au sein du réseau. Comme vu en chapitre 4, les réseaux viaires présentent souvent deux orientations privilégiées de leurs tronçons, ces orientations étant perpendiculaires entre elles. Cela se manifeste par des distributions statistiques bimodales, avec un premier mode distant d'environ 90° du second mode. Nous développons un **indicateur pour décrire à quel point l'orientation des tronçons dans un réseau se rapproche de cette distribution bimodale**, donc à quel point les tronçons sont orientés selon des directions privilégiées. Pour ce faire, nous discrétisons les valeurs de l'orientation cardinale en fonction du premier mode identifié (que la distribution soit bimodale ou pas). Ce mode est utilisé comme centre de classe. L'amplitude

choisie pour cette classe est de 45° . Cela nous permet de regrouper dans cette classe les tronçons qui suivent cette orientation modale, et les tronçons qui s'en écartent légèrement de part et d'autre. Nous discrétisons ensuite le reste de la distribution statistique selon des classes d'amplitude égale, c'est-à-dire 45° (cf figure 6.1). Cela nous permet de regrouper en une même classe les tronçons qui suivent la seconde orientation modale, si celle-ci existe et qu'elle est distante de 90° de la première.

Dans un réseau parfaitement quadrillé par exemple, les deux classes modales (celles dont le centre est l'une des orientations modales) construites selon ce procédé regroupent la totalité des tronçons du réseau. Pour évaluer cette propriété, on peut additionner la fréquence simple des deux classes modales. Elle sera de 100% dans un réseau quadrillé.

Ainsi, nous utiliserons **la fréquence simple des deux classes modales**, construites selon ce procédé, pour évaluer à quel point les tronçons d'un réseau viaire suivent des orientations privilégiées, perpendiculaires entre elles. Plus cette fréquence simple est élevée, plus l'orientation des tronçons se rapproche de celle observée dans un réseau quadrillé. A l'inverse, plus cette fréquence simple est faible, moins il y a de tronçons dans les deux classes modales, et donc plus l'orientation des tronçons s'écarte de celle d'un réseau quadrillé. Pour alléger le texte, nous désignons cette fréquence simple des classes modales par l'expression **concentration de l'orientation des tronçons**. Plus la fréquence est élevée, plus la concentration de l'orientation est élevée.

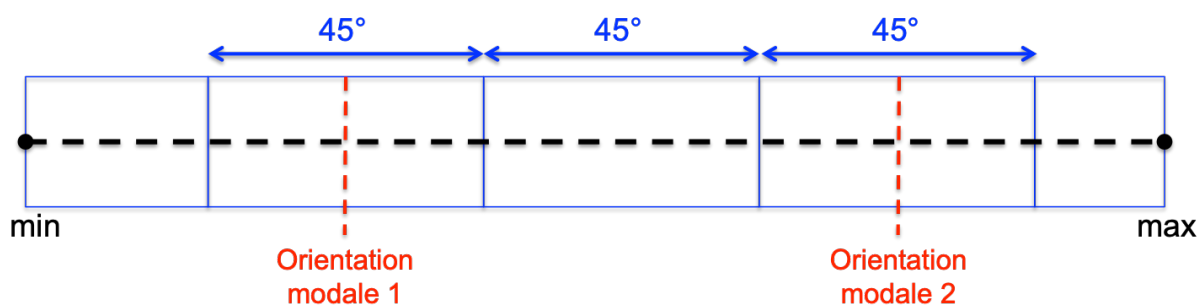


Figure 6.1 : Schéma représentant la discrétisation de la distribution statistique de l'orientation cardinale.

I.4. Quelques précautions à prendre dans l'interprétation des résultats

Nous avons procédé à un nettoyage de la topologie et de la géométrie des données filaires utilisées avant leur conversion en graphes viaires. Malgré cela, des artefacts peuvent subsister dans ces données, et se répercuter sur les valeurs prises par les descripteurs morphologiques. Ces artefacts ne sont pas propres à nos données, ils concernent les données filaires en général. Le principal est relatif à la délimitation

des filaires utilisés. Par exemple, si le filaire est délimité par des voies périphériques, on observera un grand nombre d'intersections en T, correspondant aux voies qui « butent » sur ces voies périphériques. A l'inverse, si la délimitation choisie est différente et que le filaire n'est pas délimité par des voies périphériques, on observera un grand nombre de tronçons coupés, similaires à des culs-de-sac. Dans un cas comme dans l'autre (c'est-à-dire que le filaire soit délimité ou pas par des voies périphériques), le réseau se poursuit généralement au-delà du découpage choisi, par des chemins ruraux par exemple. Les intersections en T et les « culs-de-sac » obtenus sont alors des artefacts liés au découpage choisi. Plus la surface du réseau est importante, plus ce type d'artefacts est présent. **Cela nous incite à rappeler que les filaires utilisés ne sont qu'une représentation du réseau viaire réel**, représentation qui a nécessité plusieurs choix en matière de sélection, de simplification et de délimitation (cf chapitre 5). Ces choix doivent être pris en compte lors de l'interprétation des valeurs obtenues pour chaque descripteur.

La présence de barrières naturelles ou artificielles (la Seine à Paris ou Central Park à Manhattan par exemple) est un autre élément susceptible d'influer sur les valeurs des descripteurs. Néanmoins, ces éléments ne sont pas des artefacts dans la mesure où ils existent et influent réellement sur la morphologie du réseau viaire.

II. Description des caractéristiques morphologiques des réseaux viaires des deux corpus

Nous présentons dans cette partie les résultats du calcul des descripteurs morphologiques sur les réseaux viaires des deux corpus. Ces résultats comprennent l'étude de la distribution statistique de chaque descripteur, de ses valeurs de référence, et dans certains cas de sa distribution spatiale.

L'étude de la distribution statistique de chaque descripteur s'appuiera sur l'histogramme représentant cette distribution. Cet histogramme est construit selon des classes d'amplitudes égales, similaires entre les réseaux.

II.1. Résultats sur les réseaux viaires typiques (corpus 1)

II.1.1. Le coefficient de maillage

Les valeurs du coefficient de maillage obtenues sur les réseaux viaires du corpus 1 en effectuant le calcul présenté en section I.1, sont indiquées dans le tableau 6.3. Nous obtenons les valeurs les plus élevées dans les réseaux quadrillés de Détroit et

Manhattan. Ces réseaux ont donc la connectivité la plus élevée. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Cardillo et al. (2006), dans leur analyse de 20 réseaux viaires de différents types, et par Liu & Zhao (2015), dans leur analyse de 16 quartiers anciens japonais. Dans chacun de ces cas les réseaux quadrillés obtenaient les valeurs les plus élevées.

Ces auteurs trouvent les coefficients de maillage les plus faibles dans les réseaux arborescents. Nous nous attendions donc à obtenir les coefficients de maillage les plus faibles pour les banlieues de Raleigh et de Waterloo. C'est le cas pour le réseau de la banlieue de Raleigh : son coefficient de maillage vaut 0,07, ce qui indique une connectivité très faible. En revanche, celui de la banlieue de Waterloo a un coefficient de maillage à peu près similaire à celui du réseau viaire de Chester, de type organique, ces deux réseaux ayant ainsi des niveaux de connectivité similaires. Ce résultat ne peut pas être imputé à la présence de boucles formées par les ronds points situés en bout d'impasses dans le réseau de Waterloo, car nous les avons supprimés²⁰². Ainsi, nos résultats indiquent que les réseaux arborescents peuvent dans certains cas avoir une connectivité similaire à celle de certains réseaux organiques.

Réseau	Coefficient de maillage
Chester	0,15
Paris	0,23
Détroit	0,42
Manhattan	0,40
Banlieue de Raleigh	0,07
Banlieue de Waterloo	0,16

Tableau 6.3 : Valeurs du coefficient de maillage pour les six réseaux du corpus 1.

II.1.2. Le degré des tronçons

Les histogrammes de la figure 6.2 présentent la distribution statistique du degré des tronçons, pour les six réseaux viaires de ce corpus 1. Nous observons une majorité de tronçons de degré 4 dans les réseaux organiques de Chester et Paris, et dans les réseaux arborescents de la banlieue de Raleigh et de celle de Waterloo. Cela suggère que ces réseaux comprennent une majorité d'intersections en T, ce qui est confirmé

²⁰² Les ronds points relèvent de l'aménagement du réseau, or, nous avons choisi de représenter uniquement sa morphologie sur les données filaires.

par l'observation de la carte des degrés (cf figure 6.3). On constate également que le réseau viaire de la banlieue de Raleigh présente une forte proportion de tronçons de degré 2, ce qui s'explique par la forte proportion de culs-de-sac qu'il contient.

Les réseaux quadrillés sont différents, ils présentent une forte proportion de tronçons de degré 6, ce qui suggère qu'ils comprennent une large proportion d'intersections en X. Cela est confirmé par l'observation de la carte représentant le degré des tronçons (cf figure 6.3).

Le degré moyen donne un résumé de ces résultats. Il est supérieur à 5 dans les réseaux quadrillés, ce qui s'explique par le grand nombre de tronçons de degré 6. Pour les réseaux organiques et les réseaux arborescents, ce degré moyen varie de 3,6 à 4,14. Cette variation dépend de la proportion de culs-de-sac dans ces réseaux. En effet, les culs-de-sac sont des tronçons de degré 2 et 3, par conséquent, plus leur proportion est importante, plus le degré moyen sera faible. Le réseau de la banlieue de Raleigh, dont environ un tiers des tronçons sont des culs-de-sac, a le degré moyen le plus faible.

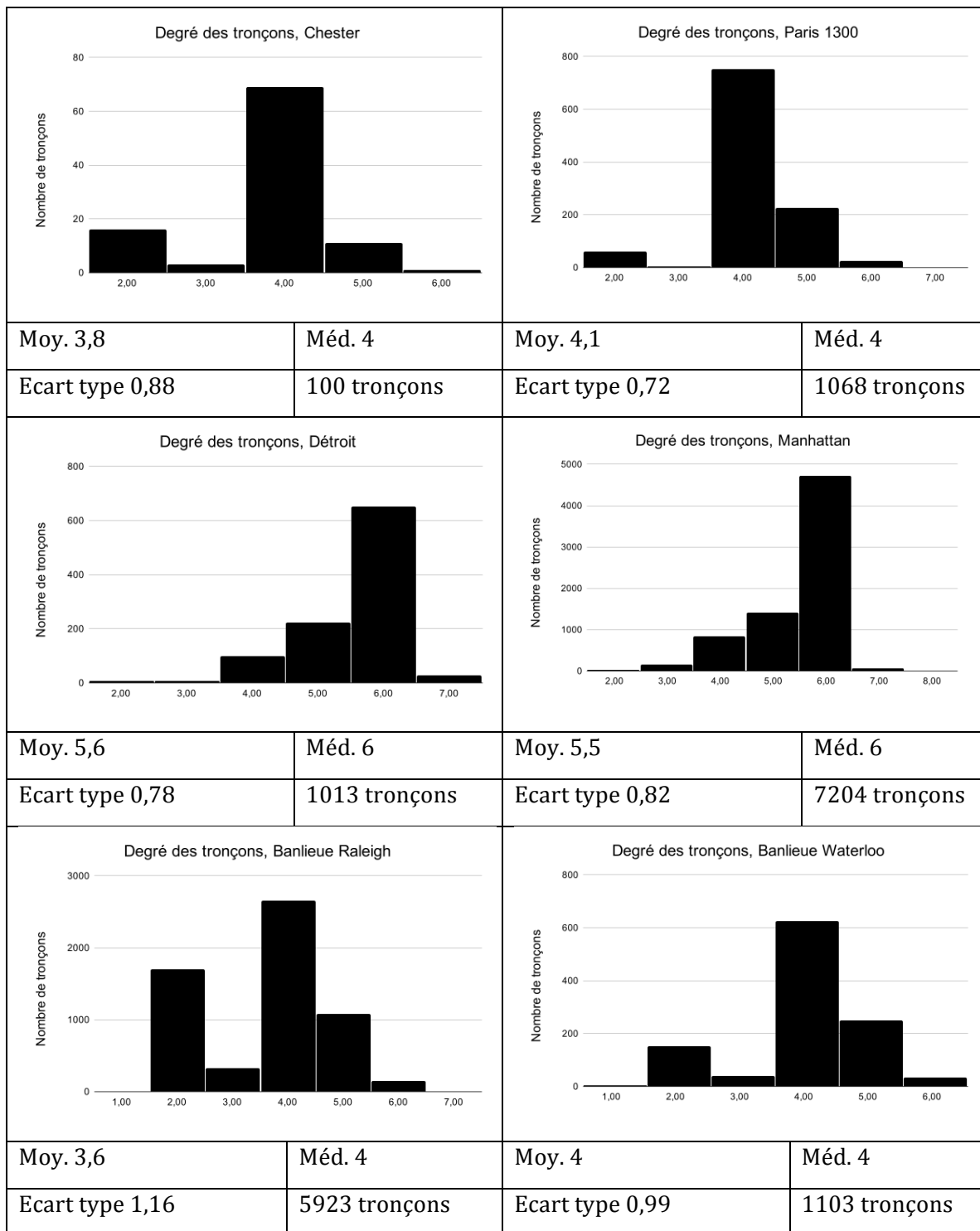


Figure 6.2 : Histogrammes du degré des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Nous indiquons sous chaque histogramme la valeur moyenne, médiane et l'écart type du descripteur, ainsi que le nombre de tronçons du réseau.

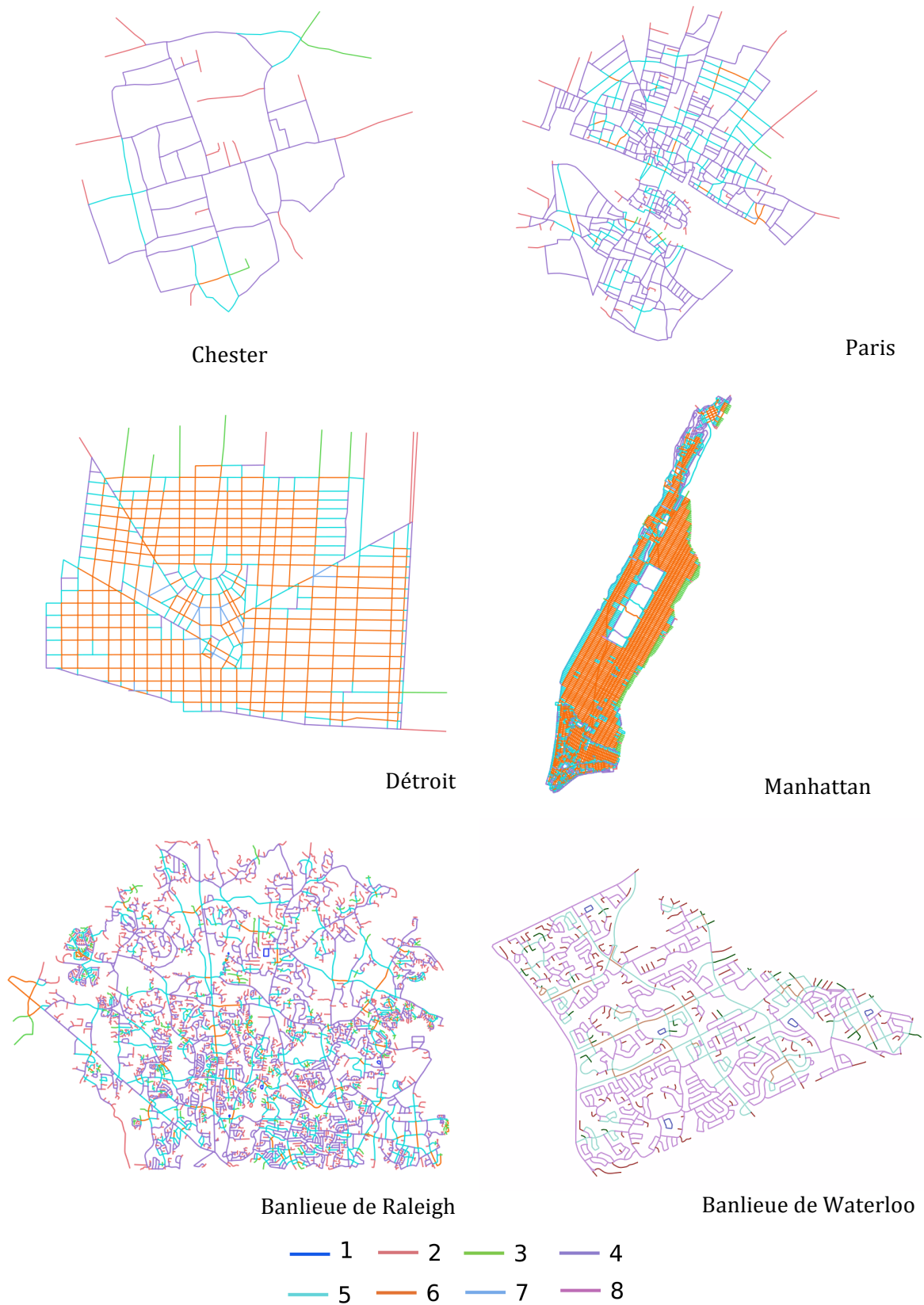


Figure 6.3 : Cartes représentant le degré des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.

II.1.3. La courbure des tronçons

Les réseaux étudiés présentent tous une majorité de tronçons parfaitement rectilignes, donc à la courbure nulle. Les histogrammes (figure 6.4) indiquent des distributions dissymétriques à gauche, avec un pic de valeurs nulles, et quelques valeurs extrêmes correspondant aux tronçons très courbes. La distribution spatiale de la courbure ne montre pas de motif particulier, en raison de cette prédominance des valeurs nulles.

Les valeurs centrales de la distribution, en particulier la moyenne et la médiane, nous permettent d'observer des différences entre les réseaux. La moyenne et la médiane de la courbure ont les valeurs les plus faibles dans les réseaux quadrillés, et les plus élevées dans les réseaux arborescents. Elles ont une valeur intermédiaire dans les réseaux organiques, ce qui suggère que leurs tronçons sont plus courbes que ceux des réseaux quadrillés, et plus rectilignes que ceux des réseaux arborescents.

Moy. 31,7°	Méd. 8,8°	Moy. 20,4°	Méd. 5,9°
Ecart type 56,4°	100 tronçons	Ecart type 38,8°	1068 tronçons
Moy. 0,82°	Méd. 0°	Moy. 2°	Méd. 0°
Ecart type 7,4°	1013 tronçons	Ecart type 12,2°	7204 tronçons

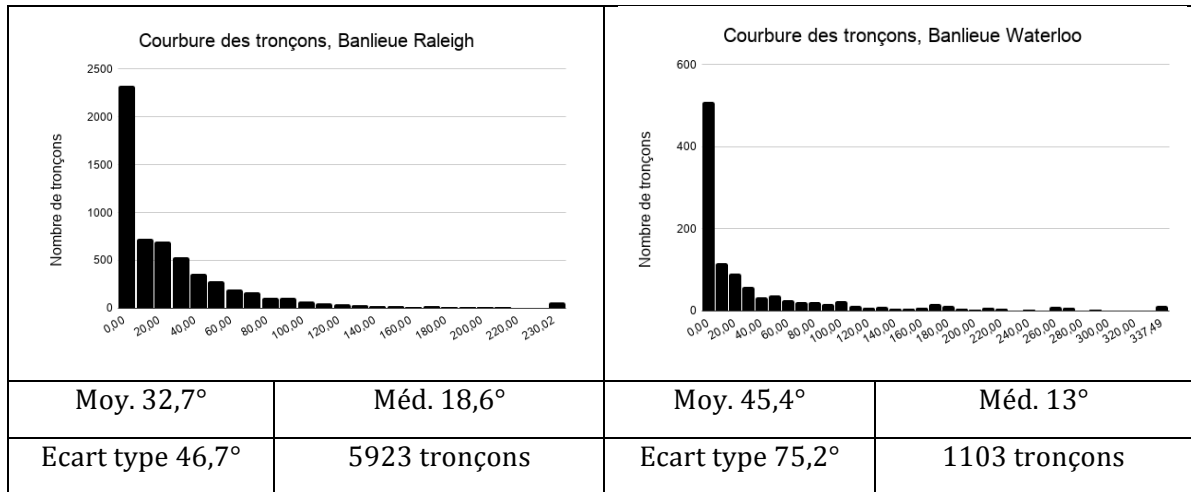


Figure 6.4 : Histogrammes de la courbure des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 10°. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

II.1.4. L'orientation cardinale des tronçons

Nous observons sur les histogrammes (figure 6.5) de l'orientation cardinale des tronçons des distributions bimodales pour chacun des six réseaux, avec deux modes distants de 90°. Cette bimodalité est plus ou moins marquée selon les cas. Elle est très présente dans les réseaux quadrillés de Détroit et Manhattan, où la quasi totalité des tronçons est orientée selon deux directions privilégiées, perpendiculaires entre elles. Elle est la moins visible dans le réseau viaire de la banlieue de Raleigh, où malgré la présence de deux modes (approximativement autour de 0° et 90°), de nombreux tronçons ont des orientations différentes.

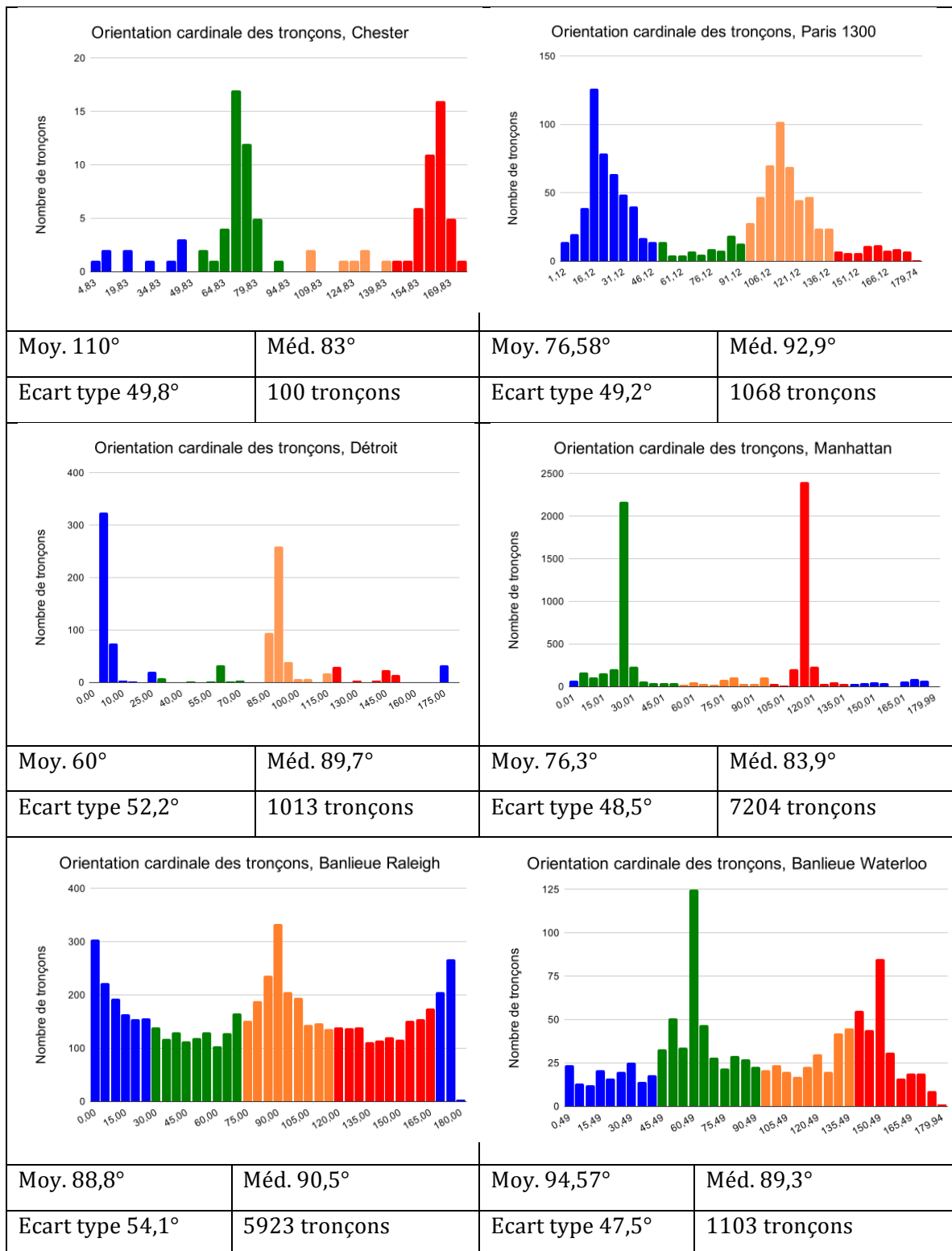


Figure 6.5 : Histogrammes de l'orientation cardinale des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 5°.

Nous avons discrétisé chacune des distributions statistiques en fonction de ses deux modes identifiés sur les histogrammes. La discrétisation s'est faite par classes d'amplitudes égales (45°) de telle sorte que les modes soient des centres de classe

(voir l'explication en section I.3). Chaque classe est représentée sur l'histogramme par une couleur différente. Pour évaluer la proportion de tronçons situés dans les deux classes modales d'une distribution (classes dont le centre correspond à l'un des modes), nous avons choisi d'utiliser la somme des fréquences simples de ces deux classes, ce qui correspond à un descripteur que nous avons appelé la concentration de l'orientation cardinale. Le tableau 6.4 ci-dessous indique ces concentrations pour les six réseaux.

Les valeurs indiquées dans le tableau 6.4 sont assez proches pour les réseaux organiques et les réseaux quadrillés : ces réseaux présentent des orientations privilégiées de leurs tronçons, comme on peut le voir sur les cartes de la figure 6.6 (pour le cas de Chester, Paris et Détroit). On constate que le réseau de Détroit présente une plus faible concentration que celui de Manhattan. Cela peut s'expliquer par les écarts que présente le réseau de Détroit par rapport à un quadrillage régulier, notamment les voies radiales tracées par Woodward dans le plan initial de la ville, et qui introduisent plusieurs autres orientations dans le réseau (cf figure 6.6). Les réseaux arborescents de leur côté ont les orientations les moins concentrées : leurs tronçons ont les orientations les plus variées (cf figure 6.6, le cas de la banlieue de Raleigh).

Réseaux	Concentration de l'orientation
Chester	0,83
Paris	0,83
Détroit	0,84
Manhattan	0,88
Banlieue Raleigh	0,64
Banlieue Waterloo	0,68

Tableau 6.4 : Valeurs de la concentration de l'orientation cardinale des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.

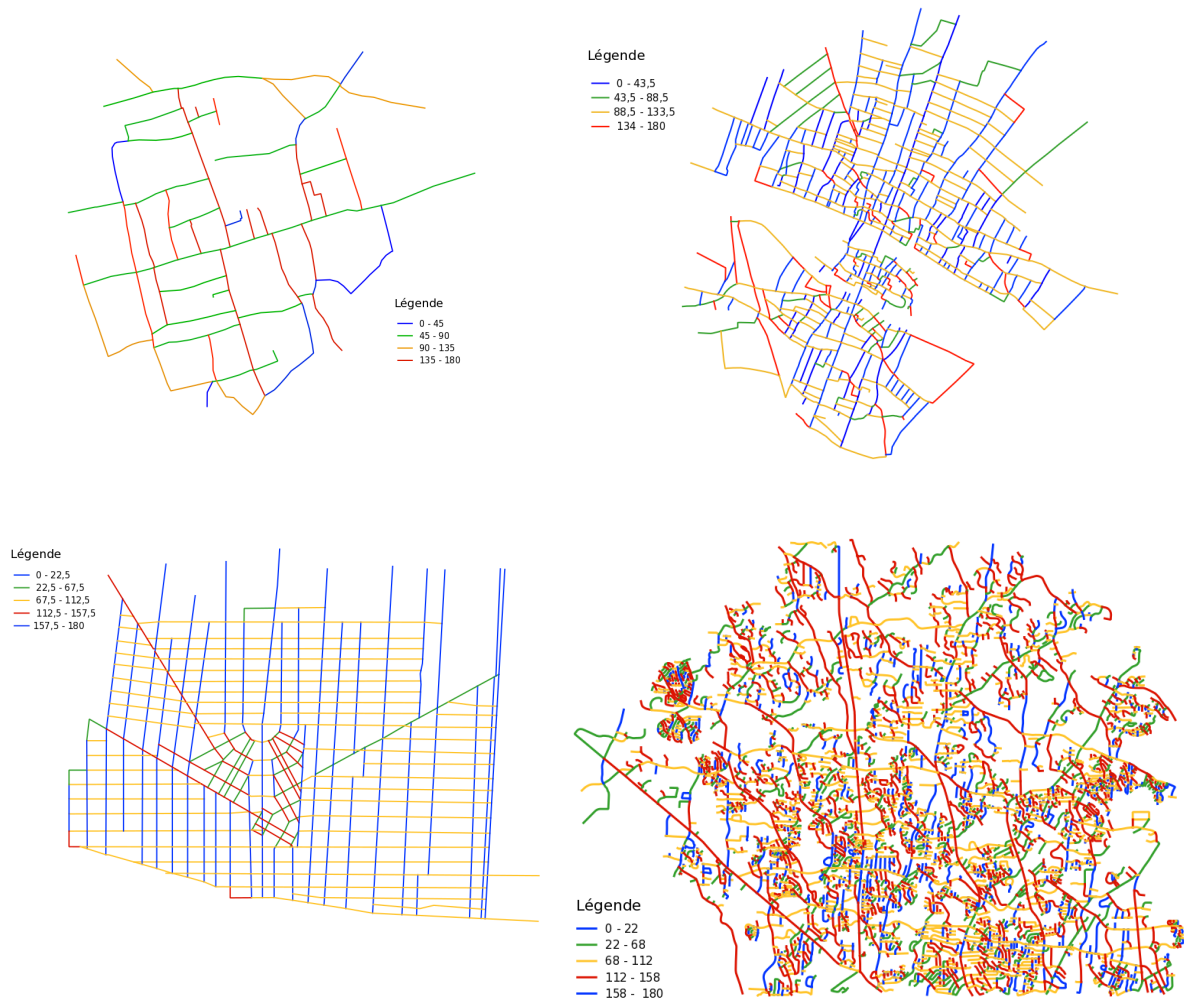


Figure 6.6 : Cartes de l'orientation cardinale des tronçons pour les réseaux (de gauche à droite et de haut en bas) de Chester, Paris en 1300, Détroit et la banlieue de Raleigh. Chaque couleur correspond à une classe construite selon la discrétisation décrite dans le texte. Elle est la même que sur les histogrammes.

II.1.5. La longueur des tronçons

Les histogrammes de la figure 6.7 permettent de décrire la distribution statistique de la longueur des tronçons, pour les six réseaux du corpus 1. Ils ont été construits selon des classes d'amplitudes égales, de 10 mètres, pour l'ensemble des réseaux. Ces histogrammes montrent des distributions de la longueur des tronçons dissymétriques à gauche sur l'ensemble des cas d'étude. On observe une majorité de tronçons courts, et quelques tronçons longs. Ce résultat a souvent été décrit dans la littérature (Griffiths, 2009; Gudmundsson & Mohajeri, 2013; Lagesse et al., 2015). Les distributions sont donc globalement unimodales. Cette forme de distribution a été décrite par Crucitti et al (2006) (cf chapitre 4) pour les réseaux de type organique (qu'ils qualifient d'auto-organisés). En revanche, pour les réseaux quadrillés (dans leur cas Los Angeles et Richmond), Crucitti et ses collègues

trouvent des distributions multimodales, avec plusieurs pics correspondant aux dimensions du quadrillage de ces villes (longueur et largeur des mailles). Dans notre cas, ces multiples pics sont légèrement visibles sur l’histogramme de Manhattan : le mode principal se situe autour de 80 mètres, ce qui correspond à la largeur des mailles du réseau, mais des pics autour de 150 mètres et 260 mètres sont également visibles, correspondant à la longueur des mailles (cette longueur est variable à Manhattan). De tels pics sont moins visibles sur l’histogramme du réseau de Détroit, car son quadrillage est à maille carrée : la longueur et la largeur des mailles sont très proches.

En résumant par une valeur de référence la longueur des tronçons à l’échelle des réseaux, on parvient à identifier des différences entre ces réseaux. La moyenne et la médiane de la longueur des tronçons sont les plus élevées dans les réseaux arborescents de la banlieue de Raleigh et de Waterloo. Cela s’explique par la forte proportion de tronçons longs que comprennent ces réseaux : comme on le voit sur la figure 6.8, la majorité des tronçons dans la banlieue de Waterloo ont une longueur supérieure ou égale à 200 mètres. On constate également que le réseau viaire parisien se distingue des autres réseaux par sa faible longueur moyenne et médiane. Cela s’explique par le grand nombre de tronçons courts, de moins de 50 mètres, dans ce réseau (cf figure 6.8).

Moy. 107 m	Méd. 85,5 m	Moy. 69 m	Méd. 52 m
Ecart type 78 m	100 tronçons	Ecart type 64,8 m	1068 tronçons
Moy. 114,4 m	Méd. 105,3 m	Moy. 118,3 m	Méd. 84,7 m
Ecart type 69,9 m	1013 tronçons	Ecart type 79,9 m	7204 tronçons

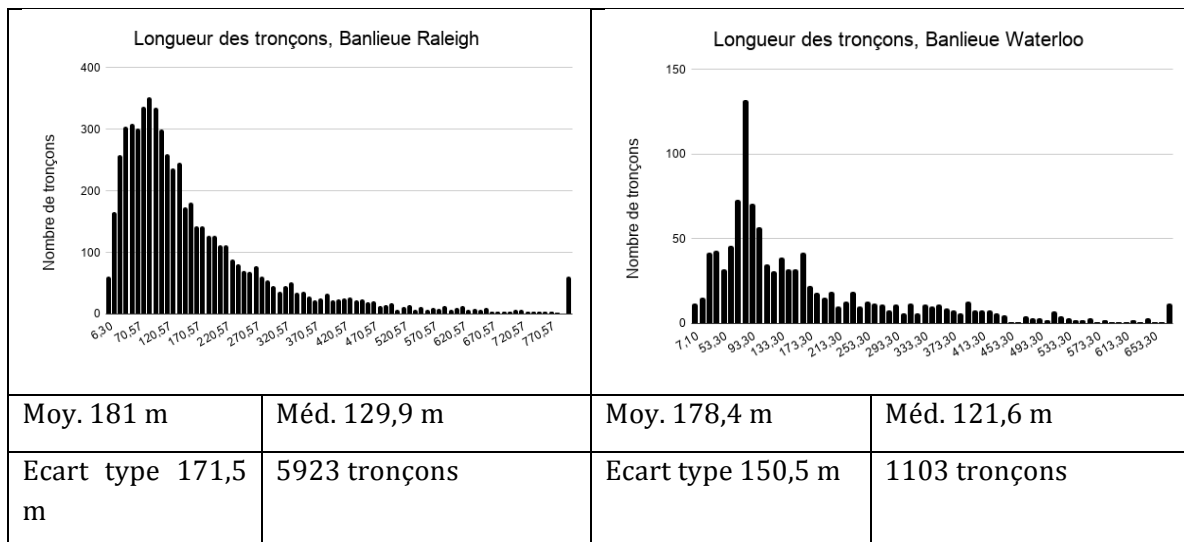


Figure 6.7 : Histogrammes de la longueur des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 10 mètres. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

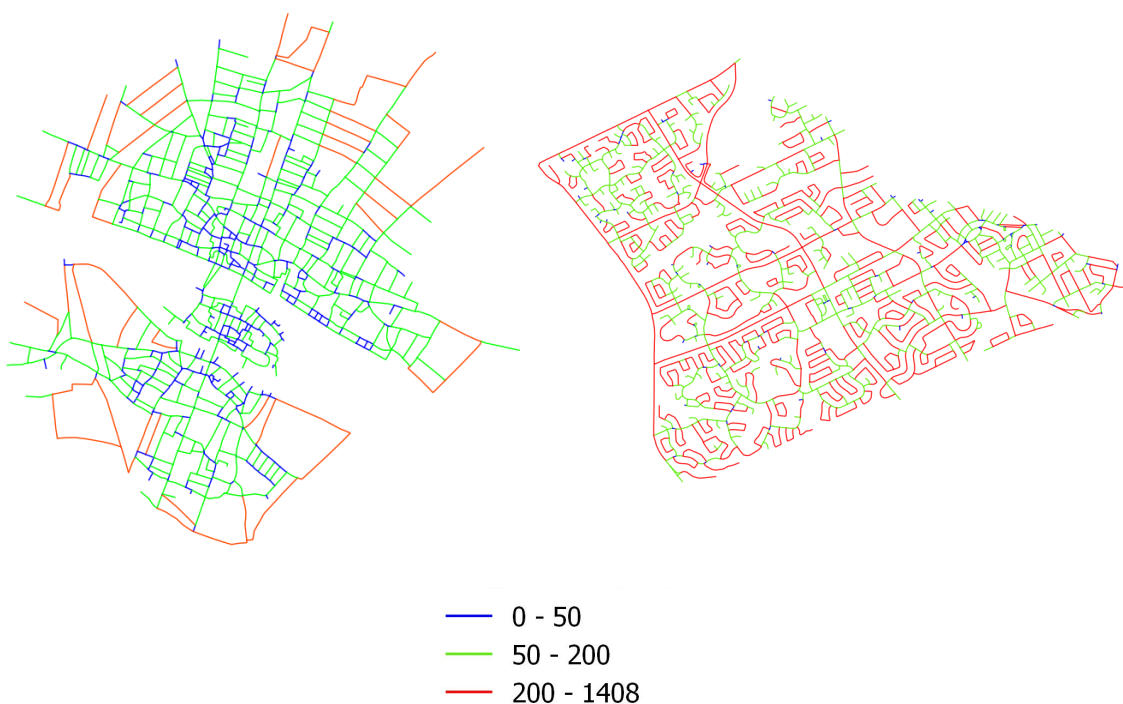


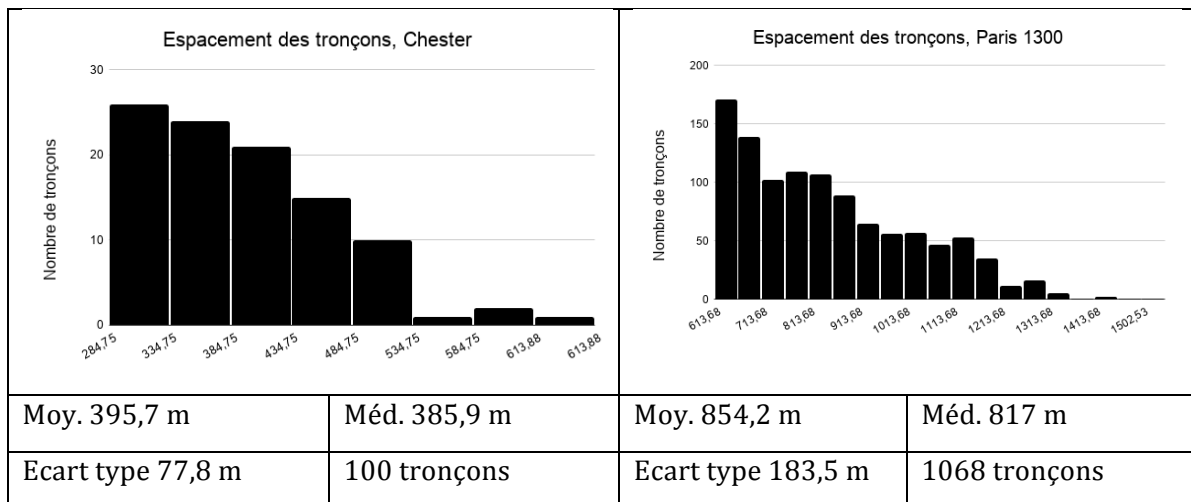
Figure 6.8 : Cartes de la longueur des tronçons, discrétisée en trois classes, pour le réseau de Paris (gauche) et celui de la banlieue de Waterloo (droite). A Paris, les tronçons de plus de 200 mètres (en rouge) sont peu nombreux, alors qu'ils sont majoritaires dans la banlieue de Waterloo.

II.1.6. L'espacement des tronçons

Les histogrammes de la figure 6.9 représentent la distribution statistique de l'espacement des tronçons, pour les six réseaux du corpus 1. Ces histogrammes ont été construits selon des classes d'amplitudes égales, de 50 mètres, pour l'ensemble des réseaux. Ainsi, chaque barre sur les histogrammes correspond à une amplitude de 50 mètres.

On observe que l'espacement des tronçons présente une distribution dissymétrique à gauche sur chacun des cas d'étude. Une majorité de tronçons sont proches des autres tronçons (en considérant les distances à vol d'oiseau), et quelques tronçons sont éloignés des autres. Les valeurs centrales (moyenne et médiane) nous permettent de constater de fortes différences dans l'ordre de grandeur de l'espacement, entre un réseau et un autre. Les réseaux de Manhattan et de la banlieue de Raleigh ont un espacement moyen et médian de plusieurs milliers de mètres, tandis que le réseau de Chester a un espacement moyen et médian de moins de 400 m. Ces différences s'expliquent par les différences de superficie et de nombre de tronçons entre les réseaux de ce corpus : plus un réseau est étendu et comprend de tronçons, plus les distances à vol d'oiseau entre ses tronçons seront élevées, donc plus l'espacement de ses tronçons sera globalement élevé. Il y a donc un effet de la taille du réseau sur ce descripteur.

Nous ne présentons pas les cartes de l'espacement des tronçons, car celles-ci présentent toutes un gradient centre-périphérie. Ce résultat était attendu : le barycentre du réseau étant le lieu le plus proche, à vol d'oiseau, de tous les autres, les tronçons situés près de ce barycentre ont l'espacement le plus faible. Les tronçons éloignés de ce barycentre, donc en périphérie du réseau, ont l'espacement le plus élevé.



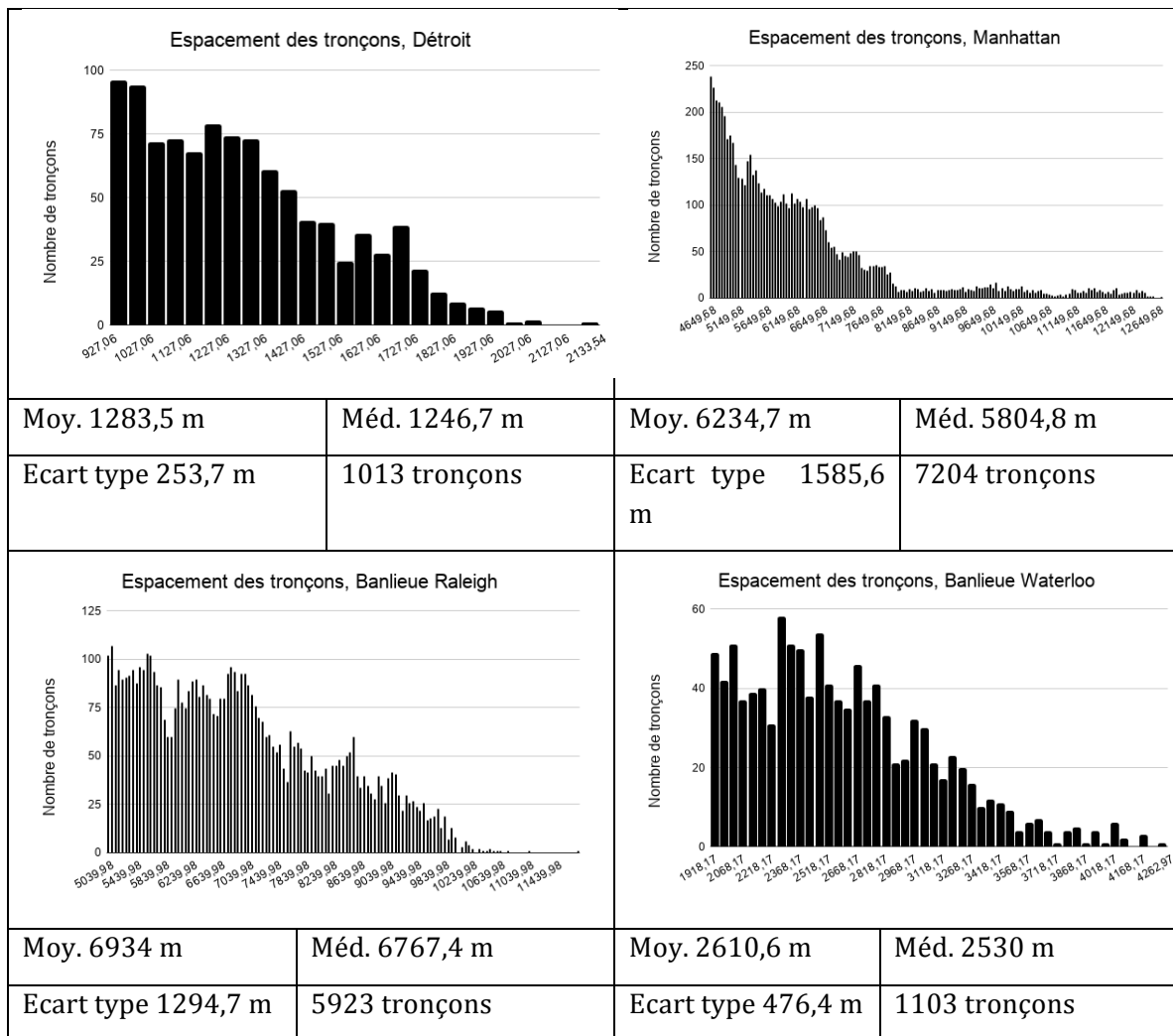


Figure 6.9 : Histogrammes de l'espace des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 50 mètres.

II.2. Résultats sur le réseau parisien entre 1790 et 1888 (corpus 2)

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus sur les réseaux du corpus 2, à savoir le réseau parisien en 1790, 1854, 1871 et 1888. Rappelons que nous étudions Paris dans l'enceinte de Fermiers Généraux (cf chapitre 5), ce qui nous permet de ne pas considérer la forte croissance de la superficie de la ville entre 1854 et 1871, croissance qui pourrait masquer l'évolution qui nous intéresse : celle due à la création de percées en étoile dans le réseau.

II.2.1. Le coefficient de maillage

Le tableau 6.5 indique le coefficient de maillage du réseau parisien aux quatre dates étudiées. On constate une augmentation de ce coefficient entre 1790 et 1871. Cela signifie que la connectivité du réseau augmente durant cette période. Le coefficient de maillage baisse ensuite très légèrement entre 1871 et 1888. Considérant la légère augmentation de ce descripteur, on constate que l'évolution survenue à la période haussmannienne (entre 1854 et 1871) est proche de celle de la première moitié du XIXe siècle.

Réseaux	Coefficient de maillage
Paris en 1790	0,26
Paris en 1854	0,29
Paris en 1871	0,33
Paris en 1888	0,3

Tableau 6.5 : Valeurs du coefficient de maillage pour les quatre réseaux du corpus 2.

II.2.2. Le degré des tronçons

Les histogrammes de la figure 6.11 représentent la distribution statistique du degré des tronçons, pour le réseau viaire parisien entre 1790 et 1888. Comme la taille du réseau augmente durant cette période, nous choisissons de décrire l'évolution de la part de chaque degré, en utilisant des graphiques en camembert (figure 6.10).

Le réseau viaire parisien en 1790 présente une part importante de tronçons de degré 4 et 5 (85%). Cela suggère une part importante d'intersections en T dans ce réseau, ce qui est confirmé par la carte des degrés présentée en figure 6.12. Entre 1790 et 1854, la part de ces tronçons de degré 4 et 5 baisse (cette dernière passe à 79%), alors que la part de tronçons de degré 6 augmente (de 9 à 15%) ainsi que celle, bien que plus légèrement, de tronçons de degré supérieur à 6 (en bleu sur les camemberts). Ce résultat suggère une augmentation de la part d'**intersections en X et en étoile** durant cette période. Une évolution similaire est observée entre 1854 et 1871 : baisse de la part de tronçons de degré 4 et hausse des tronçons de degré supérieur ou égale à 6. La part des tronçons de degré supérieur à 6 passe de 3 à 5% environ durant cette période. La figure 6.13 représente quelques exemples de ces tronçons de degré supérieur à 6 en 1854 et 1871. Cette période se caractérise également par une baisse de la part de tronçons de degré 2 (en rouge sur les camemberts), donc de tronçons en culs-de-sac.

La période entre 1871 et 1888 présente une évolution contraire à celle de la période précédente. La part des tronçons de degré 2 augmente légèrement (de 1 à 3%), ainsi que celle des tronçons de degré 4 (de 39 à 41%). Ce résultat suggère une légère hausse de la part des tronçons en culs-de-sac et des intersections en T durant cette période. A l'inverse, la part des tronçons de degré 6 baisse légèrement (de 19 à 17%), ce qui suggère une baisse de la part d'intersections en X dans le réseau.

L'évolution du degré moyen nous permet d'obtenir une synthèse de ces diverses évolutions. Le degré moyen du réseau parisien (cf figure 6.11) augmente entre 1790 et 1854 puis atteint son maximum en 1871 (4,9), ce qui s'explique par la hausse de la part de tronçons formant des intersections en X et en étoile, et la baisse de la part de tronçons en culs-de-sac et formant des intersections en T. L'évolution survenue entre 1871 et 1888 est contraire à celle des autres périodes. Le degré moyen baisse légèrement, ce qui peut s'expliquer par la création de culs-de-sac et d'intersections en T (tronçons de degré 2 et 4).

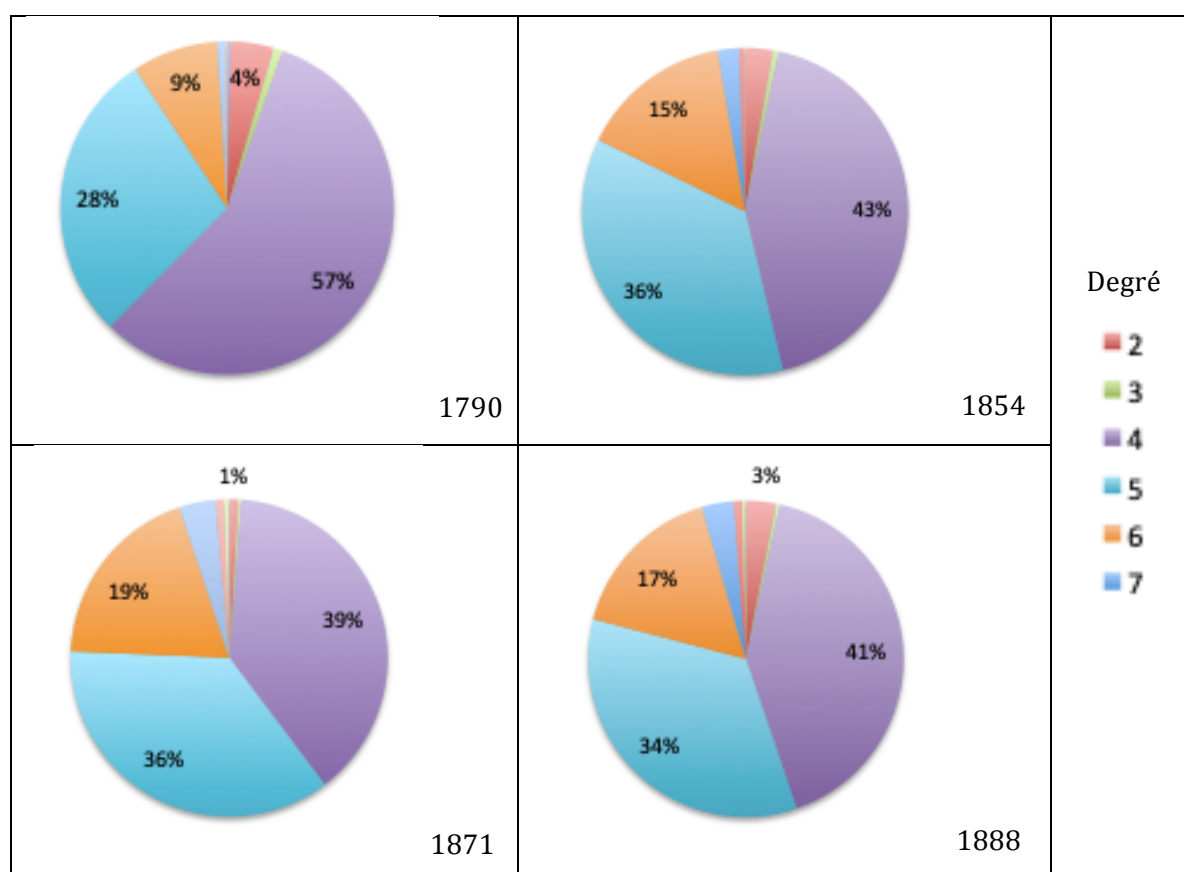


Figure 6.10 : Graphiques en camembert représentant la part de chaque degré dans le réseau viaire de Paris à différentes dates. Seuls les degrés suffisamment visibles sur les graphiques (du degré 2 au degré 7) sont indiqués dans la légende.

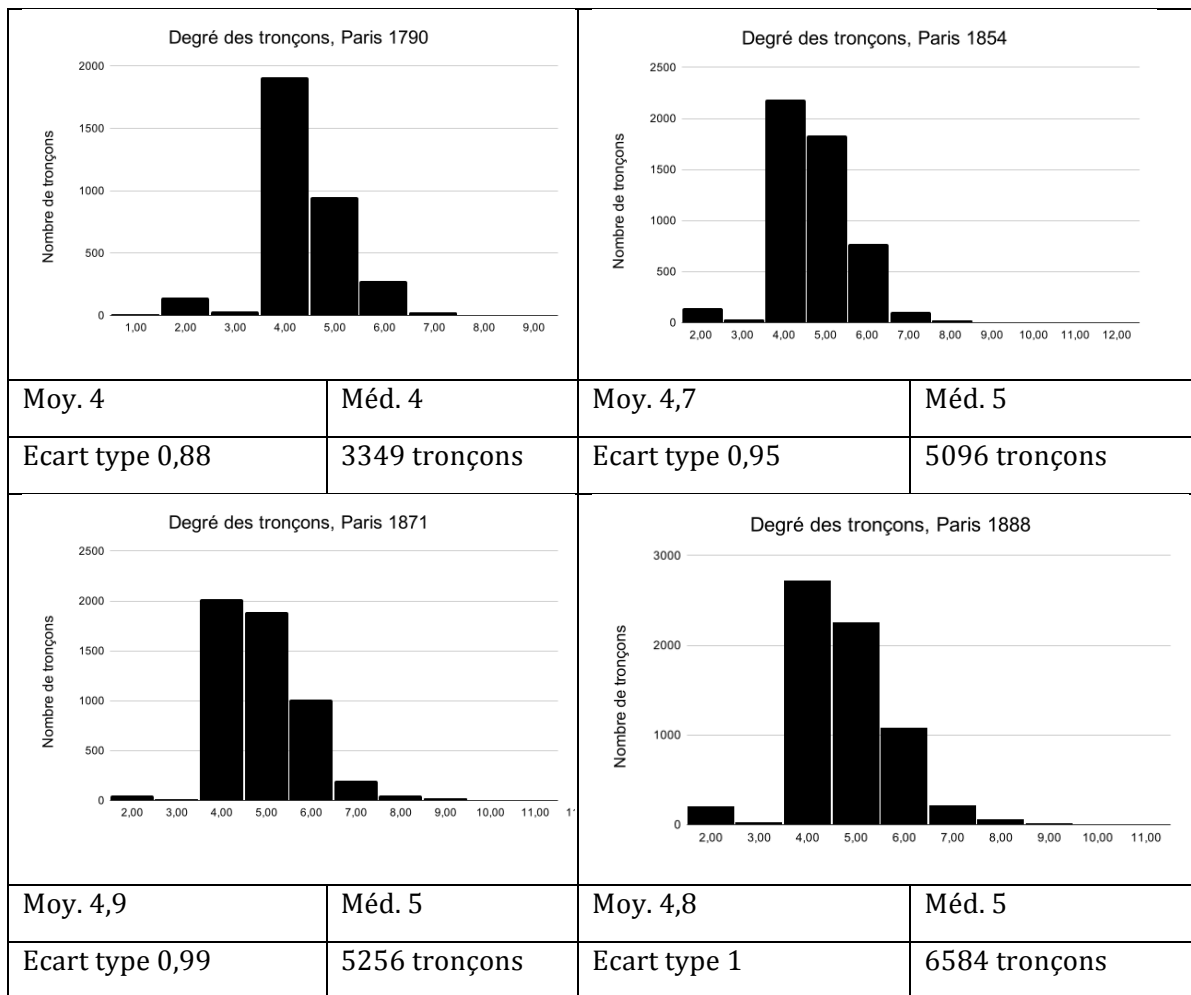


Figure 6.11 : Histogrammes du degré des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.



Figure 6.12 : Carte représentant les tronçons de degré 4 (en violet) du réseau viaire parisien en 1790. On constate qu'ils sont prédominants et qu'ils forment des intersections en T avec les autres tronçons.

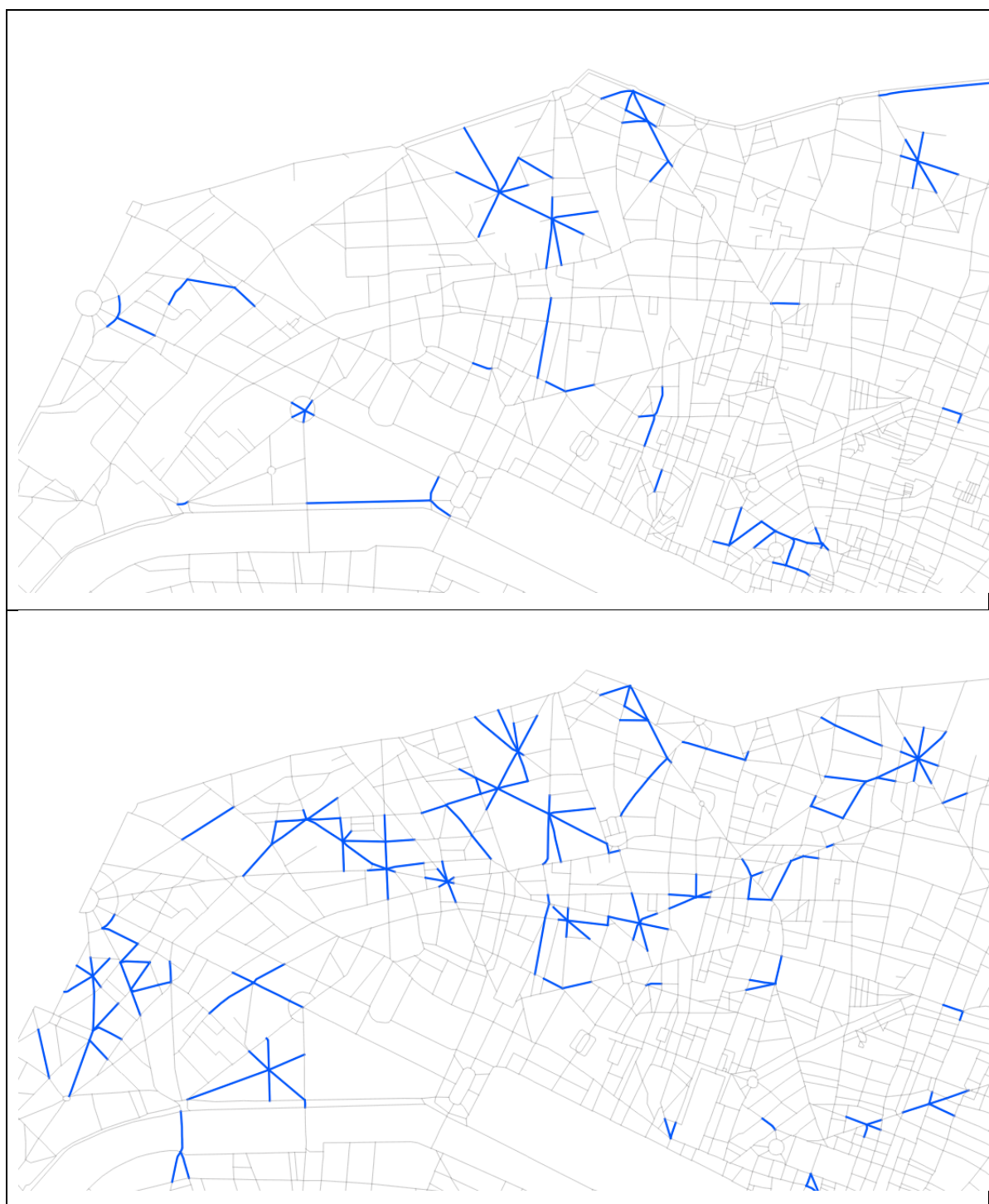


Figure 6.13 : Cartes représentant une partie du réseau viaire parisien en 1854 (haut) et en 1871 (bas), indiquant en bleu les tronçons de degré supérieur à 6. On constate que leur nombre augmente entre les deux dates.

II.2.3. La courbure des tronçons

Le réseau parisien aux quatre dates présente une majorité de tronçons parfaitement rectilignes, donc à la courbure nulle. Les histogrammes (figure 6.14) indiquent des

distributions dissymétriques à gauche, avec un pic de valeurs nulles où sont concentrés la grande majorité des tronçons, et quelques valeurs élevées correspondant à des tronçons courbes. La distribution spatiale de la courbure des tronçons ne montre pas de motif particulier, en raison de cette prédominance des valeurs nulles.

La valeur médiane de la courbure des tronçons est nulle pour les quatre réseaux considérés. La moyenne en revanche diminue entre 1790 et 1888 (de 15,9° à 7,1°). Cette différence entre moyenne et médiane suggère l'existence de valeurs extrêmes, donc de tronçons à la courbure élevée, qui font croître la courbure moyenne, sans avoir d'effet sur la médiane. La baisse observée dans la courbure moyenne entre 1790 et 1888 suggère une baisse de ces valeurs extrêmes.

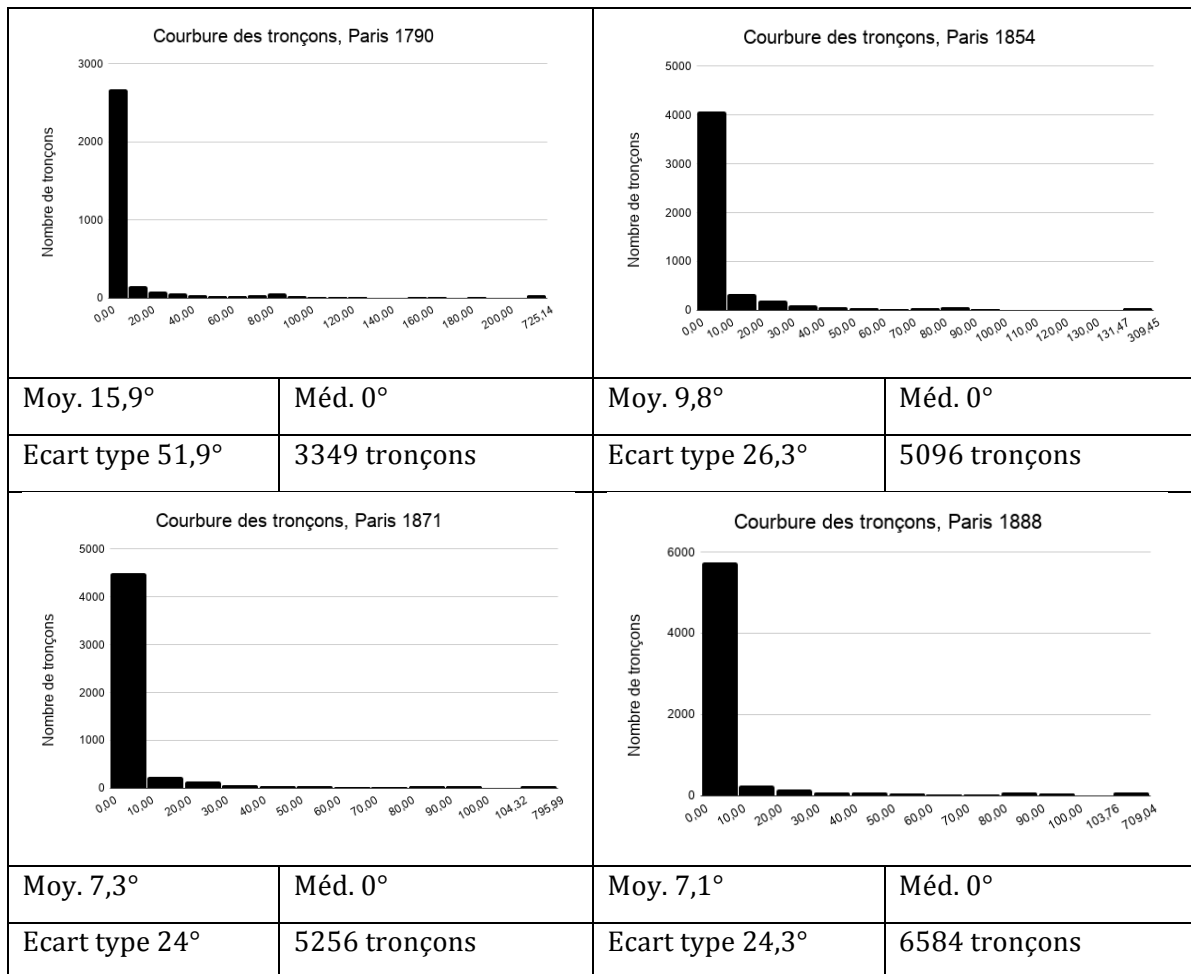
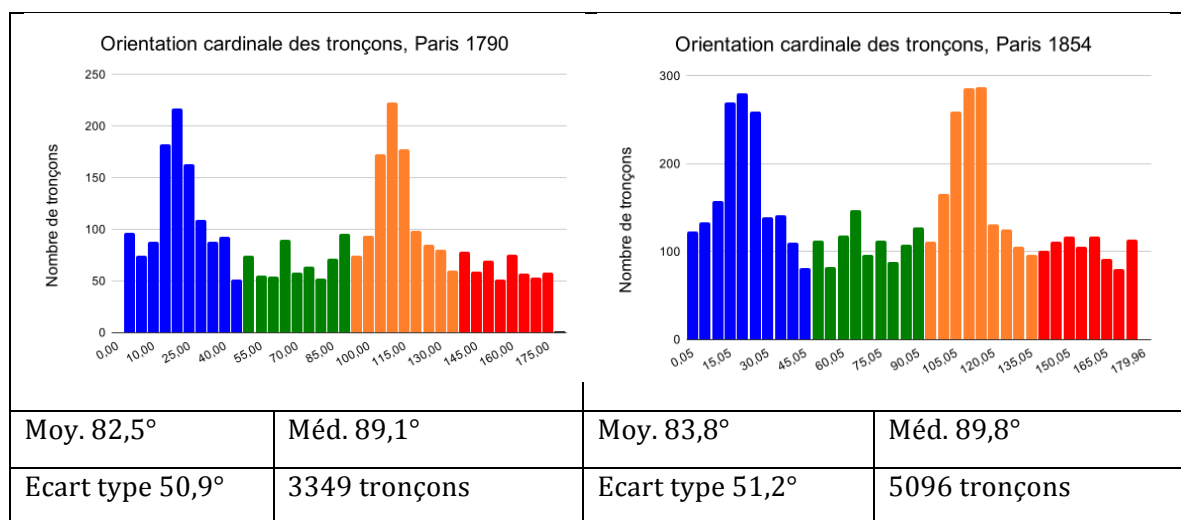


Figure 6.14 : Histogrammes de la courbure des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 10°. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

II.2.4. L'orientation cardinale des tronçons

Nous allons décrire l'évolution de l'orientation cardinale des tronçons dans le réseau viaire parisien, en nous basant d'une part sur sa distribution statistique et spatiale, et d'autre part sur les valeurs de l'indicateur que nous avons construit, la concentration de l'orientation cardinale (cf section I.3). Les valeurs de celle-ci sont indiquées dans le tableau 6.6.

L'orientation des tronçons dans le réseau viaire parisien présente une distribution bimodale aux quatre dates étudiées (cf figure 6.15). Le réseau en 1790 présente une concentration de l'orientation de ses tronçons autour de 21° et de 111° (classes bleu et orange sur l'histogramme). Ce résultat est proche de celui obtenu par Robert et al. (2013), qui ont analysé l'orientation cardinale du parcellaire parisien au début du XIXe siècle²⁰³. Ils ont ainsi montré qu'un grand nombre de parcelles avait une orientation comprise entre 16 et 30°²⁰⁴, ce qui correspond à l'orientation de l'axe nord-sud visible aujourd'hui encore dans le tissu parisien. Les auteurs regroupent dans cette classe de 16 à 30° les parcelles qui suivent cette orientation, mais aussi les parcelles perpendiculaires à cette orientation, qu'ils considèrent comme équivalentes aux premières. Cette classe de 16 à 30° correspond approximativement aux deux classes modales que nous avons identifiées pour l'orientation des tronçons du réseau parisien en 1790. En effet, l'orientation de 21° se situe dans l'intervalle 16-30°, et l'orientation de 111° est celle qui lui est perpendiculaire.



²⁰³ Ils ont utilisé des données SIG sur les parcelles créées à partir du Plan Vasserot, qui correspond à l'état du tissu urbain parisien entre 1810 et 1836.

²⁰⁴ Ils décrivent une orientation de 60-74° par rapport à l'est, ce qui correspond à 16-30° par rapport au nord.

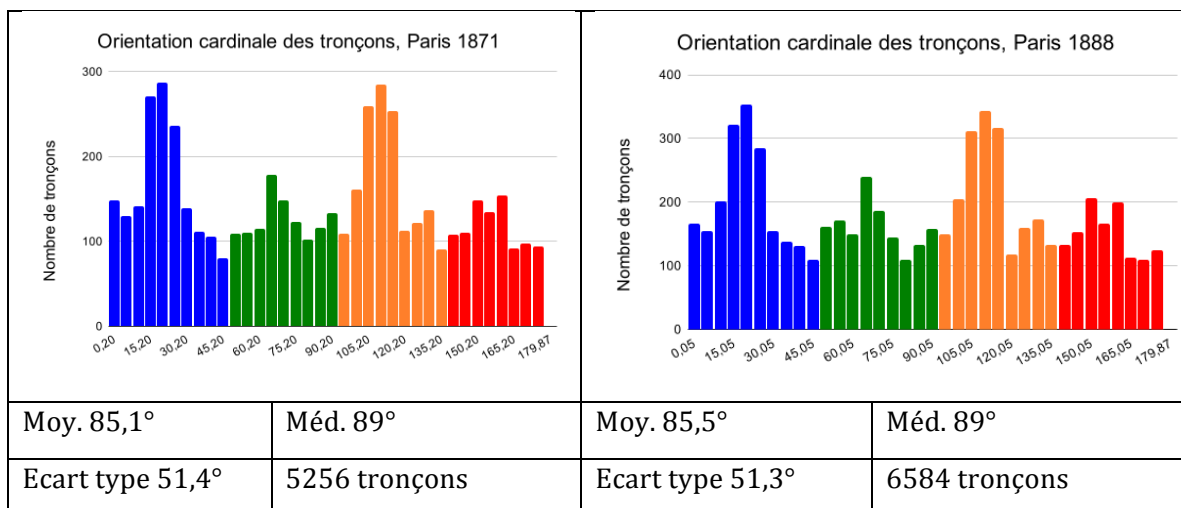


Figure 6.15 : Histogrammes de l'orientation cardinale des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 5°.

Nous constatons que ces deux orientations (21° et 111°) sont similaires à celles observées sur le réseau médiéval parisien de 1300 (en bleu et en orange sur la figure 6.16). Ce résultat est intéressant thématiquement car il montre la permanence de ces orientations, malgré le fait que 5 siècles séparent les deux réseaux. Cette permanence a été décrite par Robert et al. (2013). Selon eux, cette orientation était très présente sur la rive gauche dès la période antique, elle s'est ensuite **développée sur la rive droite à la période médiévale, puis a été renforcée à la période moderne (XVIe-XVIIIe siècles)**, avec le percement de voies telles que le boulevard Saint-Michel et le boulevard de Sébastopol. Ils en concluent que cette orientation du parcellaire à Paris ne s'est pas dégradée au fil du temps, mais qu'elle s'est au contraire renforcée.

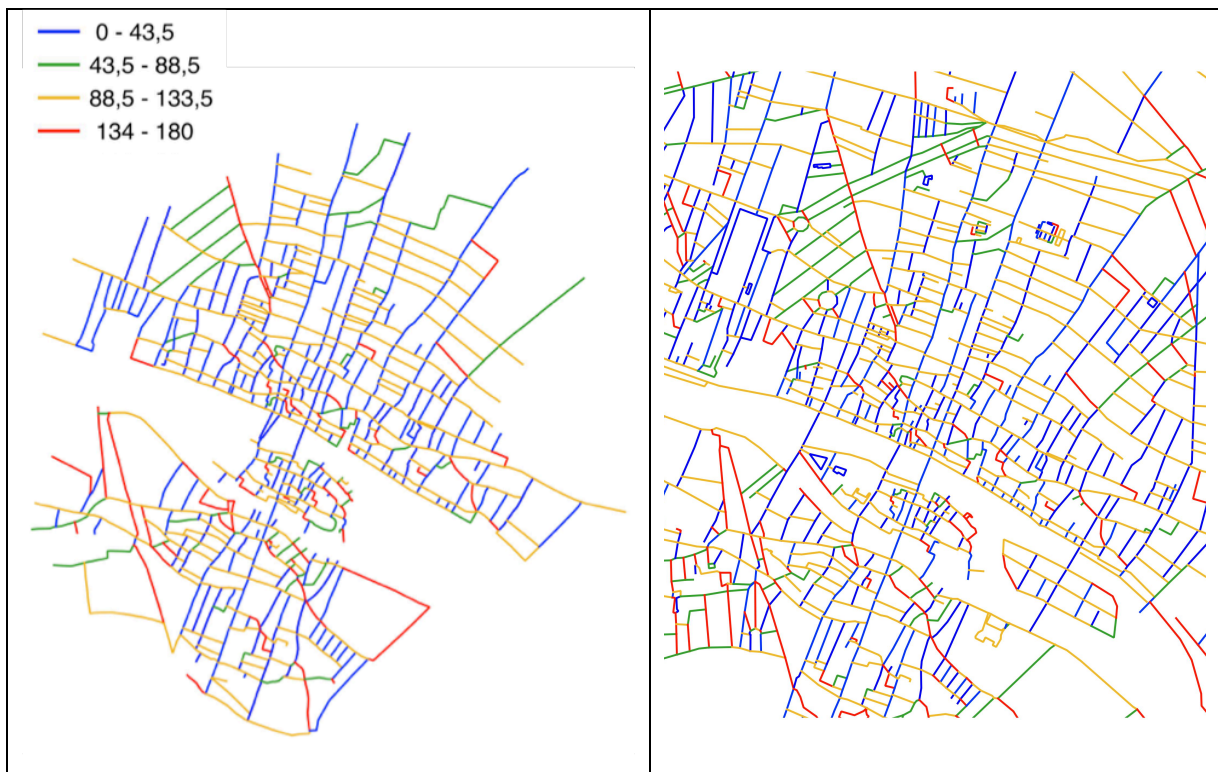


Figure 6.16 : Cartes de l'orientation cardinale des tronçons du réseau viaire parisien en 1300 (gauche) et en 1790 (droite). La carte de 1790 présente un zoom sur la partie centrale du réseau, afin de faciliter sa comparaison avec le réseau de 1300. La discrétisation choisie et les couleurs utilisées pour représenter chaque classe sont les mêmes que sur les histogrammes.

En 1854, les deux orientations modales identifiées en 1790, à savoir 21° et 111° demeurent visibles sur l'histogramme de la distribution statistique (cf figure 6.15). Néanmoins, la concentration de l'orientation baisse légèrement, passant de 0,65 à 0,63 (cf tableau 6.6), ce qui indique que l'orientation des tronçons se diversifie. Cette baisse s'accroît entre 1854 et 1871, pour finalement atteindre sa valeur la plus faible en 1888.

Les histogrammes illustrent cette diversification de l'orientation cardinale des tronçons entre 1790 et 1888. Les pics de la distribution sont nettement moins visibles sur l'histogramme de 1888 que sur celui de 1790. On constate qu'à partir de 1871 d'autres pics que ceux des classes modales apparaissent, un autour de 60° (en vert sur l'histogramme) et un autour de 160° (en rouge sur l'histogramme). Ces nouvelles orientations peuvent être liées aux percées haussmanniennes tracées entre 1854 et 1871. La carte de la figure 6.17 indique en vert et en rouge quelques percées dont l'orientation se situe autour de 60° et de 160° .

En conclusion, on observe entre 1790 et 1888 une baisse de la concentration de l'orientation des tronçons, autrement dit une diversification de leur orientation. Ce résultat avait été décrit par Barthelemy et al (2013), qui ont montré que les angles formés par les voies du réseau viaire parisien étaient beaucoup plus variés en 1888 qu'au début du XIXe siècle (cf chapitre 4).

Réseaux	Concentration de l'orientation
Paris en 1790	0,65
Paris en 1854	0,63
Paris en 1871	0,59
Paris en 1888	0,57

Tableau 6.6 : Valeurs de la concentration de l'orientation cardinale des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.

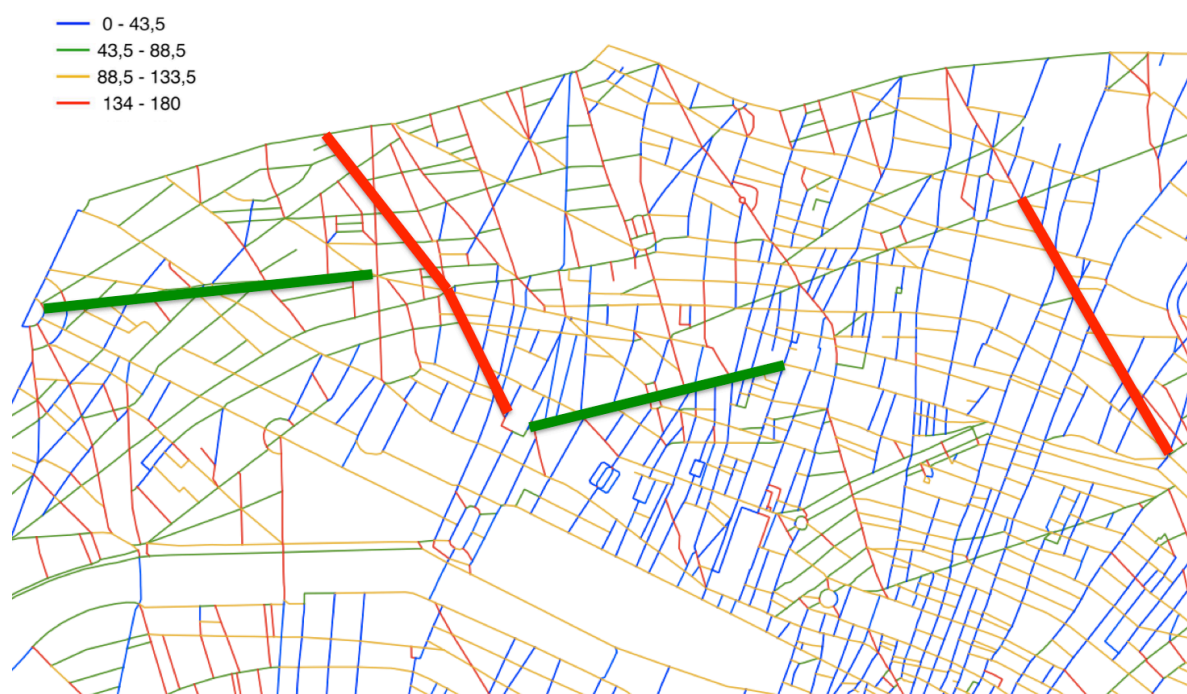


Figure 6.17 : Carte de l'orientation des tronçons, sur une partie du réseau viaire parisien en 1871. Sont indiquées en trait gros des percées tracées par Haussmann, dont l'orientation se situe autour de 60° (en vert) et autour de 160° (en rouge). De gauche à droite, on peut voir l'Avenue de Friedland, le Boulevard Malesherbes, le Boulevard de la Madeleine, et le Boulevard Magenta.

II.2.5. Longueur des tronçons

Comme pour les réseaux du premier corpus, nous observons des distributions statistiques de la longueur des tronçons dissymétriques à gauche. Une majorité de tronçons a une faible longueur, et quelques tronçons sont très longs (cf figure 6.18). Les valeurs centrales, à savoir la longueur moyenne et la longueur médiane, nous permettent de décrire l'évolution de la longueur des tronçons entre 1790 et 1888.

Elles présentent toute deux une baisse entre 1790 et 1854, une hausse entre 1854 et 1871, avant de baisser à nouveau entre 1871 et 1888. La hausse de la longueur moyenne et médiane est donc une spécificité de la période haussmannienne (1854-1871). Cela suggère que l'intervention d'Hausmann a globalement engendré une augmentation de la longueur des tronçons du réseau parisien.

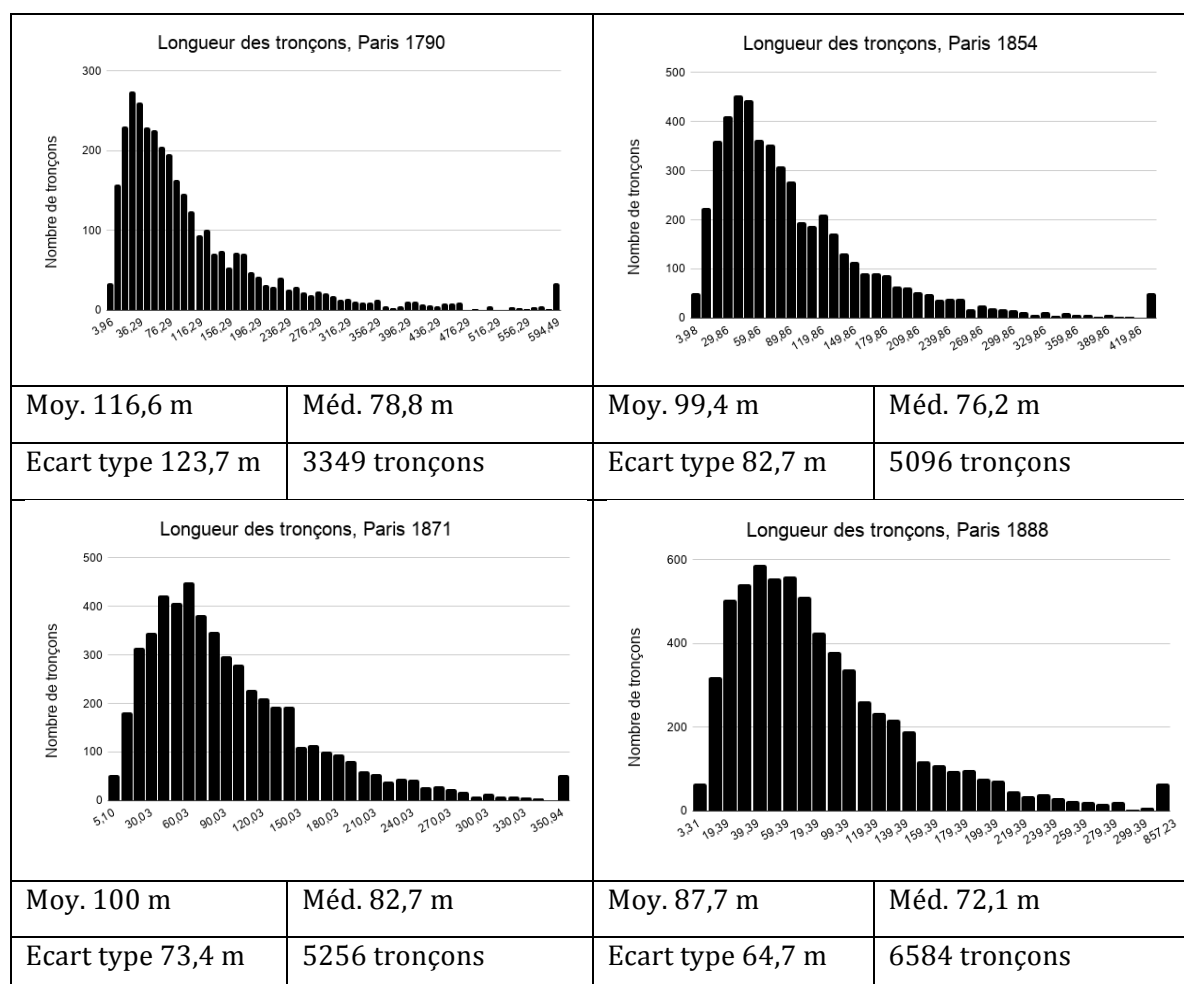


Figure 6.18 : Histogrammes de la longueur des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 10 mètres. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

II.2.6. Espacement des tronçons

L'espacement des tronçons présente une distribution dissymétrique à gauche sur les quatre réseaux parisiens de ce corpus (cf figure 6.19). Une majorité de tronçons sont proches (en considérant les distances à vol d'oiseau) des autres tronçons, tandis que quelques tronçons sont éloignés de l'ensemble des autres.

En observant les valeurs centrales de chaque distribution (moyenne et médiane), on constate que leur ordre de grandeur est similaire. Par ailleurs, ces valeurs centrales augmentent régulièrement sur l'ensemble de la période considérée, ce qui signifie que les tronçons du réseau parisien sont, globalement, de plus en plus espacés. Comme la superficie du réseau est stable sur l'ensemble de la période (nous avons considéré le réseau parisien situé à l'intérieur de l'enceinte des Fermiers Généraux), cette augmentation de l'espacement peut être due à l'augmentation du nombre de tronçons du réseau, qui passe de 3349 en 1790 à 6584 en 1888.

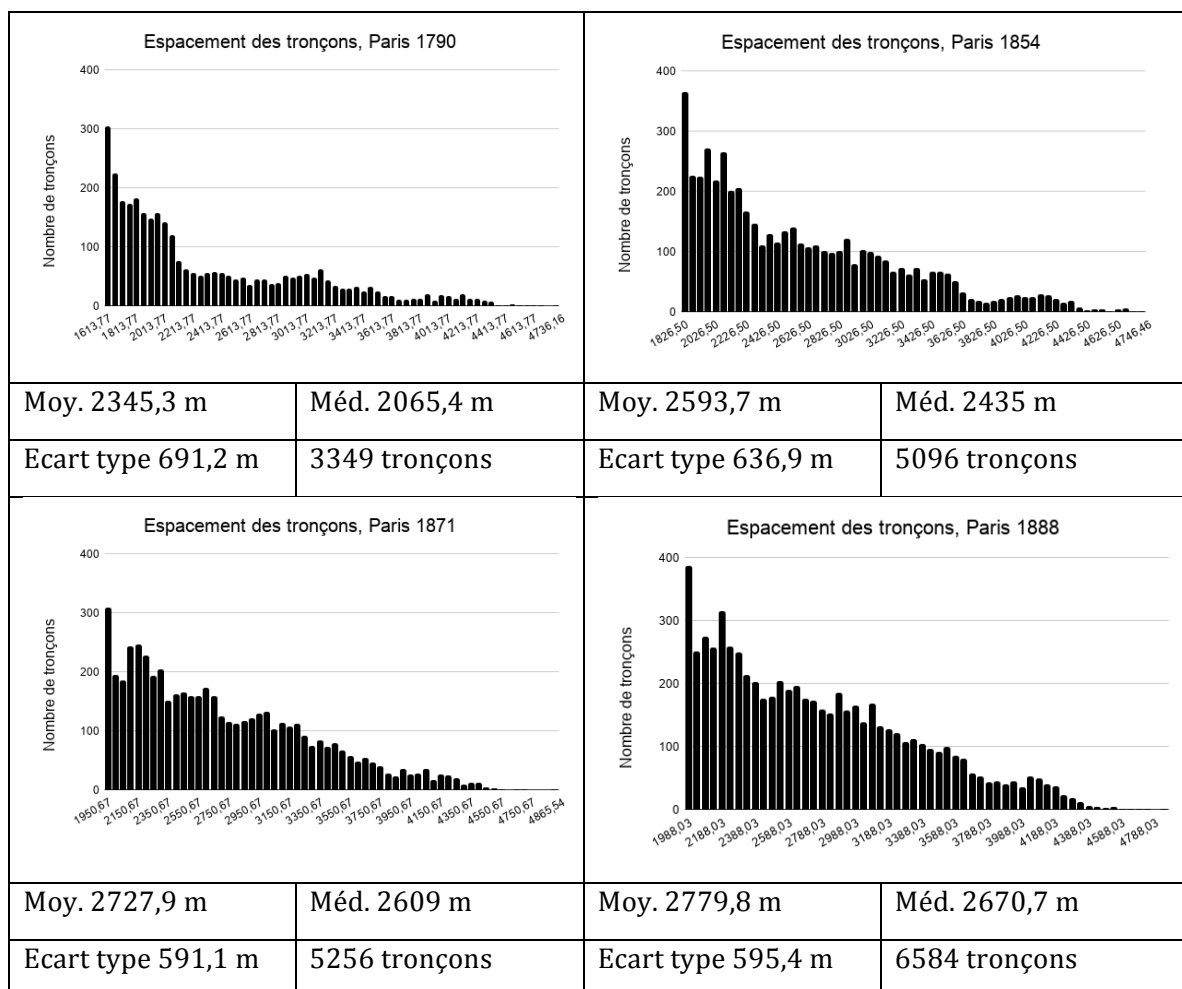


Figure 6.19 : Histogrammes de l'espacement des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 50 mètres.

Conclusion de la partie II

Dans cette partie, nous avons présenté les distributions statistiques, parfois spatiales, et les valeurs centrales de chaque descripteur morphologique, pour l'ensemble des réseaux des deux corpus. Nous avons pu grâce à cela décrire précisément chaque réseau, et montrer en quoi **cette description apportait des éléments de mesure à des phénomènes intéressants d'un point de vue thématique**. Nous avons par exemple montré que le réseau parisien en 1300 se

caractérisait par une forte proportion de tronçons très courts (la moitié de ses tronçons font moins de 52 mètres), donc par un maillage très fin qui n'a pas été observé dans les autres réseaux étudiés. Nous avons également pu quantifier la diversification de l'orientation cardinale des tronçons dans le réseau viaire parisien entre 1790 et 1888.

Nous constatons que l'utilisation de valeurs de référence permet de passer d'un descripteur de tronçons à un descripteur de réseaux appréhendés dans leur globalité, et ainsi de positionner les réseaux les uns par rapport aux autres. Toutefois, cette méthode pose la question du choix de la valeur de référence utilisée. Nous constatons que les distributions statistiques des descripteurs morphologiques utilisés présentent souvent des formes dissymétriques à gauche. C'est le cas pour la courbure des tronçons, leur longueur et leur espacement. Cela nous incite à conclure que la médiane est une valeur centrale plus pertinente que la moyenne pour résumer ces descripteurs à l'échelle des réseaux. Nous aurons donc recours à la médiane pour ces descripteurs. Toutefois, nous présentons les résultats obtenus avec la moyenne en annexe C.

Concernant l'orientation cardinale des tronçons, nous aurons recours à l'indicateur spécifique que nous avons développé pour rendre compte de la plus ou moins grande diversité de cette orientation dans un réseau. Il s'agit de la concentration de l'orientation cardinale.

Enfin, pour ce qui est du degré des tronçons, nous choisissons de le résumer par sa moyenne. Ce choix est motivé d'une part par le fait que le degré est une variable discrète, très peu étalée, et d'autre part parce que le degré moyen est traditionnellement utilisée dans la littérature en analyse de réseaux, pour résumer le degré des sommets à l'échelle d'un graphe.

Dans la partie III ci-dessous, nous allons utiliser ces valeurs de référence pour positionner les réseaux viaires, au sein de chacun des corpus, les uns par rapport aux autres. Toutefois, cette fois-ci l'objectif ne sera pas de décrire chaque réseau en tant que tel, mais plutôt chaque type, en identifiant ce qui le distingue des autres. Pour les réseaux du corpus 1, nous allons rechercher en quoi les réseaux appartenant à chaque type se distinguent de ceux appartenant aux autres types. Pour les réseaux du corpus 2, nous allons rechercher en quoi la période haussmannienne se distingue des autres périodes.

III. Une description des réseaux viaires par type

Rappelons que le corpus 1 est composé de deux réseaux de type organique (Chester et Paris), deux réseaux de type quadrillé (Déroit et Manhattan), et deux réseaux de

type arborescent (la banlieue de Raleigh et celle de Waterloo). Pour ce corpus, l'objectif de cette partie sera de montrer, grâce aux valeurs de référence choisies :

- en quoi les deux réseaux organiques susmentionnés présentent des caractéristiques morphologiques similaires, qui les distinguent de celles des réseaux appartenant aux deux autres types ;
- en quoi les réseaux quadrillés du corpus présentent des caractéristiques morphologiques similaires, qui les distinguent de celles des deux autres types ;
- et enfin, en quoi les réseaux arborescents du corpus présentent des caractéristiques morphologiques similaires, différentes de celles des deux autres types.

Dit autrement, nous allons **rechercher les spécificités des réseaux organiques, celles des réseaux quadrillés, et celles des réseaux arborescents.**

Rappelons également que le corpus 2 comprend Paris à quatre dates différentes : 1790, 1854, 1871 et 1888. Pour ce corpus, l'objectif de cette partie sera de montrer, grâce aux valeurs de référence choisies, en quoi le réseau viaire à la période haussmannienne (1854-1871) présente une évolution de ses caractéristiques morphologiques différente de l'évolution observée aux autres périodes. Nous allons donc **rechercher les spécificités de la période haussmannienne (en termes d'évolution des caractéristiques morphologiques).**

Nous allons également confronter au fur et à mesure ces spécificités (identifiées pour chaque type et pour la période haussmannienne) aux caractéristiques morphologiques décrites par connaissances thématiques dans la littérature, et que nous avons synthétisé dans le tableau 6.1.

III.1. Les caractéristiques morphologiques de chaque type de réseau du corpus 1

Nous allons nous demander dans cette section : **quelles sont les caractéristiques morphologiques qui distinguent chaque type de réseau des autres ?** Nous représentons dans les graphiques ci-dessous les descripteurs morphologiques, résumés par leur valeur de référence²⁰⁵. Nous choisissons de représenter ces descripteurs deux à deux, l'un sur l'axe des abscisses, l'autre sur l'axe des ordonnées (cf figure 6.20). Les réseaux de même type ont des couleurs proches sur le graphique : rouge/orange pour les réseaux organiques, vert pour les réseaux quadrillés, et bleu pour les réseaux arborescents.

²⁰⁵ Comme indiqué en conclusion de la partie II, nous utilisons dans la plupart des cas la médiane des descripteurs, et présentons les résultats obtenus avec la moyenne en annexe C.

Les réseaux organiques ont en commun avec les réseaux arborescents un coefficient de maillage et un degré moyen plus faibles que ceux des réseaux quadrillés. Par ailleurs, les réseaux organiques se distinguent par un espacement médian plus faible que celui des autres réseaux, ce qui indique que leurs tronçons sont rapprochés. Ce résultat sur l'espacement correspond à ce qui est décrit dans les connaissances thématiques (cf tableau 6.1).

Les réseaux quadrillés se distinguent des deux autres types par une connectivité et un degré moyen bien plus élevé. Ils ont souvent des tronçons de degré 6, formant des intersections en X. Ces réseaux se distinguent également par une courbure médiane nulle, qui décrit la rectitude de leurs tronçons. Enfin, l'orientation de leurs tronçons est plus concentrée que celle des autres réseaux, ce qui indique que leurs tronçons suivent des directions privilégiées. L'ensemble de ces résultats était attendu au vu des connaissances thématiques indiquées dans le tableau 6.1.

Les réseaux arborescents se distinguent des deux autres types par une forte courbure médiane, une faible concentration de l'orientation, et une forte longueur médiane de leurs tronçons. Dit autrement, ils se distinguent des autres réseaux par des tronçons plus longs, plus courbes et orientés dans des directions plus variées. Seul le résultat sur la forte courbure des tronçons était décrit dans les connaissances thématiques présentées dans le tableau 6.1.

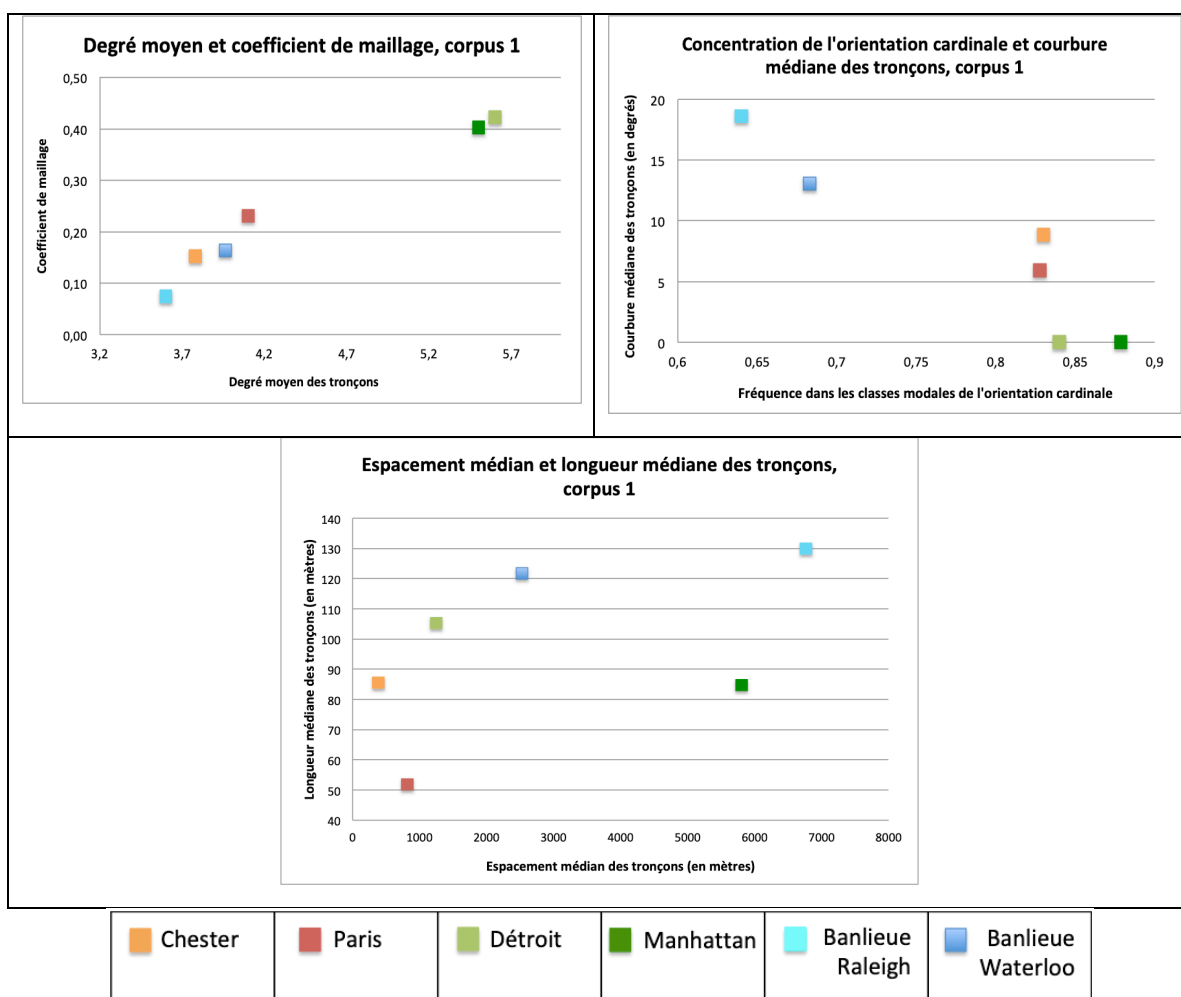


Figure 6.20 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de références des descripteurs morphologiques. Sont représentés : en haut à gauche le degré moyen et le coefficient de maillage ; en haut à droite, la concentration de l'orientation et la courbure médiane ; en bas, l'espacement médian et la longueur médiane. Chaque point coloré correspond à un réseau.

III.2. L'évolution des caractéristiques morphologiques suite à l'intervention d'Hausmann

Dans cette section, nous allons nous demander : **quelles sont les caractéristiques morphologiques qui distinguent la période haussmannienne des autres ?** Nous représentons dans les graphiques ci-dessous l'évolution des descripteurs morphologiques, résumés par leur valeur de référence, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888 (cf figure 6.21).

En comparant la période haussmannienne (1854-1871) à la période qui l'a précédée et à celle qui l'a suivie, nous constatons que cette période se distingue par une **forte hausse du degré moyen et de la connectivité du réseau, une forte baisse de la**

concentration de l'orientation, et une hausse de la longueur médiane des tronçons. La courbure médiane est nulle sur l'ensemble de la période étudiée. Les voies étaient fortement rectilignes dès 1790 et le sont restées²⁰⁶. De son côté, l'espacement médian présente la même évolution à la période haussmannienne qu'aux autres périodes.

La croissance du degré moyen et la diversification de l'orientation des tronçons correspondent à l'évolution attendue par connaissances thématiques, lors de la création de percées configurées en étoile. Ces percées configurées en étoile créent des intersections en étoile, ce qui se répercute sur le degré des tronçons, et donc sur le degré moyen du réseau. Par ailleurs, ces percées configurées en étoile prennent des directions variables, ce qui engendre une plus grande variabilité dans l'orientation cardinale des tronçons.

Toutefois, nous observons que cette évolution était déjà en cours entre 1790 et 1854, dans une moindre mesure. **La période haussmannienne apparaît dès lors comme une période d'intensification d'une évolution qui avait débuté dès le début du XIXe siècle.** Ce résultat est décrit dans la littérature. En effet, comme nous l'avons indiqué en chapitre 5, l'intervention d'Hausmann se caractérise par son envergure (70 percements de voies nouvelles en vingt ans selon Pinon et Le Boudec), mais plusieurs lotissements de la première moitié du XIXe siècle avaient eux aussi été conçus selon le vocabulaire des percées configurées en étoile. C'est le cas notamment du quartier de l'Europe à l'ouest, et du nouveau quartier Poissonnière au nord.

La croissance de la longueur médiane des tronçons durant la période haussmannienne n'était pas attendue, car la croissance de la longueur des tronçons n'est pas une évolution décrite dans la littérature consultée, comme faisant suite à la création de percées en étoile dans un réseau. De plus, il ne s'agit pas là de l'intensification d'une évolution qui avait lieu dans la première moitié du XIXe siècle, mais d'une évolution contraire à celle des autres périodes. Ce résultat suggère que durant la période haussmannienne, les tronçons du réseau viaire parisien sont globalement devenu plus longs qu'aux périodes précédentes. Cela peut être dû soit à une augmentation de la longueur de tronçons existants, soit par la création de nouveaux tronçons plus longs dans le réseau.

²⁰⁶ C'est pourquoi nous ne représentons pas la courbure médiane sur les graphiques de la figure 6.21.

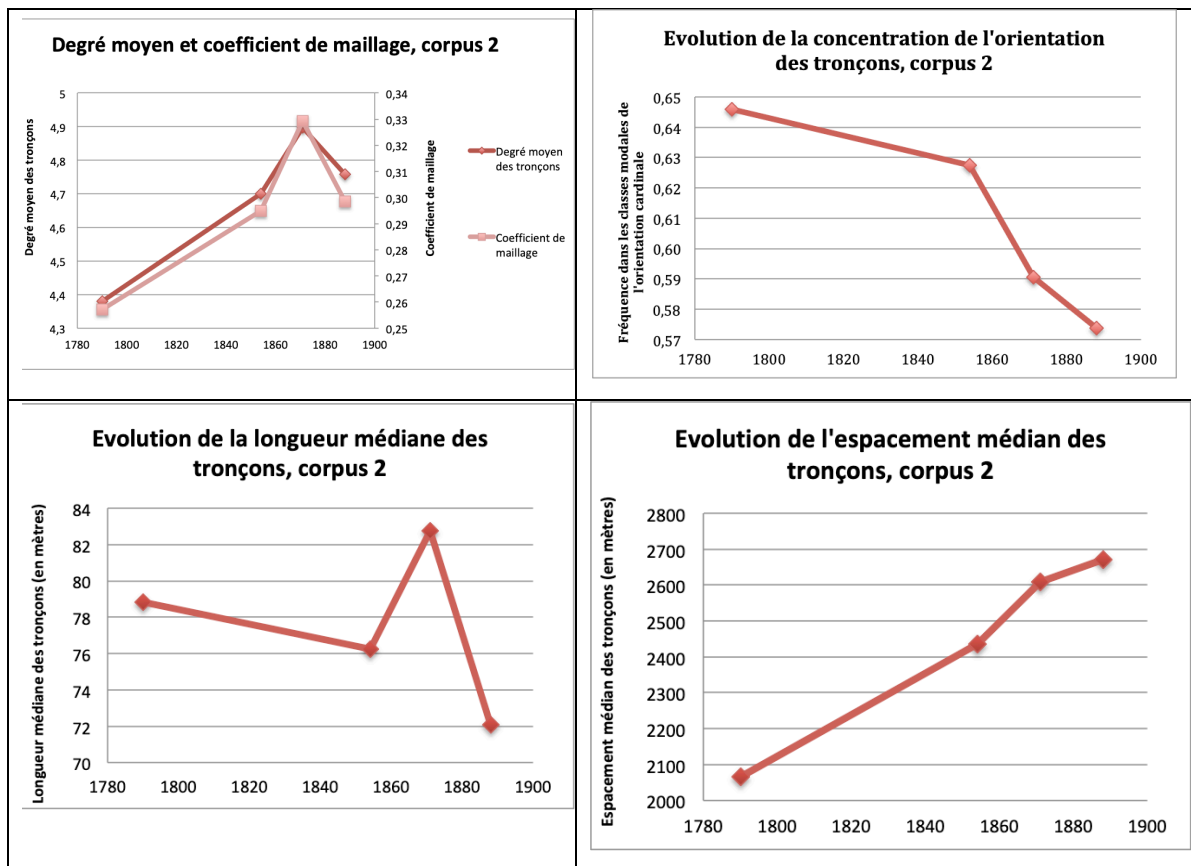


Figure 6.21 : Courbes représentant l'évolution des valeurs de références des descripteurs morphologiques, dans le réseau parisien entre 1790 et 1888. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : le degré moyen et le coefficient de maillage ; la concentration de l'orientation ; la longueur médiane ; et l'espacement médian.

Nous remarquons sur les graphiques ci-dessus, que ce soit pour le corpus 1 ou le corpus 2, que le degré moyen et le coefficient de maillage semblent fortement corrélés. Cela peut s'expliquer par le fait que ces mesures décrivent, de deux manières différentes, à quel point les tronçons d'un réseau viaire sont reliés les uns aux autres. Cette redondance entre degré moyen et coefficient de maillage a été soulignée dans la littérature. Barthelemy (2011, p. 25) montre sur plusieurs exemples issus de Cardillo et al. (2006), que le degré moyen donne la même information que le coefficient de maillage. **Pour éviter cette redondance, nous choisissons de conserver uniquement le coefficient de maillage dans la suite de notre travail.**

Synthèse

Le fait d'avoir résumé chaque descripteur à l'échelle des réseaux par une valeur de référence nous a permis d'observer en quoi chaque type de réseau du corpus 1 se distinguait des autres types, et en quoi la période haussmannienne se distinguait des deux autres périodes étudiées. Le tableau 6.7 ci-dessous résume ces *spécificités*

identifiées pour chaque type, et pour la période haussmannienne. Les cellules grisées indiquent que le type de réseau, ou la période haussmannienne, ne présentent pas de spécificité pour le descripteur en question.

	Connectivité du réseau	Rectitude des voies	Orientation des voies	Espacement des voies	
				Longueur des tronçons	Espacement des tronçons
Réseaux organiques : Chester et Paris 1300					Faible
Réseaux quadrillés : Détroit et Manhattan	Elevée	Elevée	Orientations concentrées		
Réseaux arborescents : Banlieue de Raleigh et de Waterloo		Faible	Orientations variées	Elevée	
Création de percées configurées en étoile : Paris entre 1854 et 1871	Augmente*		Se diversifie*	Augmente	

* : indique que l'évolution est similaire à celle d'autres périodes, mais qu'elle s'intensifie nettement durant la période haussmannienne. Nous avons considéré cette intensification comme une spécificité de la période haussmannienne.

Tableau 6.7 : Tableau synthétisant les spécificités, en termes de caractéristiques morphologiques, identifiées pour chaque type de réseau étudié, et pour la période haussmannienne. Le texte en vert indique que nos résultats vont dans le même sens que les connaissances thématiques présentées en tableau 6.1. Les cases grisées indiquent que nos résultats n'ont pas permis d'identifier de spécificités du type de réseau, ou de la période haussmannienne.

Le résumé des descripteurs par une valeur de référence a également permis de confronter nos résultats aux caractéristiques morphologiques décrites par connaissances thématiques dans la littérature, et présentées en début de chapitre (cf tableau 6.1). Signalons que ces connaissances thématiques concernent souvent des cas théoriques alors que nos résultats sont issus de cas empiriques. Nous indiquons

en vert dans le tableau 6.7 les cas où nos résultats vont dans le même sens que ces connaissances thématiques. Le texte en noir signale que nous n'avons pas identifié de connaissances thématiques sur ce point.

Plusieurs de nos résultats vont dans le même sens que les connaissances thématiques : le rapprochement des tronçons dans les réseaux organiques ; la forte connectivité des réseaux de type quadrillé et la rectitude de leurs voies ; la courbure élevée des tronçons dans les réseaux arborescents ; ou encore la diversification de l'orientation des tronçons durant la période haussmannienne. En outre, nos résultats ont révélé certaines spécificités qui n'étaient pas décrites dans les connaissances thématiques (texte en noir dans le tableau 6.7). A l'inverse, certaines spécificités décrites dans les connaissances thématiques n'apparaissent pas dans nos résultats, d'où les cellules grisées dans le tableau 6.7. Nous présentons dans la conclusion du chapitre des hypothèses pour expliquer ces écarts.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de quantifier, c'est-à-dire d'exprimer et de faire exister sous une forme numérique, des caractéristiques morphologiques qui auparavant étaient exprimées par des mots.

A l'exception du coefficient de maillage, nous avons utilisé des descripteurs calculés à l'échelle des tronçons de voie. Or, notre intérêt porte sur une description des réseaux pour pouvoir procéder à leur comparaison. Pour passer de descripteurs de tronçons à des descripteurs de réseaux, nous avons eu recours à l'étude de la distribution statistique de chaque descripteur, puis au résumé de cette distribution, grâce à une **valeur de référence**. Au vu de la dissymétrie des distributions observées, nous avons choisi dans la plupart des cas la valeur médiane, sauf pour l'orientation cardinale, pour laquelle nous avons développé un indicateur pour rendre compte de la concentration de cette orientation.

Une fois les valeurs de références choisies et calculées, nous avons pu procéder à la comparaison des réseaux du point de vue de leurs caractéristiques morphologiques. Sur le corpus 1, cette comparaison nous a permis d'observer les rapprochements (en termes de caractéristiques morphologiques) qui existaient entre des réseaux de même type, et les différences entre des réseaux de types différents. Dit autrement, nous avons pu identifier les *caractéristiques morphologiques spécifiques* des réseaux organiques, celles des réseaux quadrillés, et celles des réseaux arborescents. Ces caractéristiques ont été indiquées dans le tableau 6.7.

Sur le second corpus, la comparaison des valeurs de référence nous a permis de comparer l'évolution des caractéristiques morphologiques du réseau viaire parisien durant la période haussmannienne, à son évolution aux autres périodes étudiées.

Nous avons ainsi pu observer en quoi la période haussmannienne se rapprochait des autres périodes, et en quoi elle s'en distinguait. Dit autrement, nous avons identifié l'évolution des caractéristiques morphologiques qui était spécifique à la période haussmannienne. Cette évolution a été indiquée dans le tableau 6.7.

Enfin, nous avons confronté les caractéristiques spécifiques de chaque type, et l'évolution spécifique de la période haussmannienne, aux caractéristiques et à l'évolution qui étaient attendues au vu de la littérature, et que nous avons désigné comme des « connaissances thématiques » (cf tableau 6.1). Rappelons que ces connaissances thématiques concernent souvent des cas théoriques alors que nos résultats portent sur des cas empiriques. Nous avons observé des similitudes, mais aussi des écarts entre les deux approches. Dans certains cas, nos résultats révèlent des spécificités qui ne sont pas décrites dans les connaissances thématiques.

Dans d'autres cas, des spécificités décrites dans les connaissances thématiques ne sont pas observées dans nos résultats. Par exemple, selon les connaissances thématiques, les réseaux arborescents se caractérisent par une faible connectivité. Nous nous attendions donc à un coefficient de maillage plus faible dans ces réseaux que dans les autres types de réseaux. Or, nous avons vu que le réseau de la banlieue de Waterloo, de type arborescent, avait un coefficient de maillage plus élevé que le réseau de Chester, qui est de type organique. Cela nous incite à nous interroger sur deux aspects :

- **Le choix du cas d'étude** : le réseau viaire de la banlieue de Waterloo est-il représentatif du type arborescent auquel font référence les connaissances thématiques ? De même, le réseau de Chester est-il représentatif du type organique auquel font référence les connaissances thématiques ?
- **Le choix du descripteur** : le coefficient de maillage décrit-il la même sorte de connectivité que celle à laquelle font référence les connaissances thématiques ?

En conclusion, cet exemple nous permet d'insister sur les écarts qui existent entre des réseaux typiques théoriques, décrits dans la littérature, et les réseaux empiriques que nous avons choisis pour en être représentatifs. Cet exemple nous rappelle également la nécessité de porter un regard critique sur les descripteurs mobilisés. Cet aspect est d'autant plus important lorsqu'il s'agit d'un descripteur local, résumé à l'échelle du réseau par une valeur de référence. Nous avons utilisé pour cela la valeur moyenne ou médiane de la distribution, ou la fréquence simple des classes. Ces valeurs de référence nous ont permis de décrire les réseaux dans leur ensemble, et de les positionner les uns par rapport aux autres. Il faut néanmoins signaler que ces valeurs peuvent masquer certaines nuances. Par exemple, la courbure médiane, dont la valeur est nulle pour le réseau viaire parisien tout au long du XIXe siècle, masque potentiellement des différences fines entre une date et une autre dans la courbure des tronçons.

Chapitre 7 : Traduction des conditions d'accessibilité des réseaux viaires en descripteurs calculés sur un graphe

Introduction

Les conditions d'accessibilité sont un ensemble de potentialités offertes aux usagers lors de leurs déplacements, qui leur permettent un bon accès à leurs destinations. Nous nous focalisons sur cinq conditions en particulier : la simplicité des déplacements, leur continuité, leur isotropie (répartition uniforme), leur proximité et leur fluidité.

Notre intérêt porte sur la capacité d'un réseau viaire, de par sa morphologie, à offrir ces diverses conditions d'accessibilité aux usagers. Nous avons fait le choix d'évaluer cette capacité en décrivant les caractéristiques des chemins reliant les différents tronçons de voies d'un réseau : la longueur de ses chemins, leur linéarité, ou encore leur continuité. Ces caractéristiques des chemins sont à leur tour évaluées au moyen de descripteurs quantitatifs issus de la théorie des graphes (cf chapitre 4). Nous les appelons des **descripteurs d'accessibilité**.

L'objectif principal de ce chapitre est d'**évaluer les conditions d'accessibilité d'un ensemble de réseaux viaires, au moyen de ces descripteurs d'accessibilité**. Rappelons que notre travail porte sur deux corpus de réseaux, le premier est constitué de six réseaux différents, et le second est constitué du même réseau, en l'occurrence celui de Paris, à différentes dates. Ainsi, notre objectif se décline différemment selon le corpus considéré. Les descripteurs d'accessibilité vont nous permettre de :

- quantifier les conditions d'accessibilité des réseaux viaires du corpus 1 ;
- quantifier l'évolution des conditions d'accessibilité des réseaux viaires du corpus 2

Rappelons également que nos cas d'étude sont empiriques, et qu'ils ont été choisis de manière à être représentatifs de cas théoriques décrits en urbanisme. Ces cas théoriques sont des **réseaux typiques (organiques, quadrillés et arborescents) et des interventions typiques (création de percées en étoile dans un réseau existant), préconisés en urbanisme pour les conditions d'accessibilité qu'ils sont supposés offrir**. Il sera intéressant de confronter les conditions d'accessibilité calculées sur nos cas d'étude empiriques à celles décrites dans la littérature en urbanisme pour les cas théoriques correspondants. Nous désignons ces dernières

comme des **conditions d'accessibilité décrites par connaissances thématiques**. Elles ont été décrites dans le chapitre 3, le tableau 7.1 en présente une synthèse.

	Simplicité des déplacements	Continuité des déplacements	Isotropie des déplacements	Fluidité des déplacements	Proximité des déplacements
Type organique	n.d.	Faible	Faible	Faible	Faible ou élevée
Type quadrillé	Faible ou élevée	Elevée	Faible ou élevée	Faible	Elevée
Type arborescent	Faible	Faible	n.d.	Faible ou élevée	Faible
Percées configurées en étoile	Elevée	Elevée	Elevée	n.d.	n.d.

n.d. non décrit dans la littérature consultée.

Tableau 7.1 : Tableau présentant les conditions d'accessibilité décrites dans la littérature, pour les réseaux viaires organiques, quadrillés, arborescents, et les percées en étoile. Ce tableau est une synthèse de la description présentée en chapitre 3. Les mentions « élevée » indiquent que, selon la littérature consultée, le type (de réseau ou d'intervention) améliore la condition d'accessibilité en question. Les mentions « faible » indiquent au contraire qu'il la détériore. Lorsqu'il y a des avis contradictoires dans la littérature, nous l'indiquons par la mention « faible ou élevé ».

Ce chapitre est structuré de la même manière que le précédent. Dans la partie I, nous rappelons les **descripteurs d'accessibilité** que nous avons choisi, afin de quantifier les conditions d'accessibilité des réseaux viaires des deux corpus. Dans la partie II, nous présentons les résultats du calcul de ces descripteurs. Enfin, dans la partie III, nous allons décrire les conditions d'accessibilité de chaque type de réseau du corpus 1 en le positionnant par rapport aux autres types. Nous allons également décrire

l'évolution des conditions d'accessibilité faisant suite à l'intervention d'Hausmann, en la positionnant par rapport à l'évolution survenue aux autres périodes. Pour finir, nous confrontons les conditions d'accessibilité issues des connaissances thématiques à celles issues de nos résultats.

I. Des conditions d'accessibilité aux descripteurs d'accessibilité

Le tableau 7.2 synthétise la manière dont nous proposons de passer des conditions d'accessibilité d'un réseau aux caractéristiques des chemins qui relient les tronçons de ce réseau, puis aux descripteurs d'accessibilité calculés sur ce réseau.

Conditions d'accessibilité d'un réseau	Simplicité des déplacements	Continuité des déplacements	Isotropie des déplacements	Fluidité des déplacements	Proximité des déplacements
Caractéristiques des chemins entre les tronçons du réseau	Linéarité des chemins	Continuité des chemins	Concentration des chemins		Longueur des chemins
Descripteurs d'accessibilité calculés sur le réseau	Eloignement angulaire	Indice de détour	Centralité d'intermédiarité		Eloignement métrique

Tableau 7.2 : Tableau indiquant pour chaque condition d'accessibilité le descripteur d'accessibilité correspondant.

I.1. Rappel des descripteurs d'accessibilité utilisés

I.1.1. Des descripteurs de « plus courts chemins »

Nous utilisons dans ce chapitre des descripteurs d'accessibilité calculés sur la

représentation en graphe de la morphologie des réseaux viaires. Ces descripteurs sont issus de la théorie des graphes. Leur particularité (comparé aux descripteurs morphologiques vus en chapitre 6) est qu'ils sont basés sur le concept de plus court chemin. Haggett & Chorley (1969) les désignent comme des descripteurs de *shortest path characteristics*, c'est-à-dire qu'ils décrivent les caractéristiques des plus courts chemins entre les différents tronçons d'un réseau. Nous sommes partis du principe que ces caractéristiques des plus courts chemins étaient de bons révélateurs des conditions d'accessibilité permises par le réseau (cf chapitre 4). Par exemple, si les plus courts chemins entre les différents tronçons d'un réseau sont continus, nous considérons que le réseau permet une continuité des déplacements. Si ces plus courts chemins comprennent peu de changements de direction, nous considérons que le réseau permet une simplicité des déplacements, et ainsi de suite (voir tableau 7.2).

Rappelons également que les « plus courts chemins » dans un réseau peuvent être définis de diverses manières. Il peut s'agir du plus court chemin en distance métrique (minimisation de la longueur métrique des chemins), en distance angulaire (minimisation des changements de direction sur les chemins), ou en distance topologique (minimisation du nombre d'intersections sur les chemins). Nous avons choisi de ne pas nous restreindre à un seul type de plus court chemin, mais plutôt d'adapter celui-ci à la condition d'accessibilité en question. Cela permet de donner du sens thématiquement au concept de plus court chemin. Nous rappelons, dans la présentation de chaque descripteur ci-dessous, le type de plus court chemin considéré.

I.1.2. Présentation des descripteurs

Nous présentons dans cette section un rappel des descripteurs d'accessibilité choisis pour rendre compte des conditions d'accessibilité d'un réseau. Ces descripteurs ont été présentés en détail dans le chapitre 4. Rappelons que nous utilisons l'outil d'analyse de réseaux nommé sDNA²⁰⁷, pour le calcul de ces descripteurs. La présentation de cet outil, ainsi que les formules exactes qu'il utilise pour le calcul de chacun des descripteurs d'accessibilité sont dans l'annexe B.

L'éloignement angulaire

Nous avons choisi de définir la simplicité des déplacements en termes de changements de direction que comprennent les plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau, autrement dit en termes de linéarité des plus courts chemins. Nous considérons que plus ces chemins sont linéaires, plus le réseau permet des

²⁰⁷ sDNA : Cooper, C., Chiaradia, A., Webster, C. (2016) Spatial Design Network Analysis software, version 3.4, Cardiff University, <http://www.cardiff.ac.uk/sdna/>.

déplacements simples. La linéarité des plus courts chemins sera évaluée par l'intermédiaire de **l'éloignement angulaire**. Ce descripteur issu de la théorie des graphes consiste à calculer, pour chaque sommet d'un graphe, la moyenne des angles formés le long des plus courts chemins qui relient ce sommet à tous les autres.

Rappelons que nous représentons les réseaux viaires par des graphes géométriques duaux. Nous calculons donc l'éloignement angulaire des tronçons (tronçons de voie situés entre deux intersections). L'éloignement angulaire d'un tronçon désigne la moyenne des angles formés le long des plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres. Pour ce descripteur, nous avons choisi de considérer les plus courts chemins en termes de distance angulaire. Nous allons donc évaluer à quel point les chemins les plus linéaires d'un réseau sont effectivement linéaires.

L'indice de détour

Nous avons défini la continuité des déplacements en termes d'écart entre les distances réelles (via réseau) à parcourir entre deux points dans le réseau, et les distances à vol d'oiseau entre ces deux points. Plus il y a d'écart entre distance réelle et distance à vol d'oiseau, plus le réseau impose de détours, et donc moins les déplacements sont continus. L'indice de détour permet d'évaluer cet écart entre distance réelle et distance à vol d'oiseau. Il consiste à calculer, pour chaque sommet du graphe (chaque tronçon dans notre cas), le rapport entre la longueur des plus courts chemins métriques qui le sépare des autres sommets, et la distance à vol d'oiseau qui le sépare des autres sommets. Ainsi, la définition adéquate des « plus courts chemins » pour ce descripteur est celle des plus courts chemins en distance métrique.

La centralité d'intermédiarité

L'isotropie des déplacements et leur fluidité seront toutes deux évaluées par l'intermédiaire de la concentration des plus courts chemins, autrement dit de leur propension à se localiser sur un petit nombre de voies. Plus les plus courts chemins d'un réseau sont concentrés sur un petit nombre de voies, moins le réseau permet une répartition uniforme des déplacements, donc leur isotropie. En outre, plus les plus courts chemins sont concentrés sur un petit nombre de voies, plus ces voies seront potentiellement encombrées, ce qui nuit à la fluidité des déplacements dans le réseau.

La centralité d'intermédiarité permet d'évaluer la concentration des plus courts chemins qui relient les tronçons d'un réseau. Calculée à l'échelle d'un tronçon, elle correspond au nombre (pondéré) de plus courts chemins auquel participe ce tronçon²⁰⁸. En étudiant la répartition de la centralité d'intermédiarité entre les

²⁰⁸ Il s'agit là d'une forme simplifiée de centralité d'intermédiarité. Dans sa forme originale, la centralité d'intermédiarité d'un sommet désigne la *proportion* de plus courts chemins auquel

tronçons d'un réseau, on évalue comment se répartissent les plus courts chemins dans le réseau, en déterminant s'ils sont concentrés sur un petit nombre de tronçons ou non.

Pour ce descripteur, nous avons choisi de définir les « plus courts chemins » en termes de nombre minimal d'intersections à traverser, autrement dit les plus courts chemins topologiques. En effet, les intersections sont une source de ralentissement. Or, la centralité d'intermédierité sera notamment utilisée pour évaluer la propension du réseau à éviter les ralentissements, donc l'encombrement. En considérant les plus courts chemins topologiques lors du calcul de la centralité d'intermédierité, on évalue ainsi la propension du réseau à concentrer les chemins qui minimisent les possibilités de ralentissement (les intersections).

L'éloignement métrique

Enfin, pour évaluer la proximité des déplacements (condition d'accessibilité), nous proposons d'évaluer la longueur des plus courts chemins qui relient les différents tronçons d'un réseau, grâce au descripteur d'**éloignement métrique**²⁰⁹. Rappelons que ce descripteur évalue, pour chaque tronçon du réseau, la distance moyenne qui le sépare de tous les autres tronçons, en empruntant les plus courts chemins. Nous avons choisi ici les plus courts chemins métriques. Ce descripteur peut alors être interprété comme la distance minimale à parcourir, en moyenne, pour relier un tronçon à tous les autres.

I.2. Une description basée sur la comparaison

Comme nous l'avons fait dans le chapitre 6, la description des conditions d'accessibilité des réseaux des deux corpus se fera en les **comparant les uns aux autres autres**. Pour rappel, le premier corpus est constitué de réseaux à la morphologie typique (organique, quadrillée ou arborescente). Pour chaque type, nous avons choisi deux réseaux empiriques différents, ce qui nous permet d'observer si des réseaux de même type offrent des conditions d'accessibilité plus proches que des réseaux de types différents. Nous décrirons ainsi chaque type relativement aux autres.

Le second corpus est constitué du réseau viaire de la ville de Paris en 1790, 1854, 1871 et 1888. La période entre 1854 et 1871 a été choisie car nous la considérons (après revue de la littérature) comme représentative d'une intervention typique décrite dans la littérature : la création, dans un réseau existant, de percées configurées en étoile. Ainsi, en comparant le réseau de 1854 à celui de 1871, nous

participe ce sommet. L'explication détaillée du calcul de ce descripteur est présentée dans le chapitre 4.

²⁰⁹ Voir Barthelemy (2011) pour un aperçu des différentes variantes de l'éloignement métrique.

pourrons constater si l'évolution du réseau est marquée par cette intervention. Les autres dates (1790 et 1888) nous servent de points de comparaison, afin d'identifier si la période entre 1854 et 1871 est particulière.

Ainsi, pour le premier corpus, les réseaux types sont comparés entre eux afin de vérifier si des réseaux de même type sont caractérisés par des valeurs similaires des descripteurs d'accessibilité et si des réseaux de types différents sont au contraire caractérisés par des valeurs distinctes. Pour le second corpus, le réseau viaire de Paris est comparé entre une date et une autre, afin de vérifier si la période entre 1854 et 1871 se distingue des autres (en termes de condition d'accessibilité) et comment.

Signalons enfin que, parmi les réseaux composant le corpus 1, il y en a trois qui ont approximativement le même nombre de tronçons, 1000 environ : Paris en 1300, Détroit en 1837 et la banlieue de Waterloo en 2016. La comparaison de ces trois réseaux est intéressante tant d'un point de vue méthodologique que d'un point de vue thématique. D'un point de vue méthodologique, la comparaison de réseaux de même taille nous permettra d'éviter l'écueil de la sensibilité de certains descripteurs à la taille du réseau. D'un point de vue thématique, la comparaison de réseaux de même taille nous permet d'identifier, à nombre de tronçons égal, quels réseaux présentent les meilleures conditions d'accessibilité.

I.3. D'une description des tronçons à une description du réseau

Les descripteurs d'accessibilité sont tous des descripteurs locaux, calculés à l'échelle de chaque tronçon d'un réseau. Or, pour permettre la comparaison, il nous faut passer de descripteurs de tronçons à des descripteurs de réseaux. Cela est possible grâce à trois méthodes (utilisées aussi en chapitre 6) :

- décrire la distribution statistique du descripteur ;
- utiliser un résumé numérique du descripteur, autrement dit une valeur de référence (moyenne, médiane, ou autre) ;
- décrire la distribution spatiale du descripteur.

Concernant le résumé numérique du descripteur, celui-ci dépend de la forme de sa distribution statistique. Si la distribution est symétrique, la moyenne sera choisie comme valeur de référence, si elle est dissymétrique, la médiane servira de valeur de référence. Toutefois, dans le cas de la centralité d'intermédiarité, notre intérêt porte sur la répartition de cette centralité entre les tronçons du réseau. Cette répartition est utilisée pour décrire la concentration des plus courts chemins dans un réseau (cf section I.1.2). Nous avons donc choisi comme valeur de référence pour

résumer la centralité d'intermédiarité, non pas la moyenne ou la médiane, mais **l'indice de Gini**, qui rend compte de la **plus ou moins forte inégalité de répartition** de la centralité d'intermédiarité.

L'étude de la distribution spatiale revêt une importance particulière pour l'analyse des descripteurs d'accessibilité. Rappelons que celle-ci se fait grâce à une représentation cartographique du descripteur sur le graphe du réseau. On fait figurer sur le graphe la valeur prise, pour chaque tronçon, par le descripteur en question, soit grâce à une variation de couleur, soit grâce à une variation de l'épaisseur du trait. L'intérêt de cette représentation est d'observer par exemple où se localisent les tronçons dont l'indice de détour est faible, donc qui permettent une continuité des déplacements. Sont-ils regroupés ou dispersés spatialement ? De la même manière, on peut observer où se localisent les tronçons dont la centralité d'intermédiarité est élevée, donc qui peuvent potentiellement être encombrés. On peut également observer si ces tronçons à l'indice de détour faible ou à la centralité d'intermédiarité élevée correspondent à des lieux fonctionnellement importants du réseau, telles que des voies situées dans l'hyper centre d'une ville et pour lesquels une bonne accessibilité est généralement recherchée (Chiaradia, Hillier, Schwander, & Wedderburn, 2012). Signalons enfin que l'analyse de la représentation cartographique va nécessiter dans notre cas une discrétisation des valeurs prises par chaque descripteur pour chaque réseau. Le type de discrétisation dépendra de la forme de la distribution statistique.

I.4. Quelques précautions à prendre dans l'interprétation des résultats

Les descripteurs d'accessibilité que nous allons utiliser sont sensibles aux choix cartographiques fait lors de la construction des données filaires, puis des graphes viaires. Ils sont notamment sensibles à la délimitation de ces données. En effet, le calcul des descripteurs d'accessibilité est basé sur un algorithme de calcul des plus courts chemins entre les sommets du graphe représentant le réseau. Or, si un chemin est situé hors des limites du graphe, il ne sera pas pris en compte dans les calculs, même s'il est plus court que les chemins situés à l'intérieur des limites du graphe. Freiria et al. (2015) qualifient cette sensibilité à la délimitation de *Modifiable Area Unit Problem* (MAUP). Cela nous incite à rappeler une fois de plus que les données filaires, et les graphes qui en sont issus, ne sont qu'une représentation des réseaux viaires réels. Cette représentation a nécessité des choix, et ceux-ci doivent être pris en compte dans l'interprétation des résultats obtenus pour chaque descripteur.

La délimitation des données (filaires ou graphes) a un autre effet sur la centralité d'intermédiarité. Les tronçons situés en bordure du graphe, autrement dit les tronçons « coupés » par la délimitation choisie, auront une centralité

d'intermédiation très faible car, étant donnée leur position périphérique, ils ne participent à aucun « plus court chemin » entre les autres tronçons. Ainsi, plus un réseau comprendra de tronçons coupés sur ses bordures, plus il aura de tronçons à la centralité d'intermédiation faible. Cela devra être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

II. Description des conditions d'accessibilité calculées sur les deux corpus de cas d'étude

Nous présentons dans cette partie les résultats du calcul des descripteurs d'accessibilité sur les réseaux viaires des deux corpus. Nous décrivons la distribution statistique de chaque descripteur, ses valeurs de référence, et sa distribution spatiale. L'étude de la distribution statistique de chaque descripteur s'appuiera sur l'histogramme représentant cette distribution. Ces histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, toutefois il n'a pas été possible pour certains descripteurs de conserver les mêmes bornes pour tous les réseaux, en raison de différences dans les ordres de grandeur. Nous avons donc choisi selon les cas la représentation qui permettait d'avoir des histogrammes lisibles.

II.1. Résultats sur les réseaux viaires typiques (corpus 1)

Rappelons que le premier corpus se compose des réseaux viaires de Chester (Angleterre) et Paris, tout deux au Moyen Age (réseaux organiques), les réseaux de Détroit en 1837 et Manhattan en 1930 (réseaux quadrillés), et les réseaux de la banlieue de Raleigh (Etats-Unis) en 1999 et de la banlieue de Waterloo (Canada) en 2016 (réseaux arborescents).

II.1.1. Eloignement angulaire

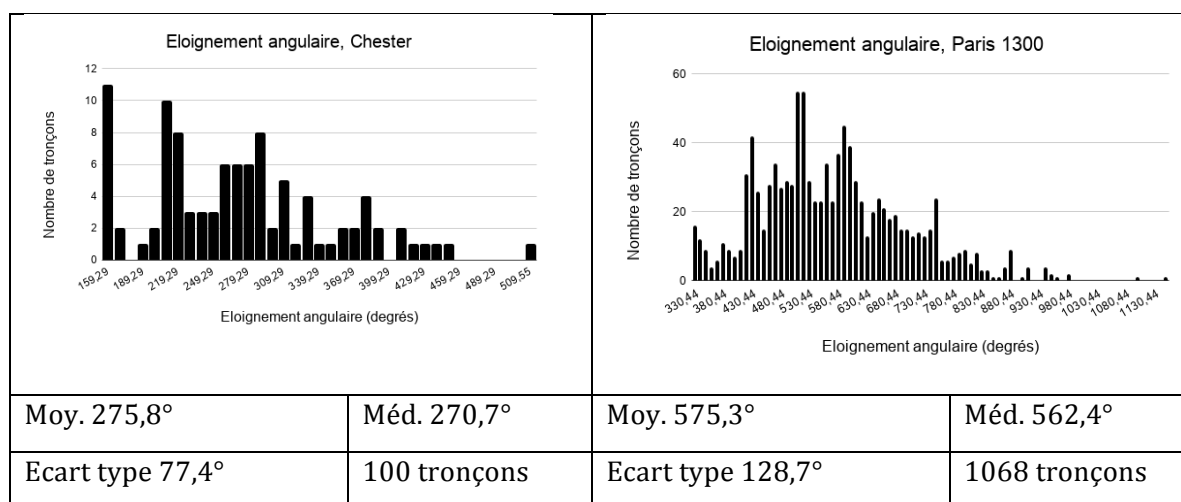
Distribution statistique et valeurs de référence

Rappelons que l'éloignement angulaire d'un tronçon désigne la moyenne des angles (en degrés) formés le long des plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres. Si un tronçon a un éloignement angulaire faible, cela signifie que les plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres sont linéaires, qu'ils n'impliquent pas de changements de direction. Les histogrammes de la figure 7.1 représentent la distribution statistique de l'éloignement angulaire des tronçons, pour les six réseaux du corpus 1. Ces histogrammes ont été construits selon des classes d'amplitudes égales, de 10°, pour l'ensemble des réseaux. Ainsi, chaque barre sur les histogrammes correspond à une amplitude de 10°.

Nous observons sur les histogrammes des réseaux de Chester, Détroit et Manhattan qu'une grande part des tronçons ont un éloignement angulaire faible, ce qui indique que ces tronçons sont reliés aux autres par des chemins linéaires. Cela se manifeste par des distributions statistiques dissymétriques à gauche, avec plusieurs valeurs faibles et quelques valeurs élevées. Cette dissymétrie est moins visible dans les réseaux viaires de Paris au Moyen Age, de la banlieue de Raleigh, et de celle de Waterloo.

Cette linéarité des plus courts chemins entre les tronçons dans les réseaux de Chester, Détroit et Manhattan est confirmée par les valeurs centrales (moyenne et médiane) de la distribution statistique de l'éloignement angulaire. Les moyennes et médianes des distributions sont plus faibles dans ces réseaux que dans les autres. Considérant ces valeurs centrales, le réseau de Détroit est celui qui a la meilleure linéarité des plus courts chemins entre ses tronçons (éloignement angulaire moyen et médiane le plus faible), tandis que celui de la banlieue de Raleigh est celui qui a la moins bonne linéarité de ces plus courts chemins (éloignement angulaire moyen et médian le plus élevé).

Enfin, nos résultats illustrent que le descripteur d'éloignement angulaire n'est pas sensible à la taille des réseaux, c'est-à-dire leur nombre de tronçons. Nous constatons par exemple que les réseaux de Chester et Manhattan ont des éloignements angulaires moyens et médians très proches, alors que le réseau de Chester comprend 100 tronçons, et celui de Manhattan en comprend plus de 7000.



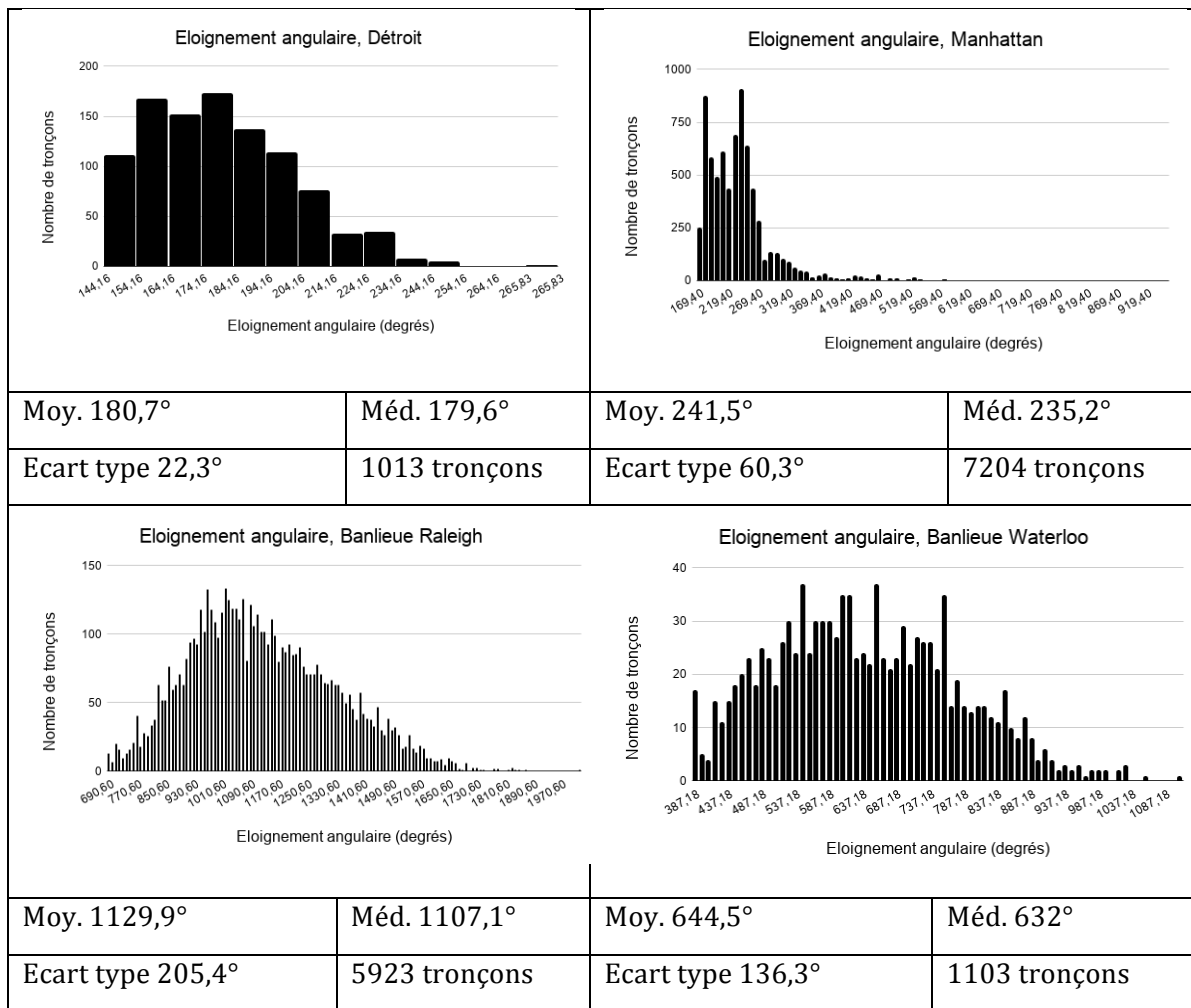


Figure 7.1 : Histogrammes de l'éloignement angulaire des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. Les histogrammes sont construits selon des classes d'amplitudes égales, cette amplitude est de 10°. Nous indiquons sous chaque histogramme la valeur moyenne, médiane et l'écart type du descripteur, ainsi que le nombre de tronçons du réseau.

Distribution spatiale de l'éloignement angulaire

Nous choisissons de discrétiser l'éloignement angulaire selon la méthode des seuils naturels, visibles sur l'histogramme. Nous obtenons les cartes de la figure 7.2. Ces cartes permettent notamment d'identifier les tronçons à partir desquels les chemins vers l'ensemble du réseau impliquent le moins de changements de direction. Nous constatons que ces tronçons sont localisés différemment selon le réseau. A Chester et à Paris, il s'agit de tronçons situés sur des voies centrales (d'un point de vue géographique), à savoir l'axe est-ouest formé par Watergate Street et Eastgate Street à Chester, et l'axe nord-sud formé par les rues Saint-Martin et Saint-Jacques à Paris. A Détroit, les tronçons ayant l'éloignement angulaire le plus faible sont ceux formant l'axe central de la grille, les voies qui lui sont perpendiculaires, et quelques voies parallèles. Le même motif s'observe dans la banlieue de Raleigh et dans celle de Waterloo : les longs axes rectilignes, les voies qui leur sont perpendiculaires, et quelques voies parallèles ressortent comme ceux ayant l'éloignement angulaire le

plus faible. Cette similitude entre Détroit, et la banlieue de Raleigh et de Waterloo est intéressante car elle montre que **des motifs similaires peuvent apparaître dans des réseaux de type différent**. Un motif similaire avait été décrit par Griffiths (2012) sur la ville de Sheffield, il le qualifie de « web-like » que l'on pourrait traduire par « motif en toile ». Hillier & Iida (2005) trouvent également un motif similaire pour le quartier de Barnsbury à Londres.

A Manhattan, les tronçons qui ont l'éloignement angulaire le plus faible (donc ceux à partir desquelles les chemins vers les autres tronçons du réseau sont les plus linéaires) sont sur les voies qui traversent le réseau du nord au sud sur une longue distance. On constate également que la partie la plus régulière de la grille, c'est-à-dire celle située au sud de Central Park, a également des tronçons à l'éloignement angulaire faible.

Sur l'ensemble des cas d'étude du corpus 1, la distribution spatiale de l'éloignement angulaire fait apparaître une hiérarchie de voies : au sommet de cette hiérarchie, on trouve de grands axes rectilignes. Cela signifie qu'en empruntant ces axes, les déplacements vers le reste du réseau requièrent peu de changements de direction. Les voies qui sont raccordées à ces axes bénéficient elles aussi d'un éloignement angulaire faible, car il est possible à partir de ces voies de rejoindre les grands axes en effectuant seulement un changement de direction. Enfin, plus une voie est éloignée des grands axes, plus son éloignement angulaire est élevé : l'accès à ces voies, ou l'accès depuis ces voies vers le reste du réseau, nécessite de nombreux changements de direction.

Le fait que les grands axes rectilignes apparaissent comme ceux ayant l'éloignement angulaire le plus faible dans nos cas d'étude nous mène à postuler une hypothèse sur le lien, à l'échelle d'un réseau, entre caractéristiques morphologiques et éloignement angulaire : la longueur et la courbure des tronçons d'un réseau viaire sont des caractéristiques morphologiques susceptibles d'agir sur son éloignement angulaire, donc sur la simplicité de déplacements qu'il permet. Nous testerons cette hypothèse (parmi d'autres) dans le chapitre 8.

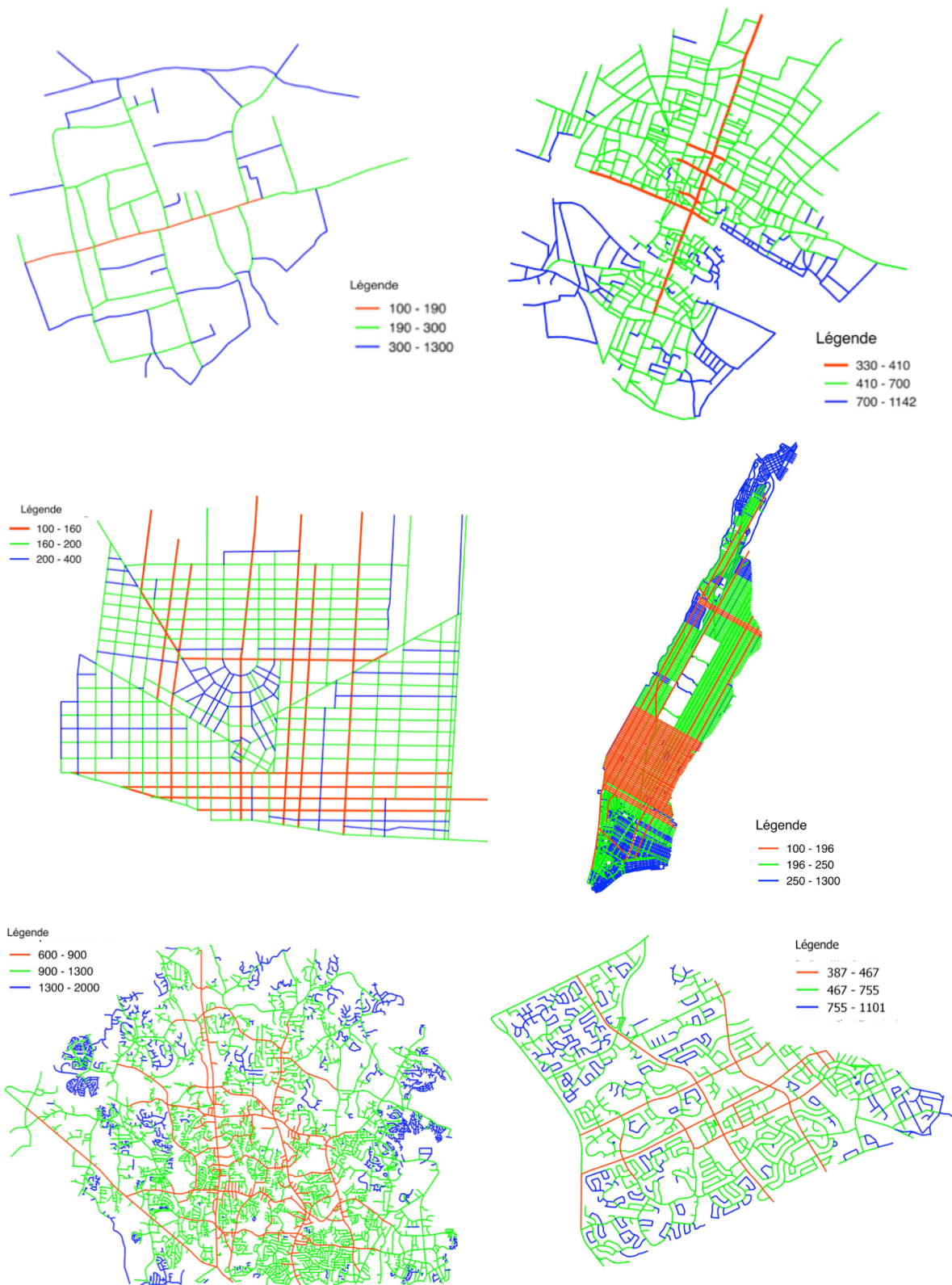


Figure 7.2 : Cartes représentant l'éloignement angulaire des tronçons pour les six réseaux du corpus 1. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : Chester, Paris, Détroit, Manhattan, la banlieue de Raleigh, la banlieue de Waterloo.

II.1.2. Indice de détour

Distribution statistique et valeurs de référence

Rappelons que l'indice de détour d'un tronçon désigne le rapport entre la longueur des plus courts chemins métriques qui le sépare des autres tronçons, et la distance à vol d'oiseau qui le sépare des autres tronçons. Si un tronçon a un indice de détour faible, cela signifie que les plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres sont continus, sans détours.

Comme pour l'éloignement angulaire, nous remarquons sur les histogrammes (figure 7.3) de l'indice de détour des distributions plus dissymétriques pour les réseaux de Chester, Détroit et Manhattan, que pour les réseaux de Paris, de la banlieue de Raleigh et de celle de Waterloo.

La moyenne et la médiane de l'indice de détour pour chaque réseau sont indiquées sous les histogrammes. On constate que ces valeurs sont plus faibles dans les réseaux quadrillés de Détroit et de Manhattan que dans les autres réseaux. Cela suggère que les **réseaux quadrillés de notre corpus engendrent moins de détours que les autres, donc qu'ils permettent potentiellement une meilleure continuité des déplacements**. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Cardillo et al. (2006), qui ont analysé un corpus de 20 réseaux viaires de types différents. Ils montrent que des réseaux quadrillés comme celui de Manhattan, Savannah ou San Francisco ont les indices de détour moyens les plus faibles. Liu et al. (2015) trouvent des résultats similaires en comparant le réseau viaire de 16 quartiers japonais : ils trouvent des indices de détour moyens plus faibles dans les réseaux quadrillés que dans les autres réseaux.

Cardillo et al. et Liu et al. trouvent également les indices de détour moyens les plus élevés dans des réseaux de type arborescent (Cardillo et ses collègues étudient notamment le réseau d'un quartier de Walnut Creek en Californie). Nos résultats sont différents puisque nous trouvons des indices de détour moyens et médians assez proches entre les réseaux arborescents et les réseaux organiques.

De manière générale, l'indice de détour moyen et médian des réseaux étudiés est proche de 1, ce qui indique que ces réseaux engendrent peu de détours. Ce résultat était attendu. Selon Buhl et al. (2006), Cardillo et al. (2006) et Rui et al. (2013), **la plupart des réseaux viaires empiriques ont une bonne efficacité globale**²¹⁰, comprise entre 0,7 et 0,8, ce qui correspond à un indice de détour moyen faible, compris entre 1,25 et 1,42. Nos résultats présentent des indices de détour moyens encore plus faible pour les cas de Détroit et Manhattan.

²¹⁰ Rappelons que l'efficacité globale est l'inverse de l'indice de détour moyen.

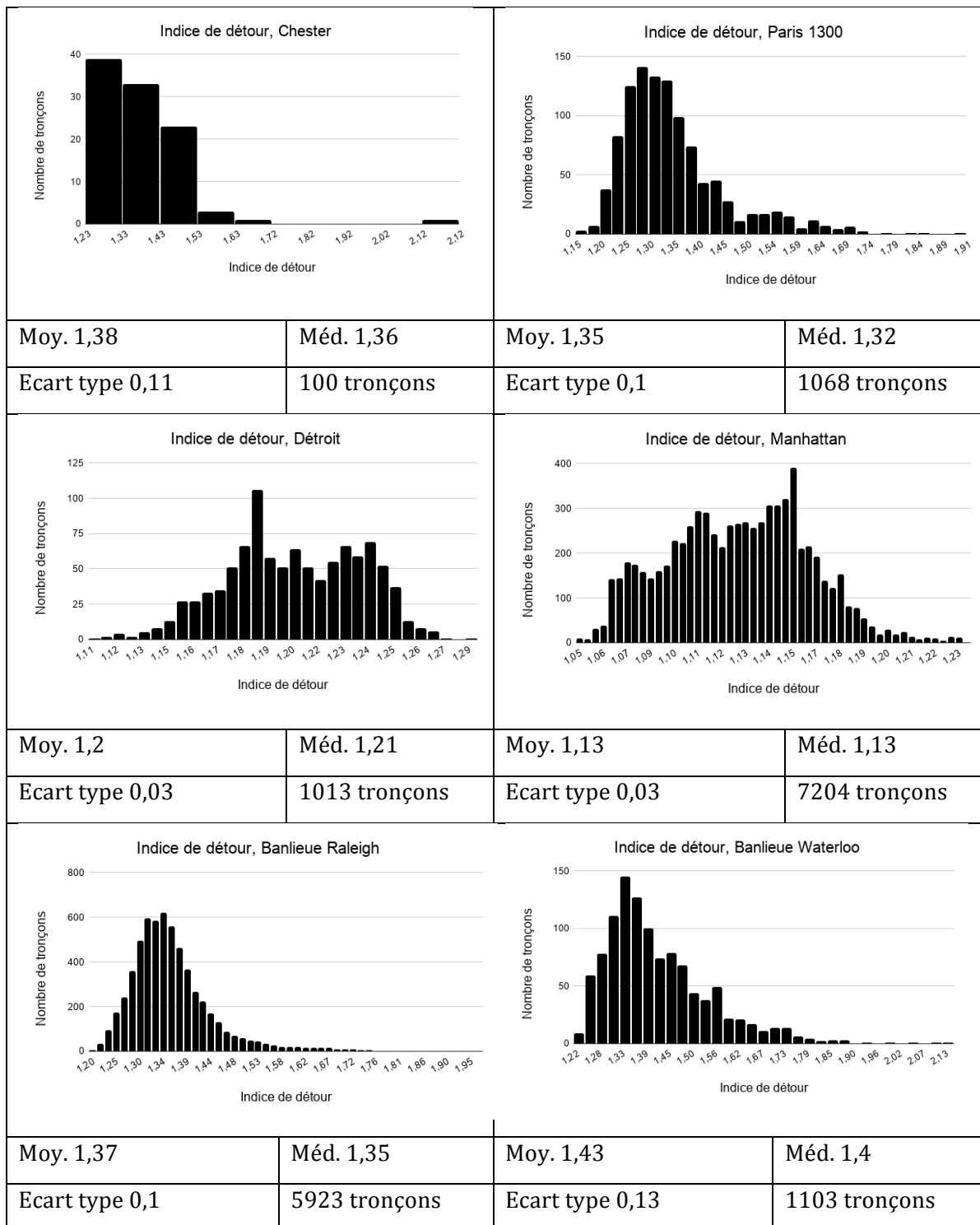


Figure 7.3 : Histogrammes de l'indice de détournement des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. L'amplitude des classes dans chaque histogramme est choisie de manière à ce que celui-ci soit lisible.

Distribution spatiale de l'indice de détournement

La distribution spatiale de l'indice de détournement est présentée dans la figure 7.4. On constate qu'à Paris comme à Chester, les axes centraux (d'un point de vue géographique) sont ceux qui ont l'indice de détournement le plus faible. On constate à Paris

que les tronçons situés près de la Seine, ou ceux qui entourent de grands îlots tels que celui du Couvent des Bernardins (côté Seine, à l'est sur la rive gauche) ou de l'Hôtel de Nesle (côté Seine, à l'ouest de la rive gauche), sont ceux qui ont l'indice de détour le plus élevé. Cela s'explique du fait que ces éléments introduisent des ruptures dans le réseau viaire, ce qui engendre de nombreux détours.

Dans le réseau viaire de Détroit, la distribution spatiale de l'indice de détour fait ressortir la partie ouest du réseau comme celle dont les tronçons ont les indices de détour les plus faibles (en rouge sur la carte). Une hypothèse d'explication de ce motif est la présence de deux voies diagonales dans cette partie ouest, alors qu'il n'en existe qu'une seule dans la partie est. Ces voies diagonales permettent de relier par des lignes droites, continues, tous les tronçons qu'elles coupent, elles font donc correspondre les distances réelles à parcourir pour relier ces tronçons aux distances à vol d'oiseau, c'est pourquoi leur indice de détour est très faible (figure 7.4). Les tronçons se situant dans le voisinage de ces voies bénéficient eux aussi d'un indice de détour faible.

Un phénomène très similaire s'observe dans le réseau viaire de Manhattan. *Broadway*, l'avenue diagonale qui traverse le réseau du nord au sud, ainsi que les voies qui y sont reliées, bénéficient d'un indice de détour faible. À l'inverse, les parties du réseau dont le tracé est rigoureusement quadrillé ont un indice de détour plus élevé. **Cela suggère que les voies diagonales tracées dans les réseaux quadrillés permettent d'y réduire les détours, donc potentiellement d'améliorer la continuité des déplacements.**

La distribution spatiale de l'indice de détour dans la banlieue de Raleigh présente un motif intéressant. On constate que les longues voies artérielles permettant de traverser le réseau ont un indice de détour faible (cf figure 7.4). Par ailleurs, les lotissements implantés directement sur ces voies artérielles ont eux aussi des tronçons à l'indice de détour faible. On l'observe notamment dans les lotissements des quartiers de Glen Forest, Millbrook et New Hopes (cf figure 7.5). À l'inverse, les lotissements qui ne sont pas directement implantés sur ces voies artérielles, mais plutôt en retrait par rapport à celles-ci, ont des tronçons à l'indice de détour plus élevé. On l'observe dans les lotissements des quartiers de Leesville et de Six Forks, et avec plus d'acuité encore dans les lotissements situés au nord du lac Lynn (cf figure 7.5). **Nous suggérons que la manière dont ces lotissements sont implantés par rapport aux voies artérielles influe sur l'indice de détour des tronçons de leur réseau viaire : plus le retrait des lotissements par rapport aux voies artérielles est important, plus il existe de détour entre ce lotissement et le reste du réseau.**

L'implantation des lotissements en retrait par rapport aux voies artérielles dans les quartiers de Leesville, Six Forks et bien d'autres est potentiellement due à une **volonté accrue de fermeture, d'isolement de ces lotissements**, en comparaison avec ceux de Millbrook, New Hope et bien d'autres, implantés directement sur les

artères. Selon Southworth et Owens (1993), cette recherche de fermeture n'a cessé de s'accroître dans les banlieues étasuniennes durant la seconde moitié du XXe siècle. Elle est motivée par un besoin croissant de sécurité et d'intimité de la part des habitants de ces banlieues. A ce propos, il est intéressant de constater que les quartiers de Leesville et Six Forks ont été conçus plus récemment (à partir de 1970) que ceux de Glen Forest, Millbrook et New Hopes (dès 1940)²¹¹.

Ainsi, nous suggérons que la présence de nombreux détours dans le réseau viaire de certains lotissements, telle qu'observée dans nos résultats, est due à une volonté délibérée d'isoler ces lotissements du reste du réseau, et d'offrir à leurs habitants la sécurité et l'intimité qu'ils recherchent.

Pour finir, la distribution spatiale de l'indice de détour pour la banlieue de Waterloo présente elle aussi un motif intéressant. On constate que les tronçons situés autour du terrain de golf du quartier de Westmount (cf figure 7.6) ont un indice de détour élevé. Comme nous l'avons vu pour le cas de Paris, cela s'explique du fait que ce terrain introduit une rupture dans le réseau viaire, ce qui engendre de nombreux détours. Ce même phénomène explique l'indice de détour élevé des tronçons situés près du lac Lynn dans la banlieue de Raleigh, mais aussi celui des tronçons qui traversent Central Park à Manhattan.

²¹¹ Selon la description de ces quartiers disponible sur la plateforme *Neighborhoodscout.com*, qui contient des données fines sur l'immobilier dans les quartiers aux Etats-Unis.

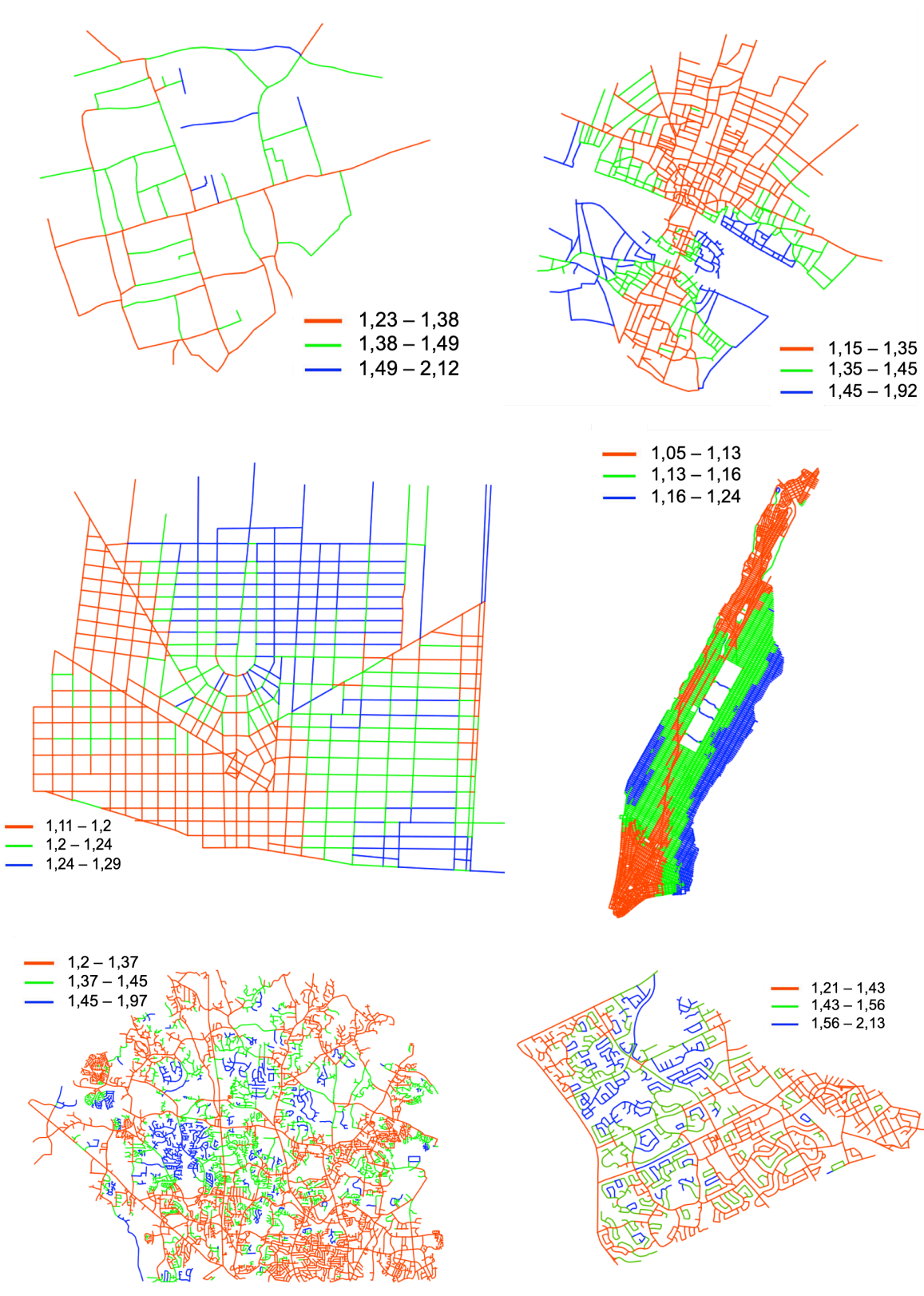


Figure 7.4 : Cartes représentant l'indice de détour des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.

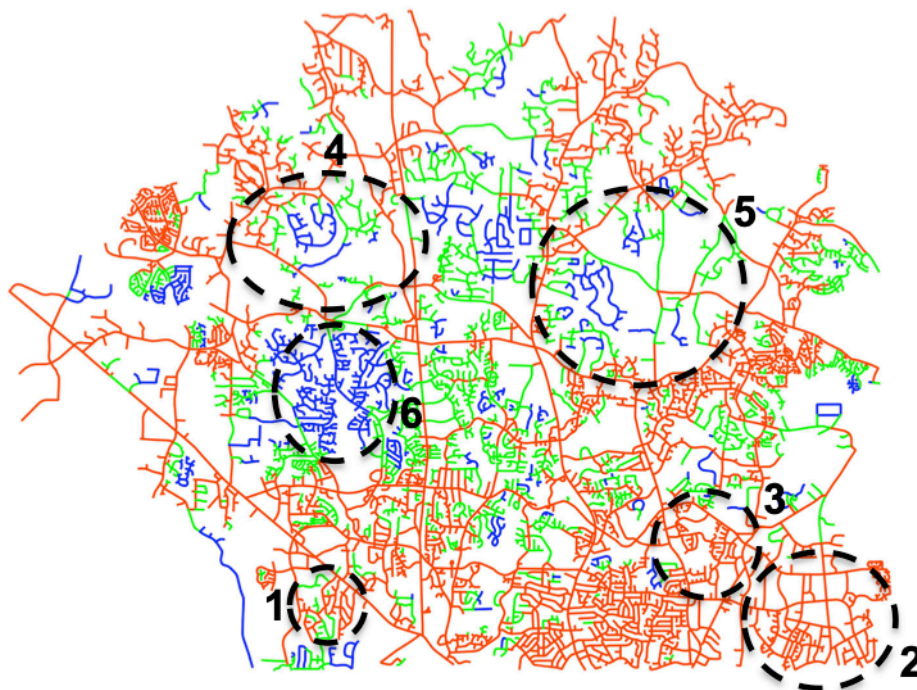


Figure 7.5 : Carte de l'indice de détour des tronçons dans la banlieue de Raleigh, faisant figurer en pointillés les quartiers mentionnés dans le texte.
1 : Glen Forest, **2** : New Hope, **3** : Millbrook, **4** : Leesville, **5** : Six Forks, **6** : plusieurs lotissements situés au nord du lac Lynn.



Figure 7.6 : Carte de l'indice de détour des tronçons dans la banlieue de Waterloo, faisant figurer en pointillés le terrain de golf du quartier Westmount.

II.1.3. Centralité d'intermédiarité

Distribution statistique et valeurs de référence

Rappelons que la centralité d'intermédiarité d'un tronçon désigne le nombre (pondéré) de plus courts chemins auquel participe ce tronçon. Si un tronçon a une centralité d'intermédiarité élevée, cela signifie qu'il est situé sur un grand nombre de plus courts chemins reliant les autres tronçons du réseau.

Selon la littérature, la forme de la distribution statistique de la centralité d'intermédiarité diffère selon les réseaux, elle peut être exponentielle (Crucitti et al., 2006; Porta et al., 2006), en loi de puissance (Jiang et al., 2009; Lämmer et al., 2006), voire gaussienne dans certains cas (Crucitti et al., 2006). Dans notre cas, nous n'allons pas rechercher quelle loi (exponentielle, puissance ou autre) est la plus adaptée pour résumer la distribution statistique de la centralité d'intermédiarité. Nous nous contentons de décrire sa forme. Les histogrammes (figure 7.7) indiquent des distributions statistiques dissymétriques à gauche sur l'ensemble de nos cas d'étude. Cela signifie qu'il existe dans ces réseaux quelques tronçons à la centralité d'intermédiarité élevée, donc qui participent à un grand nombre de plus courts chemins, et une majorité de tronçons à la centralité d'intermédiarité faible, participant peu aux plus courts chemins.

Les valeurs maximales pouvant être atteintes par la centralité d'intermédiarité dépendent du nombre de « plus courts chemins » existant dans le réseau. Plus le réseau comprend de plus courts chemins, plus le nombre de plus courts chemins auquel un tronçon peut potentiellement participer est élevé. Or, le nombre de plus courts chemins dans un réseau découle directement du nombre de tronçons dans ce réseau. Cela suggère que la centralité d'intermédiarité est influencée par le nombre de tronçons dans le réseau. Toutefois, nos résultats illustrent que seules les valeurs extrêmes de la centralité (les plus élevées) sont influencées par la taille du réseau. En effet, si on compare les moyennes ou les valeurs maximales de la centralité d'intermédiarité des réseaux (cf figure 7.7), on constate que les réseaux de grande taille (comme Manhattan ou la banlieue de Raleigh) ont une centralité d'intermédiarité moyenne et maximale plus élevée que les réseaux de petite taille²¹². En revanche, si on compare les médianes, celles-ci sont très proches entre des réseaux de taille différente. On observe par exemple que le réseau de Chester, qui n'a que 100 tronçons, le réseau de la banlieue de Waterloo, qui comprend environ 1000 tronçons, et le réseau de la banlieue de Raleigh, qui comprend près de 6000 tronçons, ont des centralités d'intermédiarité médianes proches. Ce résultat suggère que l'effet de la taille toucherait uniquement les valeurs extrêmes de la centralité d'intermédiarité.

²¹² A Manhattan, plus grand réseau du corpus 1, la valeur maximale de la centralité est de 2253,3, tandis qu'à Chester, plus petit réseau du corpus, elle est de 18,3.

Rappelons que, dans notre cas, nous voulons étudier la répartition, plus ou moins égalitaire, de la centralité d'intermédiarité entre les tronçons d'un réseau. Cela nous permet de décrire comment se répartissent les plus courts chemins parmi les tronçons : sont-ils concentrés sur un petit nombre de tronçons, ou sont-ils équitablement répartis ? Cette concentration des plus courts chemins nous renseigne sur l'isotropie et la fluidité des déplacements permises par un réseau viaire (cf section I.1.2). La répartition de la centralité d'intermédiarité sera décrite grâce à son indice de Gini. Celui-ci prend des valeurs élevées dans le cas d'une répartition inégalitaire. Les valeurs de l'indice de Gini obtenues sur nos cas d'étude sont indiquées dans le tableau 7.3. Elles varient de 0,43 pour le réseau de Chester, à 0,83 pour celui de la banlieue de Raleigh. Cette valeur obtenue pour Raleigh est proche de celles obtenues par Lämmer et al. (2006)²¹³, sur quelques unes des plus grandes villes allemandes, notamment Düsseldorf (Gini= 0,84), Bochum (0,84), et Nuremberg (0,85). Signalons que Lämmer et al. trouvent des indices de Gini beaucoup moins variables que les nôtre, ils varient de 0,84 à 0,9.

L'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité semble partiellement lié à la taille des réseaux de ce corpus : il est le plus faible dans le réseau de Chester, et le plus élevé dans les réseaux de Manhattan et de la banlieue de Raleigh. Toutefois, des réseaux approximativement de même taille comme ceux de Paris et Détroit ont des indices de Gini de la centralité d'intermédiarité très différents. A l'inverse, des réseaux de taille différente comme ceux de Chester et Détroit, ont des indices de Gini proches.

La valeur de l'indice de Gini indique que le réseau de Détroit et celui de Chester ont une centralité d'intermédiarité répartie de manière égalitaire entre les tronçons, ce qui signifie que les tronçons dans ces réseaux participent équitablement aux plus courts chemins. Les autres réseaux ont une centralité d'intermédiarité répartie de manière plus inégalitaire. Cela signifie que les tronçons dans ces réseaux participent aux plus courts chemins de manière inégalitaire : un petit nombre de tronçons participe à plusieurs plus courts chemins, et un grand nombre de tronçon participe peu aux plus courts chemins. Ces résultats suggèrent que les réseaux de Détroit et Chester permettent une meilleure isotropie et fluidité des déplacements que les autres réseaux du corpus.

²¹³ Lammer et al. calculent l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité des tronçons, sur les réseaux viaires des 20 plus grandes villes allemandes (comme nous, ils représentent ces réseaux par des graphes géométriques duaux). Ils trouvent l'indice de Gini le plus élevé, 0,9, dans les réseaux de Bremen et Duisburg, et le plus faible à Bochum (0,84).

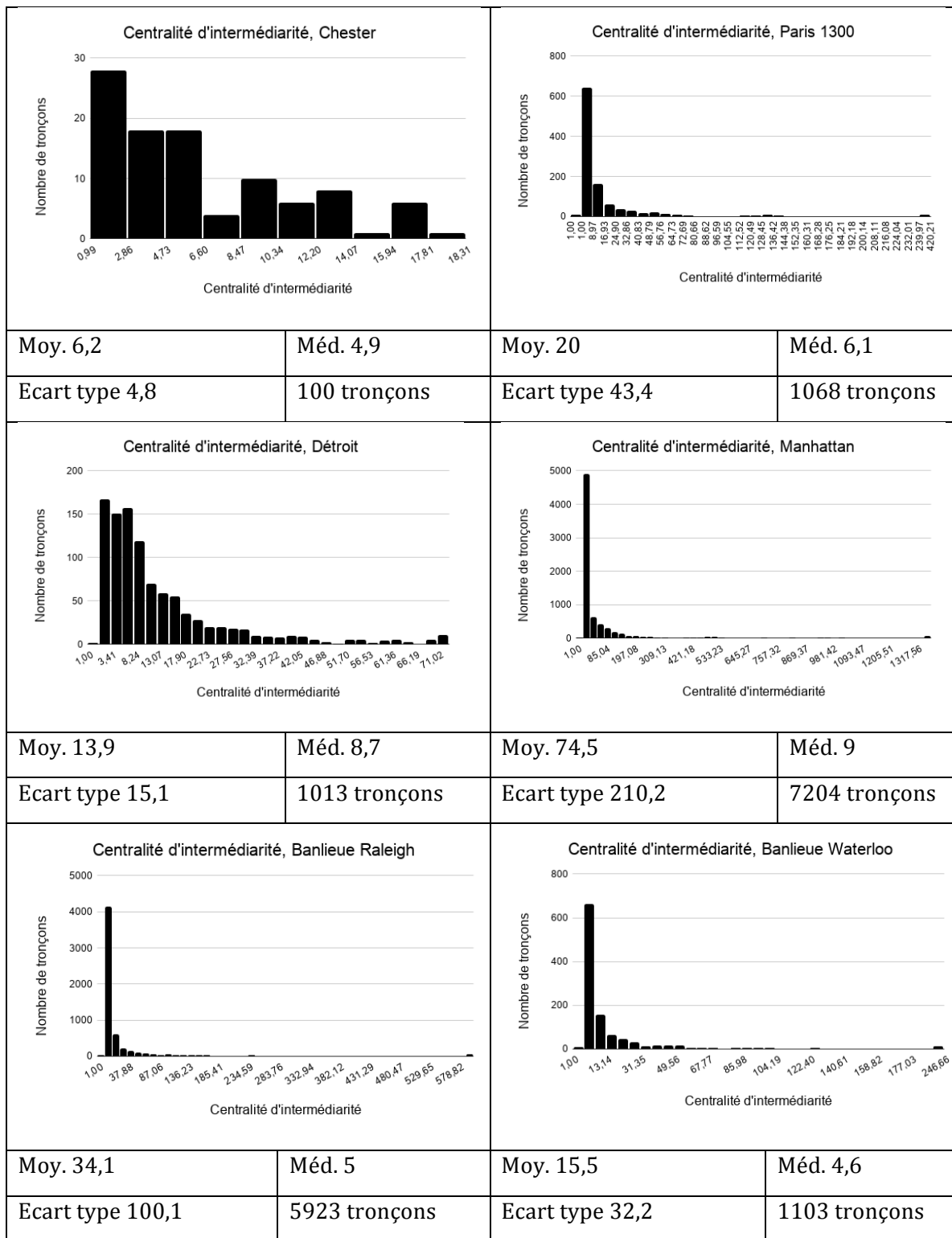


Figure 7.7 : Histogrammes de la centralité d'intermédiarité des tronçons, pour les six réseaux viaries du corpus 1. L'amplitude des classes dans chaque histogramme est choisie de manière à ce que celui-ci soit lisible. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

Réseaux	Indice de Gini de la centralité d'intermédiarité
Chester	0,43
Paris	0,71
Détroit	0,49
Manhattan	0,82
Banlieue Raleigh	0,83
Banlieue Waterloo	0,72

Tableau 7.3 : Valeurs de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, pour les six réseaux du corpus 1.

Distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité

Les distributions statistiques étant dissymétriques, nous choisissons une discrétisation selon la méthode des seuils naturels observés sur les histogrammes (figure 7.8). Dans le réseau viaire de Chester, on constate que plusieurs des tronçons ayant la centralité d'intermédiarité la plus élevée sont sur des voies périphériques (en rouge), permettant de contourner le centre du réseau.

Le motif observé à Paris est différent, les tronçons ayant la centralité d'intermédiarité la plus élevée sont au centre du réseau. On remarque en particulier un axe formé par l'actuelle rue Saint-Martin en rive droite et rue du Petit Pont en rive gauche, ainsi que par le Pont Notre Dame, le Petit Pont et la rue de la Cité entre les deux. Le pont au Change et les voies qui y sont reliées ont eux aussi une centralité d'intermédiarité élevée. Les ponts et les voies qui permettent d'y accéder ont une centralité d'intermédiarité élevée. Ce résultat se rapproche de celui décrit par Porta et al. (2006) sur la centralité d'intermédiarité dans le réseau viaire de Venise : **ils trouvent les valeurs de centralités d'intermédiarité les plus élevées dans les tronçons formant les ponts de la ville.**

Dans le réseau viaire de Détroit, la majorité des tronçons dont la centralité d'intermédiarité est élevée est située dans la partie centrale du réseau. Ce résultat se rapproche de celui décrit par Barthelemy et Flammini (2009) sur la centralité d'intermédiarité d'un réseau théorique en grille. **Les auteurs trouvent la centralité d'intermédiarité la plus élevée dans le barycentre du réseau, et une centralité qui décline régulièrement à mesure que l'on s'éloigne de ce barycentre.** Le motif que nous trouvons pour le cas de Détroit est plus complexe, **ce qui peut s'expliquer par l'écart entre la morphologie de ce réseau et celui d'une grille parfaitement régulière.**

La distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité des tronçons dans le réseau viaire de Manhattan est fortement marquée par la présence de Central Park. Les quatre voies qui le traversent jouent le rôle de ponts, elles permettent de raccourcir les chemins entre les quartiers situés à l'est du parc à ceux situés à l'ouest. Cela explique que la centralité d'intermédiarité des tronçons formant ces voies soit élevée. On constate également que plusieurs voies qui traversent la ville du nord au sud ont une centralité d'intermédiarité élevée. Les avenues (voies nord-sud) ont en général une centralité d'intermédiarité plus élevée que les rues (voies est-ouest).

Les distributions spatiales de la centralité d'intermédiarité des tronçons dans la banlieue de Raleigh et celle de Waterloo présentent un motif intéressant. Nous constatons que les voies dont la centralité d'intermédiarité est la plus élevée (en rouge) correspondent souvent aux artères principales, tandis que celles à la centralité d'intermédiarité la plus faible (en bleu) correspondent aux collecteurs locaux et aux voies en culs-de-sac. Il en résulte une distribution spatiale hiérarchisée de la centralité d'intermédiarité : les voies dont la centralité d'intermédiarité est la plus élevée correspondent à un type de voie fonctionnellement défini, il s'agit des routes, artères, rocades. De leur côté, les voies locales (voie de desserte en cul-de-sac par exemple) ont la centralité d'intermédiarité la plus faible. **Cette hiérarchie a été identifiée par de nombreux auteurs pour la centralité d'intermédiarité** (Strano et al. (2012) sur la région de Groane, Lammer et al. (2006) sur Dresden) (cf chapitre 4). Elle est visible en comparant la carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons à une carte représentant les voies par type. Pour la banlieue de Raleigh (cf figure 7.9), on constate que les voies de type « routes » (en rouge) correspondent souvent aux voies dont la centralité d'intermédiarité est la plus élevée. Pour la banlieue de Waterloo (cf figure 7.10), on constate que les voies de type « artères » (en rouge) correspondent souvent aux voies dont la centralité d'intermédiarité est la plus élevée.

Par ailleurs, on constate dans la banlieue de Raleigh que les voies à **la centralité d'intermédiarité élevée forment des boucles fermées**. Ce motif a été identifié par Barthelemy (2018) dans plusieurs réseaux viaires: celui de l'agglomération de Paris, de Dresden, de Los Angeles et de Shanghai. Nous l'identifions également dans le réseau viaire de Chester (cf figure 7.8).

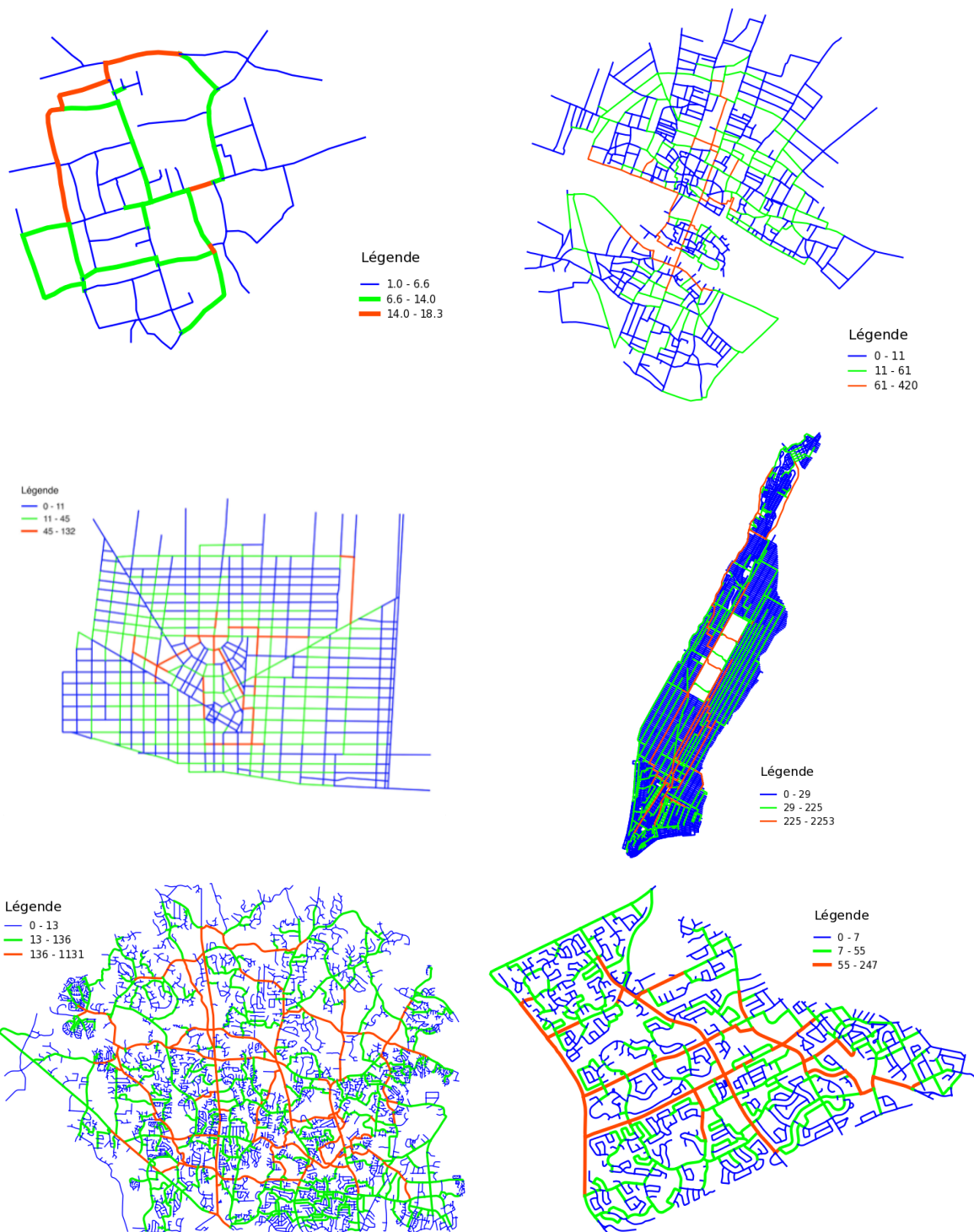


Figure 7.8 : Cartes représentant la centralité d'intermédialité des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.



Figure 7.9 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiation des tronçons du réseau de la banlieue de Raleigh, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau de la banlieue de Raleigh, indiquant les routes en rouge, et les autres types de voies en bleu turquoise. Source de la typologie de voies : Wake County GIS, *Wake Streets 1999*, Raleigh, 2009.

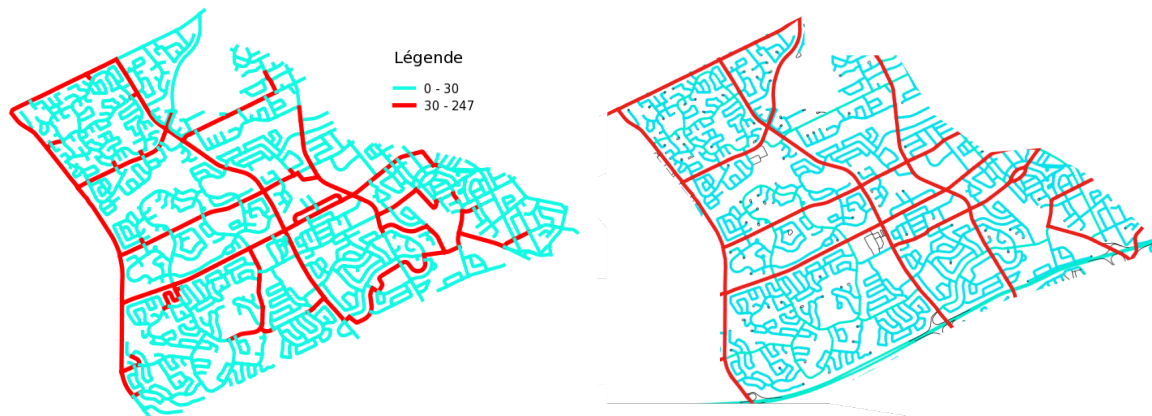


Figure 7.10 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiation des tronçons du réseau de la banlieue de Waterloo, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau de la banlieue de Waterloo, indiquant les artères en rouge, et les autres types de voies en bleu turquoise. Source de la typologie de voies : Geospatial Center, *Extent of Urban Built-up Area*, University of Waterloo, 2017.

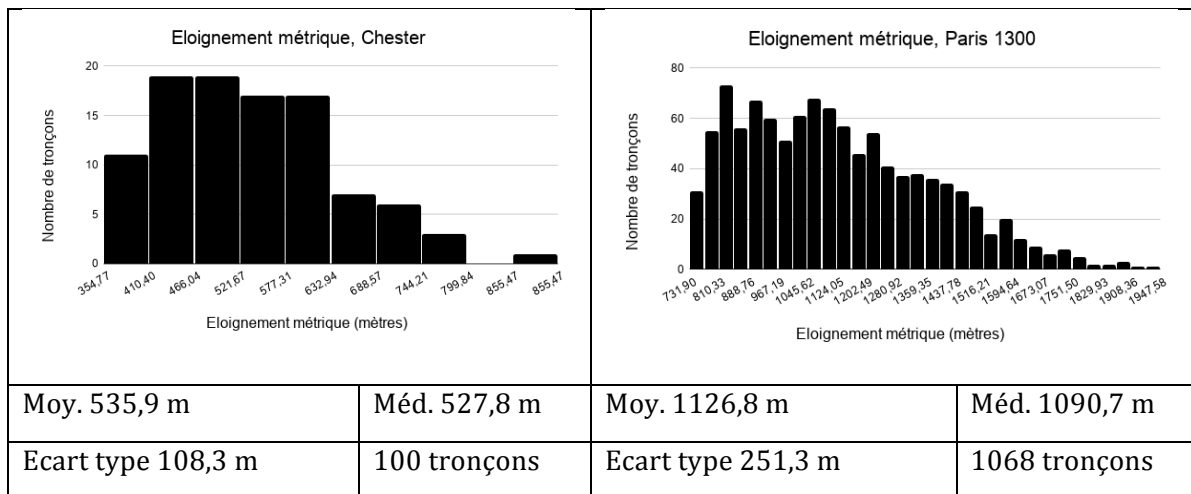
II.1.4. Eloignement métrique

Distribution statistique et valeurs de référence

Rappelons que l'éloignement métrique d'un tronçon désigne la longueur (métrique) des plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres tronçons du réseau. Si un tronçon a un éloignement métrique faible, cela signifie que les plus courts chemins qui relient ce tronçon aux autres sont courts (en distance métrique).

On observe sur les histogrammes (figure 7.11) de l'éloignement métrique des distributions dissymétriques à gauche sur nos cas d'étude, à l'exception du réseau de la banlieue de Waterloo. Nous constatons également que l'ordre de grandeur de l'éloignement métrique varie entre les réseaux dans de très larges proportions. Les valeurs centrales (moyenne et médiane) confirment cette différence d'ordre de grandeur.

L'éloignement métrique moyen et médian est élevé dans les réseaux de grandes tailles (en termes de nombre de tronçons). Il atteint sa valeur maximale dans le réseau de la banlieue de Raleigh et dans celui de Manhattan, et sa valeur minimale dans le réseau de Chester. Les résultats pour ce descripteur peuvent donc sembler triviaux, pourtant, nous observons également certaines différences entre des réseaux de même taille. Les réseaux de Paris et Détroit sont approximativement de même taille et ont des éloignement métriques moyen et médian proches, en revanche le réseau de la banlieue de Waterloo, qui lui aussi est approximativement de même taille, a un éloignement métrique moyen et médian beaucoup plus élevé. En effet, à nombre de tronçons presque égal, l'éloignement métrique moyen et médian est deux fois plus élevé dans la banlieue de Waterloo qu'à Détroit. Dit autrement, **les tronçons sont en moyenne deux fois plus éloignés les uns des autres (métriquement) dans la banlieue de Waterloo qu'à Détroit. Cela nous mène à formuler l'hypothèse selon laquelle la taille du réseau n'est pas la seule caractéristique morphologique qui influe sur l'éloignement métrique d'un réseau.**



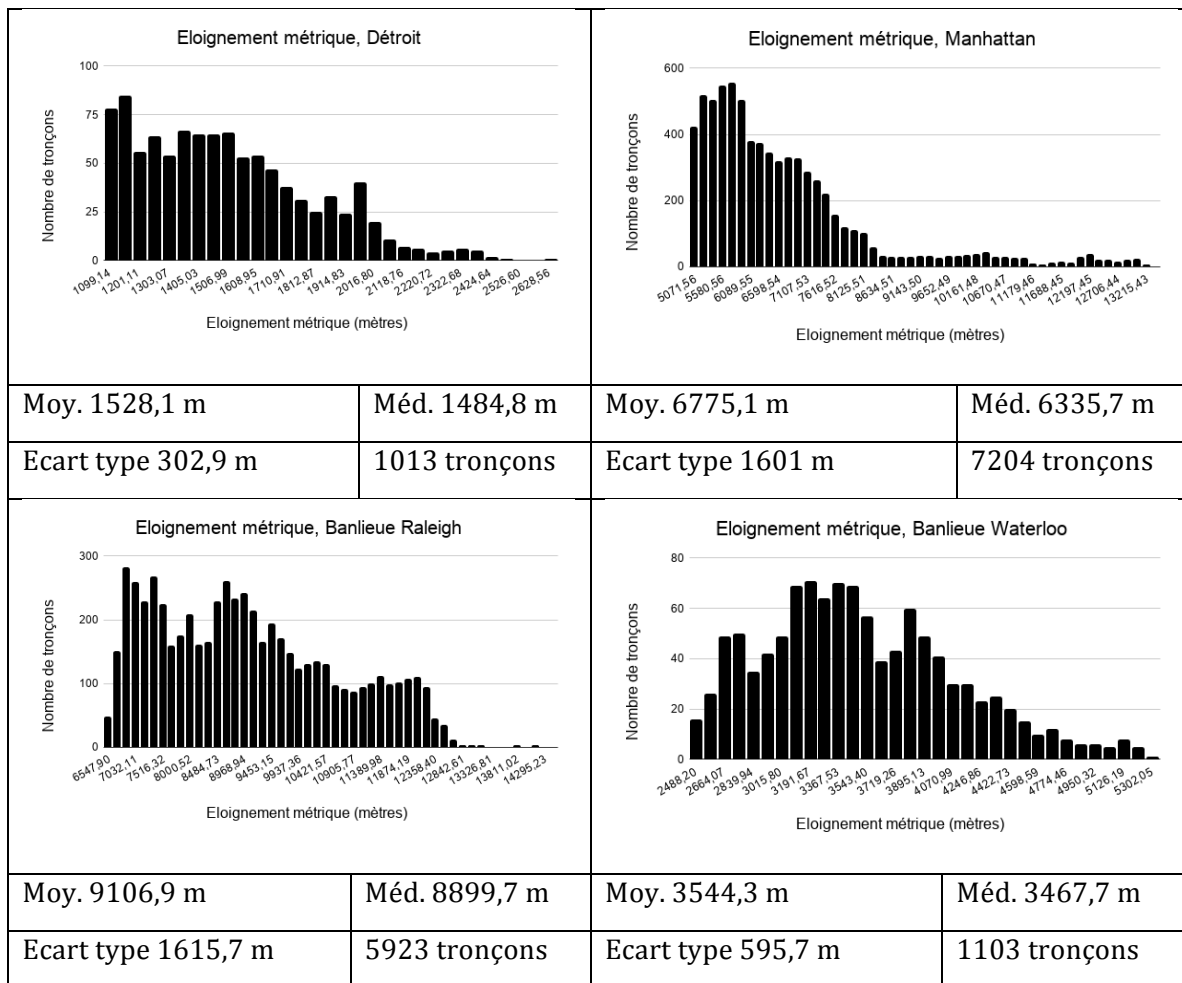


Figure 7.11 : Histogrammes de l'éloignement métrique des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1. L'amplitude des classes dans chaque histogramme est choisie de manière à ce que celui-ci soit lisible.

La distribution spatiale de l'éloignement métrique est identique quel que soit le réseau considéré. On observe un gradient centre-périphérie : les tronçons situés au centre du filaire sont systématiquement ceux dont l'éloignement métrique est le plus faible, car ils sont les plus proches métriquement de l'ensemble des autres tronçons. Plus on s'éloigne du centre du filaire, plus l'éloignement métrique des tronçons est élevé. L'éloignement métrique est donc fortement sensible à l'effet de bord, ce qui était décrit dans la littérature (Porta et al., 2006 ; Hillier & Iida, 2005). Pour cette raison, nous choisissons de ne pas développer l'étude de la distribution spatiale de ce descripteur.

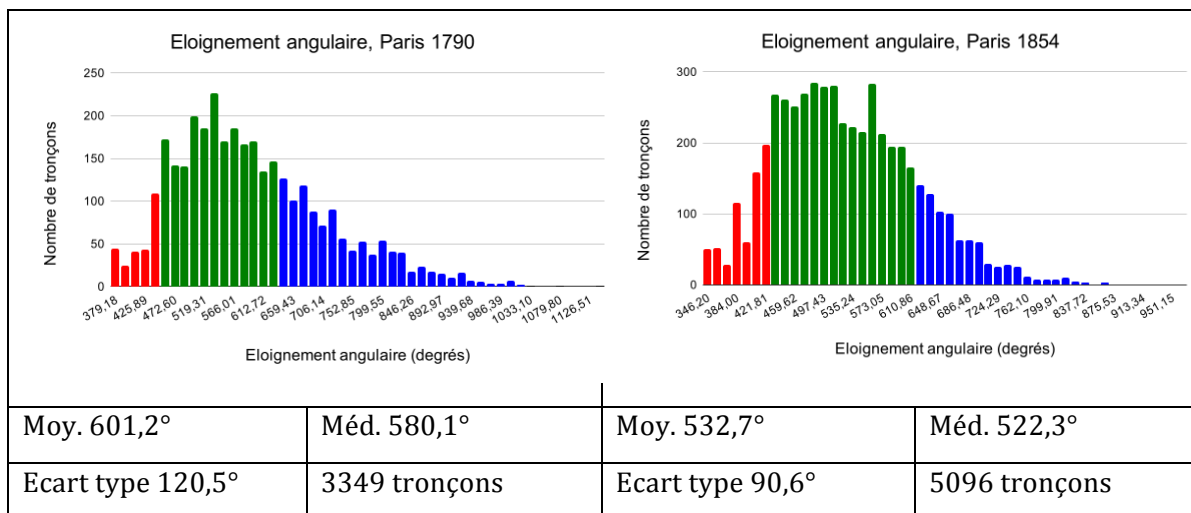
II.2. Résultats sur le réseau parisien entre 1790 et 1888 (corpus 2)

Rappelons que le corpus 2 comprend le réseau viaire parisien à quatre dates différentes : 1790, 1854, 1871 et 1888. Nous allons analyser l'évolution, entre ces différentes dates, de chacun des descripteurs d'accessibilité. Pour ce faire, nous nous basons sur l'étude de la distribution statistique et spatiale du descripteur (à chaque date), et l'étude de ses valeurs de référence (moyenne, médiane, ou autre). Pour mieux observer l'évolution de la distribution statistique et spatiale de chaque descripteur, nous allons discrétiser ses valeurs selon des bornes communes aux quatre dates. Ces bornes seront choisies en fonction des seuils visibles sur les histogrammes, en tentant d'identifier des seuils pertinents à chacune des dates.

II.2.1. Eloignement angulaire

Distribution statistique et valeurs de référence

La distribution statistique de l'éloignement angulaire est globalement symétrique aux quatre dates (cf figure 7.12). Les valeurs de référence (la moyenne et la médiane) nous permettent d'observer une baisse de l'éloignement angulaire entre 1790 et 1871, puis une légère hausse entre 1871 et 1888. Ces valeurs de référence suggèrent que les plus courts chemins entre les tronçons du réseau viaire parisien deviennent de plus en plus linéaires jusqu'en 1871, avant de perdre en linéarité en 1888.



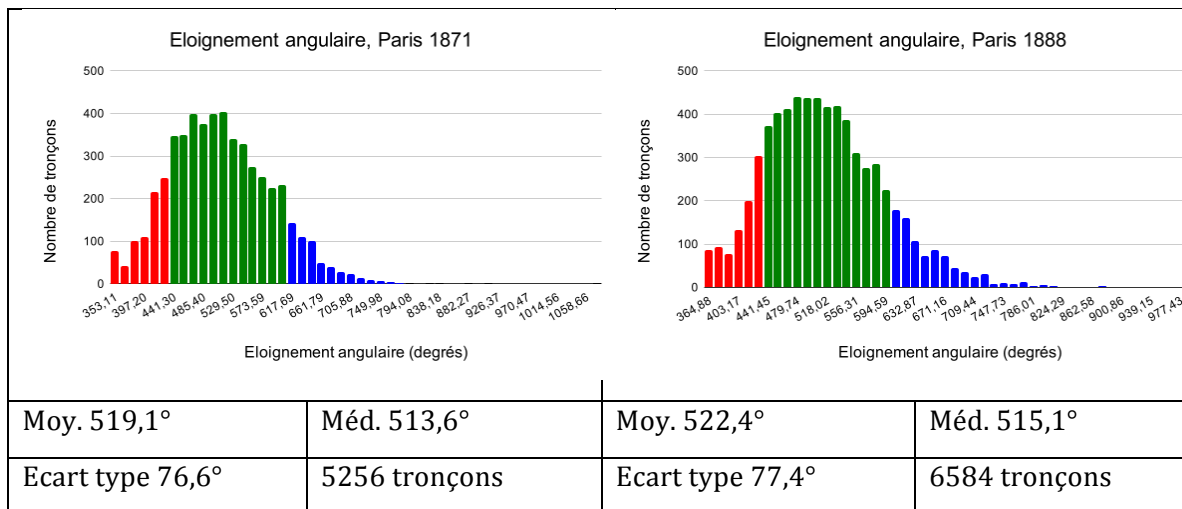


Figure 7.12 : Histogrammes de l'éloignement angulaire des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.

Distribution spatiale de l'éloignement angulaire

Les cartes de la figure 7.13 ont été obtenues en discrétisant les valeurs de l'éloignement angulaire par des bornes communes (selon les mêmes classes que sur les histogrammes ci-dessus). La distribution spatiale de l'éloignement angulaire met en évidence des motifs très structurés : sur la carte de 1790, on constate que les tronçons dont l'éloignement angulaire est le plus faible se situent sur de longs axes rectilignes. Le plus remarquable est l'axe nord-sud formé par la rue Saint-Martin et les voies qui la prolongent en rive droite, et par la rue Saint-Jacques et les voies qui la prolongent en rive gauche. Quelques voies perpendiculaires à cet axe ont elles aussi un éloignement faible. Ce motif est proche de celui identifié sur la carte de l'éloignement angulaire de Paris en 1300 (cf figure 7.2). Cela signifie que, près de 5 siècles plus tard, ces voies demeurent celles qui permettent une linéarité des chemins entre les tronçons du réseau.

Sur la carte de 1854, on observe beaucoup plus de tronçons à l'éloignement angulaire faible. Il s'agit en grande partie de tronçons appartenant à des voies qui existaient déjà en 1790 : les quais de Seine, les voies qui suivent le tracé de l'ancienne enceinte de Philippe Auguste, et plusieurs voies perpendiculaires à l'axe nord-sud (rue Saint-Martin/rue Saint-Jacques). L'éloignement angulaire de ces voies a donc baissé entre 1790 et 1854, ce qui signifie que les déplacements depuis et vers ces voies sont devenus plus linéaires.

En 1871, la rue de Rivoli apparaît comme une voie dont les tronçons ont un éloignement angulaire faible (alors qu'elle ne l'est pas avant cette date). Cela peut s'expliquer par son prolongement jusqu'à la Place de la Bastille par la rue Saint-Antoine, prolongement qui en fait un axe long de 3,5 km permettant des **itinéraires linéaires entre l'Est et l'Ouest de la ville**. Certaines nouvelles percées comme la rue de Turbigo (entre l'actuelle Place de la République et l'église Saint-Eustache) et

le boulevard de Magenta (entre l'actuelle Place de la République et la Gare du Nord) ont elles aussi des éloignements angulaires faibles.

La distribution spatiale de l'éloignement angulaire en 1888 présente assez peu de différences avec celle de 1871. Nous remarquons toutefois que le Pont de Sully (à la pointe Est de l'île Saint-Louis) et le boulevard Henri IV (entre la Place de la Bastille et le Pont de Sully), tous deux tracés à cette période, ont un éloignement faible.

De manière générale, nous remarquons que les voies dont l'éloignement angulaire est le plus faible sont souvent des voies longues et rectilignes. Ceci corrobore notre hypothèse, formulée lors de l'étude du corpus 1, sur le lien entre la longueur et la courbure des tronçons et leur éloignement angulaire. Nous testons cette hypothèse dans le chapitre 8.

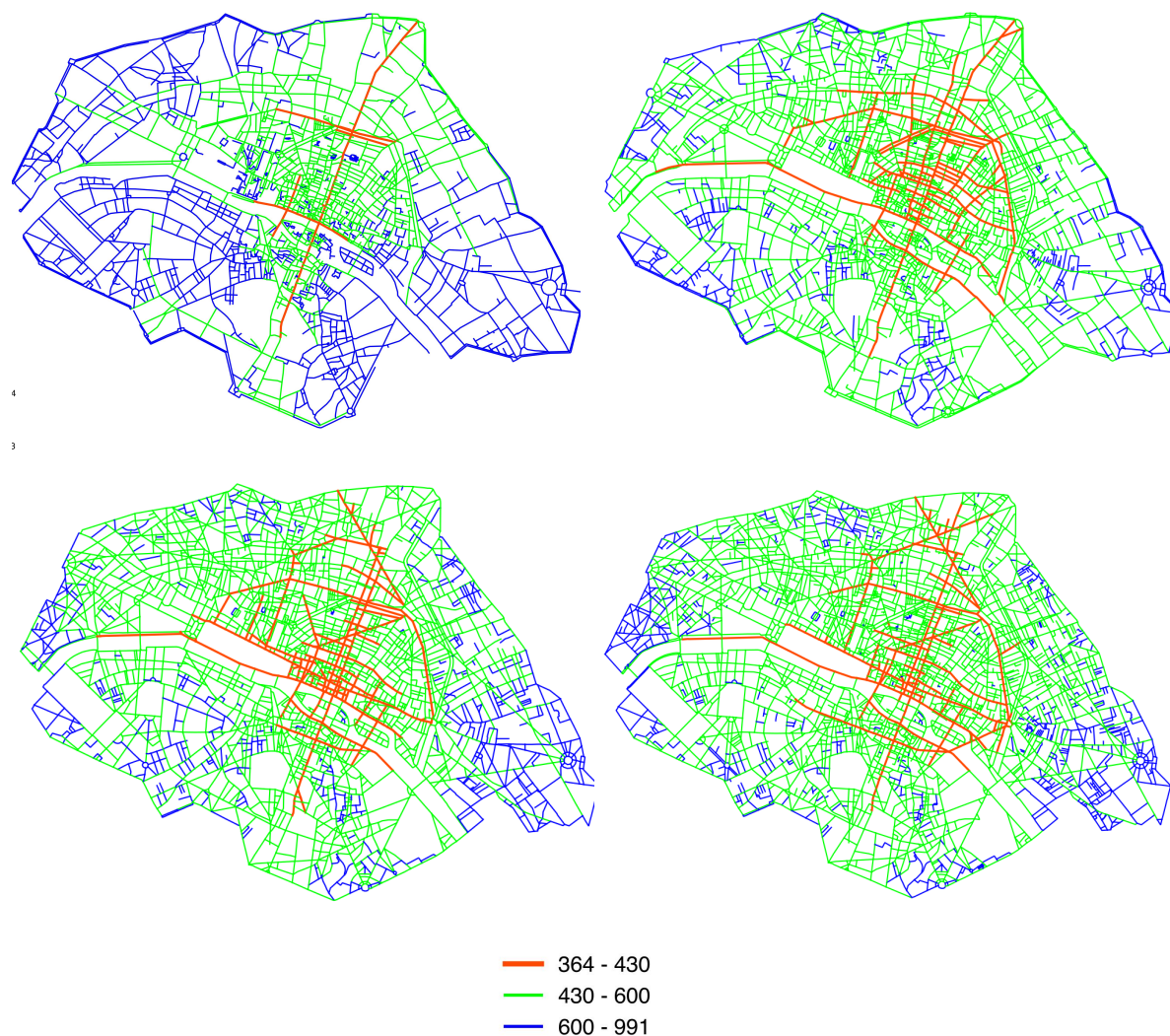


Figure 7.13 : Cartes représentant l'éloignement angulaire des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : Paris en 1790, en 1854, en 1871 et en 1888. Les quatre cartes ont été obtenues grâce à une discrétisation commune, basée sur des seuils observés sur les histogrammes.

II.2.2. Indice de détour

Distribution statistique et valeurs de référence

La distribution statistique de l'indice de détour dans le réseau parisien est symétrique aux quatre dates considérées. Les histogrammes (figure 7.14) nous permettent également de constater que les tronçons du réseau parisien en 1790 ont, globalement, un indice de détour bien plus élevé qu'aux autres dates. La classe regroupant les tronçons à l'indice de détour supérieur à 1,22 (en bleu sur les histogrammes) est prédominante en 1790, alors qu'elle est minoritaire aux autres dates.

En comparant les valeurs de référence du descripteur entre une date et une autre, on constate effectivement une baisse de l'indice de détour, moyen et médian, sur l'ensemble de la période. Ainsi, les plus courts chemins entre les tronçons du réseau parisien deviennent de plus en plus continus, au fil du temps. Cela suggère que le réseau permet des déplacements de plus en plus continus, sans détours.

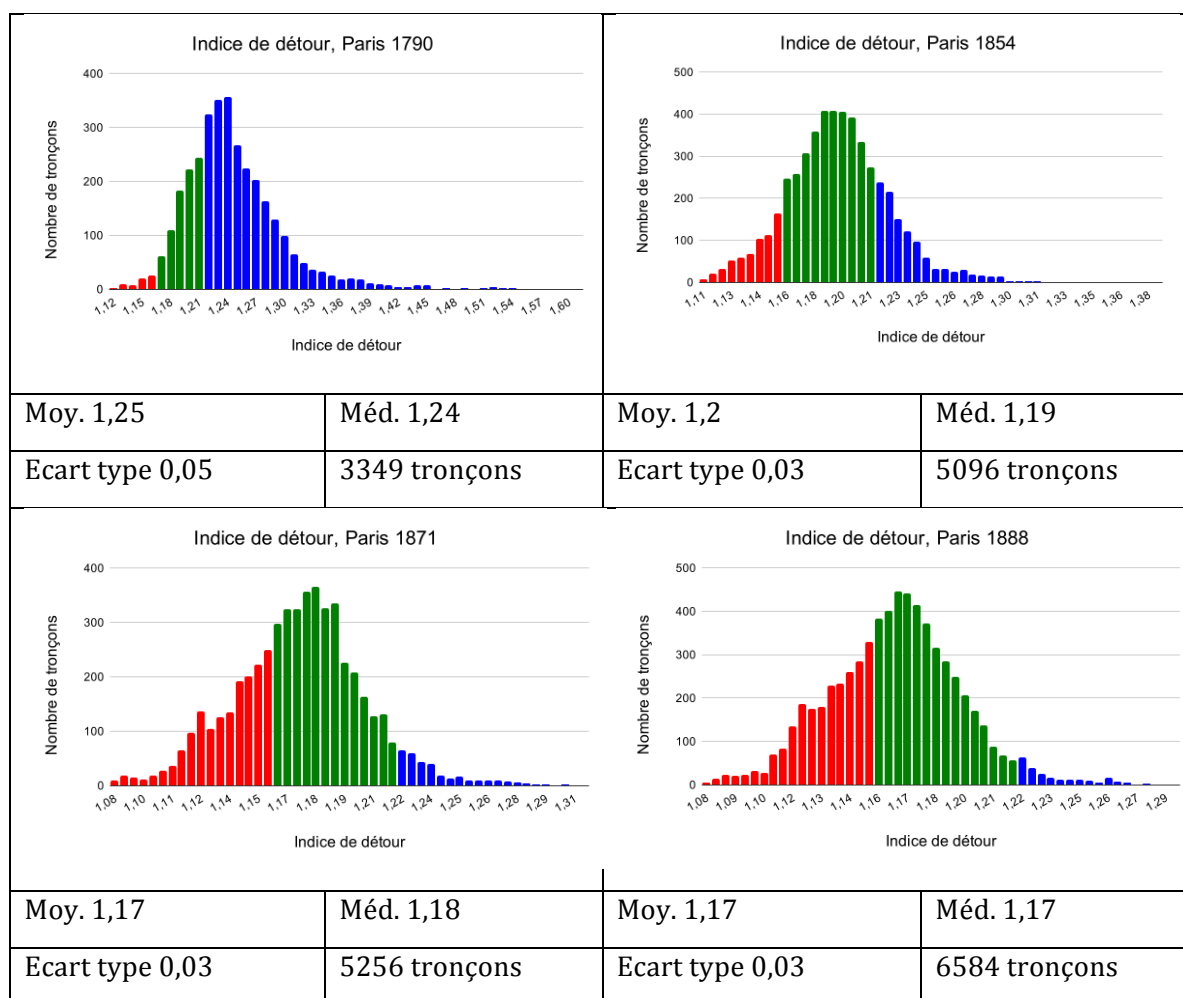


Figure 7.14 : Histogrammes de l'indice de détour des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.

Distribution spatiale de l'indice de détour

Les cartes de l'indice de détour (figure 7.15) confirment que le réseau de 1790 comprend une majorité de tronçons à l'indice de détour supérieur à 1,22 (en bleu). En 1854, on voit émerger des parties du réseau dont l'indice de détour est faible (inférieur à 1,16, en rouge sur les cartes et les histogrammes), notamment autour des places en étoile telles que la Place de la Nation (à l'extrême est du réseau), la Place de l'Etoile (à l'extrême ouest), ou encore la Place d'Italie (au sud). Cette distribution spatiale se confirme en 1871 et en 1888 : les parties du réseau situées autour des places en étoile ont des tronçons à l'indice de détour faible. Plus généralement, on constate que l'indice de détour fait ressortir **les voies qui partent de ces places en étoile, et traversent le réseau en diagonale. Ces voies permettent des trajectoires directes, sans détour, entre certains points du réseau. Les parties du réseau situées près de ces voies bénéficient elles aussi d'un indice de détour faible.** Ce motif avait été observé pour le cas de Broadway à Manhattan, et pour les voies en diagonale du réseau viaire de Détroit.

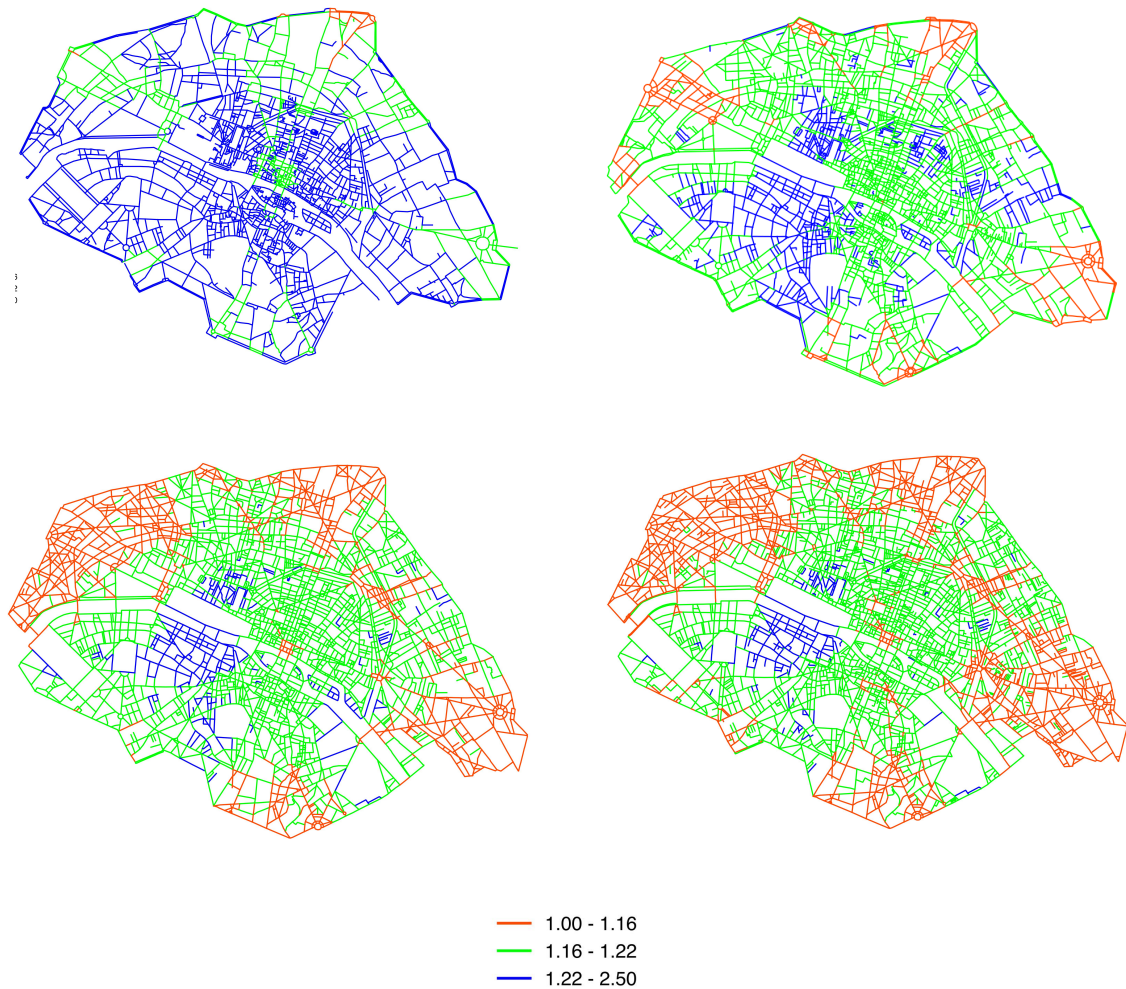


Figure 7.15 : Cartes représentant l'indice de détour des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : Paris en 1790, en 1854, en 1871 et en 1888.

II.2.3. Centralité d'intermédiarité

Distribution statistique et valeurs de référence

On observe des distributions de la centralité d'intermédiarité dissymétriques à gauche, avec une majorité de tronçons à la centralité d'intermédiarité très faible, et quelques tronçons à la centralité élevée (figure 7.16). Les valeurs de la centralité d'intermédiarité moyenne et maximale augmentent entre une date et la suivante. Comme indiqué en section II.1.3, cela peut être interprété comme un potentiel effet de la taille du réseau (qui augmente entre 1790 et 1888) sur le nombre de plus courts chemins existants dans le réseau, et donc sur le nombre de plus courts chemins auquel peut participer un tronçon. Cela a des répercussions sur les valeurs pouvant être prises par la centralité d'intermédiarité d'un tronçon.

Pour ce descripteur, notre intérêt ne porte pas sur les valeurs centrales (moyenne et médiane) mais sur l'indice de Gini, indiqué dans le tableau 7.4. Rappelons que celui-ci nous permet d'évaluer la répartition, plus ou moins égalitaire, de la centralité d'intermédiarité entre les tronçons d'un réseau, donc la plus ou moins forte concentration des plus courts chemins sur un petit nombre de tronçons.

L'indice de Gini croit entre 1790 et 1888, passant de 0,71 à 0,76. Cette faible variabilité de l'indice de Gini était attendue. Comme indiqué en section II.1.3, Lämmer et al. (2006) trouvent, sur un ensemble de 20 réseaux viaires de villes allemandes, un indice de Gini variant de 0,84 à 0,9. L'augmentation de l'indice de Gini dans le réseau parisien entre 1790 et 1888 indique que la répartition des plus courts chemins entre les tronçons du réseau est de plus en plus inégalitaire. Cela signifie que les plus courts chemins sont de plus en plus concentrés sur un petit nombre de tronçons. Cela suggère que l'isotropie et la fluidité des déplacements, permises par le réseau viaire parisien, sont de plus en plus faibles.

Signalons toutefois que l'augmentation observée de l'indice de Gini entre 1790 et 1888 est potentiellement uniquement liée à l'augmentation de la taille du réseau. Nous testerons cette hypothèse dans le chapitre 8.

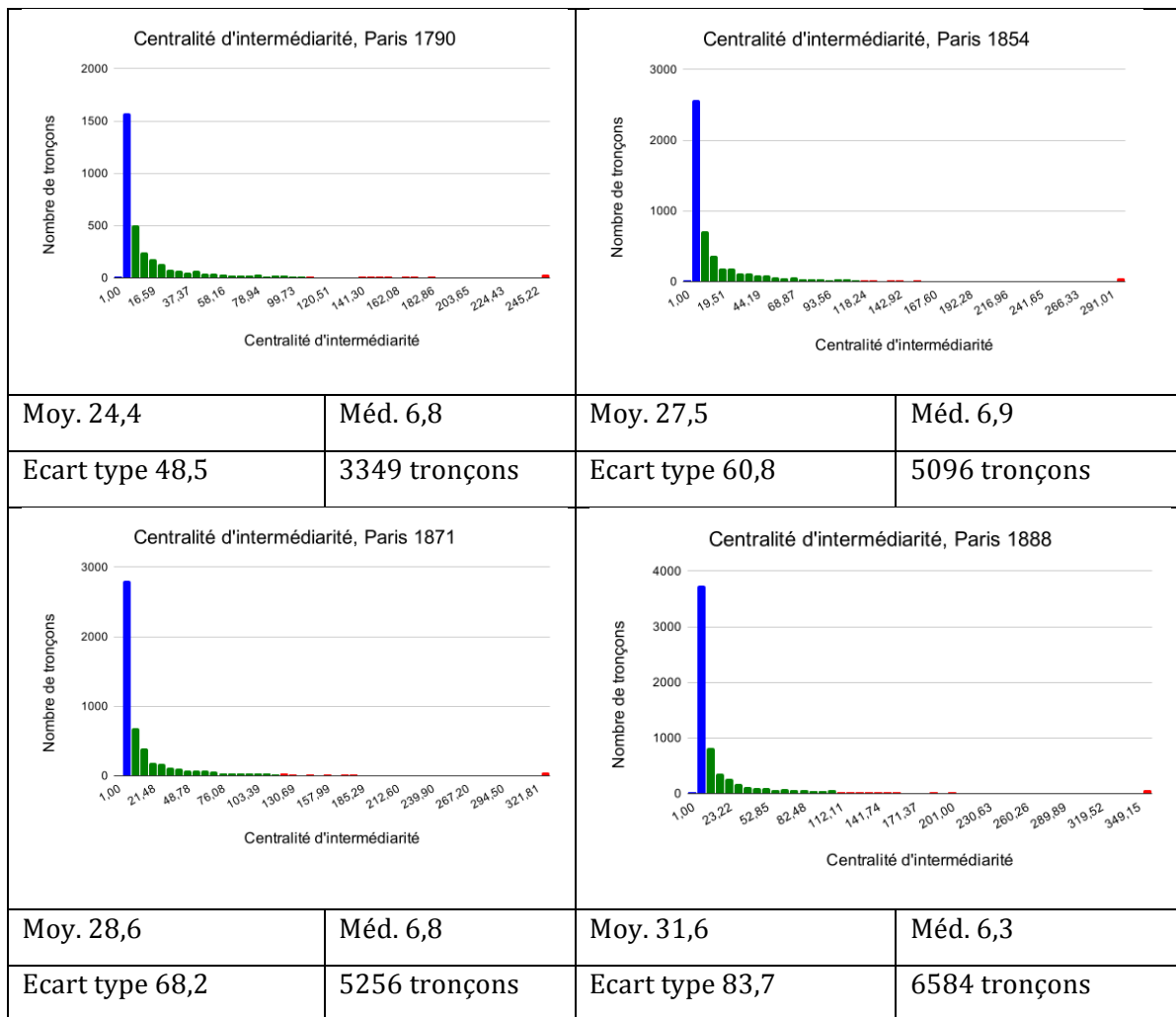


Figure 7.16 : Histogrammes de la centralité d'intermédierité des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2. Pour réduire l'étalement des histogrammes, nous avons regroupé en une classe les 1% des valeurs les plus faibles, et en une classe les 1% des valeurs les plus élevées.

Réseaux	Indice de Gini de la centralité d'intermédierité
Paris en 1790	0,71
Paris en 1854	0,73
Paris en 1871	0,74
Paris en 1888	0,76

Tableau 7.4 : Valeurs de l'indice de Gini de la centralité d'intermédierité, pour les quatre réseaux du corpus 2.

Distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité

La distribution spatiale (figure 7. 17) de la centralité d'intermédiarité des tronçons dans le réseau viaire parisien en 1790 indique que les ponts qui traversent la Seine ont des centralités d'intermédiarités élevées. Ce résultat est similaire à celui observé pour Paris en 1300, et à celui observé pour Venise par Porta et al. (2006). Par ailleurs, certains tronçons de l'enceinte des Fermiers Généraux et de l'ancienne enceinte de Philippe Auguste (alors démolie) ont eux aussi une centralité d'intermédiarité élevée. Il en est de même pour les tronçons des voies qui longent la Seine. En 1854, les voies qui longent le Canal Saint-Martin apparaissent elles aussi comme ayant des tronçons à la centralité d'intermédiarité élevée. En 1871, les voies qui longent l'enceinte des Fermiers Généraux et le canal Saint-Martin perdent en centralité d'intermédiarité, et plusieurs voies à la centralité d'intermédiarité élevée apparaissent au centre du réseau. Ce phénomène se poursuit en 1888, les voies à forte centralité d'intermédiarité se situent loin de l'enceinte des Fermiers Généraux. Nous constatons que ces voies sont souvent reliées entre elles, formant **une série de boucles**, particulièrement en rive droite. Ce motif en boucles avait été identifié par Barthelemy (2018) dans la centralité d'intermédiarité de plusieurs réseaux viaires : celui de Paris, Dresden, Los Angeles et Shanghai. Ces voies en boucle à la centralité élevée participent à un grand nombre de plus courts chemins, et sont donc potentiellement très fréquentées.

En résumé, jusqu'en 1854, les tronçons qui participent à un grand nombre de plus courts chemins (donc à la centralité d'intermédiarité élevée) sont ceux situés sur les voies qui bordent les enceintes de la ville, ou le canal Saint-Martin. A partir de 1871, donc à partir de la période haussmannienne, on observe une redistribution de ces plus courts chemins, qui se localisent désormais sur des voies en boucle situées au centre du réseau.

Cette redistribution des plus courts chemins à Paris durant la période haussmannienne a également été observée par Barthelemy et al (2013). Ces auteurs ont étudié la distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité du réseau viaire parisien sur graphe primaire (centralité des intersections du réseau). En comparant la distribution spatiale des nœuds dont la centralité est la plus forte, en 1836 et en 1888, les auteurs constatent des modifications importantes. Selon eux, **ce phénomène est peu fréquent car les nœuds les plus centraux présentent généralement une certaine permanence à travers le temps**. Ils donnent l'exemple de Strano et al. (2012), qui avaient observé cette permanence dans le réseau viaire de la région de Groane (Milan). **Barthelemy et al. en concluent que la redistribution spatiale de la centralité d'intermédiarité à Paris est due à l'œuvre d'Haussmann, tandis que la permanence observée à Groane relève d'une croissance non planifiée.**

La distribution spatiale en boucles de la centralité d'intermédiarité dans le réseau parisien en 1888 nous évoque celle observée dans le réseau de Chester, et celui de la

banlieue de Raleigh (cf section II.1.3). Il est intéressant de souligner que dans le cas de Raleigh, ces boucles à la centralité d'intermédiarité élevée correspondaient souvent à un type de voies fonctionnellement défini : les routes. Il y avait alors concordance entre type de voies et valeur prise par leur centralité d'intermédiarité. Cela n'est pas le cas dans le réseau parisien en 1888, les boucles observées ne correspondent pas à un type de voie défini (cf figure 7.18).

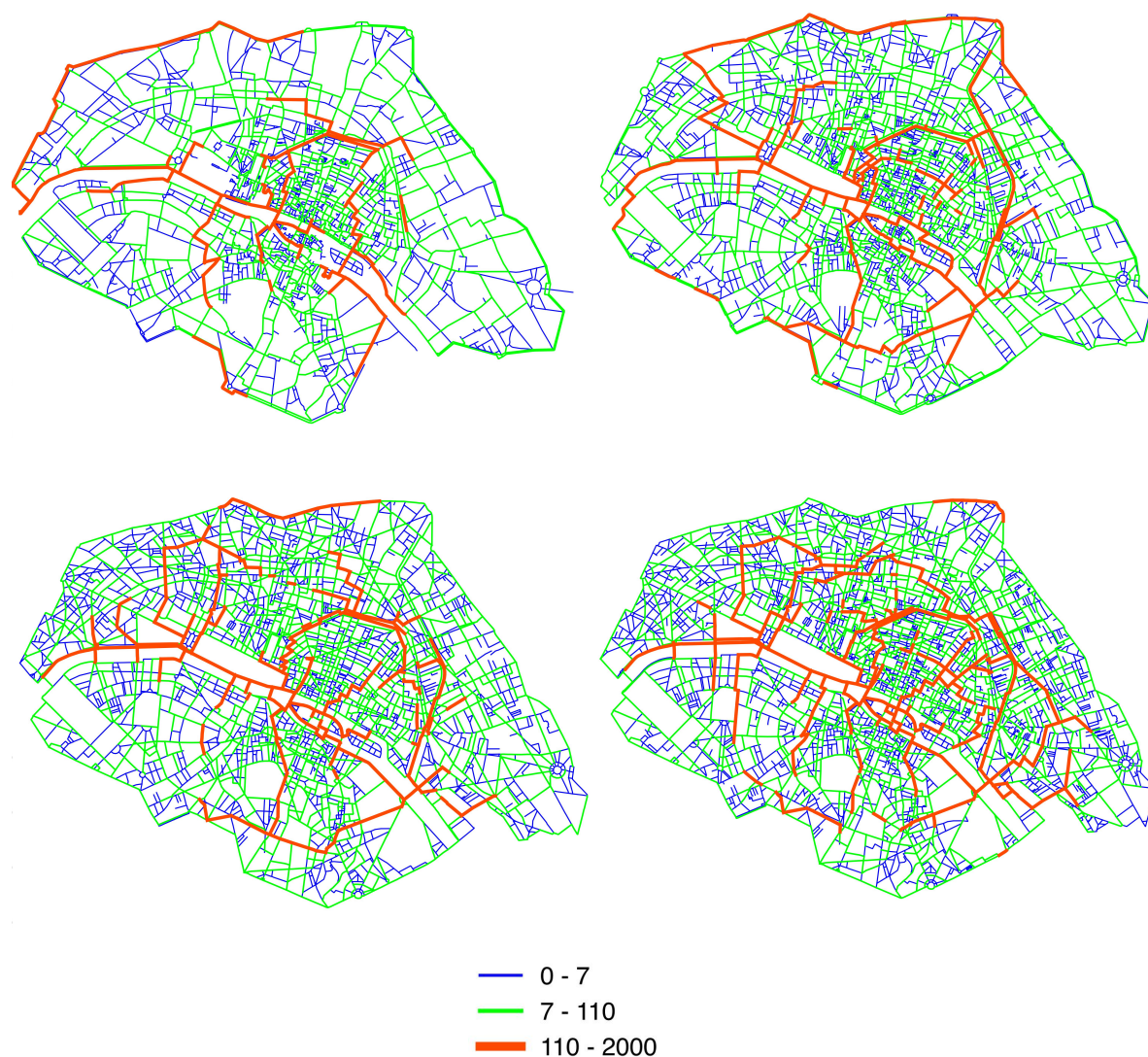


Figure 7.17 : Cartes représentant la centralité d'intermédiarité des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2. Sont représentés de gauche à droite et de haut en bas : Paris en 1790, en 1854, en 1871 et en 1888.

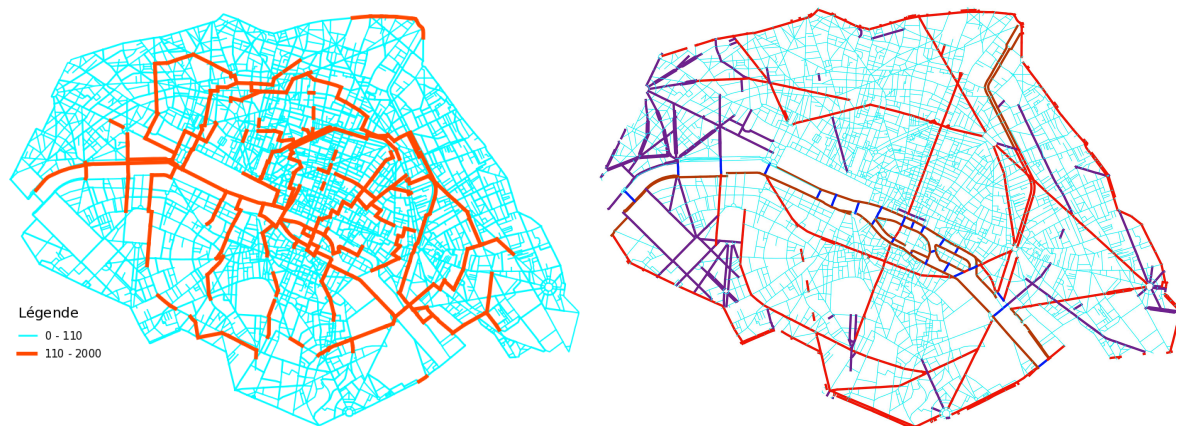


Figure 7.18 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiation des tronçons du réseau parisien en 1888, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau viaire parisien en 1888, indiquant les boulevards (en rouge), les avenues (en violet), les quais (en marron) et les ponts (en bleu marine). Les autres types sont en bleu turquoise. Cette carte a été construite grâce aux données sur les types de voies, disponibles sur le filaire de 1888 construit dans le cadre du projet GeoHistoricalData.

II.2.4. Eloignement métrique

Distribution statistique et valeurs de référence

La distribution statistique de l'éloignement métrique des tronçons est présentée dans les histogrammes de la figure 7.19. On observe des distributions dissymétriques à gauche sur l'ensemble des quatre périodes. Un grand nombre de tronçons ont un éloignement métrique faible, et quelques tronçons ont un éloignement élevé. Les valeurs centrales de ces distributions nous permettent d'observer des évolutions entre une date et une autre. On constate que la moyenne et la médiane de l'éloignement métrique augmentent sur l'ensemble de la période. Ce résultat suggère que les plus courts chemins entre les tronçons du réseau viaire parisien deviennent de plus en plus longs entre 1790 et 1888, donc que le réseau parisien permet une moins bonne proximité des déplacements en 1888 qu'en 1790.

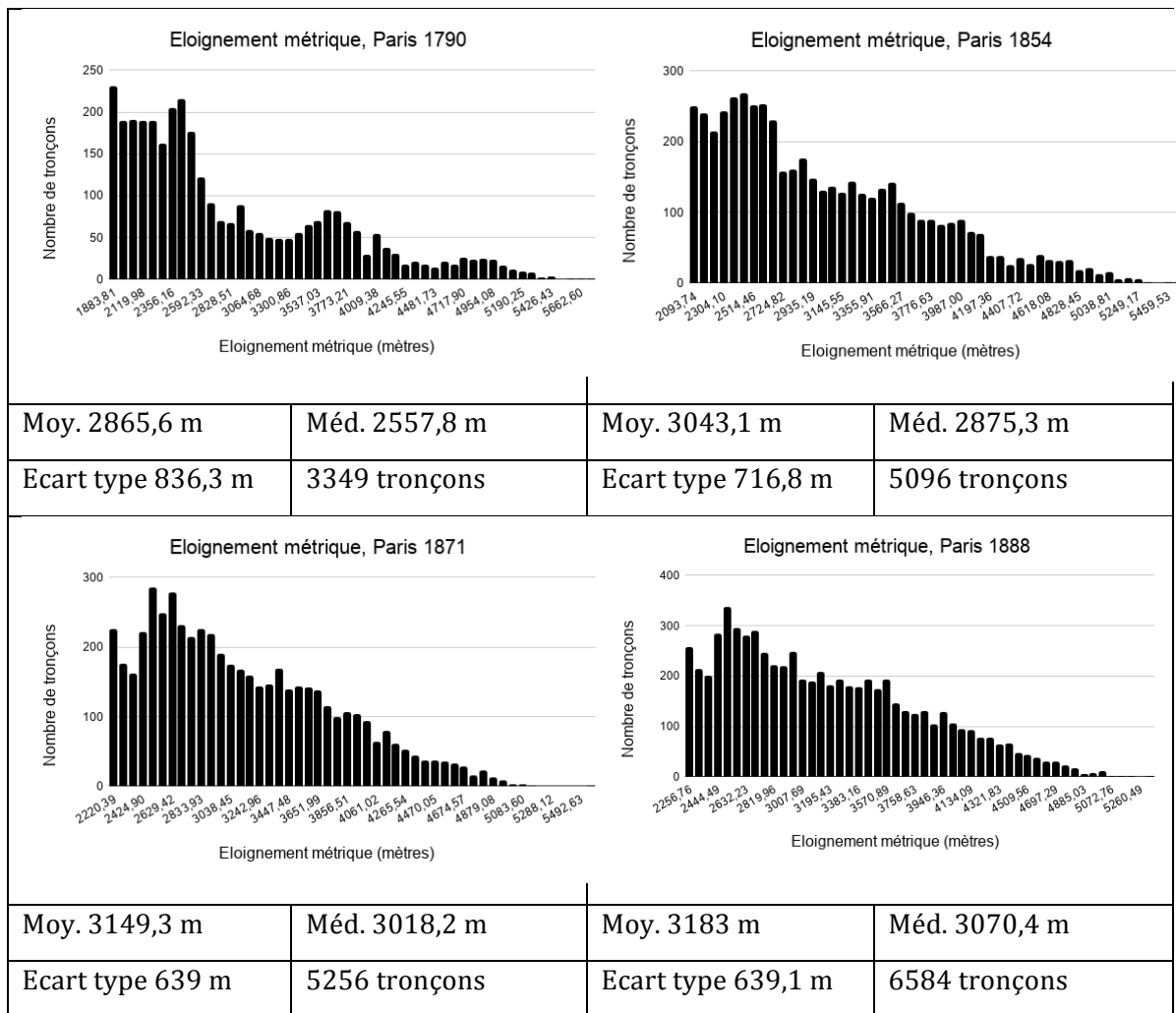


Figure 7.19 : Histogrammes de l'éloignement métrique des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.

Comme pour le corpus 1, la distribution spatiale de l'éloignement métrique du réseau parisien présente un gradient centre-périphérie quelle que soit le réseau considéré. Nous choisissons donc de ne pas étudier de plus près cette distribution spatiale.

Conclusion de la partie II

Dans cette partie, nous avons décrit les conditions d'accessibilité de chaque réseau viaire de nos deux corpus, grâce aux descripteurs d'accessibilité rappelés en partie I. Nous avons étudié la distribution statistique et spatiale de chacun de ces descripteurs, ainsi que leurs valeurs de référence.

Nous avons en particulier montré dans cette partie la fertilité de l'étude de la distribution spatiale de chacun des descripteurs d'accessibilité utilisés. En effet, cette étude permet de révéler des motifs intéressants qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Elle permet également de montrer que ces motifs peuvent être similaires entre

les réseaux, qu'il s'agisse de réseaux de même type ou de réseaux de types différents. Par exemple, Détroit et la banlieue de Raleigh se révèlent proches en termes de distribution spatiale de l'éloignement angulaire, alors que leur morphologie est très différente (le réseau de Détroit est de type quadrillé, et celui de la banlieue de Raleigh de type arborescent). Autre exemple, la banlieue de Raleigh et le réseau parisien en 1888 se révèlent proches en termes de distribution spatiale de la centralité d'intermédiarité (nous y avons observé un motif en boucles), alors que ces deux réseaux ont des morphologies très différentes. Nous avons également vu que les réseaux de Manhattan et de Paris entre 1790 et 1888, pourtant très différents d'un point de vue morphologique, présentent des points communs dans la distribution spatiale de leur indice de détour (les voies en diagonale dans ces réseaux présentent des indices de détour faible).

Enfin, l'étude de la distribution spatiale des descripteurs d'accessibilité nous permet de formuler des hypothèses quant aux **caractéristiques morphologiques pouvant être liées aux conditions d'accessibilité** analysées dans ce chapitre. Par exemple, nous supposons que les voies longues et rectilignes ont des éloignements angulaires faibles, et que les voies qui traversent le réseau en diagonale ont un indice de détour faible. Nous supposons également que la présence d'une rupture dans un réseau viaire (un cours d'eau, un parc, un terrain de golf) se répercute sur les conditions d'accessibilité des tronçons situés à proximité. Ces tronçons ont alors un indice de détour élevé, et une centralité d'intermédiarité elle aussi élevée. Dans le chapitre 8, nous testerons certaines de ces hypothèses, grâce à une analyse de la relation entre les descripteurs morphologiques mobilisés dans le chapitre 6, et les descripteurs d'accessibilité étudiés dans ce chapitre.

Après avoir décrit dans cette partie chaque réseau de nos deux corpus, nous allons nous atteler dans la partie III à une description « par type ». Pour les réseaux du corpus 1, nous allons rechercher en quoi les réseaux appartenant à chaque type se distinguent (en termes de conditions d'accessibilité) de ceux appartenant aux autres types. Pour les réseaux du corpus 2, nous allons rechercher en quoi la période haussmannienne se distingue des autres périodes.

Pour identifier les spécificités de chaque type, et de la période haussmannienne, nous choisissons, comme dans le chapitre 6, de nous baser sur les valeurs de référence permettant de résumer la distribution statistique des descripteurs d'accessibilité. Ces valeurs de référence offrent le résumé le plus adapté pour positionner des réseaux les uns par rapport aux autres, et donc identifier leurs spécificités. Cette méthode pose néanmoins la question du choix de la valeur de référence la plus appropriée. Nous constatons que les distributions statistiques des descripteurs d'accessibilité présentent souvent des cas des formes dissymétriques à gauche. C'est le cas pour l'éloignement métrique sur l'ensemble des réseaux. C'est également le cas dans plusieurs réseaux pour l'éloignement angulaire et l'indice de

détour. Pour cette raison, et afin d'harmoniser les valeurs de référence choisies, nous utiliserons systématiquement la valeur médiane des descripteurs étudiés. Toutefois, nous présentons les résultats obtenus avec la moyenne en annexe C. Ces derniers sont en fait très proches de ceux obtenus avec la médiane.

Pour ce qui est de la centralité d'intermédiation, nous utilisons comme valeur de référence l'indice de Gini, qui permet de décrire la répartition de cette centralité entre les tronçons du réseau.

III. Une description par type

Concernant le corpus 1, le premier objectif de cette partie est d'identifier si les réseaux que nous avons classés dans le même type au sein du corpus 1 sont similaires en termes de conditions d'accessibilité, c'est-à-dire s'ils prennent des valeurs proches pour les descripteurs d'accessibilité utilisés. Nous choisissons pour cela de nous baser sur les valeurs de référence permettant de résumer la distribution statistique des descripteurs d'accessibilité. Si les valeurs de référence pour un type sont plus élevées ou plus faibles que celles des autres types, on considérera cela comme une spécificité du type. Plus concrètement, si, par exemple, l'éloignement angulaire médian des deux réseaux de type quadrillé (Détroit et Manhattan) est plus élevé que l'éloignement angulaire médian des autres réseaux, on considérera cela comme une spécificité du type quadrillé²¹⁴.

Dans un tel cas, notre second objectif sera de confronter les conditions d'accessibilité décrites par nos résultats à celles décrites par connaissances thématiques, et résumées dans le tableau 7.1 en début de chapitre. Plus précisément, si nos résultats indiquent que les réseaux de même type (Détroit et Manhattan par exemple) présentent une certaine condition d'accessibilité, nous comparons cette condition à celle décrite dans la littérature pour les réseaux de ce type (le type quadrillé en l'occurrence). Rappelons toutefois que ces connaissances thématiques concernent des cas théoriques alors que nos résultats sont issus de cas empiriques.

Concernant le corpus 2, le premier objectif de cette partie est d'identifier si la période haussmannienne (1854-1871), que nous avons jugée comme représentative d'un certain type d'intervention (création de percées en étoile), se distingue des autres périodes en termes de conditions d'accessibilité. Pour ce faire, nous observons si elle se distingue par une évolution particulière des valeurs prises par les descripteurs d'accessibilité utilisés. Comme pour le corpus 1, nous nous basons sur les valeurs de référence choisies (la médiane et l'indice de Gini).

Si la période haussmannienne se distingue effectivement des autres par une évolution particulière, notre second objectif pour ce corpus sera de confronter cette

²¹⁴ Nous considérons tout écart entre les valeurs, même si cet écart est faible.

évolution décrite par nos résultats, à celle décrite dans la littérature comme faisant suite à la création de percées en étoile dans un réseau.

III.1. Les conditions d'accessibilité de chaque type de réseau du corpus 1

Les graphiques ci-dessous présentent les valeurs de référence (médiane²¹⁵ ou indice de Gini) pour chaque descripteur d'accessibilité utilisé, et pour chaque réseau. Nous choisissons de représenter ces descripteurs deux à deux, l'un sur l'axe des abscisses, l'autre sur l'axe des ordonnées (cf figure 7.20). Nous représentons par une couleur proche les réseaux de même type : rouge/orange pour les réseaux organiques, vert pour les réseaux quadrillés, et bleu pour les réseaux arborescents. Cela nous permet d'observer plus facilement en quoi les conditions d'accessibilité de chaque type de réseau se distinguent de celles des autres.

Les réseaux organiques du corpus 1 ont un éloignement angulaire médian situé entre celui des réseaux quadrillés et celui des réseaux arborescents et ont un indice de détour médian proche de celui des réseaux arborescents. Ces réseaux ne se distinguent pas non plus en termes de concentration de la centralité d'intermédialité. En revanche, leur éloignement métrique médian est plus faible que celui des deux autres types.

En résumé, ce qui distingue les réseaux organiques de notre corpus des autres réseaux est leur **faible éloignement métrique médian**. Pour les autres descripteurs d'accessibilité (résumés par leur valeur de référence), soit les réseaux organiques sont proches de réseaux d'un autre type, soit ils apparaissent dans une position intermédiaire entre les réseaux quadrillés et les réseaux arborescents.

L'éloignement métrique faible des réseaux organiques du corpus, en comparaison avec celui des autres types, signifie que la longueur des plus courts chemins entre les différents tronçons dans ces réseaux est plus faible que dans les autres réseaux. **Cela suggère, selon notre interprétation sur la longueur des chemins (cf tableau 7.2), que les réseaux organiques du corpus (Chester et Paris) permettraient une bonne proximité des déplacements.** Ce résultat coïncide avec certaines connaissances thématiques, concernant les réseaux organiques en général (cf tableau 7.1). En effet, des auteurs comme Jane Jacobs soutiennent que ce type de réseau permet de réduire les distances à parcourir, et facilite l'usage de la marche à pied (cf chapitre 3).

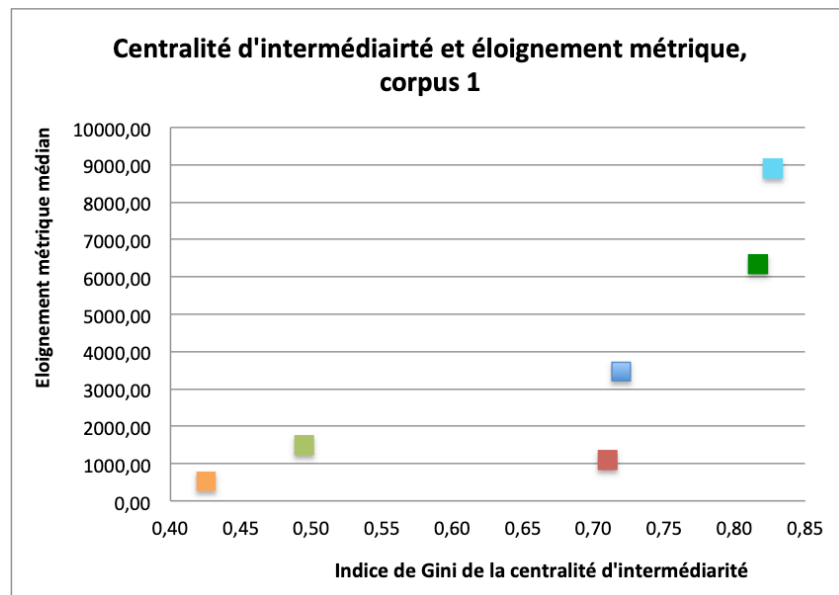
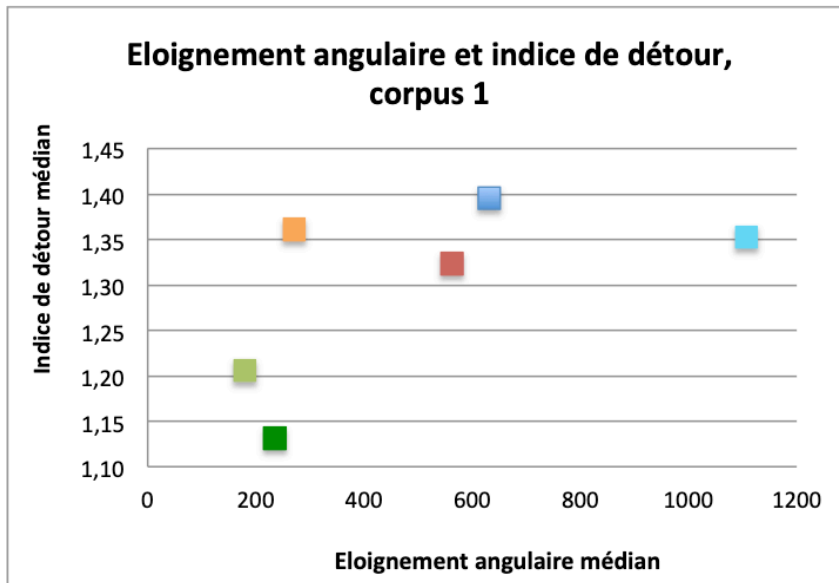
²¹⁵ Les graphiques avec la moyenne comme valeur de référence montrent des distributions similaires, ils sont présentés en annexe C.

Passons maintenant aux réseaux quadrillés. Ceux-ci se distinguent des autres types par un éloignement angulaire médian légèrement plus faible, et par un indice de détour médian beaucoup plus faible. Ces réseaux ne se distinguent pas des autres, en revanche, en termes de concentration de la centralité d'intermédiarité, ni en termes d'éloignement métrique médian.

Ainsi, ce qui caractérise les réseaux quadrillés des autres réseaux du corpus 1 est leur **faible éloignement angulaire médian** et leur **faible indice de détour médian**. Cela suggère que **ces réseaux offrent une plus grande linéarité et continuité des plus courts chemins (reliant les tronçons de ces réseaux) que les autres réseaux du corpus. Considérant notre interprétation de la linéarité et de la continuité des chemins (cf tableau 7.2), cela signifie que les réseaux quadrillés du corpus permettraient des déplacements simples et continus**. Ces résultats coïncident avec des connaissances thématiques sur les réseaux quadrillés de manière générale (cf tableau 7.1). Chanowitz (2014) par exemple soutient que les réseaux quadrillés permettent des déplacements simples. De leur côté, les architectes Pope et Mangin (cités dans Gharbi (2016)) soutiennent que ce type de réseau permet une continuité de l'espace public.

Pour finir, les réseaux arborescents du corpus se distinguent des autres par un éloignement angulaire médian élevé. Ils ont un indice de détour moyen proche de celui des réseaux organiques. Ils ne se distinguent pas des deux autres types en termes de concentration de la centralité d'intermédiarité, ni en termes d'éloignement métrique médian.

Ainsi, ce qui caractérise les réseaux arborescents des autres réseaux du corpus est leur **éloignement angulaire médian élevé**. Pour les autres conditions d'accessibilité, ils sont proches d'au moins un réseau d'un autre type. **Les réseaux arborescents offrent donc une plus faible linéarité des plus courts chemins (reliant les tronçons de ces réseaux) que les autres types de réseau. Selon notre interprétation de la linéarité des chemins (cf tableau 7.2), cela signifie que les réseaux arborescents du corpus ne permettent pas une simplicité des déplacements**. Ce résultat coïncide avec certaines connaissances thématiques (cf tableau 7.1), notamment formulées par Grammenos et al. (2001) à propos des réseaux arborescents de manière générale. Pour eux, ce type de réseau rendrait le cheminement des usagers confus.



■ Chester	■ Paris	■ Détroit	■ Manhattan	■ Banlieue Raleigh	■ Banlieue Waterloo
---	--	---	--	--	---

Figure 7.20 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de références des descripteurs d'accessibilité. Haut : éloignement angulaire médian et indice de détour médian. Bas : indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et éloignement métrique médian. Chaque point coloré correspond à un réseau.

III.2. L'évolution des conditions d'accessibilité suite à l'intervention d'Hausmann

Les graphiques ci-dessous (figure 7.21) présentent l'évolution des valeurs de référence (médiane²¹⁶ ou indice de Gini) pour chaque descripteur d'accessibilité utilisé, et pour chaque réseau du corpus 2. Ils nous permettent de montrer en quoi les conditions d'accessibilité à la période haussmannienne (entre 1854 et 1871) diffèrent de celles aux autres périodes.

En comparant la période haussmannienne (1854-1871) à la période qui l'a précédée et à celle qui l'a suivie, nous constatons qu'elle se distingue assez peu. L'évolution des descripteurs calculés (résumés ici par leur valeur de référence) entre 1854 et 1871 est proche de celle survenue entre 1790 et 1854, et entre 1871 et 1888 : baisse de l'indice de détour médian, hausse de la concentration de la centralité d'intermédiarité et de l'éloignement métrique médian. Seul l'éloignement angulaire médian présente une évolution légèrement différente puisqu'il se stabilise entre 1871 et 1888, alors qu'il baisse aux autres périodes.

Ce résultat nous interroge sur la spécificité de la période haussmannienne. Dans le chapitre 6, nous avons montré que la période haussmannienne se distinguait des autres par une évolution des descripteurs morphologiques qui était soit plus marquée, soit contraire à celle des autres périodes. Cela suggérait que l'intervention d'Hausmann avait eu un effet mesurable sur l'évolution des caractéristiques morphologiques du réseau viaire parisien. En outre, dans la section II.2.3 de ce chapitre, nous avons vu que la période haussmannienne se distinguait clairement des autres périodes, par une redistribution spatiale des plus courts chemins²¹⁷. Nous nous attendions alors à observer une spécificité de la période haussmannienne dans les valeurs de référence choisies pour résumer la distribution statistique des descripteurs d'accessibilité. Or, les graphiques ci-dessous suggèrent qu'il n'y a pas eu « d'effet Hausmann » sur ces valeurs de référence.

²¹⁶ Les graphiques avec la moyenne comme valeur de référence montrent des évolutions similaires, ils sont présentés en annexe C.

²¹⁷ Ces derniers passent des tronçons situés sur les voies qui bordent les enceintes de Paris, ou le canal Saint-Martin, aux voies en boucle situées au centre du réseau.

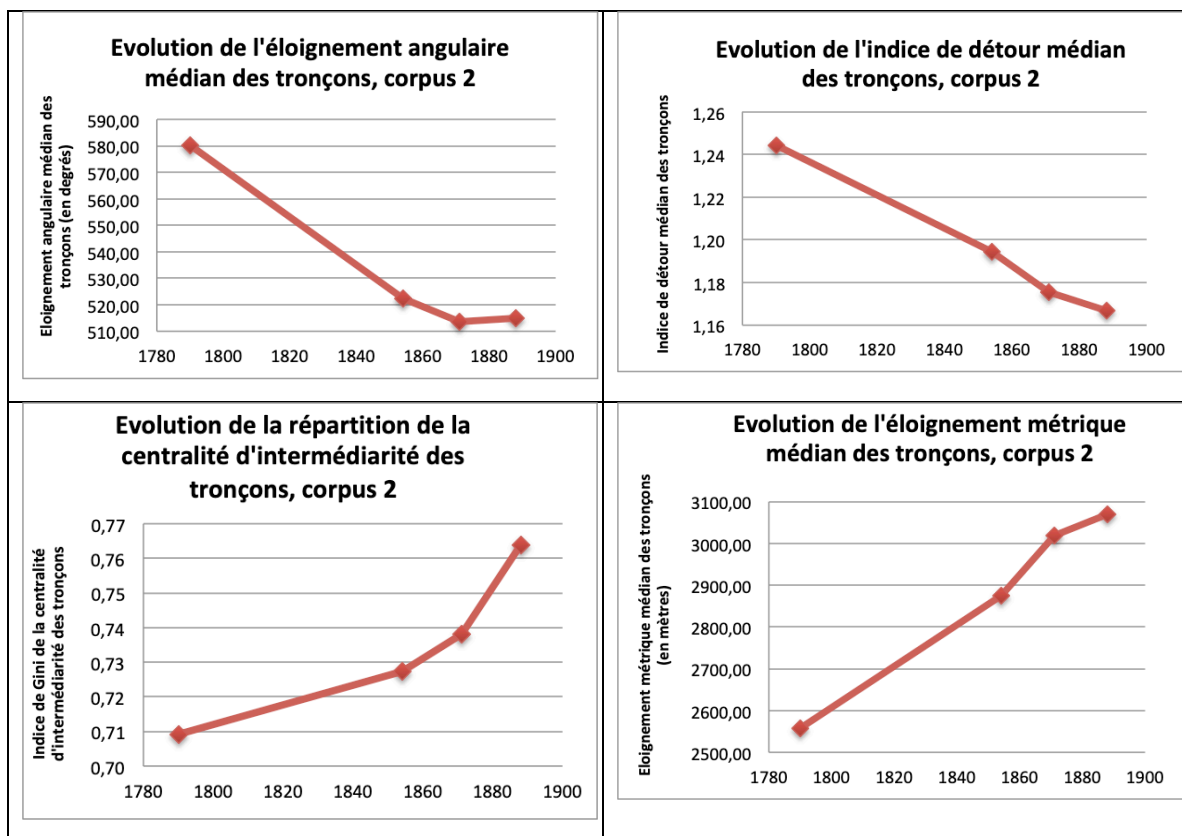


Figure 7.21 : Graphiques représentant l'évolution de l'éloignement angulaire médian, de l'indice de détour médian, de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, et de l'éloignement métrique médian, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.

Ainsi, ces graphiques indiquent une évolution quasi régulière des descripteurs d'accessibilité (résumés par leur valeur de référence), sur l'ensemble de la période allant de 1790 à 1888. Nous allons confronter, à titre indicatif, cette évolution à l'évolution des conditions d'accessibilité décrite dans la littérature comme faisant suite à la création de percées en étoile dans un réseau. Rappelons toutefois que cette évolution décrite dans la littérature concerne des cas théoriques alors que nos résultats sont issus de cas empiriques. Nous avons indiqué dans le tableau 7.1, et plus longuement dans le chapitre 3, que la création de percées en étoile dans un réseau existant visait, pour des théoriciens et praticiens de l'urbanisme comme l'abbé Laugier ou Pierre Patte, à améliorer la simplicité des déplacements²¹⁸, leur continuité²¹⁹, et leur isotropie (répartition uniforme)²²⁰. Considérant notre interprétation des descripteurs d'accessibilité, cela signifie une baisse de l'éloignement angulaire et de l'indice de détour, et une répartition plus égalitaire de

²¹⁸ L'abbé Laugier voulait, à travers la création de percées en étoile, créer des lieux d'observation panoramique pour mieux se repérer.

²¹⁹ Selon Panerai et al (1997), les percées, notamment dans le plan de Rome par Sixt V, visait à créer des trajectoires directes, continues.

²²⁰ Pierre Patte, qui lui aussi préconisait des percées en étoile, voulait que *tous les abords soient faciles*, que tout se dégage du centre vers la circonférence sans confusion.

la centralité d'intermédialité. Nos résultats sur le réseau parisien entre 1790 et 1888 montrent au contraire une répartition de plus en plus inégalitaire de la centralité d'intermédialité. Toutefois, nous observons aussi une baisse importante de l'éloignement angulaire médian et de l'indice de détournement médian : les plus courts chemins reliant les tronçons du réseau deviennent de plus en plus linéaires et continus (sans obstacles) à Paris, entre 1790 et 1888. Les déplacements sont donc potentiellement de plus en plus simples et continus, ce qui coïncide avec ce qui était recherché par Laugier, Patte, et d'autres. Cette concordance nous mène à formuler l'hypothèse que l'ensemble du XIXe siècle pourrait être représentatif de la création de percées en étoile dans un réseau existant.

Cette hypothèse irait dans le sens d'un « **relativisme haussmannien** », expression utilisée par Flonneau (2007) pour souligner la nécessité d'une réévaluation de l'apport réel de l'œuvre d'Hausmann, en comparaison avec ce qui se faisait avant lui. Par ailleurs, cette hypothèse semble plausible puisque, comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 5, quelques percées configurées en étoile ont été tracées dans le réseau viaire parisien durant la première moitié du XIXe siècle. En outre, des percées en étoile, prévues par Hausmann ou décidées après lui, ont pu être tracées dans le réseau parisien entre 1871 et 1888. C'est notamment le cas du boulevard Henri IV, décidé sous Hausmann, mais qui ne sera réalisé qu'entre 1876 et 1879. Pour tester cette hypothèse selon laquelle tout le XIXe siècle serait représentatif de la création de percées en étoile dans un réseau, il faudrait comparer l'évolution du réseau parisien au XIXe siècle avec son évolution à d'autres périodes, périodes durant lesquelles il est attesté que des percées en étoile n'ont pas été créées dans le réseau. Nous ne testons pas cette hypothèse dans le cadre de ce travail.

Synthèse

Grâce au résumé numérique offert par les valeurs de référence synthétisant chaque descripteur (médiane ou indice de Gini), nous avons été en mesure d'identifier des spécificités dans les conditions d'accessibilité de chaque type de réseau du corpus 1. Elles sont résumées dans le tableau 7.5 ci-dessous. Les réseaux organiques étudiés (Chester et Paris) se distinguent des autres par un éloignement métrique plus faible, donc potentiellement **une meilleure proximité des déplacements offerte aux usagers**. Les réseaux quadrillés étudiés (Détroit et Manhattan) se distinguent des autres par un éloignement angulaire et un indice de détournement plus faibles, ce qui indique potentiellement une **meilleure simplicité et continuité des déplacements pour les usagers dans ces réseaux**. Enfin, les réseaux arborescents étudiés (Banlieue de Raleigh et de Waterloo) se distinguent des autres par un éloignement angulaire plus élevé, donc potentiellement une **moindre simplicité des déplacements**.

Pour le corpus 2, les résultats de cette partie ne nous ont pas permis d'identifier d'évolution des descripteurs d'accessibilité qui soit propre à la période haussmannienne. Nous présentons dans la conclusion du chapitre des hypothèses d'explication à cela.

	Simplicité des déplacements	Continuité des déplacements	Isotropie et fluidité des déplacements	Proximité des déplacements
Réseaux organiques : Chester et Paris 1300				Elevée
Réseaux quadrillés : Détroit et Manhattan	Elevée	Elevée		
Réseaux quadrillés : Détroit et Manhattan	Faible			
Création de percées configurées en étoile : Paris entre 1854 et 1871				

Tableau 7.5 : Tableau synthétisant les spécificités, en termes de conditions d'accessibilité, identifiées pour chaque type de réseau que nous avons étudié, et pour la période haussmannienne. Les cases grisées indiquent que nos résultats n'ont pas permis d'identifier de spécificités.

Conclusion du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre nos résultats sur l'évaluation des conditions d'accessibilité offertes par un ensemble de réseaux viaires. Nous avons pour cela utilisé des descripteurs quantitatifs, calculés sur la représentation en graphe de ces réseaux. La distribution statistique et spatiale de chacun de ces descripteurs a été analysée, ce qui nous a permis de décrire précisément chacun des réseaux, et d'apporter des éléments de mesure à des phénomènes intéressants d'un point de vue thématique. Nous avons également été en mesure de formuler plusieurs hypothèses quant aux caractéristiques morphologiques potentiellement liées à chacune des conditions d'accessibilité décrites dans ce chapitre. Nous sélectionnons puis testons certaines de ces hypothèses dans le chapitre 8.

Dans la partie III, nous avons résumé les distributions statistiques des descripteurs d'accessibilité grâce à des valeurs de référence (médiane ou indice de Gini selon les cas). Ces valeurs contiennent nécessairement moins d'informations que la distribution statistique ou spatiale du descripteur. Néanmoins, elles permettent de positionner facilement les réseaux les uns par rapport aux autres. Sur le premier corpus, nous avons ainsi pu identifier les spécificités, en termes de conditions d'accessibilité, des réseaux de type organique étudiés, des réseaux quadrillés et des réseaux arborescents. Sur le second corpus en revanche, nous n'avons pas été en mesure d'identifier de spécificité de la période haussmannienne, en termes d'évolution des conditions d'accessibilité.

Cette absence de spécificité de la période haussmannienne fait partie des quelques écarts que nous avons identifiés, entre nos résultats sur les conditions d'accessibilité évaluées de manière quantitative, et les conditions d'accessibilité décrites « par des mots » dans la littérature, et que nous avons appelé des connaissances thématiques. Ces écarts nous permettent un retour critique sur divers aspects, nous en présentons certains ci-dessous.

Retour critique sur les cas d'étude choisis

Les écarts observés entre nos résultats et les connaissances thématiques doivent en premier lieu nous interroger sur le choix de nos cas d'étude. En effet, les connaissances thématiques décrites dans la littérature et résumées dans le tableau 7.1 concernent des réseaux ou des interventions théoriques préconisés en urbanisme (réseau de type organique, quadrillé, arborescent, création de percées en étoile dans un réseau existant). Nos résultats en revanche concernent des cas d'étude empiriques, que nous avons choisis car ils nous semblaient représentatifs des réseaux théoriques préconisés. Ainsi, l'objet sur lequel portent les connaissances thématiques et celui sur lequel portent nos résultats sont différents.

Une des causes possibles de l'écart entre nos résultats et les connaissances thématiques est donc l'écart entre les réseaux empiriques sélectionnés et les réseaux théoriques auxquels ils sont censés correspondre. Les réseaux empiriques sont souvent plus complexes, plus mixtes, que ces réseaux théoriques. Cela se répercute sur les conditions d'accessibilité de ces réseaux.

Retour critique sur la définition des conditions d'accessibilité

Dans certains cas, l'écart observé entre nos résultats et les connaissances thématiques s'explique par une différence entre la définition d'une certaine condition d'accessibilité que nous avons adoptée, et la définition de cette même condition dans la littérature. Par exemple, nous avons défini la simplicité des déplacements permise par un réseau comme synonyme de linéarité des chemins sur ce réseau. Pour nous, plus les plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau

sont en lignes droites, plus ce réseau permet des déplacements simples. Or, dans la littérature en urbanisme, certains auteurs comme Léonce Reynaud considèrent que des itinéraires linéaires n'offrent pas de point de repère, et sont source d'égarement. Cet exemple nous permet de souligner **l'importance d'une définition précise de chaque condition d'accessibilité.**

Retour critique sur les valeurs de référence choisies pour résumer les conditions d'accessibilité

Pour identifier les spécificités de chaque type, et de la période haussmannienne, nous avons choisi dans la partie III d'utiliser des valeurs de référence résumant la distribution statistique de chaque descripteur d'accessibilité. Toutefois, ces valeurs de référence, calculées à l'échelle de chaque réseau, peuvent cacher certaines spécificités locales à l'intérieur de ces réseaux. En outre, ces valeurs de référence ne tiennent pas compte de la répartition spatiale du descripteur. Or, nous avons vu dans la partie II que l'étude de cette répartition spatiale fournissait des renseignements précieux sur les spécificités de chaque réseau.

Retour critique sur les connaissances thématiques

Enfin, les écarts observés entre nos résultats et les connaissances thématiques doivent nous interroger sur les connaissances thématiques elles-mêmes. En effet, comme nous l'avons souligné dans le chapitre 3, les conditions d'accessibilité attribuées dans la littérature en urbanisme aux réseaux et aux interventions typiques le sont parfois sans véritable justification. Des contradictions sur les conditions d'accessibilité d'un même type de réseau ont été soulevées entre un auteur et un autre. Ces contradictions peuvent être dues à un manque d'évaluation systématique et formalisée de ces conditions d'accessibilité en urbanisme. L'un de nos objectifs est de contribuer à pallier ce manque.

Chapitre 8 : Des tendances de relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité

Introduction

Notre objectif est de mettre en relation les **caractéristiques morphologiques d'un réseau viaire et ses conditions d'accessibilité** afin d'identifier d'éventuels liens entre elles. Dans les chapitres 4 et 5, nous avons présenté la conversion des réseaux viaires de nos deux corpus en graphes géométriques duaux. Cela nous a permis dans le chapitre 6 de décrire les caractéristiques morphologiques de ces réseaux grâce à des descripteurs morphologiques. Dans le chapitre 7 nous avons pu décrire les conditions d'accessibilité de ces réseaux grâce à des descripteurs d'accessibilité. Ces derniers rendent compte des caractéristiques des plus courts chemins joignant les tronçons du réseau viaire.

Ce chapitre vise maintenant à explorer la relation entre ces deux ensembles de descripteurs, morphologiques et d'accessibilité, à partir des réseaux viaires composant nos deux corpus. Cela nous permettra d'explorer la forme et l'intensité des liens entre les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité de ces réseaux.

Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de repérer dans quelle mesure les caractéristiques morphologiques des réseaux étudiés sont liées à chacune de leurs conditions d'accessibilité. Par exemple, la longueur des chemins²²¹ dans un réseau (qui rend compte de la proximité des déplacements dans ce réseau, donc d'une condition d'accessibilité) est-elle liée à la longueur de ses tronçons (caractéristique morphologique) ? La linéarité des chemins (qui rend compte de la simplicité des déplacements) est-elle liée à l'orientation cardinale des tronçons ? La concentration des chemins dans un réseau (qui rend compte de l'isotropie et de la fluidité des déplacements) est-elle liée au nombre de tronçons dont il se compose ? Et ainsi de suite.

Pour étudier ces relations, nous considérons l'ensemble des réseaux de nos deux corpus de manière indifférenciée, comme les éléments d'un même ensemble. Cela

²²¹ Lorsque nous utilisons le terme « chemins » dans ce chapitre, nous faisons systématiquement référence aux « plus courts chemins » qui relient les tronçons d'un réseau viaire.

nous permet d'obtenir un ensemble composé de dix éléments. Il faut néanmoins signaler que cet ensemble est hétérogène : sur ces dix éléments, cinq correspondent en effet au réseau viaire de la même ville (Paris) à cinq dates différentes (1300, 1790, 1854, 1871 et 1888) alors que les cinq autres (Chester, Manhattan, Détroit, la banlieue de Waterloo et celle de Raleigh) représentent des cas de réseaux types (organiques, quadrillés, arborescents) observés à des échelles différentes. Cet ensemble ne forme donc ni un tout (toutes les dates pour une ville donnée) ni un échantillon représentatif de villes ou de quartiers. Il ne nous est pas possible de mener une analyse de corrélation quantitative dans des conditions rigoureuses. Nous adoptons donc plutôt une approche **qualitative** et **exploratoire** fondée sur le croisement des descripteurs pris deux par deux. Ainsi, nous ne pourrions pas identifier de corrélations entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité, mais chercherons plutôt à repérer des tendances dans la relation entre ces deux catégories de descripteurs. Par conséquent, notre travail dans ce chapitre est à envisager comme de premières explorations pour tenter de comprendre les liens existant entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité. Nous mettons en œuvre cette méthode sur un ensemble de dix réseaux, mais seule son application à un panel plus large permettrait de conclure sur la significativité statistique des résultats.

Le fait de travailler à la fois sur des réseaux différents, et sur le même réseau à différentes dates nous permettra d'observer si les mêmes relations sont constatées de manière statique et dynamique. D'un point de vue thématique, cela revient à se demander : lorsqu'une relation est identifiée entre une caractéristique morphologique et une condition d'accessibilité, est-ce que la modification de cette caractéristique s'accompagne d'une modification de la condition d'accessibilité ? Nous verrons que la réponse diffère selon les cas.

Les tendances que nous identifions dans la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité seront confrontées aux résultats obtenus en analyse de réseaux par d'autres auteurs. L'analyse des corrélations entre différents descripteurs d'un réseau viaire a notamment donné lieu à plusieurs publications dans le domaine de la physique (Buhl et al., 2006; Cardillo et al., 2006; Crucitti et al., 2006; Lagesse, 2015; Rui et al., 2013). Nous en présentons un bref état de l'art en **annexe D**. Toutefois, nous constatons que ces auteurs étudient le plus souvent la relation entre les descripteurs d'accessibilité et la taille du réseau (cf figure 8.1), sa surface ou encore sa longueur totale. Dans notre cas, nous allons explorer la relation entre les descripteurs d'accessibilité et les descripteurs morphologiques mobilisés dans le chapitre 6, et qui se sont révélés pertinents pour décrire les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires de nos deux corpus.

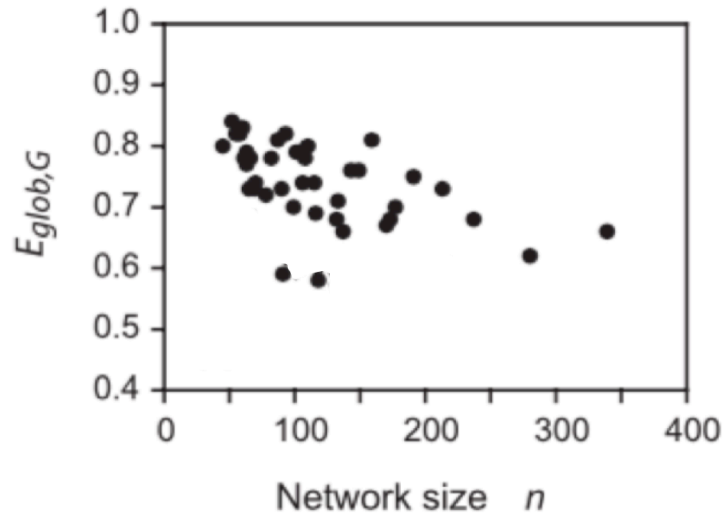


Figure 8.1 : Nuage de points croisant efficacité globale (inverse de l'indice de détour moyen) et nombre de sommets, pour un ensemble de 41 réseaux vires de type organique. Source : (Buhl et al. 2006) simplifiée par R. Hachi.

Signalons que, lorsque les descripteurs que nous avons choisis sont les mêmes que ceux utilisés dans la littérature, il peut exister des différences entre le mode de calcul que nous avons utilisé et celui utilisé dans la littérature. Par exemple, certains travaux portent sur l'analyse de graphes vires primaires alors que notre analyse porte sur des graphes duaux. Il sera intéressant d'observer si, malgré ces différences, nous observons les mêmes tendances dans les relations entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité.

Une autre différence entre notre travail et ceux mentionnés plus haut est l'échelle à laquelle des relations sont recherchées. Plusieurs travaux portent sur la relation entre les caractéristiques morphologiques des sommets d'un graphe – un tronçon du réseau vires dans notre cas – et l'accessibilité de ce sommet. Tel est le cas, par exemple, quand on étudie la relation entre le degré d'un tronçon et sa centralité d'intermédiarité (Barrat et al., 2008). Cette approche vise à identifier des relations entre les caractéristiques morphologiques d'un tronçon de voie, qui sont des caractéristiques locales (dépendant uniquement du tronçon en lui-même, telles que son degré, sa longueur, sa courbure, ...), et les conditions d'accessibilité de ce tronçon (sa centralité d'intermédiarité par exemple), qui elles dépendent de sa relation avec l'ensemble du réseau. Notre travail se situe à une échelle plus globale : nous recherchons les relations entre les caractéristiques morphologiques d'un réseau dans son ensemble (par exemple le niveau de courbure de l'ensemble du réseau) et l'accessibilité d'ensemble de ce réseau (sa centralité d'intermédiarité par exemple).

I. Rappel des descripteurs morphologiques et d'accessibilité mobilisés

Notre exploration de la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité repose sur un panel de descripteurs quantitatifs : **six descripteurs morphologiques et quatre descripteurs d'accessibilité**. En mobilisant de manière métaphorique le vocabulaire statistique, les descripteurs morphologiques représentent les variables « explicatives », et les descripteurs d'accessibilité sont les variables « à expliquer ». Nous nous intéressons donc à la variabilité des valeurs prises par les descripteurs d'accessibilité en fonction de la variabilité des valeurs prises par les descripteurs morphologiques. Ces descripteurs sont rappelés dans cette partie.

I.1. Différents types de descripteurs

I.1.1. Les descripteurs morphologiques

Les descripteurs morphologiques utilisés sont de deux sortes. D'abord, les **descripteurs morphologiques d'ensemble**, calculés à l'échelle des réseaux. Il s'agit de la taille du réseau, exprimée par l'intermédiaire de son **nombre de tronçons**, et de la connectivité du réseau, exprimée par l'intermédiaire du **coefficient de maillage** (coefficient alpha).

Ensuite, des **descripteurs morphologiques calculés localement**, à l'échelle de chaque tronçon, puis résumés à l'échelle du réseau par une valeur de référence. Notre objectif étant d'évaluer les relations entre descripteurs au niveau des réseaux, considérés dans leur globalité, un des enjeux de ce travail est de résumer par une valeur de référence les caractéristiques du réseau à partir de celles des tronçons le constituant. Il y a donc une opération d'agrégation à effectuer. Nous présentons les choix faits pour effectuer cette agrégation dans la section I.2.

Les descripteurs morphologiques locaux sont la **courbure des tronçons, leur orientation cardinale, leur longueur et leur espacement les uns par rapport aux autres**²²². L'ensemble des descripteurs morphologiques (locaux et d'ensemble) ainsi que leur mode de calcul sont rappelés dans le tableau 8.1 ci-dessous.

²²² Rappelons que nous n'avons pas conservé le descripteur du degré des tronçons, car sa valeur de référence (le degré moyen) présentait une forte corrélation avec le coefficient de maillage.

	Descripteur morphologique	Mode de calcul
Descripteurs d'ensemble	Taille du réseau	Nombre total de tronçons de voie dans le réseau
	Coefficient de maillage du réseau (coefficient Alpha)	Connectivité du réseau : nombre de boucles dans le réseau divisé par le nombre maximal de boucles possible
Descripteurs locaux	Courbure d'un tronçon	Somme des angles formés sur toute la longueur d'un tronçon (exprimée en degré)
	Orientation cardinale d'un tronçon	Angle formé entre un tronçon et le nord géographique (exprimé en degré)
	Longueur d'un tronçon	Longueur métrique d'un tronçon (exprimée en mètres)
	Espacement d'un tronçon	Moyenne des distances à vol d'oiseau entre un tronçon et tous les autres ²²³ (exprimée en mètres)

Tableau 8.1 : Tableau synthétisant les descripteurs morphologiques utilisés et leur mode de calcul.

I.1.2. Les descripteurs d'accessibilité

Pour évaluer les conditions d'accessibilité permises par un réseau viaire, nous avons choisi de décrire les caractéristiques des plus courts chemins reliant les tronçons de ce réseau (cf chapitre 4). Cela revenait à choisir une certaine définition de chaque condition d'accessibilité. Par exemple, la simplicité des déplacements permise par un réseau est définie comme la linéarité des plus courts chemins entre les tronçons de ce réseau. La proximité des déplacements permise par un réseau est définie comme la longueur des plus courts chemins entre les tronçons de ce réseau. Les caractéristiques des plus courts chemins représentent donc **notre acception des conditions d'accessibilité des réseaux**. Nous rappelons ces acceptions dans le tableau 8.2 ci-dessous, ainsi que les descripteurs d'accessibilité utilisés pour évaluer

²²³ Ce descripteur n'est pas basé sur le calcul des plus courts chemins mais seulement sur les distances à vol d'oiseau entre les tronçons. Il s'agit donc d'un descripteur morphologique, et non d'un descripteur d'accessibilité.

chacune d'elle. Ces descripteurs sont tous locaux, c'est-à-dire calculés à l'échelle de chaque tronçon.

Conditions d'accessibilité	Notre acception des conditions d'accessibilité	Descripteur d'accessibilité	Signification
Simplicité des déplacements	Linéarité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau	Eloignement angulaire d'un tronçon ²²⁴	Lorsque l'éloignement angulaire d'un tronçon est élevé, la linéarité des plus courts chemins depuis ce tronçon vers les autres tronçons est faible
Continuité des déplacements	Continuité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau	Indice de détour d'un tronçon ²²⁵	Lorsque l'indice de détour d'un tronçon est élevé, la continuité des plus courts chemins depuis ce tronçon vers les autres tronçons est faible
Isotropie et fluidité des déplacements	Concentration des plus courts chemins sur les tronçons d'un réseau	Centralité d'intermédiarité d'un tronçon ²²⁶	Lorsque la centralité d'intermédiarité d'un tronçon est élevée (comparée à celle des autres tronçons), la concentration des plus courts chemins sur ce tronçon est élevée
Proximité des déplacements	Longueur des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau	Eloignement métrique d'un tronçon ²²⁷	Lorsque l'éloignement métrique d'un tronçon est élevé, la longueur des plus courts chemins depuis ce tronçon vers les autres tronçons est élevée

Tableau 8.2 : Tableau synthétisant notre acception de chaque condition d'accessibilité, ainsi que les descripteurs d'accessibilité utilisés pour décrire ces acceptions.

²²⁴ Moyenne des angles formés le long des plus courts chemins reliant un tronçon à tous les autres.

²²⁵ Moyenne des rapports entre *longueur des plus courts chemins* et *distance à vol d'oiseau*, entre un tronçon et tous les autres.

²²⁶ Nombre de plus courts chemins qui passent par un tronçon. Nous normalisons ce nombre en le divisant par le nombre de tronçons dans le réseau (cf annexe B).

²²⁷ Moyenne des longueurs des plus courts chemins entre un tronçon et tous les autres.

I.2. Une analyse principalement basée sur la médiane des descripteurs

Notre analyse se situe à l'échelle des réseaux et pas à celle des tronçons. Ainsi, ce qui nous intéresse n'est pas la longueur de chaque tronçon d'un réseau, sa courbure, ou encore son indice de détour. Nous voulons décrire ces caractéristiques à l'échelle du réseau dans son ensemble, c'est-à-dire obtenir un « résumé » de la longueur des tronçons d'un réseau, de leur courbure, et de leur indice de détour. Ce résumé induit nécessairement une perte d'information, mais il est nécessaire pour travailler à l'échelle de réseaux entiers.

Ainsi, nous avons besoin d'indicateurs capables de résumer à l'échelle des réseaux les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité calculées à l'échelle des tronçons. Plusieurs choix sont possibles. Dans les chapitres 6 et 7, nous avons représenté les histogrammes associés aux différents descripteurs et indiqué les valeurs statistiques de base (moyenne, médiane, écart-type). Il nous a semblé que le plus commode était d'adopter, quand cela avait du sens, un indicateur de tendance centrale. Plusieurs des descripteurs ayant une distribution dissymétrique (voir les histogrammes en chapitre 6 et 7)²²⁸, nous avons choisi la valeur médiane qui nous a donc semblé plus pertinente que la moyenne pour les résumer.

Par exemple, la courbure des tronçons d'un réseau sera caractérisée par la valeur médiane des courbures de ses tronçons, c'est-à-dire la valeur dépassée par 50% d'entre eux. Pour mieux comprendre l'hypothèse sous-jacente à ce choix, prenons le cas des réseaux de Chester et de Paris en 1300. Notre hypothèse est que le réseau de Chester, dans lequel 50% des tronçons ont une courbure supérieure à 8,9°, **globalement des tronçons plus courbes** que le réseau de Paris en 1300, dans lequel 50% des tronçons ont une courbure inférieure à 5,9°.

Autre exemple, la longueur des plus courts chemins entre les tronçons dans un réseau sera caractérisée par la valeur médiane des longueurs de chemins de ses tronçons, c'est-à-dire la valeur dépassée par 50% de ses tronçons. Si on reprend le cas de Chester et Paris en 1300, l'hypothèse sous-jacente est que le réseau de Chester, dans lequel 50% des tronçons sont distants des autres de moins de 530 mètres (éloignement métrique médian de 527,8 m), **globalement des chemins plus courts** que le réseau parisien en 1300, dans lequel 50% des tronçons sont distants des autres de plus de 1091 mètres.

²²⁸ Seuls l'éloignement angulaire et l'indice de détour du réseau viaire de la banlieue de Raleigh et du réseau parisien entre 1790 et 1888 ont une distribution que l'on peut qualifier de symétrique. Ces descripteurs sont dissymétriques pour les autres réseaux étudiés. Les autres descripteurs (morphologiques et d'accessibilité) sont quant à eux dissymétriques pour l'ensemble des réseaux étudiés.

Concernant l'orientation cardinale, nous voulons établir si les tronçons sont globalement orientés selon des directions privilégiées, comme dans les réseaux quadrillés, ou si au contraire ils sont orientés selon une diversité de directions. Par conséquent, nous n'utilisons pas la médiane de ce descripteur, mais plutôt un indicateur que nous avons construit (cf chapitre 6) : la concentration de l'orientation cardinale, qui décrit à quel point l'orientation des tronçons dans un réseau est concentrée autour de valeurs modales²²⁹, comme dans les réseaux orthogonaux.

Par ailleurs, concernant la centralité d'intermédiarité, nous voulons établir si celle-ci se répartit de manière égalitaire entre les tronçons d'un réseau, ce qui indiquerait une faible concentration des chemins dans ce réseau. Ainsi, la médiane ne sera pas non plus utilisée pour résumer ce descripteur, nous lui préférons l'indice de Gini. Plus l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité est élevé, plus cette centralité se répartit de manière inégalitaire entre les tronçons du réseau, et donc plus les plus courts chemins sont concentrés sur un petit nombre de tronçons du réseau.

La médiane sera utilisée comme indicateur pour les autres descripteurs locaux. Le fait d'utiliser principalement la médiane nous permet une facilité dans la description des résultats. Par exemple, si nos mesures le permettent, nous pourrions formuler des interprétations qualitatives telles que : « Dans les dix cas étudiés, plus les tronçons d'un réseau ont *souvent* telle caractéristique morphologique, plus ils présentent *souvent* telle condition d'accessibilité ». Cette interprétation est à comprendre comme une tendance globale, qui ne signifie pas qu'à échelle individuelle, les tronçons qui ont la caractéristique morphologique en question présentent la condition d'accessibilité en question. Ainsi, notre approche dans ce chapitre consistera à mettre en relation les **variations** inter-réseaux des **médianes** associées aux descripteurs morphologiques et aux descripteurs d'accessibilité.

I.3. Synthèse des descripteurs utilisés

Le tableau 8.3 ci-dessous regroupe l'ensemble des descripteurs morphologiques et des descripteurs d'accessibilité sélectionnés, pour explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires de nos corpus et leurs conditions d'accessibilité. Nous précisons dans ce tableau les indicateurs choisis pour passer de descripteurs locaux à des descripteurs d'ensemble.

²²⁹ Cet indicateur correspond à la fréquence de tronçons (en %) dans les deux classes modales de la distribution statistique de l'orientation cardinale. Dans le cas d'un réseau parfaitement quadrillé, l'ensemble des tronçons est regroupé dans ces deux classes modales (correspondant à des directions perpendiculaires). La valeur de l'indicateur est alors de 1 (100%).

Descripteurs morphologiques		Descripteurs d'accessibilité
Descripteurs d'ensemble	Descripteurs locaux	
Nombre de tronçons	Courbure médiane des tronçons	Eloignement angulaire médian
Coefficient de maillage (coefficient Alpha)	Concentration de l'orientation cardinale des tronçons (fréquence dans les classes modales)	Indice de détour médian
	Longueur médiane des tronçons	Indice de Gini de la centralité d'intermédiarité
	Espacement médian des tronçons	Eloignement métrique médian

Tableau 8.3 : Synthèse de l'ensemble des descripteurs (morphologiques et d'accessibilité) utilisés.

1.4. Valeurs prises par les descripteurs

Le tableau 8.4 ci-dessous regroupe les valeurs prises par les six descripteurs morphologiques et les quatre descripteurs d'accessibilité, pour les dix réseaux viaires étudiés.

	Descripteurs morphologiques						Descripteurs d'accessibilité			
	Nombre de tronçons	Coefficient de maillage	Courbure médiane (en degré)	Concentration de l'orientation cardinale (fréquence dans les classes modales)	Longueur médiane (en mètres)	Espacement médian (en mètres)	Eloignement angulaire médian (en degrés)	Indice de détour médian	Indice de Gini de la centralité d'intermédialité	Eloignement métrique médian (en mètres)
Chester	100	0,15	8,9	0,83	85,5	385,9	270,8	1,36	0,43	527,8
Paris	1068	0,23	5,9	0,83	51,9	817	562,5	1,32	0,71	1091
Detroit	1013	0,42	0	0,84	105,3	1247	179,6	1,21	0,49	1485
Manhattan	7204	0,40	0	0,88	84,7	5805	235,2	1,13	0,82	6336
Raleigh	5923	0,07	18,6	0,64	129,9	6767	1107	1,35	0,83	8900
Waterloo	1103	0,16	13	0,68	121,6	2530	632	1,40	0,72	3468
Paris 1790	3349	0,26	0	0,65	78,8	2065	580,1	1,24	0,71	2558
Paris 1854	5096	0,29	0	0,63	76,2	2435	522,3	1,19	0,73	2875
Paris 1871	5256	0,33	0	0,59	82,7	2609	513,6	1,18	0,74	3018
Paris 1888	6584	0,30	0	0,57	72,1	2671	515,1	1,17	0,76	3070

Tableau 8.4 : Valeurs prises par les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité, pour nos dix cas d'étude.

II. Exploration de la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité

Après avoir présenté les descripteurs utilisés pour décrire les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité des réseaux étudiés, nous présentons dans cette partie l'exploration de la relation entre les deux.

Cette exploration est guidée par un certain nombre d'hypothèses que nous voulons tester. Elles émanent des résultats des chapitres 6 et 7. Nous présentons ces hypothèses dans la première section ci-dessous (II.1). Nous présentons ensuite plus en détail la méthode adoptée pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité (section II.2), avant de passer à la présentation et l'interprétation de nos résultats en section II.3.

II.1. Hypothèses concernant la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité

Parmi les résultats des chapitres 6 et 7, nous avons pu observer que chaque type de réseau du corpus 1 avait des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité spécifiques qui le distinguent des autres types. Pour le corpus 2, nous avons pu identifier des spécificités morphologiques de la période haussmannienne, mais pas de spécificités en termes de conditions d'accessibilité (cf chapitre 7).

Nous choisissons de nous appuyer sur les spécificités, à la fois morphologiques et d'accessibilité, de chaque type de réseau du corpus 1, pour formuler des hypothèses quant à la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux et leurs conditions d'accessibilité. Nous supposons que si un certain type de réseau se caractérise à la fois par certaines caractéristiques morphologiques et par certaines conditions d'accessibilité, alors ces caractéristiques morphologiques et ces conditions d'accessibilité sont potentiellement liées. Nous testons ensuite cette hypothèse sur l'ensemble de nos cas d'étude, pas uniquement sur les réseaux types. Les spécificités de chaque type de réseau sont rappelées ci-dessous, et synthétisées dans le tableau 8.5.

Nous avons vu dans le chapitre 6 que les réseaux organiques se distinguaient des autres par un espacement médian plus faible, indiquant que les tronçons dans les réseaux organiques seraient **plus rapprochés** que dans les autres réseaux. En outre, nous avons vu dans le chapitre 7 que ces réseaux se distinguaient des autres par un éloignement métrique médian plus faible, indiquant que **les chemins entre les tronçons seraient moins longs** dans les réseaux organiques que dans les autres

types de réseaux. Nous pouvons donc supposer, comme hypothèse, que cette **faible longueur des chemins** est liée au **faible espacement des tronçons**, autrement dit que les deux sont liés par une relation positive. Notre démarche consiste alors à mettre en relation, à partir de l'ensemble de nos cas d'étude, le descripteur morphologique qui rend compte de l'espacement des tronçons (l'espacement médian) et le descripteur d'accessibilité qui rend compte de la longueur des chemins entre ces tronçons (l'éloignement métrique médian) afin de détecter s'il existe un lien positif entre les deux.

Nous avons également vu dans le chapitre 6 que les réseaux quadrillés étudiés se distinguaient des autres types de réseau par un coefficient de maillage plus élevé, une courbure médiane plus faible, et une forte concentration de l'orientation des tronçons. Selon notre interprétation de ces descripteurs, cela indiquerait que ces réseaux ont des tronçons **plus rectilignes et plus connectés entre eux** que les autres réseaux, et qu'ils suivent **deux orientations privilégiées**. Par ailleurs, nous avons vu dans le chapitre 7 que ces réseaux quadrillés se distinguaient par un éloignement angulaire médian et un indice de détour médian tous deux plus faibles que les autres réseaux. Cela signifierait que les chemins entre les tronçons sont, dans ces réseaux quadrillés, **plus linéaires et plus continus** que dans les autres types de réseaux étudiés. Cela nous mène à formuler comme hypothèse que **plus les tronçons d'un réseau viaire sont connectés les uns aux autres, rectilignes, et orientés selon des directions privilégiées, plus les chemins entre les tronçons de ce réseau sont linéaires et continus**. Du point de vue des descripteurs, nous supposons donc l'existence d'une relation négative entre connectivité des réseaux d'une part et éloignement angulaire médian et indice de détour médian d'autre part. Nous supposons également l'existence d'une relation positive entre courbure médiane d'une part et éloignement angulaire médian et indice de détour médian d'autre part. Nous testerons cette hypothèse, à partir de l'ensemble de nos cas d'étude. Enfin, nous supposons qu'il existe une relation négative entre concentration de l'orientation d'une part et éloignement angulaire médian et indice de détour médian d'autre part.

Enfin, nous avons vu dans le chapitre 6 que les réseaux arborescents étudiés présentaient plusieurs caractéristiques morphologiques différentes de celles des autres réseaux types. Ils se distinguent notamment par des tronçons orientés selon des directions variées (concentration de l'orientation cardinale faible). Ces tronçons sont aussi plus longs (longueur médiane élevée), et plus courbes (courbure médiane élevée) que les autres réseaux. En outre, nous avons vu dans le chapitre 7 que l'accessibilité dans ces réseaux arborescents se distinguait par une faible linéarité des chemins (éloignement angulaire médian élevé), autrement dit que les chemins

qui relient les tronçons dans ces réseaux comprenaient de nombreux changements de direction. Cela nous mène à formuler comme hypothèse que **plus un réseau est composé de tronçons longs, courbes, et orientés selon des directions variées, plus les chemins qui relient les tronçons de ce réseau sont souvent peu linéaires**. Du point de vue des descripteurs, nous supposons donc l'existence d'une relation positive entre longueur médiane et courbure médiane d'une part et éloignement angulaire médian d'autre part. Nous supposons également l'existence d'une relation négative entre concentration de l'orientation cardinale d'une part et éloignement angulaire médian d'autre part. Nous étudierons si de telles relations peuvent être globalement observée sur nos 10 cas.

Les spécificités de chaque type de réseau présentées ci-dessus ne nous permettent pas de formuler des hypothèses quant aux caractéristiques morphologiques potentiellement liées à la concentration des chemins reliant les tronçons dans un réseau. En effet, aucun des trois types de réseaux étudiés ne se distingue des autres en termes de concentration des chemins, c'est-à-dire en termes d'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité. Néanmoins, en observant les valeurs prises par l'indice de Gini, dans nos résultats et dans la littérature en analyse de réseaux, on peut formuler comme hypothèse qu'il existe une relation entre la taille des réseaux viaires (leur nombre de tronçons) et la valeur de l'indice de Gini, donc la concentration des chemins dans le réseau. En effet, nos résultats (cf chapitre 7) indiquent un indice de Gini de 0,43 pour le réseau viaire de Chester, qui est composé de 100 tronçons de voie, tandis que pour le réseau viaire de la banlieue de Raleigh, qui contient près de 6000 tronçons, l'indice de Gini vaut 0,83. De leur côté, Rui et al. (2013) obtiennent sur des réseaux théoriques d'environ 1000 tronçons, un indice de Gini de la centralité d'intermédiarité compris entre 0,6 et 0,75. Enfin, Lammer et al. (2006) qui calculent l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité sur les réseaux viaires des 20 plus grandes villes allemandes, chacun comprenant entre 11 000 et 88 000 tronçons de voie, obtiennent des indices de Gini compris entre 0,84 et 0,9. Ces résultats nous incitent à formuler comme hypothèse que **plus un réseau est grand (en termes de nombre de tronçons), plus l'indice de Gini est élevé, et donc plus les chemins reliant les tronçons dans ce réseau sont concentrés**. Du point de vue des descripteurs, cela signifie que nous supposons une relation positive entre le nombre de tronçons et l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité.

	Caractéristiques morphologiques					Conditions d'accessibilité (selon nos acceptations)			
	Connectivité du réseau	Rectitude des voies	Orientation des voies	Espace des voies		Linéarité des chemins	Continuité des chemins	Concentration des chemins	Longueur des chemins
				Longueur des tronçons	Espace des tronçons				
Réseaux organiques : Chester et Paris 1300					Faible				Faible
Réseaux quadrillés : Détroit et Manhattan	Elevée	Elevée	Orientations concentrées			Elevée	Elevée		
Réseaux arborescents : Banlieue de Raleigh et de Waterloo		Faible	Orientations variées	Elevée		Faible			
Création de percées configurées en étoile : Paris entre 1854 et 1871	Augmente		Se diversifie	Augmente					

Tableau 8.5 : Tableau synthétisant les spécificités – en termes de morphologie et d'accessibilité – observées pour chaque type de réseau du corpus 1, et pour la période haussmannienne à Paris. Ces spécificités ont été identifiées grâce aux valeurs prises par les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité, résumés par leurs valeurs de référence (le plus souvent la médiane). Les parties grisées du tableau indiquent que le type en question, ou la période haussmannienne, ne présentent pas de spécificités pour le descripteur considéré.

Si l'on synthétise et regroupe les hypothèses tirées de l'analyse des réseaux typiques du premier corpus, on obtient les hypothèses thématiques suivantes concernant la relation entre les quatre conditions d'accessibilité des réseaux étudiés et leurs caractéristiques morphologiques :

1. La linéarité des plus courts chemins dans un réseau viaire est liée à la connectivité du réseau, à la courbure de ses tronçons, à la concentration de leur orientation cardinale, et à leur longueur ;
2. La continuité des plus courts chemins dans un réseau viaire est liée à la connectivité du réseau, à la courbure de ses tronçons, et à la concentration de leur orientation cardinale ;
3. La concentration des plus courts chemins dans un réseau viaire est liée au nombre de tronçons dans ce réseau ;
4. La longueur des plus courts chemins dans un réseau viaire est liée à l'espacement des tronçons de ce réseau.

Les relations attendues entre les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité correspondant à ces hypothèses figurent dans le tableau 8.6.

	Eloignement angulaire médian	Indice de détour médian	Indice de Gini de la centralité d'intermédiarité	Eloignement métrique médian
Nombre de tronçons			+	
Coefficient de maillage	-	-		
Courbure médiane	+	+		
Concentration de l'orientation cardinale	-	-		
Longueur médiane	+			
Espacement médian				+

Tableau 8.6 : Synthèse de nos hypothèses sur la relation entre descripteurs morphologiques (en lignes) et descripteurs d'accessibilité (en colonnes). Le signe + indique qu'une relation positive entre les descripteurs est attendue, le signe - indique qu'une relation négative est attendue.

II.2. Des tendances observées grâce aux nuages de points formés par les dix cas d'étude

Pour tester nos hypothèses sur les relations entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité, nous nous appuyons sur l'analyse des nuages de points obtenus en croisant deux à deux les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité. Nous présentons uniquement les nuages de point correspondant aux couples de descripteurs entre lesquels nous supposons une relation. Ces nuages de points présentent, sur l'axe des abscisses, les descripteurs morphologiques car ceux-ci sont pour nous les « variables explicatives ». Nous représentons sur l'axe des ordonnées les descripteurs d'accessibilité, qui sont les variables « à expliquer ». Les couleurs utilisées pour représenter chaque réseau sont les mêmes que dans les chapitres 6 et 7.

Les nuages de points nous permettent d'identifier si les relations entre les descripteurs sont linéaires. Dans ce cas, la droite qui résume ce nuage de point est tracée. Ils nous permettent également d'identifier des relations non linéaires entre les descripteurs. Toutefois, notre approche étant qualitative, nous ne recherchons pas la forme exacte de ces relations non linéaires. Enfin, il sera intéressant d'observer sur les nuages de points les réseaux qui échappent à une relation globale, autrement dit les résidus.

Bien que notre approche soit qualitative et que les conditions d'application d'un modèle statistique ne soient pas réunies (le nombre de cas est très réduit et de plus ces cas ne correspondent pas à des observations indépendantes les unes des autres), nous avons calculé, en tant que support d'analyse, les coefficients de corrélation (de Pearson et de Spearman) entre les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité. Si le coefficient de Pearson est plus élevé que celui de Spearman, cela indique souvent qu'il existe des valeurs extrêmes dans le nuage de points. Si le coefficient de Spearman est plus élevé, cela indique souvent que la relation entre les descripteurs est non linéaire.

Le tableau 8.7 donne ces coefficients de corrélation entre chaque descripteur morphologique, indiqué en ligne du tableau, et chaque descripteur d'accessibilité, indiqué en colonne. Les valeurs potentiellement significatives sur un plan statistique (pour 10 observations, pour un risque d'erreur inférieur ou égal à 5%) sont indiquées en gras à titre indicatif. Nous constatons grâce à ce tableau que certains couples de descripteurs entre lesquels nous n'attendons pas de relation (vu nos hypothèses) présentent un coefficient de corrélation significatif (l'indice de détour médian et le nombre de tronçons par exemple). Toutefois, nous choisissons d'explorer uniquement les relations correspondant à nos hypothèses.

		Eloignement angulaire médian	Indice de détour médian	Indice de Gini de la centralité d'intermédiarité	Eloignement métrique médian
Nombre de tronçons	P	0,26	- 0,64	0,77	0,68
	S	0,10	- 0,67	0,92	0,81
Coefficient de maillage (alpha)	P	- 0,72	- 0,86	0,04	- 0,22
	S	- 0,73	- 0,81	0,04	0,005
Courbure médiane	P	0,67	0,86	0,06	0,44
	S	0,57	0,84	0,13	0,14
Concentration de l'orientation	P	- 0,59	0,09	- 0,46	0,2
	S	- 0,42	0,17	- 0,40	0,24
Longueur médiane	P	0,39	0,41	0,0	0,56
	S	0,07	0,46	0,04	0,37
Espacement médian	P	0,50	- 0,14	0,73	0,98
	S	0,22	- 0,41	0,94	0,99

Tableau 8.7 : Tableau indiquant les coefficients de corrélation entre chaque couple de descripteurs morphologiques et de descripteurs d'accessibilité.

P : coefficient de corrélation de Pearson. S : coefficient de corrélation de Spearman.
Les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5% ou moins.

II.3. Identification des tendances de relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité

Nous testons dans les sections suivantes nos hypothèses sur les relations entre les caractéristiques morphologiques des réseaux et leurs conditions d'accessibilité, à partir de l'ensemble des dix réseaux étudiés. Nous consacrons une section à chacune des quatre conditions d'accessibilité, en la mettant successivement en relation avec les descripteurs choisis pour mesurer les caractéristiques morphologiques du réseau.

II.3.1. La linéarité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau

La linéarité des plus courts chemins reliant entre eux les tronçons d'un réseau est une première condition d'accessibilité dont il s'agit d'étudier la relation avec des caractéristiques morphologiques des réseaux pris dans leur globalité, comme leur **connectivité, la rectitude de leurs tronçons, la similarité des orientations de ces tronçons, ainsi que la longueur de ceux-ci**. Pour cela nous croisons successivement l'éloignement angulaire médian de chaque réseau, qui est une mesure globale du niveau de linéarité de ses chemins, avec les descripteurs morphologiques suivants : coefficient de maillage, courbure médiane des tronçons, concentration de l'orientation des tronçons, et longueur des tronçons. L'objectif est de tester les hypothèses présentées dans le tableau 8.6.

Les nuages de points nous permettent d'observer une relation négative entre l'éloignement angulaire médian et le coefficient de maillage, c'est-à-dire la connectivité du réseau (cf figure 8.2). Les réseaux dont les tronçons ont une forte connectivité ont un éloignement angulaire médian faible, et inversement. Cela signifie que plus les tronçons d'un réseau sont fortement connectés les uns aux autres, plus les chemins qui relient ces tronçons sont linéaires.

Cette relation négative entre éloignement angulaire médian et coefficient de maillage correspond à une tendance générale, et il est intéressant d'observer de plus près les cas qui échappent à cette tendance. Ils sont facilement identifiables sur le nuage de points. Par exemple, le réseau viaire de Chester a un coefficient de maillage faible, mais un éloignement angulaire médian lui aussi faible. Dit autrement, même si ses tronçons sont faiblement interconnectés, les chemins dans le réseau de Chester sont linéaires. Nous pensons que cela peut être dû à la très faible taille du réseau de Chester (comparé aux autres réseaux), laquelle induit de plus faibles changements de direction dans ce réseau, donc une plus grande linéarité des chemins entre les tronçons.

Autre cas intéressant : le réseau viaire parisien entre 1790 et 1888. On observe pour ce réseau aussi une baisse de l'éloignement angulaire médian à mesure que le coefficient de maillage augmente. Néanmoins, cette baisse de l'éloignement est plus faible que ne le suggère la tendance générale observée. En effet, au vu de l'augmentation de la connectivité du réseau parisien, la baisse de l'éloignement angulaire médian, donc l'augmentation de la linéarité des chemins entre les tronçons, devrait être plus importante. Cet exemple illustre que la linéarité des

chemins présente, dans le réseau viarie parisien, une inertie à travers le temps. **Le fait de modifier la morphologie de ce réseau en rendant ses tronçons de plus en plus reliés les uns aux autres, n'a eu qu'un faible effet sur la linéarité des chemins dans ce réseau.**

Ces résultats sur le coefficient de maillage laissent penser que, d'un point de vue statique, les réseaux viaries à la connectivité élevée ont une plus grande linéarité des chemins qui relient leurs tronçons (à l'exception de Chester), mais que d'un point de vue dynamique, l'augmentation de la connectivité dans un réseau existant (le réseau parisien en l'occurrence) a un faible effet sur la linéarité des chemins.

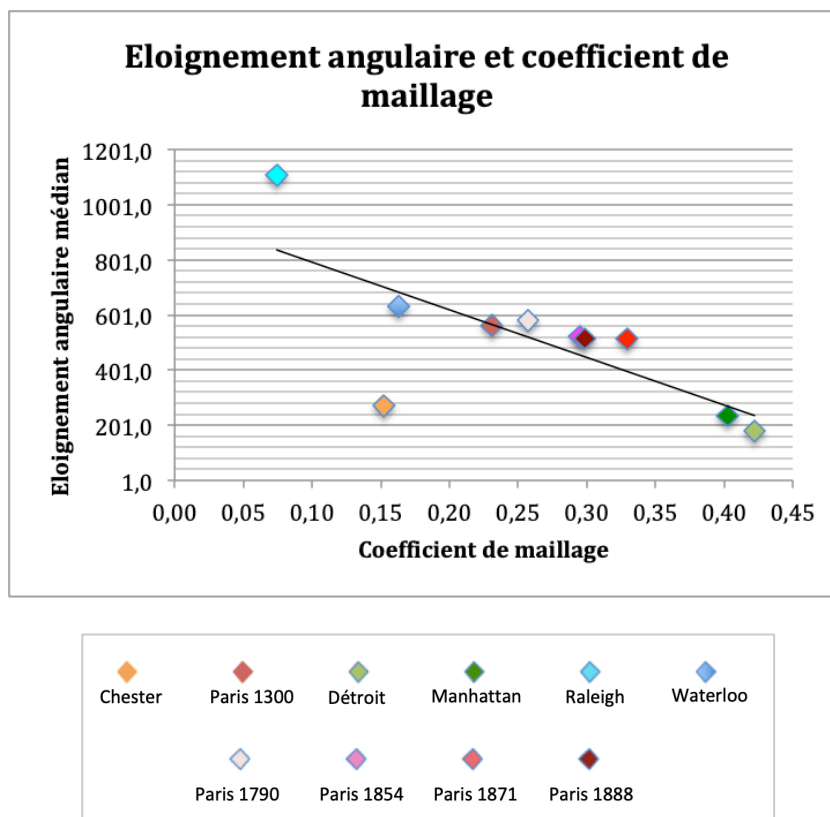


Figure 8.2 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et coefficient de maillage (coefficient de Pearson : -0,72 ; coefficient de Spearman : -0,73).

La relation entre linéarité des chemins et rectitude des tronçons peut sembler intuitive : plus les tronçons d'un réseau dans son ensemble sont rectilignes, plus les chemins qui relient ces tronçons devraient être linéaires. Pourtant, le nuage de points croisant éloignement angulaire médian (qui rend compte de la linéarité des chemins de chaque réseau) et courbure médiane (qui rend compte de la courbure des tronçons de chaque réseau) indique une relation plus nuancée (cf figure 8.3). On

constate que les réseaux dont la courbure médiane est la plus élevée, comme celui de la banlieue de Waterloo et de Raleigh, ont l'éloignement angulaire médian le plus élevé, donc les chemins les moins linéaires. Toutefois, on observe aussi que des réseaux à la courbure médiane nulle peuvent avoir des éloignements angulaires médians différents. En effet, les réseaux de Détroit, Manhattan et Paris entre 1790 et 1888 ont une majorité de tronçons parfaitement rectilignes, d'où leur courbure médiane nulle. Pourtant, l'éloignement angulaire médian est environ deux fois plus élevé à Paris entre 1790 et 1888 qu'à Détroit ou Manhattan, indiquant des chemins beaucoup moins linéaires dans le réseau parisien. Nous supposons que cela est lié à la connectivité des réseaux, qui est plus élevée à Détroit et Manhattan qu'à Paris.

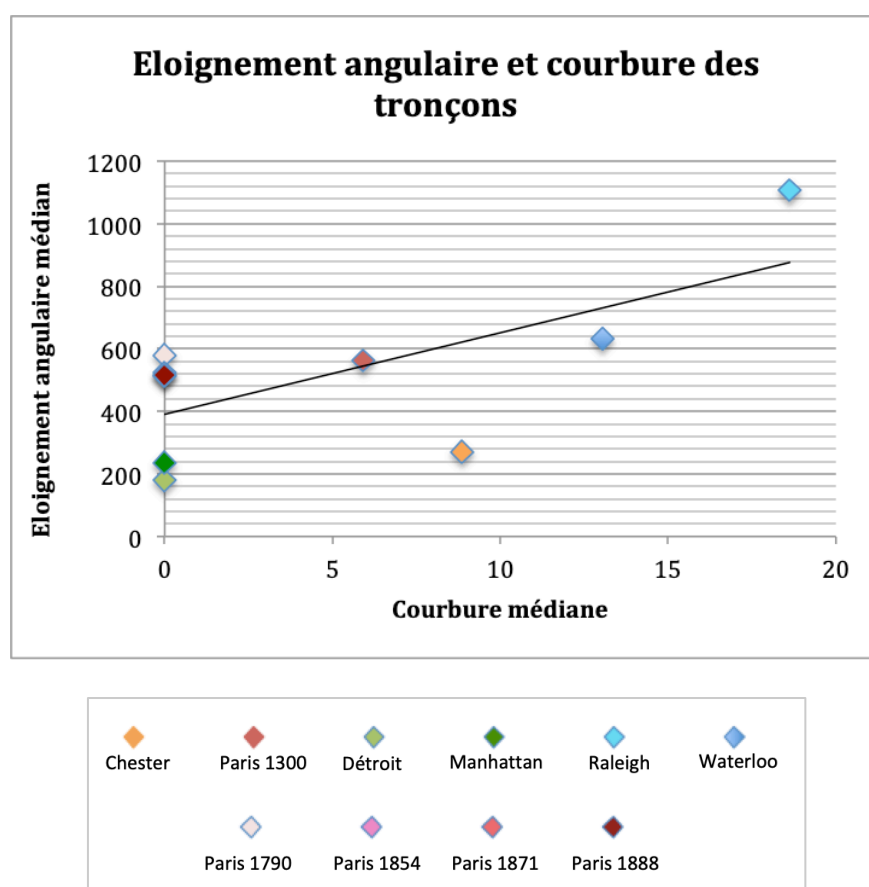


Figure 8.3 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et courbure médiane des tronçons (coefficient de Pearson : 0,67 ; coefficient de Spearman : 0,57).

La forme du nuage de point correspondant au croisement entre éloignement angulaire médian et concentration de l'orientation cardinale indique globalement une relation négative entre ces deux descripteurs : la concentration de l'orientation tendant à être élevée là où l'éloignement angulaire médian est faible, c'est-à-dire là où les plus courts chemins sont globalement plus linéaires (figure 8.4). Les réseaux

dont les tronçons sont orientés selon des directions privilégiées, comme Détroit et Manhattan, présentent une plus grande linéarité des chemins. De leur côté, les réseaux qui ont des tronçons à l'orientation variable (comme la banlieue de Waterloo et de Raleigh) ont globalement les chemins les moins linéaires.

Toutefois, ici encore, le réseau viaire parisien s'écarte de cette tendance générale. Entre 1300 et 1888, les tronçons du réseau parisien sont orientés selon des directions de plus en plus variées (la concentration de leur orientation baisse). Pourtant, son éloignement angulaire médian est relativement stable à cette période. Ce résultat va à l'encontre de notre hypothèse. Il indique que **le fait d'avoir diversifié l'orientation des tronçons dans le réseau parisien²³⁰, n'a pas eu d'effet majeur sur la linéarité des chemins reliant les tronçons de ce réseau.**

Ainsi, nous pouvons interpréter ces résultats de façon similaire à ceux sur le coefficient de maillage. D'un point de vue statique, les réseaux viaires dont l'orientation est la plus concentrée (comme les réseaux quadrillés) présentent globalement une plus grande linéarité des chemins entre leurs tronçons. En revanche, d'un point de vue dynamique, le fait d'avoir réduit cette concentration à Paris, en diversifiant l'orientation des tronçons, n'a pas détérioré la linéarité des chemins entre ces tronçons.

²³⁰ Nous avons vu dans le chapitre 6 que cela pouvait être lié à la création de percées configurées en étoile dans ce réseau, tout au long du XIXe siècle. Ces percées ont introduit de nouvelles orientations cardinales dans le réseau.

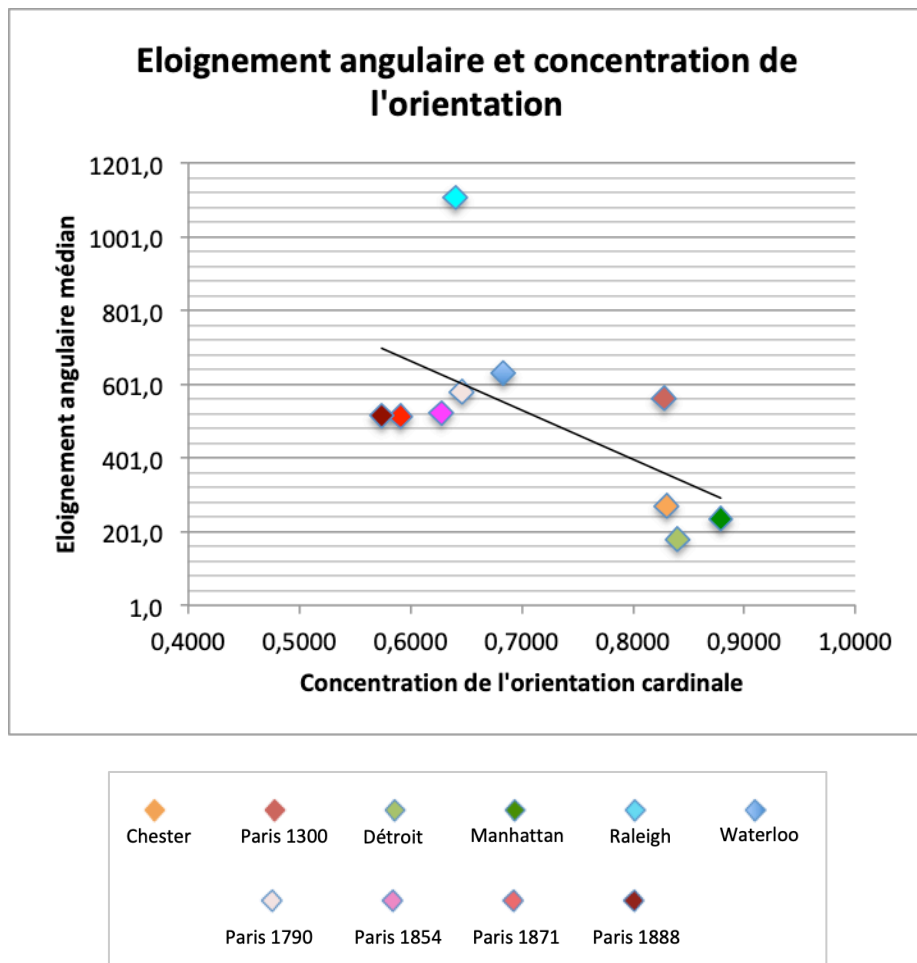


Figure 8.4 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et concentration de l'orientation cardinale des tronçons (coefficient de Pearson : -0,59 ; coefficient de Spearman : -0,42).

Enfin, nous présentons dans la figure 8.5 le nuage de points croisant l'éloignement angulaire médian des réseaux étudiés et la longueur médiane de leurs tronçons. Nous nous attendions à une relation positive entre ces descripteurs, pourtant le nuage de points correspondant ne permet pas d'identifier de relation. Les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman confirment cette absence de relation (cf tableau 8.7).

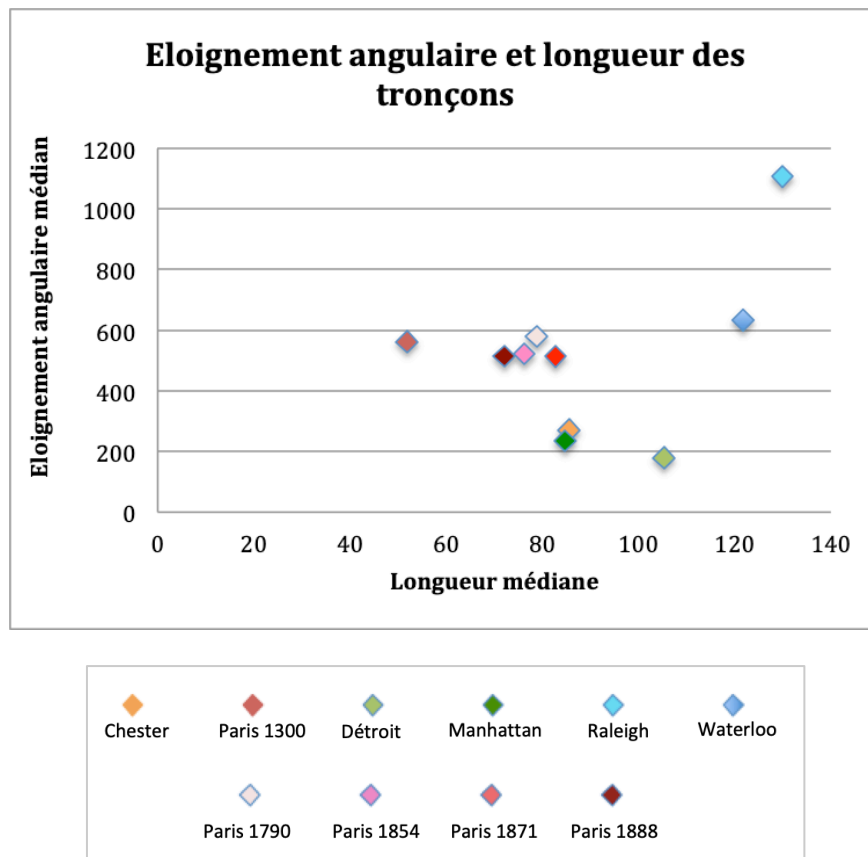


Figure 8.5 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et longueur médiane des tronçons (coefficient de Pearson : 0,39 ; coefficient de Spearman : 0,07).

En conclusion, la linéarité des plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau, évaluée par l'intermédiaire de l'éloignement angulaire médian, s'avère partiellement liée à la **connectivité des réseaux étudiés, à la courbure de leurs tronçons, et à la concentration de l'orientation de ces tronçons**. En revanche, nous n'avons pas identifié de relation avec la longueur des tronçons.

Ces résultats indiquent que, globalement, plus les tronçons des réseaux de nos cas d'étude sont reliés les uns aux autres, rectilignes et orientés selon des directions privilégiées, plus les chemins qui relient ces tronçons sont linéaires. Rappelons que notre approche est exploratoire : ces relations sont des tendances générales, et il est intéressant d'observer, comme nous l'avons fait, les écarts à ces tendances.

Nous avons en particulier constaté que les co-variations²³¹ entre les descripteurs morphologiques et l'éloignement angulaire médian étaient faibles lorsqu'il s'agissait du réseau parisien pris à différentes dates (entre 1300 et 1888). Ce résultat suggère

²³¹ Nous utilisons le terme « co-variation » plutôt que « relation » lorsque nous commentons les tendances observées pour un sous-ensemble de nos cas d'étude, ici le réseau parisien à différentes dates.

que, bien que la connectivité du réseau, la concentration de l'orientation de ses tronçons, et leur courbure soient des caractéristiques morphologiques globalement liées à la linéarité des chemins, la modification de ces caractéristiques dans un réseau viaire existant ne s'accompagne pas nécessairement d'une modification de la linéarité des chemins entre les tronçons. Nous avons au contraire pu constater une inertie de la linéarité des chemins dans le réseau parisien.

D'un point de vue thématique, cela nous laisse penser que, si un concepteur a pour objectif d'améliorer la linéarité des chemins dans un réseau, la conception d'un réseau type aurait davantage d'effet sur cette linéarité que la modification d'un réseau existant. Le meilleur choix serait alors de concevoir des réseaux de type quadrillé, à la forte connectivité, et dont les tronçons sont rectilignes et orientés selon deux directions privilégiées. A l'inverse, si un concepteur a pour objectif de réduire la linéarité des chemins dans un réseau, la conception d'un réseau arborescent – à la connectivité faible et aux tronçons courbes et d'orientations variées – serait plus adaptée.

Soulignons qu'étant donné le petit nombre d'observations, il s'agit ici de pistes de réflexion plutôt que de conclusions concrètes.

II.3.2. La continuité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau

Rappelons que nous utilisons l'indice de détour médian pour rendre compte de la condition d'accessibilité que représente la continuité des chemins dans un réseau, c'est-à-dire la propension du réseau à imposer ou non des détours lors des déplacements. D'après notre hypothèse (cf tableau 8.6), l'indice de détour médian est lié à trois descripteurs morphologiques : il est lié au **coefficient de maillage** et à la **concentration de l'orientation des tronçons** par une relation négative, et à la **courbure médiane** des tronçons par une relation positive.

Le nuage de points associé au croisement entre l'indice de détour médian des réseaux étudiés (descripteur d'accessibilité) et le coefficient de maillage (descripteur morphologique) fait apparaître une relation négative entre ces descripteurs (cf figure 8.6). **Les réseaux maillés, aux tronçons fortement connectés les uns aux autres, apparaissent ainsi avec un indice de détour médian faible, indiquant une forte continuité des chemins dans ces réseaux.** Ce résultat est également visible aux travers des valeurs des coefficients de corrélation (cf tableau 8.7).

Cette relation est souvent décrite dans la littérature en analyse de réseaux. Par exemple, Haggett et Chorley (1969) ont analysé un réseau théorique dans lequel le

nombre de sommets est fixe et le nombre d'arêtes croissant, ce qui fait croître la connectivité du réseau. Les auteurs ont ainsi montré que l'indice de détour moyen du réseau devient plus faible à mesure que la connectivité augmente. De leur côté, Liu & Zhao (2015) ont montré sur un ensemble de 16 quartiers historiques japonais, que plus les indices de connectivité (le coefficient de maillage notamment) augmentent, plus l'indice de détour baisse. Autre exemple, Buhl et al. (2006) ont étudié la corrélation entre le coefficient de maillage et l'efficacité relative²³², pour un ensemble de 41 réseaux viaires de type organique. Les auteurs observent que les réseaux les plus maillés (alpha élevé) ont les efficacités relatives les plus élevées, donc les indices de détours les plus faibles. Ils ajoutent qu'une petite augmentation du coefficient de maillage suffit à créer de nombreux chemins dans le réseau, réduisant de fait les détours, et améliorant l'efficacité relative. D'autres auteurs évoquent le lien entre connectivité et indice de détour, sans forcément avoir recours aux indices de connectivité. Genre-Grandpierre (2001) par exemple montre que des réseaux aux tronçons faiblement interconnectés, tels que le réseau arborescent du quartier de Planoise (à Besançon), ont un indice de détour plus élevé que les centres villes anciens. Il montre ainsi qu'en rendant « plus connectif » le réseau de Planoise, par la création de voies permettant de traverser les îlots, la moyenne de l'indice de détour passait de 1,65 à 1,3. Enfin, Rui et al. (2013) étudient, grâce à un modèle de simulation, l'effet de la construction de boucles dans un réseau²³³ (donc l'effet d'une augmentation de son maillage) sur l'indice de détour dans ce réseau. Rui et ses collègues montrent que, lorsque la probabilité de construction de boucles passait de 0,2 à 1, cela faisait croître l'efficacité²³⁴ des réseaux simulés d'environ 0,72 à 0,82, ce qui indique une baisse de l'indice de détour. Les auteurs en concluent que la présence de boucles a un effet déterminant sur l'efficacité d'un réseau, et donc sur la présence de détours. Signalons que l'ensemble de ces travaux considère la moyenne – de l'efficacité ou de l'indice de détour – comme indicateur pour passer d'un descripteur de tronçon à un descripteur du réseau, et non la médiane qui a été le choix fait ici. Dans les deux cas il s'agit d'un indicateur de tendance centrale et il n'est donc pas surprenant de constater notre travail présente des résultats similaires.

²³² L'efficacité correspond à l'inverse de l'indice de détour, elle s'obtient en divisant les distances à vol d'oiseau par les longueurs de chemins, puis en effectuant la moyenne de ces rapports. Plus l'efficacité d'un réseau est élevée, moins il y a de détours dans ce réseau. De son côté, l'efficacité relative est une normalisation de l'efficacité. Buhl et ses collègues l'obtiennent en soustrayant l'efficacité du réseau en question à celle de son arbre de recouvrement minimal (réseau le moins efficace), puis en divisant le résultat par l'écart entre l'efficacité de la triangulation correspondante (la *greedy triangulation*, qui correspond au réseau le plus efficace) et celle de l'arbre de recouvrement minimal correspondant. Voir Buhl et al. (2006) pour plus d'explication.

²³³ Voir Rui et al. (2013) pour le détail de cette mesure.

²³⁴ Moyenne des rapports entre distances à vol d'oiseau et longueurs de plus courts chemins entre les tronçons.

La relation entre continuité des chemins et connectivité du réseau s'explique selon nous par le fait que les réseaux à la connectivité élevée comprennent généralement des intersections en X ou en étoile, or, ce type d'intersections permet une continuité du mouvement, sans interruption. Barrat et al. (2008) expliquent à ce propos que les intersections à plusieurs voies (les hubs) permettent d'éviter les détours dans un réseau, en offrant des chemins directs, des *raccourcis*. A l'inverse, les réseaux à la connectivité faible sont généralement des réseaux où dominent les intersections en T et les culs-de-sac. Or, ces derniers interrompent le mouvement, créant des discontinuités dans les chemins.

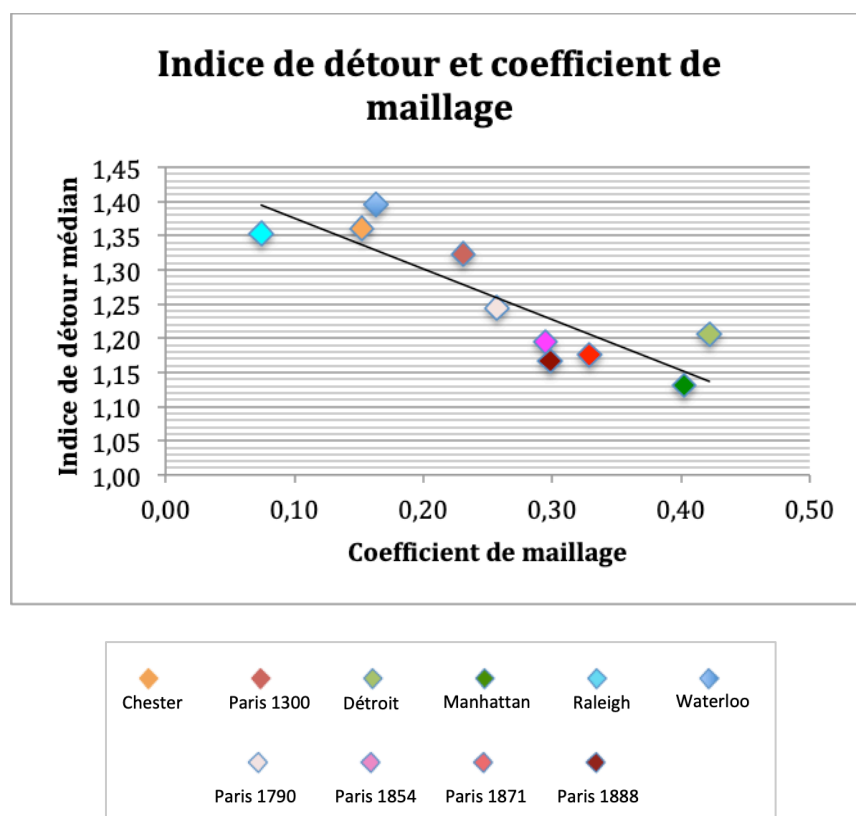


Figure 8.6 : Nuage de points croisant indice de détour médian et coefficient de maillage du réseau (coefficient de Pearson : -0,86 ; coefficient de Spearman : -0,81).

Une autre de nos hypothèses (tableau 8.6) suggère une relation entre continuité des chemins dans un réseau et rectitude des tronçons de ce réseau. Cette relation semble intuitive : si les tronçons rectilignes sont très fréquents dans un réseau, on peut s'attendre à ce qu'il y ait peu de détours dans ce réseau, car les tronçons rectilignes se rapprochent des distances à vol d'oiseau. Pourtant, le nuage de points croisant le descripteur de la continuité des chemins (indice de détour médian) et le descripteur de la rectitude des tronçons (courbure médiane) suggère un résultat plus nuancé (cf

figure 8.7). La relation est globalement positive, indiquant que les réseaux dont la courbure médiane est élevée ont un indice de détour élevé, et inversement. Toutefois, de nombreux réseaux ayant la même courbure médiane ont des indices de détour médians différents. En effet, les réseaux de Détroit, Manhattan, et Paris entre 1790 et 1888 ont un grand nombre de tronçons parfaitement rectilignes, ce qui se manifeste par une courbure médiane nulle pour chacun de ces réseaux. La continuité des chemins dans ces réseaux est meilleure que dans les autres, mais elle varie de 1,13 pour Manhattan à 1,24 pour Paris en 1790. Cela peut s'expliquer par les différences entre ces réseaux en termes de connectivité, comme vu ci-dessus.

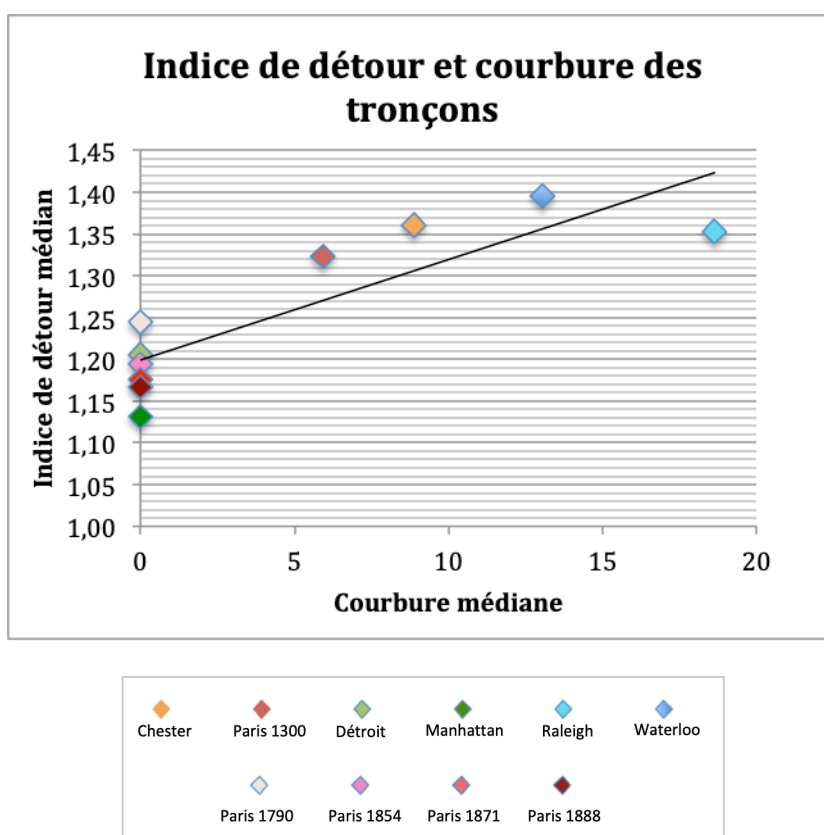


Figure 8.7 : Nuage de points croisant indice de détour médian et courbure médiane des tronçons (coefficient de Pearson : 0,86 ; coefficient de Spearman : 0,84).

On constate que le réseau viarie de la banlieue de Raleigh s'écarte de la tendance générale observée, aussi bien sur le nuage de points croisant indice de détour médian et coefficient de maillage, que sur celui croisant indice de détour médian et courbure médiane des tronçons. L'indice de détour médian y est plus faible que ne le suggère son coefficient de maillage (faible) et sa courbure médiane (élevée). Dit autrement, la continuité des chemins dans ce réseau est meilleure que ne le suggère sa faible connectivité et la forte courbure de ses tronçons. Cela nous mène à nuancer l'effet de ces caractéristiques morphologiques sur la continuité des chemins reliant

les tronçons d'un réseau, et à supposer que d'autres caractéristiques sont impliquées.

Pour finir, notre hypothèse (cf tableau 8.6) suggérait une relation négative entre indice de détour médian et concentration de l'orientation des tronçons de ce réseau, ce qui indiquerait une relation entre la continuité des chemins dans un réseau (l'absence de détour) et le fait que les tronçons dans ce réseau soient orientés selon des directions privilégiées. Le nuage de points croisant l'indice de détour médian et la concentration de l'orientation des tronçons n'indique pas de relation négative entre ces deux descripteurs (cf figure 8.8). Nous observons même une co-variation positive dans le cas du réseau parisien à différentes dates : plus la concentration de l'orientation des tronçons baisse dans le réseau parisien, plus son indice de détour médian baisse lui aussi. Dit autrement, dans ce réseau à différentes dates, plus les tronçons ont des orientations variées (la concentration baisse), plus les chemins entre ces tronçons sont continus, sans détours.

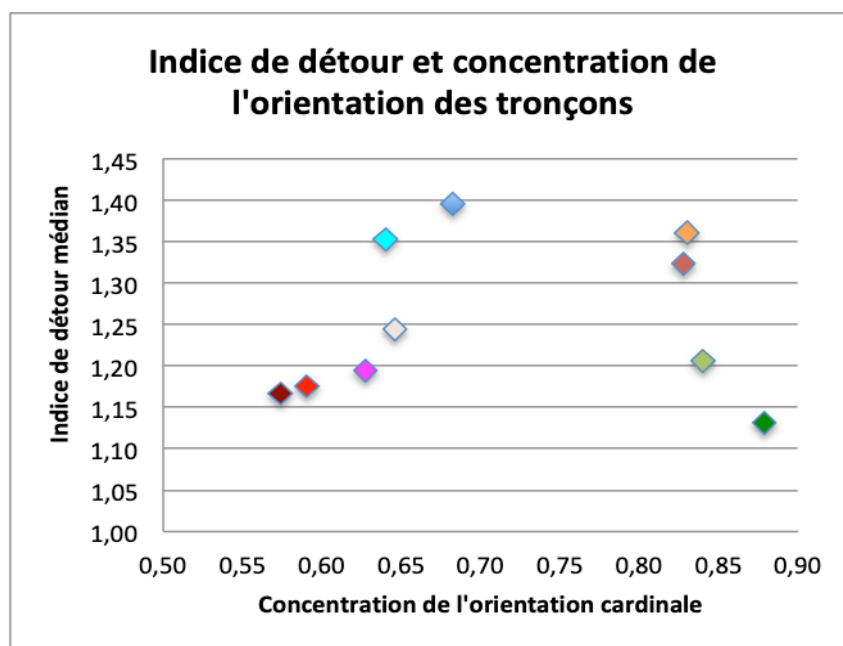


Figure 8.8 : Nuage de points croisant indice de détour médian et concentration de l'orientation cardinale des tronçons (coefficient de Pearson : 0,09 ; coefficient de Spearman : 0,17).

En conclusion, la continuité des plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau, que nous avons évaluée par l'intermédiaire de l'indice de détour médian, s'avère partiellement liée à la **connectivité des réseaux, et à la courbure des tronçons.**

Globalement, plus les tronçons sont liés les uns aux autres et rectilignes, plus les chemins qui relient ces tronçons sont continus, sans détours. Rappelons que notre approche demeure exploratoire, et que nos résultats ne sont valables que pour les cas d'étude considérés, et pour les descripteurs utilisés.

Bien que des écarts à la tendance générale soient observés, la continuité des chemins reliant les tronçons d'un réseau semble davantage liée à la connectivité de ce réseau qu'à la courbure de ses tronçons. Cette co-variation s'observe y compris pour le réseau parisien à différentes dates. D'un point de vue thématique, cela **nous inciterait à conclure que, si un concepteur souhaite améliorer la continuité des chemins entre les tronçons dans un réseau existant, il pourrait y parvenir en faisant croître la connectivité de ce réseau, et ce en créant, par exemple, des intersections en X et en étoile dans le réseau. Toutefois, ce type d'intervention dans un réseau existant présente des inconvénients : coût de réalisation, conséquences sur la morphologie des îlots et sur les bâtiments existants.**

II.3.3. La concentration des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau

Nous allons maintenant explorer la relation entre l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et les descripteurs morphologiques. Pour rappel, l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité est un descripteur d'accessibilité utilisé pour évaluer la concentration des plus courts chemins dans le réseau. Plus l'indice de Gini est élevé, plus la centralité d'intermédiarité est répartie de manière inégale entre les tronçons, et donc plus les plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau sont concentrés sur un petit nombre de tronçons. Dans ce cas, le réseau ne permet pas une uniforme répartition des déplacements (faible isotropie), et encourt des risques d'encombrement sur ces tronçons (faible fluidité des déplacements) (cf tableau 8.2).

Nous testons ici une hypothèse sur la relation entre l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et le nombre de tronçons du réseau (cf tableau 8.6). Le nuage de points associant ces deux descripteurs suggère une relation positive entre ces deux descripteurs (cf figure 8.9). Ce résultat est également visible aux travers des valeurs des coefficients de corrélation (cf tableau 8.7). Cela signifie que, parmi les réseaux étudiés, ceux de grande taille ont une répartition plus inégale de la centralité d'intermédiarité que ceux de petite taille. Dit autrement, les plus courts chemins dans les réseaux de grande taille sont davantage concentrés sur un faible nombre de tronçons, que dans les réseaux de petite taille. Ces réseaux permettent donc une moins bonne isotropie et fluidité des déplacements que les réseaux de petite taille.

Les cas de Paris en 1300 et de la banlieue de Waterloo sont intéressants. Ces deux réseaux ont approximativement la même taille et le même indice de Gini. Toutefois, leur indice de Gini semble plus élevé que ne le suggère la tendance générale observée pour les autres réseaux. Cela pourrait s'expliquer par la présence de *points de passage obligé* dans ces réseaux : le pont qui traverse la Seine à Paris en 1300, et les collecteurs permettant d'accéder aux culs-de-sac dans la banlieue de Waterloo. Plusieurs auteurs tels que Crucitti et al. (2006) évoquent une relation entre la répartition inégalitaire de la centralité d'intermédiation et la présence de points qui connectent des « régions » du réseau qui, sans ces points, ne seraient pas connectées. La vérification de cette hypothèse nécessite le développement de descripteurs capables de rendre compte de la présence de tels points de passage.

Le cas de Paris au XIXe siècle est également intéressant. Les points relatifs à Paris entre 1790 et 1888 se positionnent régulièrement sur la droite résumant le nuage de points, illustrant la co-augmentation du nombre de tronçons et de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiation dans ce réseau. Ainsi, la concentration des plus courts chemins y augmente au fur et à mesure que le nombre de tronçons augmente. **Cela laisserait supposer que le fait d'augmenter le nombre de tronçons dans un réseau viaire existant (à emprise égale) augmenterait la concentration des plus courts chemins dans ce réseau.** Ce résultat peut venir du fait que, plus le nombre de tronçons dans un réseau augmente, plus le nombre de plus courts chemins reliant les tronçons augmente lui aussi. De fait, il est probable que les tronçons qui étaient déjà traversés par un grand nombre de plus courts chemins (comme les ponts à Paris) le soient de plus en plus. Cela crée une plus forte concentration des plus courts chemins sur ces tronçons, donc globalement une augmentation de la concentration des chemins dans le réseau.

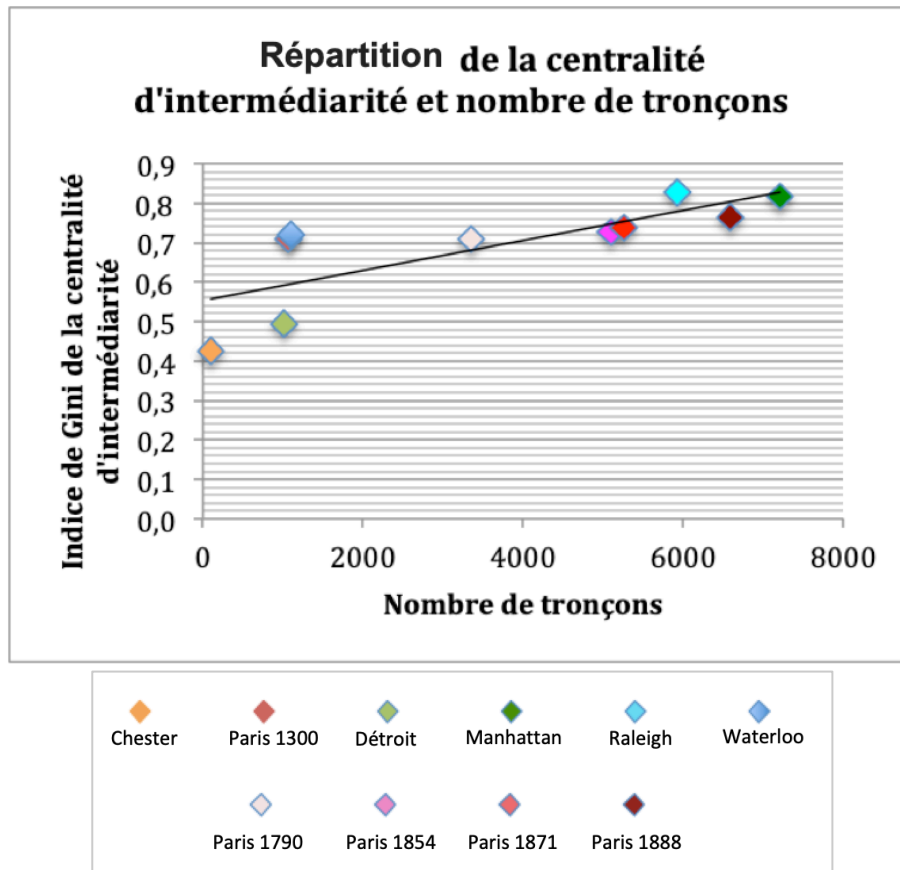


Figure 8.9 : Nuage de points croisant indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et nombre de tronçons du réseau (coefficient de Pearson : 0,77 ; coefficient de Spearman : 0,92).

Le fait que le réseau viaire de Manhattan ait une centralité d'intermédiarité répartie de manière très inégalitaire nous interroge. En effet, selon Barthélemy & Flammini (2009), la centralité d'intermédiarité des sommets dans un réseau théorique au quadrillage régulier décline lentement en fonction de la distance au barycentre du réseau. A l'échelle du réseau dans son ensemble, cela engendre une centralité répartie de manière relativement égalitaire entre les sommets. Or, le réseau viaire de Manhattan, qui est de type quadrillé, est de ceux qui ont la répartition la plus inégalitaire de leur centralité d'intermédiarité (l'indice de Gini vaut 0,82 dans ce réseau, cf tableau 8.4). Comment expliquer cela ?

Une première hypothèse d'explication est que la présence de Central Park est à l'origine de la répartition inégalitaire de la centralité d'intermédiarité à Manhattan. En effet, ce parc urbain crée un vide au centre du réseau, ce qui confère aux tronçons qui permettent de le traverser et de le contourner une forte participation aux plus courts chemins dans le réseau, donc une centralité d'intermédiarité plus élevée que celle des autres tronçons. Cela peut engendrer une répartition inégalitaire de la centralité d'intermédiarité à l'échelle du réseau. Pour tester cette hypothèse, nous construisons un réseau théorique similaire à celui de Manhattan, mais dans lequel le

quadrillage se poursuit y compris à l'intérieur de Central Park (cf figure 8.10 gauche). Ce réseau a donc un quadrillage plus régulier, sans interruption en son centre. Malgré cela, on observe la même répartition inégale de la centralité d'intermédiation, avec un indice de Gini qui vaut 0,8 (proche de celui du réseau d'origine). Nous en concluons que la répartition inégale de la centralité d'intermédiation à Manhattan n'est pas liée à la présence de Central Park.

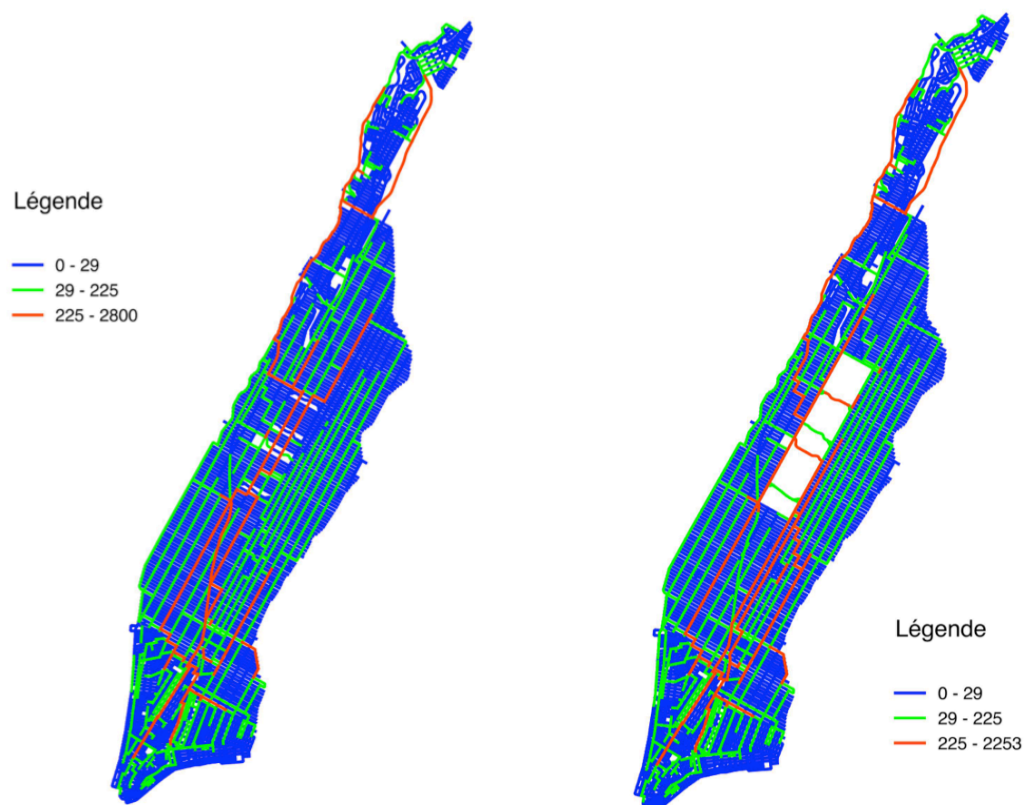


Figure 8.10 : Centralité d'intermédiation des tronçons dans le réseau viaire de Manhattan (à droite) et dans un réseau théorique similaire, dans lequel le quadrillage de la ville se poursuit à l'intérieur de Central Park (à gauche).

Une autre hypothèse d'explication tient à la forme allongée du réseau viaire de Manhattan, qui le distingue de la forme régulière des réseaux décrits par Barthélemy et Flammini (2009). Cette forme allongée fait que les tronçons formant des voies longitudinales (permettant de parcourir l'île dans sa longueur) participent davantage aux plus courts chemins dans le réseau que les tronçons formant des voies transversales. Ces tronçons longitudinaux ont donc une centralité d'intermédiation bien plus élevée que les tronçons transversaux (cf figure 8.10 droite), ce qui peut expliquer la répartition inégale de la centralité à l'échelle du réseau. **Cet exemple nous incite à rechercher, dans de futurs travaux, des relations entre la forme de l'enveloppe des réseaux (leur forme plus ou moins allongée par exemple) et les conditions d'accessibilité dans ces réseaux. Cette**

recherche devra recourir à des descripteurs morphologiques spécifiques, décrivant la manière dont un réseau viaire occupe l'espace. Nous reviendrons sur cet aspect dans la conclusion de la thèse.

En conclusion, la concentration des plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau, que nous avons évaluée par l'intermédiaire de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, s'avère **partiellement liée au nombre de tronçons dans un réseau.**

Le réseau de Paris en 1300 et celui de la banlieue de Waterloo s'écartent légèrement de la tendance générale observée. Pour le cas de Paris en 1300, il est intéressant de constater que son indice de Gini est proche de celui de la même ville au XIXe siècle, alors que le réseau est beaucoup plus grand au XIXe siècle. Nous avons formulé comme hypothèse que cela pouvait être dû à la présence de points de passage obligé à Paris en 1300 : un pont unique permet de relier la rive droite à la rive gauche dans ce réseau. Le réseau parisien à partir de 1790 est plus grand mais il comprend aussi davantage de ponts, donc aucun point de passage obligé.

La proximité entre l'indice de Gini du réseau parisien en 1300 et au XIXe siècle peut également être le signe d'une inertie de cet indice de Gini, c'est-à-dire une **inertie du niveau de concentration des chemins dans le réseau parisien.** Cela suggérerait que, malgré les modifications morphologiques survenues à Paris entre le Moyen Age et la fin du XIXe siècle, la concentration des chemins y est restée relativement similaire. Cette idée renforce l'hypothèse, abordée pour la linéarité des chemins, selon laquelle les réseaux présenteraient une inertie à travers le temps de leurs conditions d'accessibilité. Des modifications morphologiques pourraient ne modifier les conditions d'accessibilité que dans de faibles proportions.

II.3.4. La longueur des plus courts chemins reliant les tronçons d'un réseau

Nous allons explorer dans cette dernière section la relation entre l'éloignement métrique médian (descripteur d'accessibilité) et les descripteurs morphologiques. L'éloignement métrique médian rend compte de la longueur des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau, et donc de la propension du réseau à induire ou non de longues distances à parcourir lors des déplacements²³⁵. Selon notre hypothèse (cf

²³⁵ Rappelons que l'éloignement métrique médian d'un réseau est la valeur d'éloignement métrique dépassée par 50% des tronçons d'un réseau. Nous considérons que plus cette valeur est élevée, plus les tronçons du réseau sont éloignés les uns des autres, autrement dit plus les chemins entre ces tronçons sont longs.

tableau 8.6), l'éloignement métrique médian est lié à l'espacement²³⁶ médian des tronçons par une relation positive.

Le nuage de points croisant l'éloignement métrique médian et l'espacement médian des tronçons dans le réseau fait effectivement apparaître une relation positive entre ces descripteurs (cf figure 8.11). Plus les distances à vol d'oiseau entre les tronçons d'un réseau sont élevées, plus les chemins entre ces tronçons sont longs. Comme le confirme la valeur élevée du coefficient de corrélation, cette relation est plus forte que celles observées jusqu'ici (cf tableau 8.7). Bien qu'il puisse sembler intuitif, ce résultat est intéressant dans la mesure où il suggère que **la topologie et la géométrie des réseaux étudiés n'ont pas d'effet majeur sur la longueur des chemins au sein de ces réseaux, et que seules les distances à vol d'oiseau entre les tronçons sont déterminantes**. Un travail mené sur un plus grand nombre de cas d'étude permettrait de renforcer ce résultat.

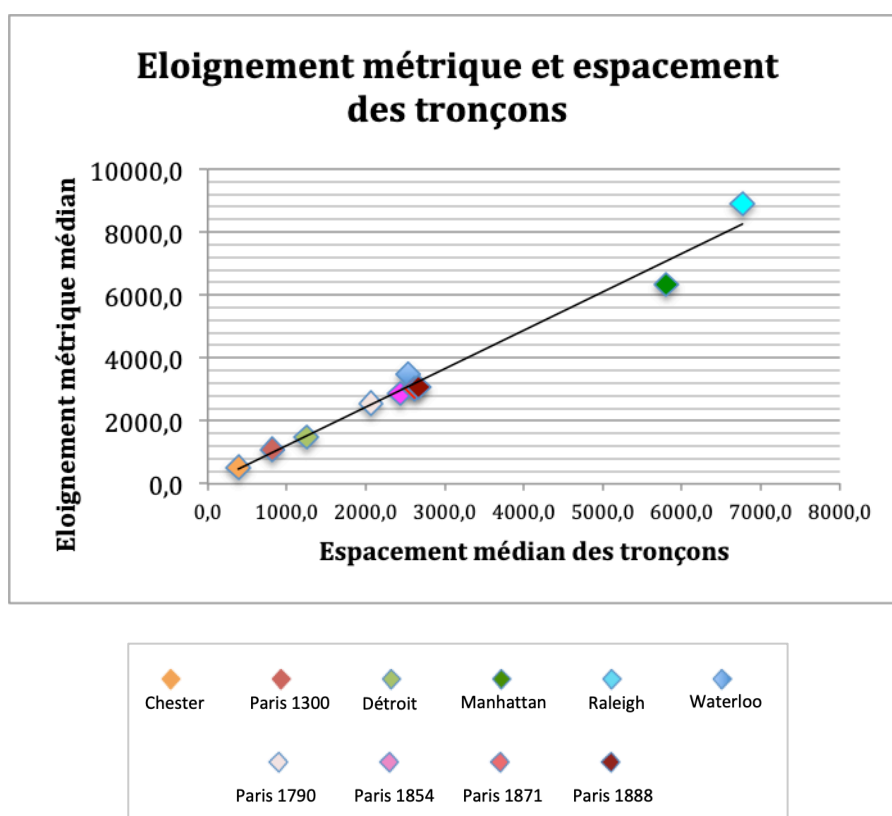


Figure 8.11 : Nuage de points croisant éloignement métrique médian et espacement médian des tronçons (coefficient de Pearson : 0,98 ; coefficient de Spearman : 0,99).

²³⁶ Distance moyenne à vol d'oiseau entre un tronçon et tous les autres.

En conclusion, la longueur des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau viaire, que nous avons évaluée par l'intermédiaire de l'éloignement métrique médian, s'avère liée à **l'espacement des tronçons dans ce réseau**. Cette covariation est observée aussi bien pour les réseaux types, que pour le réseau parisien à différentes dates.

Le cas de Paris à différentes dates nous incite à suggérer que, si un concepteur souhaite réduire la longueur des chemins dans un réseau viaire existant, c'est-à-dire permettre plus de proximité dans les déplacements, il lui est possible d'y parvenir en **réduisant l'espacement entre les tronçons de ce réseau**, autrement dit les distances à vol d'oiseau entre eux. Mais comment ? Intuitivement, on pourrait penser que la densification du réseau, c'est-à-dire l'augmentation de son nombre de tronçons, à emprise égale, réduirait l'espacement entre les tronçons. Pourtant, le cas de Paris suggère le contraire. Entre 1790 et 1888, à emprise égale, le nombre de tronçons dans ce réseau a augmenté, or, l'espacement des tronçons a lui aussi augmenté. Cela nous incite à suggérer que **pour réduire l'espacement des tronçons dans un réseau, et donc réduire la longueur des chemins, il faudrait au contraire réduire le nombre de tronçons dans ce réseau, à emprise égale, autrement dit le dé-densifier**. Nous pensons que, d'un point de vue statique, les réseaux denses induisent de faibles distances à parcourir lors des déplacements, mais que la densification d'un réseau existant provoque au contraire un rallongement des distances à parcourir dans ce réseau. Rappelons qu'il s'agit là de pistes de réflexion, plutôt que de préconisations concrètes.

Conclusion de la partie II

Les analyses que nous avons menées dans cette partie laissent penser que certaines conditions d'accessibilité des réseaux semblent liées aux caractéristiques morphologiques de ces derniers. Si des tendances ont pu être identifiées, de nombreux contre-exemples sont aussi apparus. Parmi les grandes tendances, nous avons repéré que, parmi les réseaux étudiés :

- les réseaux dans lesquels les tronçons sont fortement reliés les uns aux autres, rectilignes, et orientés selon des directions privilégiées, ont le plus souvent des chemins linéaires entre leurs tronçons ;
- les réseaux dans lesquels les tronçons sont fortement reliés les uns aux autres et rectilignes ont tendance à avoir des chemins continus entre leurs tronçons ;
- les réseaux de petite taille (nombre de tronçons faible) ont tendance à avoir des chemins uniformément répartis ;
- les réseaux dans lesquels les tronçons sont rapprochés les uns des autres ont tendance à avoir des chemins courts entre leurs tronçons

Notre analyse porte à la fois sur des réseaux types et sur un même réseau à différentes dates (Paris en l'occurrence). Dans plusieurs cas, alors que la forme globale du nuage de point était linéaire, témoignant ainsi d'une co-variation entre descripteur d'accessibilité et descripteur morphologique, il est apparu que les cinq cas parisiens ne suivaient pas cette régularité. Par exemple, l'augmentation de la connectivité du réseau parisien entre 1300 et 1888 ne s'est pas accompagnée d'une augmentation conséquente de la linéarité des chemins entre les tronçons constituant le réseau parisien. De son côté, l'augmentation du nombre de tronçons, sur la même période, ne s'est pas traduite par une augmentation conséquente de la concentration des chemins dans ce réseau. Ces résultats peuvent être interprétés comme une **inertie du réseau viaire parisien en termes de linéarité et de concentration des chemins qui relient ses tronçons**. Nous reviendrons sur cette inertie dans la conclusion du chapitre.

Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était d'explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux de nos deux corpus, et leurs conditions d'accessibilité. Les résultats des chapitres 6 et 7 nous ont permis de formuler des hypothèses quant à cette relation, hypothèses que nous avons testées dans ce chapitre.

Au vu du nombre de cas d'étude dont nous disposons (dix cas, dont cinq qui correspondent à la même ville à différentes dates), nous avons choisi d'adopter, non pas une approche quantitative, mais une approche qualitative et exploratoire. Celle-ci s'est basée sur l'analyse de la relation entre des descripteurs des caractéristiques morphologiques, et des descripteurs des conditions d'accessibilité.

Cette analyse nous a permis d'identifier des tendances générales de relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité. Toutefois, nous avons également identifié plusieurs écarts à ces tendances. Ces écarts sont aussi intéressants à commenter que les tendances elles-mêmes. En outre, ils suggèrent qu'il existe d'autres caractéristiques morphologiques potentiellement liées aux conditions d'accessibilité des réseaux viaires. Nous revenons sur ce point en conclusion de la thèse.

Nos résultats montrent que les réseaux types présentent des conditions d'accessibilité plus marquées, c'est-à-dire plus différentes entre un réseau et un autre, que le réseau parisien à différentes dates. Nous supposons que cela peut être dû au fait que ces réseaux types (corpus 1) présentent des **combinaisons de caractéristiques morphologiques typiques**, et que ce sont ces combinaisons qui engendrent leurs conditions d'accessibilité très marquées. Par exemple, les réseaux quadrillés ont à la fois une connectivité élevée, et des tronçons rectilignes et orientés selon des directions privilégiées. De leur côté, les réseaux arborescents ont à la fois

des tronçons courbes, longs, et d'orientations variées. Ces combinaisons de caractéristiques morphologiques spécifiques peuvent être à l'origine des conditions d'accessibilité bien marquées de ces réseaux.

Concernant le second corpus, notre hypothèse est que l'inertie observée dans les conditions d'accessibilité du réseau viaire parisien entre 1790 et 1888 vient du fait que le réseau à cette période présente une **évolution complexe de ses différentes caractéristiques morphologiques**. Certaines caractéristiques ont évolué dans un sens entre une date et une autre, puis dans le sens opposé²³⁷. D'autres caractéristiques morphologiques ont connu une évolution régulière, d'autres enfin sont restées stables sur l'ensemble de la période. Nous suggérons que cette évolution complexe des caractéristiques morphologiques a empêché que les conditions d'accessibilité du réseau viaire parisien n'évoluent de manière marquée, dans un sens ou dans l'autre, entre 1790 et 1888.

Enfin, sur le plan opérationnel, cette discussion suggère que, si l'on souhaite agir sur les conditions d'accessibilité d'un réseau viaire, la conception d'un réseau type, conçu *ex-nihilo*, aurait davantage d'effet que la modification d'un réseau existant. Cette idée renvoie à un débat bien connu en urbanisme, qui oppose les partisans d'un renouvellement urbain faisant *table rase* de la ville existante, aux partisans d'une ville construite *sur la ville* existante. Payette-Hamelin (2011) décrit ce débat au XXe siècle. Pour lui, les partisans de la table rase²³⁸ se revendiquent de l'urbanisme progressiste décrit par Françoise Choay (1965), tandis que les tenants d'une conception de la ville sur la ville sont associés à l'urbanisme culturaliste (cf chapitre 1).

²³⁷ C'est le cas de la connectivité du réseau, et de la longueur médiane de ses tronçons.

²³⁸ L'auteur évoque comme exemple d'application de *la table rase* en urbanisme le phénomène d'*Urban Renewal*, qui se répand aux Etats-Unis avec l'adoption du *Housing Act* par le Congrès américain en 1949. Cette loi permet à l'époque de procéder à la démolition de vieux quartiers urbains (p. 70).

Conclusion Générale

L'objectif premier de cette thèse était d'**explorer l'effet des préconisations faites en urbanisme, concernant la morphologie des réseaux viaires, sur les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux**. Nous avons vu dans le **chapitre 1** que les réseaux viaires étaient un objet d'intérêt pour les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Ces derniers font des préconisations variées quant à la manière de concevoir les réseaux viaires, pour faire émerger diverses qualités dans l'espace urbain. Parmi ces qualités figurent les conditions de circulation offertes aux usagers. Nous avons vu dans le **chapitre 2** que la circulation dans l'espace urbain était l'un des objets d'un champ scientifique bien établi : l'étude de la mobilité urbaine. En puisant dans ce champ, nous avons été en mesure de définir plus précisément les conditions de circulation décrites par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme, et de les décliner en huit conditions : le confort et la sécurité lors des déplacements, la simplicité des déplacements, leur continuité, isotropie, proximité, fluidité et rapidité. Nous désignons ces conditions, définies suivant des critères précis, comme des **conditions d'accessibilité**. Il s'agit d'un ensemble de potentialités offertes aux usagers lors de leurs déplacements, et qui leur permet un bon accès à leurs destinations. Dans le **chapitre 3**, nous avons présenté plus en détail les préconisations faites en urbanisme afin d'améliorer chacune des conditions d'accessibilité identifiées, et ce en agissant sur la morphologie des réseaux viaires. Nous avons également questionné le processus de construction de ces préconisations, et sommes arrivé à la conclusion qu'une évaluation de leurs conditions d'accessibilité, à partir de critères mesurables, était nécessaire. Nous avons donc choisi un ensemble de ces préconisations, et proposé une démarche d'exploration, formalisée et reproductible²³⁹, afin d'évaluer leur effet sur les conditions d'accessibilité des réseaux viaires. Cette démarche s'appuie en premier lieu sur la théorie des graphes. Nous avons présenté cette théorie dans le **chapitre 4**²⁴⁰, en insistant sur sa capacité à rendre compte, grâce à des descripteurs quantitatifs, d'une part de la morphologie des réseaux viaires, et d'autre part des conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux viaires. Nous avons dû nous focaliser sur cinq des huit conditions d'accessibilité identifiées, car ce sont celles qui peuvent être mesurées grâce à des descripteurs de la théorie des graphes (la simplicité des déplacements, leur continuité, isotropie, proximité et fluidité).

²³⁹ L'ensemble des éléments nécessaires à une reproduction de nos analyses sont présentés dans la thèse (choix des données, logiciel utilisé, formules utilisées pour le calcul des descripteurs, choix faits dans la représentation des résultats). Les données filaires utilisées pour construire les graphes sont disponibles en ligne.

²⁴⁰ La revue de la littérature nous a permis de proposer un retour critique sur l'utilisation de la théorie des graphes pour l'analyse des réseaux viaires, en physique et en urbanisme (cf encadré du chapitre 4).

La prochaine étape (**chapitre 5**) a consisté à choisir les cas d'étude empiriques sur lesquels mener notre exploration de l'effet des préconisations faites en urbanisme sur les conditions d'accessibilité des réseaux. Il nous fallait des cas d'étude représentatifs de ces préconisations. Nous avons choisi pour cela deux corpus de réseaux : le premier est composé de réseaux à la morphologie typique (organique, quadrillée et arborescente), faisant l'objet de préconisations de la part des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Le second est composé d'un réseau dans lequel ont été menées des interventions typiques, préconisées en urbanisme pour améliorer les conditions d'accessibilité dans un réseau existant.

Une fois la méthode d'analyse présentée et les cas d'étude choisis, nous sommes passés à la présentation des résultats dans les **chapitres 6 et 7**. L'objet du chapitre 6 était la description, grâce à la théorie des graphes, de la morphologie des réseaux viaires de nos deux corpus, tandis que le chapitre 7 visait la description, aussi grâce à la théorie des graphes, des conditions d'accessibilité des réseaux de nos deux corpus.

Sur le corpus 1, nous avons pu décrire précisément la morphologie et les conditions d'accessibilité de réseaux viaires types souvent préconisés par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Nos résultats montrent notamment que :

- les réseaux organiques du corpus se distinguent des autres par des tronçons ²⁴¹ plus rapprochés (caractéristique morphologique), et une meilleure proximité des déplacements (condition d'accessibilité);
- les réseaux quadrillés du corpus se distinguent des autres par une connectivité plus élevée, des tronçons rectilignes et orthogonaux ²⁴² (caractéristiques morphologiques), et par une meilleure simplicité et continuité des déplacements que les autres réseaux (conditions d'accessibilité) ;
- les réseaux arborescents du corpus se distinguent des autres par des tronçons plus longs, plus courbes et orientés selon des directions plus variées (caractéristiques morphologiques), ainsi que par une moins bonne simplicité des déplacements que les autres réseaux (condition d'accessibilité).

Nous avons également pu révéler des résultats intéressants sur chaque réseau. Par exemple, le réseau de Chester au Moyen Age et celui de Détroit en 1837 se caractérisent par une centralité d'intermédiarité répartie de manière égalitaire, ce qui, selon notre interprétation de ce descripteur, indique que ces réseaux permettent de répartir uniformément les déplacements (isotropie) et seraient peu propices à la congestion (fluidité des déplacements).

²⁴¹ Un tronçon est la partie d'une voie située entre deux intersections.

²⁴² Orientation des tronçons selon deux directions orthogonales.

Sur le corpus 2, nous avons pu décrire dans les chapitres 6 et 7 l'évolution de la morphologie et des conditions d'accessibilité du réseau viaire parisien sur des périodes historiques anciennes (de 1790 à 1888). Notre intérêt portait en particulier sur les spécificités de la période haussmannienne, en comparaison avec le reste du XIXe siècle. Nous avons pu montrer que cette période se distinguait des autres par une forte augmentation de la connectivité du réseau et de la longueur des tronçons, et par une diversification de l'orientation de ces tronçons. En revanche, l'évolution des conditions d'accessibilité a présenté peu de spécificités à la période haussmannienne, comparativement aux autres périodes.

Enfin, nous avons exploré dans le **chapitre 8** la relation entre les caractéristiques morphologiques et les conditions d'accessibilité des réseaux viaires de nos deux corpus. Nous avons pu observer des tendances générales de co-variation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité. Par ailleurs, nos résultats ont montré une différence entre les co-variations observées sur les réseaux typiques (corpus 1), et celles observées sur le réseau parisien à différentes dates (corpus 2). Sur les réseaux typiques, des caractéristiques morphologiques différentes s'accompagnent de conditions d'accessibilité différentes, tandis que dans le réseau parisien entre une date et une autre, des caractéristiques morphologiques différentes peuvent s'accompagner de conditions d'accessibilité très proches. Nous avons qualifié ce phénomène d'inertie des conditions d'accessibilité dans le réseau viaire parisien. Une hypothèse d'explication de cette inertie est que l'évolution des caractéristiques morphologiques à Paris entre 1790 et 1888 avait été complexe (différences d'évolution entre une période et la suivante, stabilité de certaines caractéristiques morphologiques et forte variation des autres), et que cette complexité n'a pas permis d'évolution marquée de ses conditions d'accessibilité, dans un sens ou dans l'autre.

Un dialogue entre Urbanisme et Science des réseaux

Sur le plan méthodologique, cette thèse se voulait une illustration des **possibilités offertes par l'Analyse des réseaux pour explorer la relation entre la morphologie des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité**. Cette exploration s'est basée sur une approche empirique, portant sur un corpus de cas d'étude. A ce titre, elle diffère de nombreux travaux en analyse de réseaux, qui ont plutôt recours à des réseaux théoriques. Par exemple, pour explorer la relation entre le nombre de sommets d'un réseau et la longueur des chemins dans ce réseau, une approche fréquente en analyse de réseaux consiste à construire un réseau théorique, et à faire croître son nombre de sommets un grand nombre de fois, de façon itérative, les autres caractéristiques morphologiques du réseau restant stables. Il est

alors possible d'observer l'effet du nombre de sommets sur la longueur des chemins dans le réseau, en l'isolant de l'effet des autres caractéristiques.

Cette approche théorique n'est pas celle que nous avons choisie, d'une part parce que la génération d'un grand nombre de réseaux en fonction d'une règle donnée (la croissance du nombre de sommets dans l'exemple ci-dessus), nécessite la maîtrise d'outils de simulation qui ne sont pas de notre domaine de compétence. D'autre part, ce type d'approche conduit rapidement à la génération de réseaux peu réalistes, c'est-à-dire de réseaux dont la morphologie ne correspond à aucun réseau viaire observable dans le domaine empirique. En effet, les réseaux viaires empiriques ont des caractéristiques morphologiques complexes et l'application d'une règle unique échoue nécessairement à la production de cette complexité. En outre, ces réseaux résultant de l'application d'une règle ne sont pas porteurs de sens pour les théoriciens et les praticiens de l'urbanisme. Nous avons donc choisi de conserver une approche empirique.

En résumé, l'approche empirique que nous avons adoptée ne vise pas à tester et à isoler l'effet de chaque caractéristique morphologique d'un réseau viaire sur ses conditions d'accessibilité. Nous renvoyons le lecteur intéressé par ce type d'approche aux travaux de modélisation de Rui et al. (2013) par exemple. Notre approche vise plutôt à explorer la relation entre les caractéristiques morphologiques de réseaux qui sont **porteurs de sens en urbanisme**, et les conditions d'accessibilité de ces réseaux. Une telle approche offre ainsi des résultats facilement appropriables par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.

Cette discussion illustre l'intérêt d'un dialogue entre les savoirs propres à l'urbanisme et les outils méthodologiques propres à la Science des réseaux. Ce dialogue peut également influencer sur le **choix des descripteurs mobilisés**. En effet, il est important de recourir à des descripteurs (qu'ils soient morphologiques ou d'accessibilité) adaptés au cas des réseaux viaires. Nous avons montré dans le chapitre 6 l'intérêt d'aller au-delà des descripteurs morphologiques classiques proposés par les outils d'analyse de réseaux, et de recourir à des descripteurs de géométrie, tels que la courbure des tronçons ou leur orientation cardinale. Dans de futurs travaux, nous suggérons de recourir à des descripteurs capables de rendre compte de la **présence de ruptures** dans un réseau viaire (comme un cours d'eau ou un parc)²⁴³, la **présence de points de passage obligé**²⁴⁴, ou encore la **forme de l'enveloppe** du réseau²⁴⁵. Cette dernière caractéristique suscite un fort intérêt dans

²⁴³ Nous avons formulé dans le chapitre 7 l'hypothèse que la présence de telles ruptures faisait croître l'indice de détour et la centralité d'intermédiarité des tronçons avoisinant.

²⁴⁴ Nous avons formulé dans le chapitre 8 l'hypothèse que ces points de passage obligé engendraient une concentration des chemins dans le réseau.

²⁴⁵ Nous avons formulé dans le chapitre 8 l'hypothèse que la forme allongée du réseau viaire de Manhattan était à l'origine de la répartition inégalitaire de sa centralité d'intermédiarité.

les travaux d'analyse de réseaux (Barthelemy, 2011; Haggett & Chorley, 1969; Lämmer et al., 2006; Louf & Barthelemy, 2014). Haggett et Chorley (1969) évoquent une variété de mesures pour décrire la forme de l'enveloppe d'un réseau. Ils proposent l'utilisation d'indices décrivant à quel point cette enveloppe est circulaire, allongée, elliptique, radiale, ou encore compacte. Lämmer et al. (2006) utilisent des descripteurs similaires mais calculés à l'échelle des îlots. Ils utilisent le facteur de forme (*form factor*), qui correspond au rapport entre la surface de l'îlot et celle du cercle circonscrit à cet îlot. Leurs résultats sur un corpus de villes allemandes montrent une grande variété des formes d'îlots au sein même de chaque réseau.

Enfin, nous avons vu que le fait de recourir à des valeurs de référence comme la médiane ou l'indice de Gini était utile pour obtenir des descripteurs d'ensemble d'un réseau, à partir de descripteurs calculés à l'échelle des tronçons. Toutefois, ce recours engendre également un effacement de certaines spécificités locales de chaque réseau. Par exemple, dans le chapitre 7, l'étude de la distribution spatiale de la centralité d'intermédiation dans le réseau viaire parisien au XIXe siècle a révélé une redistribution de cette centralité à la période haussmannienne : les voies à la centralité la plus élevée n'étaient plus celles situées en périphérie, mais celles formant des boucles au centre du réseau. Or, l'indicateur utilisé pour résumer la centralité d'intermédiation des tronçons à l'échelle du réseau n'a pas permis d'observer cette redistribution spatiale. Cela suggère qu'il faudrait avoir recours à des indicateurs agrégés décrivant la **distribution spatiale** des descripteurs.

Quel impact des analyses de réseaux sur la pratique de l'urbanisme ?

Pour conclure ce dialogue entre urbanisme et sciences des réseaux, on peut se demander quel peut être l'impact des analyses de réseaux dans la pratique de l'urbanisme ? Nous avons vu dans le chapitre 4 que les architectes et urbanistes qui ont recours à l'analyse de réseaux peuvent avoir des visées opérationnelles. Les architectes de la *Space Syntax* par exemple utilisent parfois le calcul des descripteurs d'accessibilité pour argumenter certains choix d'intervention sur la morphologie des réseaux viaires. Néanmoins, ces pratiques demeurent minoritaires dans la communauté des théoriciens et praticiens de l'urbanisme. Cela nous incite à nous demander **comment les résultats de travaux comme le nôtre pourraient être utiles dans la pratique de la conception des réseaux viaires ?** Nous pensons que ces analyses de réseaux peuvent fournir de « bons exemples » concernant les caractéristiques morphologiques à adopter pour qu'un réseau viaire présente certaines conditions d'accessibilité. Il ne s'agit pas de faire des prescriptions rigides sur une morphologie de réseau viaire à adopter, mais plutôt de présenter un ensemble d'ingrédients qui, en théorie, permettent de bonnes conditions d'accessibilité.

Futures pistes

Plusieurs travaux en analyse de réseaux recherchent des corrélations entre les descripteurs morphologiques ou d'accessibilité, et des phénomènes concrets tels que la répartition du prix du foncier, l'occupation du sol (Wang et al., 2011), l'usage de la marche (Berrigan et al., 2010), ou encore la criminalité (Hillier & Shu, 2000). Par exemple, Berrigan et al. ont montré qu'il existait une relation entre la connectivité du réseau viaire (qu'ils évaluent par un ensemble de descripteurs morphologiques) et l'usage d'un mode de transport actif (la marche à pied ou le vélo). De leur côté, Hillier et Shu ont identifié une relation entre la configuration des tronçons dans un réseau viaire et la localisation des crimes et délits.

Une analyse fréquente dans ce type de travaux consiste à explorer la relation entre un descripteur d'accessibilité et des données empiriques sur les déplacements réels des individus. Cooper & Chiaradia (2015) ont par exemple montré qu'il existe une corrélation entre l'éloignement angulaire des tronçons dans plusieurs quartiers centraux de Londres et l'importance des flux piétons et automobiles sur ces tronçons. Ils trouvent que les tronçons à l'éloignement angulaire faible (donc qui permettent des chemins linéaires vers le reste du réseau) sont ceux sur lesquels se localisent les flux piétons et automobiles. Ce résultat conduit les auteurs à conclure que les usagers empruntent souvent les chemins qui leur permettent la meilleure linéarité pour atteindre leurs destinations.

Le choix des chemins empruntés par les usagers fait partie de leurs comportements de mobilité. Ainsi, ces travaux d'analyse de corrélation entre descripteurs d'accessibilité et données empiriques sur les déplacements nous font identifier une autre perspective à explorer dans de futurs travaux : **l'exploration de la relation entre les conditions d'accessibilité des réseaux et les comportements de mobilité des usagers** (les chemins qu'ils choisissent d'emprunter, le mode de déplacements qu'ils utilisent). Nous pourrions par exemple observer si des conditions d'accessibilité telles que la proximité des déplacements ou leur continuité, sont corrélées à un usage de la marche à pied. Cela reviendrait à mener une analyse de corrélation entre les descripteurs de proximité et de continuité des déplacements (à savoir l'éloignement métrique et l'indice de détour) calculés à l'échelle d'un réseau, et des données empiriques portant par exemple sur le nombre ou la part d'usagers se déplaçant à pied dans ce même réseau.

Cette perspective introduit les « comportements de mobilité » comme chaînon supplémentaire dans le schéma que nous avons présenté en introduction de la thèse, et qui liait trois concepts clefs de notre travail : les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, la morphologie des réseaux viaires, et les conditions d'accessibilité de ces réseaux (cf figure 9.1).

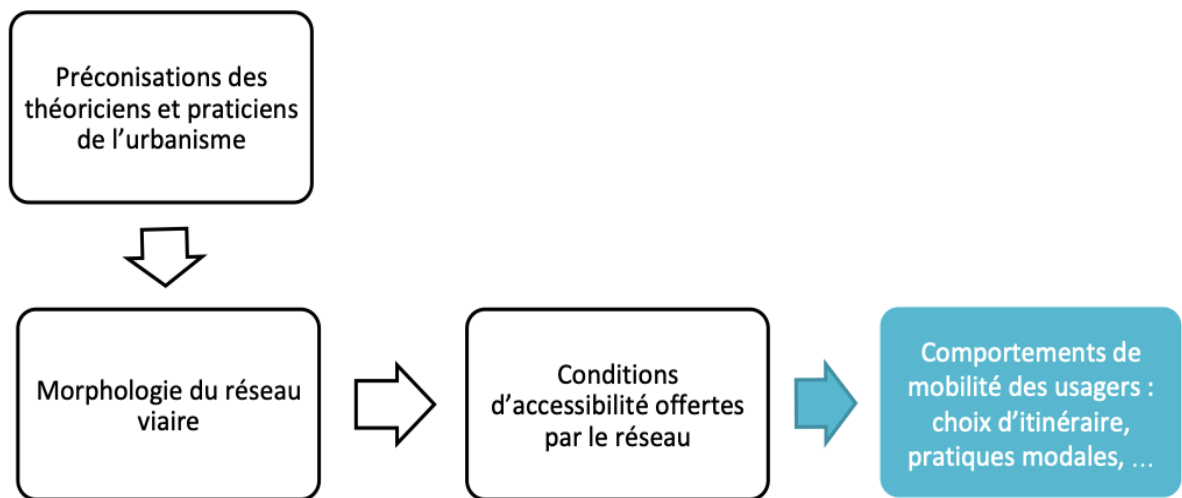


Figure 9.1 : Schéma représentant la relation entre les préconisations faites en urbanisme, la morphologie des réseaux viaires, leurs conditions d'accessibilité, et les comportements de mobilité des usagers (issu du schéma présenté en introduction de la thèse).

Nous proposons également dans de futurs travaux d'analyser un plus grand corpus de données. Bien qu'une analyse sur un nombre restreint de cas d'étude nous ait permis de formuler des interprétations thématiques intéressantes sur chacun des réseaux analysés, un travail sur un **plus grand nombre de cas d'étude** permettrait d'explorer plus en détail la relation entre les caractéristiques morphologiques des réseaux viaires et leurs conditions d'accessibilité. Ce travail pourrait s'appuyer sur de grandes bases de données filaires telles qu'Openstreetmap, ou que la base construite par Karduni et al. (2016), spécifiquement pour analyser des réseaux viaires au moyen de la théorie des graphes²⁴⁶. Une des pistes à explorer, dans le cas d'une analyse portant sur un grand nombre de réseaux viaires, serait la construction d'une classification de ces réseaux, en se basant sur les valeurs prises par les descripteurs morphologiques. On obtiendrait alors une typologie de réseaux, qu'il serait intéressant de confronter aux types dans lesquels nous aurions pu *a priori* classer chacun de ces réseaux, en se basant sur l'observation de leur morphologie. En outre, il serait intéressant d'explorer la relation entre les types construits à partir des descripteurs morphologiques, et les descripteurs d'accessibilité. On pourra alors observer si des réseaux de même type prennent des valeurs proches (en termes de descripteurs d'accessibilité), et donc s'ils ont potentiellement des conditions d'accessibilité proches.

²⁴⁶ Cette base de données, accessible gratuitement, contient les graphes viaires de 80 aires urbaines réparties à travers le monde.

Enfin, nous nous sommes intéressé dans ce travail à la composante *transports* de l'accessibilité (cf chapitre 2), c'est-à-dire celle relative à l'efficacité de l'infrastructure de transport, dans notre cas le réseau viaire. Il serait intéressant dans de futurs travaux de s'intéresser à d'autres composantes de l'accessibilité, notamment la composante spatiale. L'étude de la composante spatiale de l'accessibilité consiste à explorer l'accessibilité offerte aux usagers, en intégrant des éléments spatiaux susceptibles d'agir sur cette accessibilité, tels que la localisation spatiale des activités (résidences, emplois, ...), ou la densité d'occupation du sol. **Cette composante fait partie du domaine d'intérêt des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, au même titre que la composante transports.** En effet, ces théoriciens et praticiens font notamment des préconisations sur la manière de répartir les activités dans une ville, et sur la densité bâtie. Ainsi, une future piste serait d'explorer les effets de ces préconisations, comme nous l'avons fait pour les préconisations relatives à la conception des réseaux viaires.

Annexe A : Les études de la mobilité urbaine, par qui et comment ?

Dans son acception la plus générale, la mobilité désigne « un changement de lieu accompli par une ou des personnes »²⁴⁷. Dans cette annexe, nous présentons comment se sont constituées au fil du temps les théories et les méthodes qui ont donné naissance à l'étude de la mobilité urbaine. Nous nous focalisons en particulier sur la mobilité qui a lieu à l'intérieur de l'espace urbain, et en empruntant le réseau viaire – ce qui nous fait exclure le transport ferré et fluvial. Par ailleurs, nous excluons la littérature sur les modes de transport collectifs, même lorsque ceux-ci se font via le réseau viaire (bus, tramway, ...), car ils portent des enjeux très spécifiques que nous n'abordons pas dans le cadre de notre travail. Nous renvoyons le lecteur intéressé par ces modes de transport aux travaux sur la planification des transports publics urbains. Dans notre cas, nous nous focalisons uniquement sur les déplacements à pied et en véhicule individuel (par exemple en automobile, à vélo ou en motocyclette). Toutefois, certains travaux mentionnés, notamment en socio-économie des transports, traitent à la fois du transport individuel et collectif.

I. Début des études de la mobilité urbaine en Europe et aux Etats-Unis

Le terme « mobilité » n'est employé que depuis la deuxième moitié du XXe siècle. Avant cela, on retrouve dans les travaux existants les termes de *circulation*, ou *mouvement*. Nous nous intéressons dans cette première section à l'émergence, aux Etats-Unis et en Europe, d'un champ d'étude qui deviendra celui de la mobilité.

I.1. Jusqu'au début du XXe siècle

Dès le XVIIIe siècle, une attention particulière est portée en France à la classification des routes en classes et aux statistiques sur le nombre de véhicules en circulation (Alonzo, 2018). Pourtant, Antoine Haumont (1993) soutient que nous en savons très peu sur la circulation intra-urbaine dans la ville préindustrielle européenne. Le même constat est dressé pour ce qui est de la ville industrielle du début du XIXe siècle, période durant laquelle la circulation hors marche à pied connaît pourtant un essor fulgurant. Sabine Barles (2000) explique ainsi qu'à Paris, cet essor et ses conséquences ne laissent indifférents « ni les citoyens, ni la préfecture de la Seine – chargée notamment de l'aménagement de la voie publique –, ni la préfecture de Police – qui gère la circulation ». Pourtant, l'auteure ajoute que l'évaluation des mouvements de véhicules reste très embryonnaire : tous les véhicules ne sont pas

²⁴⁷ Entrée (« Mobilité » s. d.) sur le site de Géoconfluences.

soumis à enregistrement et même lorsqu'ils le sont, cela n'est pas systématiquement fait. Il en va de même de « l'évaluation du nombre de chevaux et autres équidés, dont le recensement n'a été rendu obligatoire que dans les années 1870 ». Barles évoque néanmoins quelques sources qui lui permettent d'estimer le nombre de véhicules en circulation dans la première moitié du XIXe siècle : les *Recherches statistiques sur la ville de Paris et le département de la Seine*, vol. 1, Paris, 1821 ; le livre de A. Husson, *Les consommations de Paris*, 1ère éd., Paris, 1856 ; celui de A. Martin, *Étude historique et statistique sur les moyens de transport dans Paris avec plans, diagrammes et cartogrammes*, Paris, 1894 ; et enfin les *Comptes d'administration des dépenses de la Préfecture de Police pour l'exercice de l'année...*, Paris, 1819, 1853.

La situation est différente à l'aube du XXe siècle. Hadrien Commenges (2013) dresse un bref inventaire des « professionnels » qui s'intéressent à la circulation à cette période :

« Des ingénieurs formés à la conception, à la construction et à l'entretien des infrastructures (...) des statisticiens, des démographes, des géographes et des sociologues qui s'intéressaient aux migrations résidentielles et aux migrations alternantes (...) des services de police chargés de la régulation de la circulation (...) des architectes qui se faisaient une opinion de la circulation et de la fonction qu'elle devrait occuper au sein de la ville ».

Malgré cette apparente variété, Commenges ajoute qu'en ce début du XXe siècle, il n'existait **ni théorie, ni méthode, ni matériau empirique pour la constitution d'une connaissance sur la circulation**. Les rares données existantes servaient des objectifs très spécifiques qui avaient peu de rapport avec la constitution d'un tel domaine de connaissance et d'action.

I.2. L'ingénierie du trafic automobile, un sujet d'étude dès 1920 aux États-Unis

Selon Commenges (2013), dès les années 1920, dans un contexte étasunien marqué par le début de l'essor de l'automobile, les ingénieurs et les économistes du transport commencent à s'intéresser à la mobilité²⁴⁸ envisagée comme **mouvement effectif dans l'espace**. Ils donnent alors naissance à un domaine de compétences appelé l'ingénierie du trafic automobile, qui devient, sous l'impulsion d'ingénieurs tels que l'américain Miller McClintock, un objet de recherche en soi. Plus globalement, à partir des travaux de McClintock, « la circulation devient objet d'étude (...) un corps de connaissance se constitue progressivement sur ce thème, en particulier dans les années 1940 et 1950 » (Commenges 2013).

²⁴⁸ Bien que le terme « mobilité » ne sera employé qu'à partir de la fin des années 1970.

Apparue aux États-Unis, l'ingénierie du trafic se diffuse ensuite rapidement dans les pays d'Europe occidentale : « dès la fin des années 1950, en France, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, des spécialistes d'un nouveau genre apparaissent : spécialistes de la circulation chargés d'examiner, de proposer, d'évaluer les projets d'infrastructures et de services de transport » (Commenges 2013). L'ingénierie du trafic sera par la suite remplacée par *l'économie des transports*, puis par *la socio-économie des transports*.

1.3. Une prise de conscience « à reculons » en France ?

Plusieurs auteurs affirment que, comparé aux États-Unis, la question de la mobilité mettra un certain temps à devenir un enjeu important en France. Haumont (1993) explique : « la représentation de la ville traditionnelle est (...) si présente dans la culture française que la majorité des urbanistes et administrateurs de l'après-guerre vont entrer, si l'on peut dire, à reculons dans **l'ère de la mobilité généralisée** ». Haumont ajoute qu'« il faut attendre assez longtemps pour que l'on se préoccupe sérieusement de la mobilité. Les premières enquêtes approfondies sur la mobilité quotidienne ne datent que des années 1950 et ne portent que sur les déplacements de travail, peut-être à juste titre, mais avec l'ambition évidente de les réduire ». Ainsi, à l'époque, « presque tout se passe comme si l'horizon était celui de la société sédentaire. Chacun est bien dans son quartier : le bon niveau de la mobilité est proche de zéro » (Haumont 1993). Selon Haumont, cela est dû à la superposition de deux représentations, qui finissent par se confondre : le mythe historique du quartier, et le mythe moderne de la rationalité économique du peuplement dense.

Haumont ajoute néanmoins que l'évolution des années 1960 et de celles qui ont suivi ne va pas du tout s'inscrire dans cette image. L'administration française va alors devoir opérer divers coups de force pour réajuster ses objectifs, notamment en confiant dès 1958 le pilotage de l'urbanisme aux ingénieurs du Corps des Ponts et Chaussées, et en élaborant des Schémas directeurs dits stratégiques qui donnent une place importante à la voirie²⁴⁹ rapide. Ce retard en France comparé aux États-Unis peut aussi s'expliquer du fait que le développement du trafic automobile dans les villes européennes ne se fait qu'après 1960 (Haumont 1993), alors qu'il est présent dès les années 1920 aux États-Unis.

²⁴⁹ Le terme « voirie » signifie ici « catégorie de voies », en l'occurrence, les voies destinées aux déplacements à grande vitesse (autoroutes, rocadés, ...).

II. L'étude de la mobilité en socio-économie des transports : prédire la mobilité future et y répondre

Avec l'ingénierie du trafic automobile, qui deviendra la socio-économie des transports, un premier champ disciplinaire se constitue autour de l'étude de la mobilité. Nous présentons dans cette section quelques-uns de ses apports, en particulier sur le plan méthodologique.

II.1. Des développements méthodologiques conséquents

Selon Dupuy (1985), le développement de l'automobile a conduit à un gros effort d'investissement pour adapter le réseau de voies²⁵⁰ urbaines à la circulation. Parallèlement, il y a eu un grand effort méthodologique pour créer des modèles de prévision, de planification et de gestion du trafic automobile. Pour Commenges (2013), c'est là que se situe l'apport de l'ingénierie du trafic, puis de l'économie et de la socio-économie des transports. Ces disciplines ont forgé des critères et des méthodes pour « faire des **prévisions des flux futurs et pour évaluer la rentabilité des investissements en infrastructures et services de transport**²⁵¹ ».

Pour ce faire, une démarche **rationnelle et scientifique** a été développée (Lévy 1999). Cette démarche est fondée sur l'enquête et le diagnostic et permet de définir les caractéristiques de l'infrastructure en adéquation avec les futurs besoins en circulation. Selon Lévy, cette démarche vise à faire du réseau viaire une « machine circulatoire de communication efficiente, à partir de normes établies et d'une programmation dans le temps pour sa réalisation ». Lévy ajoute que ces principes et méthodes ont surtout concerné la gestion de la mobilité interurbaine (entre les villes), pour y « organiser et canaliser les flux, faire dévier le trafic croissant issu de l'extension de la ville avec les problèmes cruciaux de circulation qu'elle entraîne ». Néanmoins, nous verrons que l'étude des transports a aussi été fertile à échelle intra-urbaine.

II.2. La planification des transports

Selon Pierre Merlin et Françoise Choay (1996), la planification des transports désigne l'« établissement de programmes, spatiaux et économiques, déterminant la **demande**²⁵² prévisible à l'horizon temporel étudié, les **investissements** à réaliser pour la satisfaire, leur **échelonnement** dans le temps et leurs **conséquences** prévisibles, en particulier sur le développement urbain et la localisation des activités et des équipements ». Merlin et Choay ajoutent qu'« en raison des interactions

²⁵⁰ Rappelons que nous regroupons sous le terme « voie » l'ensemble des éléments linéaires de l'espace urbain sur lesquels se font les déplacements des individus à pieds ou en véhicule (hors transport ferré). Ainsi les voies regroupent les rues, ruelles, culs-de-sac, avenues, boulevards, allées, ou encore passages.

²⁵¹ Les surlignages sont faits par nous.

²⁵² De déplacement.

possibles et prévisibles, dans les deux sens, entre les réseaux de transport et l'occupation du sol, la planification des transports doit être menée en liaison étroite avec la planification spatiale ou territoriale (urbanisme ou aménagement du territoire selon l'échelle) ».

Ainsi, la planification des transports comprend à la fois la détermination de la **demande de déplacement prévisible**, mais aussi toutes les étapes qui mènent à la **mise en place de l'offre** adéquate pour y répondre. Cette manière de considérer les transports comme un système d'offre et de demande est fréquente en socio-économie des transports.

II.2.1. Modéliser la demande de déplacement prévisionnelle

Selon Abbas Zadeh et Mohammad Rajabi (2013), la « demande » de déplacement est généralement formée par l'activité humaine et influencée par des facteurs socio-économiques, des conditions démographiques, l'usage du sol, et d'autres facteurs. Durant les dernières décennies, **différentes théories ont été présentées pour modéliser cette demande de transport dans différents lieux du réseau**, et notamment localiser les origines et destinations des déplacements. C'est ainsi qu'apparurent les modèles de demande de transport (*Travel demand models*) (Zadeh et Rajabi 2013), ou plus simplement les modèles de transport (Merlin et Choay 1996). Ces modèles se développent à la fin des années 1950 comme outil de planification des autoroutes (Beimborn et Kennedy 1996). Ils ont ensuite été adaptés pour répondre à des problématiques urbaines.

Selon Merlin et Choay (1996), le modèle de transport est un système complet, plus ou moins simplifié par rapport à la réalité, et qui décrit **des comportements liés à la mobilité**. Selon Beimborn et Kennedy (1996), ces comportements représentent **la manière dont les usagers font des choix lors de leurs déplacements, choix portant sur comment, quand et où se déplacer. Ces choix dépendent de facteurs socio-économiques, des conditions démographiques, de l'usage du sol, et de bien d'autres facteurs.**

Pour modéliser les comportements de mobilité des usagers, l'approche « classique » mise au point aux États-Unis dans les années 1960 puis adoptée et adaptée en Europe à la même période, suppose des choix successifs de l'utilisateur. Ces choix se traduisent par autant de modèles dits séquentiels (Merlin et Choay 1996), regroupés sous l'expression « **modèle à quatre étapes** » (modèle de génération des déplacements, de distribution géographique des déplacements, de choix modal, et enfin modèle de choix d'itinéraire) (figure A.1).

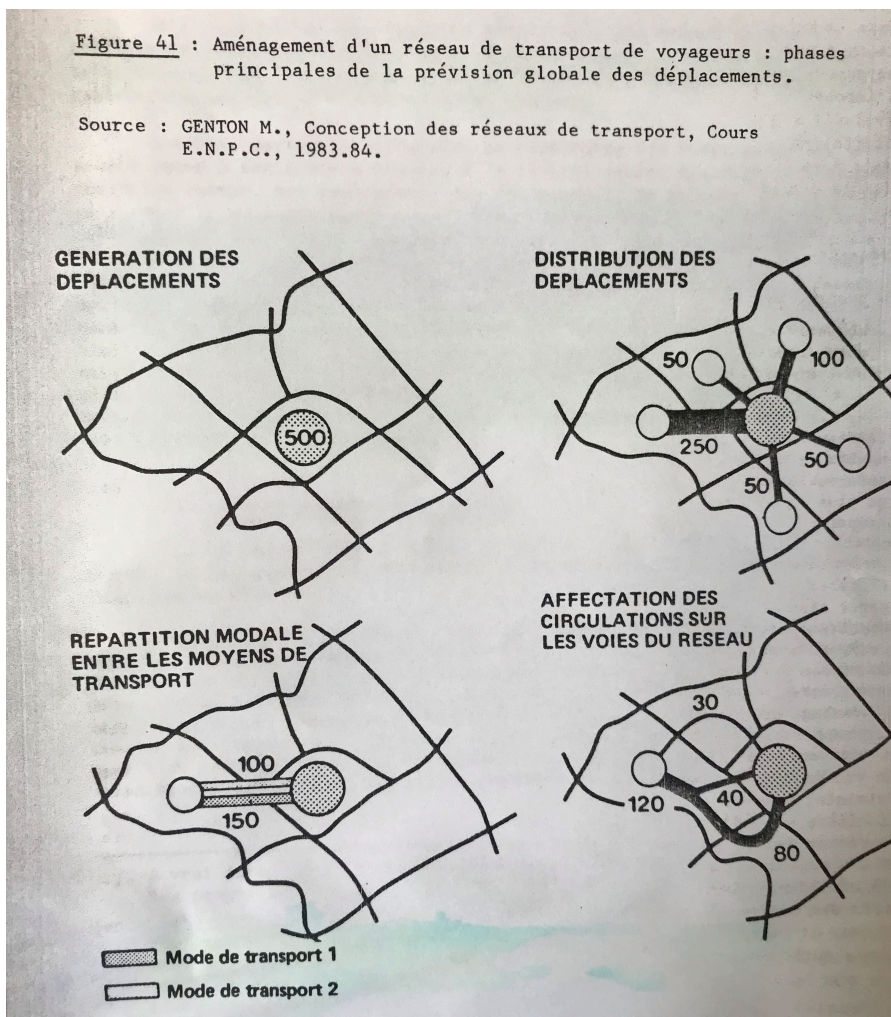


Figure A.1 : Schémas représentant les quatre modèles qui forment le « modèle à quatre étapes » : le modèle de génération permet d'évaluer le nombre de personnes amenées à se déplacer ; le modèle de distribution²⁵³ consiste à distribuer ces déplacements entre les différentes origines et destinations, souvent en fonction de leur taille et de la distance qui les sépare ; le modèle de répartition modale consiste à répartir les déplacements entre les moyens de transport, en tenant compte des gains (en temps par exemple) qu'engendre l'utilisation d'un mode plutôt qu'un autre ; enfin, le modèle d'affectation consiste à affecter les déplacements à des itinéraires, en tenant compte du gain que représente le choix d'un itinéraire plutôt qu'un autre. Source : Dupuy (1985).

²⁵³ Les modèles de distribution géographique des déplacements sont basés sur des modèles d'interaction spatiale. Ces derniers, dans leur acception la plus ancienne, visent à prédire les quantités (de biens, de personnes, d'informations, ...) échangées entre des entités géographiques (des pays, des villes, des quartiers, etc.) (Grasland s. d.) sur Hypergéog. Dans le cas d'un modèle de distribution géographique des déplacements, le but est de déterminer les flux entre chaque origine et chaque destination sous forme de matrice.

II.2.2. Les modèles de demande de déplacement de deuxième et troisième génération

Selon Merlin et Choay (1996), les modèles à quatre étapes tels qu'ils ont été décrits ci-dessus ont beaucoup été critiqués à la fin des années 1960 et au cours des années 1970. On les qualifiait d'outil « au service de l'automobile » - rappelons qu'ils ont initialement été conçus aux États-Unis pour planifier les autoroutes urbaines²⁵⁴. Les usagers des transports en commun étaient alors traités de manière résiduelle (Merlin 1985). De plus, selon Zadeh et Rajabi (2013), ces premiers modèles étaient surtout utilisés dans l'optique de prédire l'effet des investissements sur le développement d'infrastructures, développement qui, vers 1960, était conséquent, mais qui s'est par la suite beaucoup réduit. En outre, après deux décennies de transformations dans la gestion de la circulation, la nécessité d'améliorer les modèles à quatre étapes s'est faite sentir. Cela était notamment dû au développement des mesures de « gestion de la demande de déplacement » (*Transportation Demand Management*). Ces mesures visent à modifier la nature de la demande, en particulier le choix modal (en prévoyant des voies prioritaires pour les bus, en développant des programmes et logiciels de covoiturage, etc.). Les modèles de demande de transport devaient alors prévoir la réaction des usagers face à ces mesures. C'est ainsi qu'apparurent dans les années 1970 des modèles de seconde (*disaggregated trip-based demand models*) et de troisième génération (*activity-based travel demand models*). Ces modèles devaient davantage répondre aux besoins des politiques de planification qu'au besoin d'extension de l'infrastructure (Zadeh et Rajabi 2013).

II.2.3. Mise en place de l'offre de déplacement

Une fois la demande de déplacement prévisionnelle modélisée, la mise en place de l'offre de déplacement se fait par comparaison de la demande prévue à l'offre actuelle, par détermination des réseaux de transport optimaux, et par évaluation des gains liés à l'introduction d'infrastructures nouvelles (Merlin, Choay, 1996). Les ingénieurs de trafic procèdent également à une étude de la rentabilité des infrastructures nouvelles ainsi envisagées, à la préparation d'une décision de réalisation (ou non), et d'un échelonnement dans le temps des investissements.

Une dernière étape dans la mise en place de l'offre de déplacement consiste, selon Merlin et Choay, à étudier les « conséquences (impact) des infrastructures nouvelles envisagées sur le développement urbain, et la correction éventuelle, pour les mettre en harmonie, des prévisions de réseaux et (ou) des prévisions d'urbanisation ». Signalons enfin que la mise en œuvre effective de l'offre de déplacement se fait en concertation avec l'ensemble des partis prenants du projet (politiques, économiques).

²⁵⁴ Voir la thèse Commenges (2013), chapitre 8, pour plus de détails sur cette relation entre les premiers modèles de transport et la volonté de promouvoir l'automobile.

Conclusion

Comme le souligne Commenges (2013), l'apport principal de la socio-économie des transports a été de faire des prévisions des flux futurs et d'évaluer la rentabilité des investissements en infrastructures et services de transport. Les plus gros efforts méthodologiques ont été mis dans la prévision de la demande à horizon temporel donné, de manière de plus en plus précise.

III. L'étude de la mobilité en sciences humaines et sociales : connaître la mobilité actuelle et l'expliquer

Après avoir présenté les apports de la socio-économie des transports aux études sur la mobilité, nous présentons dans cette section l'apport d'un autre champ disciplinaire des études de la mobilité, à savoir les études menées en sciences humaines et sociales.

III.1. Introduction de la mobilité en sciences humaines et sociales

III.1.1. Le *Mobility turn*

Le phénomène d'automobilisation, et plus globalement celui de la mobilité, a d'abord été négligé par les sociologues du début du XXe siècle, notamment ceux de l'Ecole de Chicago, alors même que cette école a été fondée précisément au moment de l'essor de l'automobile aux Etats-Unis (vers 1915) (Commenges 2013). Ainsi, l'étude de la mobilité a longtemps été le seul fait des ingénieurs du trafic, dont certains avaient une vision de la mobilité comme simple mécanique des fluides, devant répondre à des questions sur les infrastructures et les services de transport.

Mais depuis la fin des années 1990, les études sur la mobilité connaissent des redéfinitions massives (Commenges 2013), à tel point que le sociologue britannique John Urry propose en 2000 de parler de *Mobility turn*. Le *Mobility turn* renvoie à l'importance que prennent les études sur la mobilité à cette époque en sciences sociales, et notamment en sociologie. Ces études conduisent à considérer l'individu non plus suivant une simple dichotomie entre sédentaire et nomade, mais comme un être en mouvement. La mobilité est alors conçue comme un phénomène social et spatial. Les formes de cette mobilité rendent compte de l'ensemble des rapports sociaux, elles sont le principe organisateur du monde social (Kaufmann 2012). Désormais, la mobilité n'est plus considérée sous un aspect technique, elle est de plus en plus étudiée à travers ses échelles, modes de vie, processus sociaux et

économiques (Viana Cerqueira 2018). Alonzo (2018) dresse un constat similaire. Pour lui, ces dernières décennies ont été marquées « par un intérêt croissant des historiens, géographes et sociologues pour les réseaux, les flux et les mobilités ». Les chercheurs en sciences sociales orientent leurs intérêts vers les problématiques de mobilité, que ce soit celles des sociétés anciennes ou récentes.

III.1.2. Le paradigme de la « ville en réseau »

Le Mobility turn s'est accompagné du succès, dans les années 1990 en économie urbaine, du paradigme de la « ville en réseau »²⁵⁵ – voir Pouyanne (2004) pour une revue de cette littérature. Selon ce paradigme, la ville est vue comme « le lieu de polarisation d'un ensemble de flux. La concentration urbaine trouve sa justification économique dans le fait qu'elle permet l'articulation et l'interface d'un certain nombre de réseaux d'entreprise, de transport, de communication et d'information, enfin de socialisation, d'affinités et de pouvoir » (Derycke (1999) *cité dans* Pouyanne (2004)). Le réseau de communication prend alors plus d'importance que les lieux qu'il relie. La notion de connexité, qui décrit la capacité d'un réseau à permettre la circulation, est alors considérée comme plus pertinente que la proximité spatiale pour décrire les relations entre les lieux de la ville (Berroir, Cattan et St-Julien, 1995).

III.1.3. Une mobilité illimitée

L'intérêt des sciences humaines et sociales pour l'étude de la mobilité a également été nourri par un débat sur le prétendu déclin des mobilités. En effet, dès les années 1980, certains auteurs prévoient un déclin de la mobilité, causé par l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Jean Mesqui et Pierre Skriabine (1984) par exemple affirmaient que, si la mobilité était autrefois essentielle pour la vie économique du pays, elle est désormais peu à peu remplacée par l'utilisation de nouvelles techniques, telles que les télécommunications ou l'informatique. Selon eux, la mobilité était alors appelée à devenir un phénomène de plus en plus lié aux loisirs. Cet avis n'était pas partagé par certains de leurs contemporains. Par exemple, l'historien Georges Duby 1980 (*cité dans* (Haumont 1993)) voyait au contraire dans les innovations techniques l'outil permettant une mobilité illimitée. Il explique « depuis trente ans, les innovations techniques viennent à bout des monopoles culturels que détenaient les villes, amenuisent les obstacles de la distance, (...) autorisent les agglomérations à se décontracter, à se répandre dans la ruralité qui les environne, (...) les résidences secondaires, les supermarchés, les campus universitaires (...) s'établissent au milieu des champs ».

Les évolutions qui ont suivi ont donné raison à Georges Duby. Ainsi, Haumont (1993) écrit au début des années 1990 que « l'idée est désormais acquise qu'il est

²⁵⁵ Expression utilisée par Guillaume Pouyanne (2004).

illusoire de prévoir des limites supérieures à la mobilité intra-urbaine, quotidienne et résidentielle, et que les problèmes sont ceux de l'organisation de territoire et des transports dans des sociétés où les déplacements seront importants ». Il ajoute qu'on distingue mal ce qui peut désormais limiter la mobilité quotidienne.

III.2. L'étude de la mobilité quotidienne

En sciences humaines et sociales, les mobilités sont souvent appréhendées dans le cadre des déplacements domicile-travail et d'une temporalité du quotidien. On parle alors de « mobilité quotidienne ». La mobilité quotidienne est définie par Segaud, Brun, et Driant (2001, cités dans Bonerandi (2004)) comme « l'ensemble des pratiques de déplacements d'une population dans son cadre habituel ». Commenges (2013) la définit de son côté comme « la variabilité temporelle de la présence spatiale, dont les épisodes d'immobilité font partie au même titre que les épisodes de mobilité ».

III.2.1. Expliquer la mobilité quotidienne

L'étude de la mobilité quotidienne est une étude des déplacements effectivement réalisés par les usagers, elle renseigne sur l'accès des personnes aux activités (Viana Cerqueira 2018). Ainsi, contrairement à la socio-économie des transports – avec le modèle à quatre étapes, les sciences humaines et sociales s'intéressent davantage à la description et à l'explication des comportements de mobilité actuels qu'à la prédiction de la demande future (donc des comportements de mobilité futurs). Ces comportements actuels sont étudiés grâce à diverses variables telles que le nombre de déplacements des usagers, leur choix modal, leur choix d'itinéraire, la distance qu'ils sont prêts à parcourir, ou encore la durée de leurs trajets. Ces variables sont souvent obtenues grâce à des données empiriques²⁵⁶, et leurs facteurs explicatifs sont recherchés. Ces facteurs peuvent être les caractéristiques des usagers (âge, sexe, profession, condition physique, ...) et, le cas échéant, de leur véhicule (type de véhicule notamment). Ces facteurs peuvent aussi être les caractéristiques de l'environnement dans lequel les usagers se déplacent (localisation des activités, forme urbaine²⁵⁷, heure de la journée, conditions météorologiques, vitesse de circulation autorisée, et bien d'autres aspects). L'étude des mobilités quotidiennes a ainsi recours à des analyses statistiques multivariées pour rechercher les liens entre ces différents facteurs et les comportements de mobilité observés²⁵⁸. À titre d'exemple, Pouyane (2005) s'est notamment intéressé aux facteurs expliquant les distances parcourues en automobile, Ewing (1996) aux facteurs pouvant expliquer

²⁵⁶ Elles sont aussi parfois modélisées. C'est le cas pour les distances moyennes parcourues (*vehicle miles traveled*), voir Kumapley et Fricker (1996) pour un état de l'art. C'est également le cas pour les temps de trajet, voir Cohen, Bomier et Schwab (2002) pour un état de l'art.

²⁵⁷ Forme physique des éléments qui constituent la ville (voies, bâtiments, îlots, places, etc.).

²⁵⁸ Voir Ewing et Cervero (2001) pour une revue des travaux des années 1990.

la part modale²⁵⁹, et Moudon, Hess, Snyder et Stanilov (1997) à ceux pouvant expliquer l'usage de la marche à pied comme choix modal. Selon Aditjandra (2013), plusieurs de ces travaux mettent en exergue le fait que chacun des comportements de mobilité est affecté par une multitude de facteurs.

Conclusion

Contrairement à la socio-économie des transports qui s'est concentrée sur la prédiction des comportements de mobilité futurs des usagers (la demande de déplacement prévisionnelle), les sciences humaines et sociales à travers l'étude de la mobilité quotidienne se sont intéressées à l'explication de leurs comportements de mobilité actuels, effectifs.

²⁵⁹ C'est-à-dire la part prise par les différents modes de transports dans la mobilité.

Annexe B : Analyser un réseau viaire avec le plugin *Spatial Design Network Analysis* (sDNA)

I. Présentation du plugin

Le plugin Spatial Design Network Analysis, ou sDNA, a été développé par Alain Chiaradia, Crispin Cooper et Chris Webster, à l'Université de Cardiff et l'Université de Hong Kong²⁶⁰. L'objectif affiché par cette équipe était d'unifier l'utilisation de l'analyse des réseaux spatiaux entre le domaine de la conception (*design*) et le domaine de la recherche. Le champ d'intérêt était pour Chiaradia, Cooper et Webster les réseaux urbains (réseaux viaires, réseaux de transport, ...), mais ils expliquent que leur outil est pertinent pour l'analyse de tous les réseaux spatiaux. Ils définissent ces derniers comme des réseaux contenant des informations spatiales, c'est-à-dire des réseaux dans lesquels les éléments ponctuels ont des positions dans l'espace, et les liens ont un tracé (des dimensions et une géométrie). Cet objectif de concevoir un outil adapté à la fois à la conception (urbaine, *urban design*) qu'à la recherche explique le soin apporté au développement de sDNA sous différents supports (Autocad, Qgis, Python, ...).

Ce plugin prend en charge les données filaires. Celles-ci sont la seule information dont le plugin a besoin pour analyser un réseau viaire. Il construit à partir des lignes du filaire un graphe géométrique primaire, dont les arêtes sont les tronçons situés entre deux intersections, et les sommets sont les intersections du réseau, ou les extrémités de tronçons. Mais l'analyse ne se fait pas sur ce graphe primaire. sDNA construit alors le graphe dual correspondant, et les indicateurs de la théorie des graphes sont calculées sur graphe dual. C'est ainsi que l'on obtient par exemple l'éloignement métrique des tronçons de voies, leur centralité d'intermédiarité, etc. Ainsi, l'un des avantages de sDNA est qu'il permet de travailler sur graphe dual, ce qui n'est pas le cas de plusieurs autres outils.

Un autre avantage de sDNA est qu'il permet de choisir le type de plus court chemin à prendre en compte lors du calcul des descripteurs. Enfin, sDNA permet de réaliser l'essentiel des étapes nécessaires à l'analyse d'un réseau viaire : la correction topologique et géométrique des données filaires (éventuellement en complément d'autres outils), la conversion de ces données en graphe viaire, puis le calcul d'une large variété de descripteurs issus de la théorie des graphes.

²⁶⁰ Cooper, C., Chiaradia, A., Webster, C. (2016) Spatial Design Network Analysis software, version 3.4, Cardiff University, <http://www.cardiff.ac.uk/sdna/>.

I.1. Parenthèse sur les plus courts chemins topologiques

Signalons que sDNA ne propose pas directement de construire les plus courts chemins topologiques, c'est-à-dire les chemins qui minimisent le nombre de tronçons à traverser. En revanche, il permet de customiser les plus courts chemins, afin de générer des chemins qui minimisent une certaine variable définie par l'utilisateur. Par exemple, si on choisit une variable correspondant au temps de parcours sur chaque tronçon, sDNA générera les chemins qui minimisent ce temps de parcours. Nous utilisons cette métrique customisée pour générer les plus courts chemins topologiques. En affectant la valeur 1 à chaque tronçon du réseau, l'algorithme des plus courts chemins générera les chemins qui minimisent cette variable, donc qui minimisent le nombre de tronçons à parcourir. Ceci correspondra aux plus courts chemins topologiques. Rappelons que le calcul de la centralité d'intermédiarité sera basé sur les plus courts chemins topologiques.

II. Nettoyage des données filaires

Pour utiliser sDNA, la première étape consiste à vérifier que les données filaires du réseau viaire étudié sont correctement représentées, autrement dit qu'il n'existe pas d'erreurs de dessin. Ces erreurs peuvent être d'ordre **topologique**, survenant par exemple lorsque deux tronçons supposés être reliés dans la réalité ne le sont pas sur le graphe (cf figure B.1). En effet, en cas d'intersections, les extrémités de tronçon doivent coïncider, autrement la connectivité ne sera pas assurée, et sDNA considérera que les deux tronçons ne sont pas reliés. Pour éviter cela, il convient de corriger en amont la topologie du réseau (cf figure B.2), ce qui peut facilement se faire grâce aux outils de nettoyage de vecteurs sur un système d'informations géographiques (SIG). Il existe bien entendu des cas où deux tronçons qui s'entrecoupent sur plan ne sont pas reliés en réalité. C'est le cas des ponts et des tunnels. Néanmoins, ces cas de figure vont à l'encontre de la planarité du graphe, qui veut que les arêtes ne s'entrecoupent que s'il y a intersection dans le réseau réel. Comme nous avons choisi de considérer les graphes viaires comme des graphes planaires, nous choisissons de négliger le cas des ponts et des tunnels, dont la proportion dans le réseau est très faible.

Les erreurs de dessin dans les filaires peuvent également être d'ordre **géométrique**. Il peut s'agir de tronçons représentés en doublon, ou de changements de direction qui n'existent pas en réalité (cf figure B.3). Ces changements de directions faussent en particulier le calcul du descripteur d'éloignement angulaire.

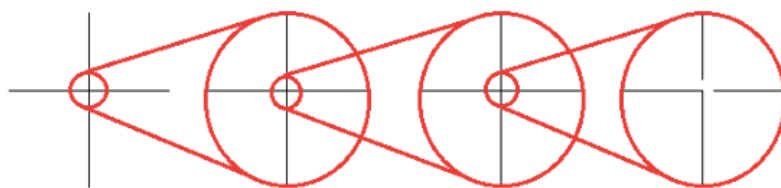


Figure B.1 : Erreur topologique : absence de raccordement entre les tronçons. Source : (Cooper, 2016).

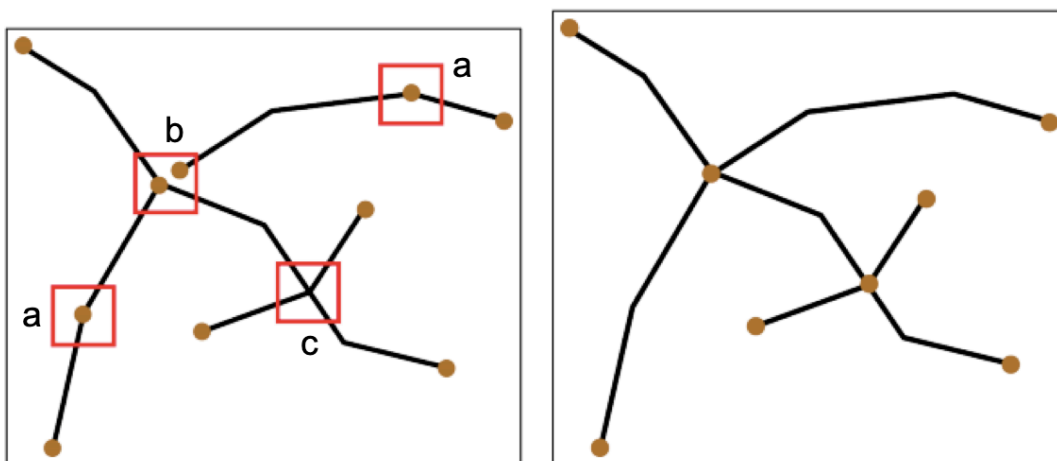


Figure B.2 : Correction de la topologie d'un graphe viaire primaire : (a) suppression des sommets de degré 2 ; (b) raccordement des sommets correspondant à la même intersection ; (c) création d'un sommet à chaque intersection. Source : d'après (Costes, 2016).

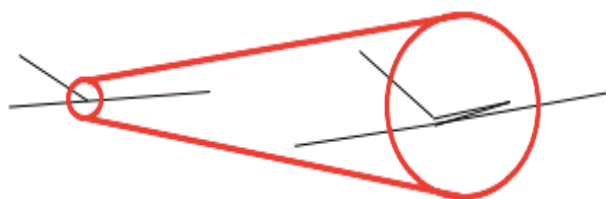


Figure B.3 : Erreur géométrique : changement de direction dû à une erreur de dessin. Source : (Cooper, 2016).

Une autre vérification indispensable avant toute analyse : la longueur des tronçons, et plus globalement les **dimensions**, au sens métrique, dans le graphe viaire. Celles-ci doivent être les mêmes que dans le réseau viaire réel. Pour que ce soit le cas, il faut que le réseau ait été représenté sur SIG suivant un système de références spatiales de type « projeté » (et non pas « géographique ») (Cooper, 2016). Ce système simplifie la représentation de petites parties du globe terrestre en les

considérant comme plates. Chaque pays dispose généralement de son propre système de coordonnées projetées, basée sur des coordonnées en x et y.

Ainsi, une étape indispensable dans l'utilisation de sDNA est la vérification du type de système de référence spatiale. Si celui-ci est un système géographique, il faudra re-projeter les données en fonction de l'endroit où l'on se trouve sur terre. S'il s'agit déjà d'un système projeté, il faudra savoir lequel. Lorsque les données contenant le réseau viaire ont été construites sur SIG, cette information est présente dans les métadonnées.

Une fois le système de projection identifié, il faut vérifier que sDNA renverra bien les bonnes mesures métriques lors de l'analyse. Pour cela, on calcule la longueur de quelques tronçons dans la réalité (sur Google map par exemple) et on les compare avec les longueurs affichées grâce à la fonction *Individual line measures* de sDNA. Si les deux sont identiques, le réseau a été correctement représenté. A noter que certains systèmes de projection (ceux des Etats-Unis notamment) renverront parfois des longueurs en pieds plutôt qu'en mètres. Il faudra alors prendre cela en compte lors de l'interprétation de ces longueurs.

III. Les descripteurs calculés avec sDNA

sDNA permet de calculer les descripteurs d'accessibilité présentés en chapitre 4, soit à échelle locale, soit à échelle globale. A échelle locale, sDNA considère uniquement les plus courts chemins entre un tronçon et son voisinage. Ce voisinage peut être défini selon différents types de seuils (en termes de distance métrique, topologique, ou autre). Cela permet une description des caractéristiques des plus courts chemins à échelle locale. A échelle globale, sDNA considère les plus courts chemins entre un tronçon et tout le reste du réseau. On obtient alors une description des caractéristiques des plus courts chemins à l'échelle du réseau dans son ensemble. Nous choisissons cette **analyse à échelle globale**.

Nous présentons ci-dessous le mode de calcul des descripteurs d'accessibilité car celui-ci présente des spécificités dans sDNA. Le calcul des descripteurs morphologiques en revanche correspond à celui décrit en chapitre 4.

III.1. Abréviations

La présentation du mode de calcul des descripteurs d'accessibilité ci-dessous reposera sur le manuel d'utilisation de sDNA (Cooper, 2016). Notons ci-dessous quelques abréviations utilisées dans ce manuel.

- N désigne l'ensemble des tronçons du réseau.
- L'ensemble des tronçons situés à l'intérieur du voisinage du tronçon x est noté R_x . Dans notre cas nous choisissons une analyse globale, donc $R_x = N$.

- La proportion d'un tronçon y située à l'intérieur d'un voisinage donné est notée $P(y)$. Si on considère que l'espace est discret, $P(y)$ vaut soit 0 soit 1 : si y est situé dans le voisinage de x , $P(y)$ vaut 1, si y n'est pas dans le voisinage de x , $P(y)$ vaut 0. Lorsque l'espace est continu $0 \leq P(y) \leq 1$. Dans le cas d'une analyse globale comme la nôtre, $P(y)$ est égale à 1.
- La longueur du plus court chemin (quelque soit son type) entre un tronçon « origine » x et un tronçon « destination » y est notée $d_M(x,y)$.
- Le poids d'un tronçon y est noté $W(y)$. Celui-ci dépend de la pondération choisie pour les tronçons (on peut par exemple leur assigner un poids en fonction de leur largeur). Dans notre cas, tous les tronçons ont un poids de 1.

III.2. Les descripteurs d'éloignement

sDNA ne calcule pas la centralité de proximité, mais plutôt l'éloignement (*farness*), qui est l'inverse de cette centralité. (Cooper, 2016) justifie ce choix par le fait que la centralité de proximité a une distribution exponentielle, statistiquement difficile à étudier, ce qui n'est pas le cas de l'éloignement.

L'éloignement métrique d'un tronçon est noté MED, pour *Mean Euclidean Distance*. Il s'agit de la longueur moyenne des plus courts chemins métriques entre ce tronçon et tous les autres. Cette mesure est pondérée par le poids des destinations (cf formule).

$$\mathbf{Farness}(x) = \frac{\sum_{y \in R_x} d_M(x, y) W(y) P(y)}{\sum_{y \in R_x} W(y) P(y)}$$

Ainsi, pour obtenir l'éloignement moyen d'un tronçon x , sDNA commence par mesurer la longueur du plus court chemin entre ce tronçon (origine) et tous les autres tronçons « destination », notés y . Chacune de ces longueurs, notée $d_M(x,y)$ est multipliée par le poids du tronçon « destination » ($W(y)$), donc par 1 dans notre cas. $d_M(x,y)$ est également multiplié par $P(y)$, la proportion du tronçon destination située à l'intérieur du voisinage du tronçon origine. $P(y)$ vaut 1 dans le cas d'une analyse globale comme la nôtre.

Ces longueurs sont ensuite additionnées et divisées par la somme des produits de $W(y)$ par $P(y)$. On obtient ainsi l'éloignement métrique du tronçon x , notée $MED(x)$. La même opération est répétée pour tous les tronçons du réseau.

A noter que dans le cas d'une analyse à échelle globale comme la nôtre, et avec $W(y) = 1$, la formule ci-dessus correspond simplement à la somme des longueurs des plus courts chemins entre un tronçon x et tous les autres, divisée par la somme des tronçons, autrement dit par N . Plus simplement, il s'agit de la moyenne des longueurs des plus courts chemins entre ce tronçon et tous les autres.

La même formule est utilisée dans le cas de **l'éloignement angulaire**, noté $MAD(x)$, pour *Mean Angular Distance*. Dans ce cas, $d_M(x,y)$ désignera la distance angulaire entre les tronçons x et y , autrement dit la somme des angles le long du plus court chemin entre x et y . Cette mesure est en degrés.

La formule ci-dessus nous permet de comprendre que l'unité de mesure de l'éloignement sera celle de d_M . Ainsi, sDNA nous donnera l'éloignement métrique en mètres, kilomètres, pieds, en degrés, ou toute autre unité de d_M . De ce fait, en calculant l'éloignement d'un tronçon, on a directement une idée du nombre de mètres, de kilomètres, de degrés, ou autre à parcourir en moyenne pour atteindre les autres tronçons du réseau.

III.3. L'indice de détour

L'**indice de détour** d'un tronçon est noté Div pour *Diversion ratio*. Pour évaluer l'indice de détour d'un tronçon x , sDNA calcule le rapport entre longueur du plus court chemin et distance à vol d'oiseau, entre ce tronçon x (considéré comme origine) et chacun des tronçons y (destinations). Il calcule ensuite la moyenne de l'ensemble de ces rapports. La formule est la suivante :

$$\mathbf{Div}(x) = \frac{\sum_{y \in R_x} \frac{d_M(x,y)}{CFD(x,y)} W(y)P(y)}{\sum_{y \in R_x} W(y)P(y)}$$

III.4. La centralité d'intermédierité

La centralité d'intermédierité d'un tronçon correspond **au nombre de plus courts chemins** (quelque soit son type) qui passe par un tronçon, autrement dit au nombre de fois qu'un tronçon est sur le plus court chemin entre des paires de tronçons. Sur sDNA, la formule de la centralité d'intermédierité (*Betweenness*) est la suivante :

$$\mathbf{Betweenness}(x) = \sum_{y \in N} \sum_{z \in R_y} W(y)W(z)P(z)OD(y,z,x)$$

Cette fois-ci, y désigne le tronçon d'origine, z désigne le tronçon de destination, et x est le tronçon dont on recherche la centralité d'intermédierité.

Cette formule signifie que l'on calcule le nombre de plus courts chemins passant par x entre chaque tronçon y (appartenant à N), et chaque tronçon z situé dans le voisinage de y (R_y). Chacun de ces plus courts chemins est désigné par $OD(y,z,x)$, tel que :

- Si le tronçon x est bien sur le plus court chemin reliant y à z , $OD(y,z,x) = 1$.
- Si le tronçon x est lui-même le tronçon d'origine ou de destination²⁶¹, $OD(y,z,x) = 1/2$.
- Si $x = y = z$, autrement dit pour le plus court chemin entre un tronçon et lui-même, $OD(y,z,x) = 1/3$.
- Dans les autres cas, c'est-à-dire lorsque x ne se situe pas sur le plus court chemin reliant y à z , $OD(y,z,x) = 0$.

Une fois $OD(y,z,x)$ calculé, il est multiplié par le poids du tronçon d'origine y , du tronçon destination z , et par la proportion $P(z)$ du tronçon destination situé dans le voisinage de y (en cas d'analyse locale). De fait, la centralité d'intermédiarité telle que calculée par sDNA est proportionnelle au produit du poids de l'origine par celui de la destination, donc au poids *au carré*. Selon (Cooper, 2016), cela diffère de l'unité habituelle de la centralité d'intermédiarité, les valeurs obtenues sont très élevées. Pour retrouver un ordre de grandeur habituel, les auteurs recommandent l'utilisation de la « centralité d'intermédiarité calculée en deux phases » (*Two phase betweenness*) notée TPBt. Au lieu d'être pondérée par le produit du poids du tronçon d'origine et de destination, on considère que le tronçon d'origine (y) distribue son poids (1 dans notre cas) sur l'ensemble des destinations situées dans son voisinage. De ce fait, chaque tronçon « destination » reçoit une part du poids du tronçon « origine ». La formule est la suivante :

$$TPBt(x) = \sum_{y \in N} \sum_{z \in R_y} OD(y, z, x) \frac{W(z)P(z)}{\text{total weight}(y)}$$

Nous choisissons d'opter pour ce type de centralité d'intermédiarité. A noter que lorsqu'il existe plusieurs chemins équitablement « courts » entre une origine et une destination, sDNA considère uniquement le premier chemin détecté par l'algorithme de construction des plus courts chemins. D'autres outils procèdent différemment, ils distribuent la centralité d'intermédiarité équitablement entre les différents chemins équitablement courts. Une des conséquences de l'approche de sDNA est que si on analyse par exemple une grille parfaitement symétrique, la centralité d'intermédiarité, elle, ne sera pas symétrique. Les chemins détectés en premier par l'algorithme des plus courts chemins ressortiront comme ayant une centralité d'intermédiarité plus élevée.

²⁶¹ Cela permet de rendre compte de la participation d'un tronçon à sa propre fréquentation, du fait qu'il est une origine et une destination.

Annexe C : Graphiques des descripteurs morphologiques et des descripteurs d'accessibilité résumés par leur moyenne, pour les deux corpus

I. Graphiques des descripteurs morphologiques

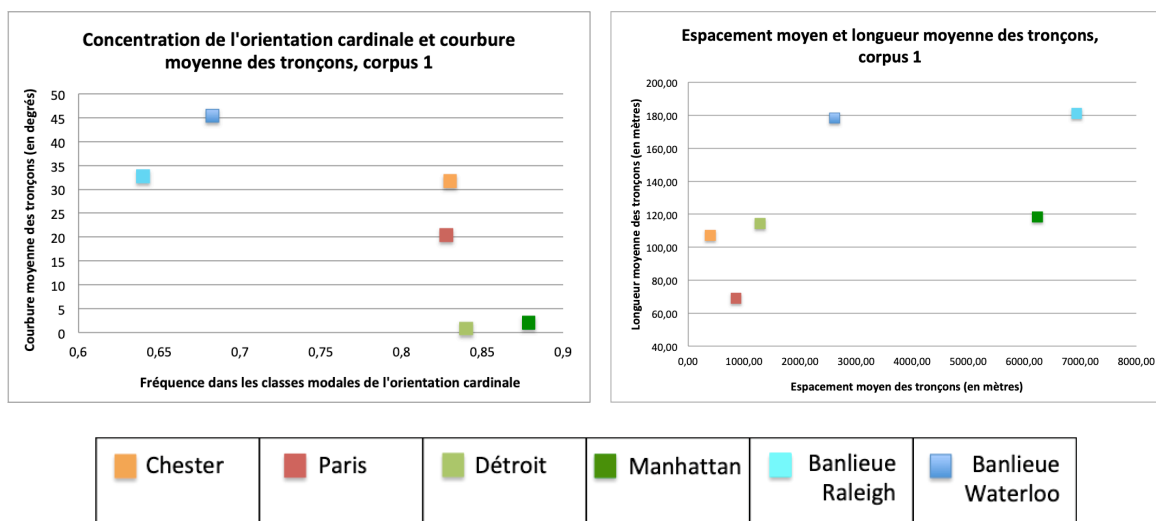
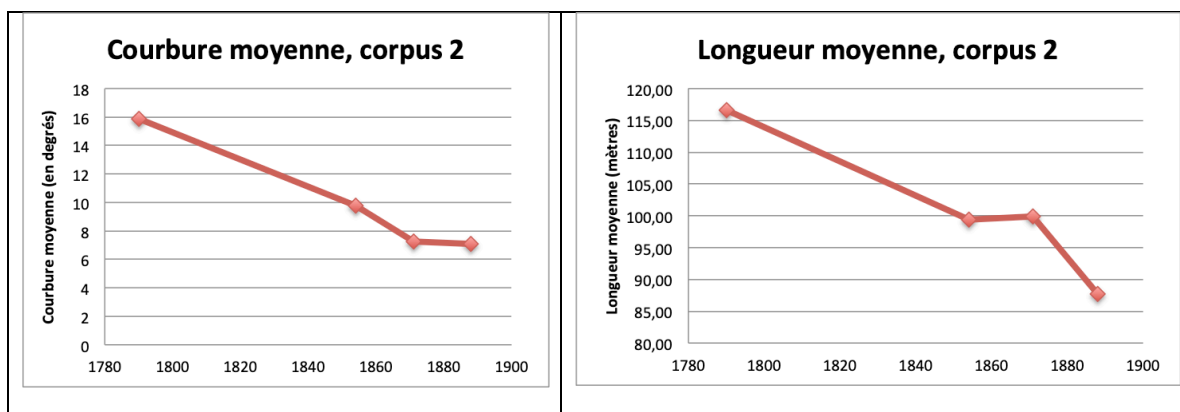


Figure C.1 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de référence des descripteurs morphologiques. Gauche : concentration de l'orientation et courbure moyenne des tronçons. Droite : espacement moyen et longueur moyenne des tronçons. Chaque point coloré correspond à un réseau viaire du corpus 1.



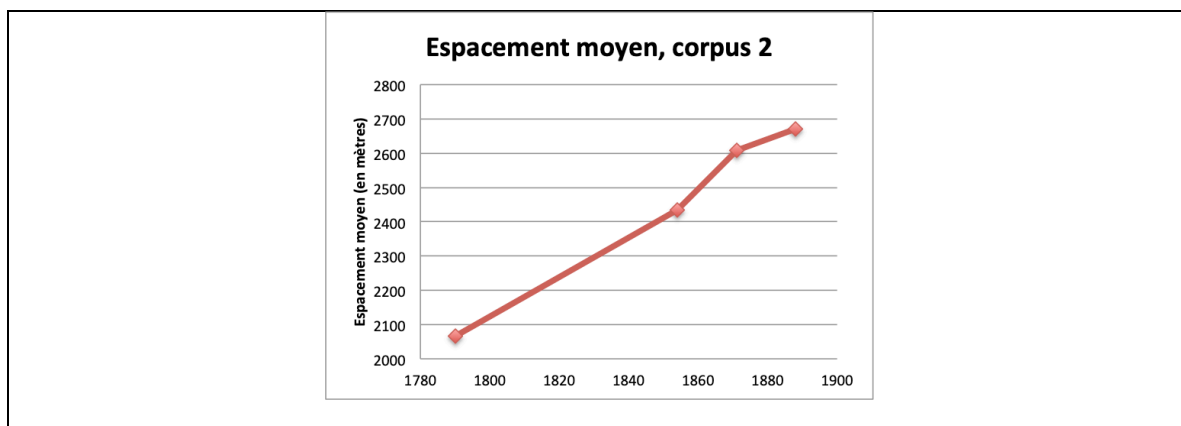


Figure C.2 : Graphiques représentant l'évolution de la courbure moyenne des tronçons, de leur longueur moyenne et de leur espacement moyen, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.

II. Graphiques des descripteurs d'accessibilité

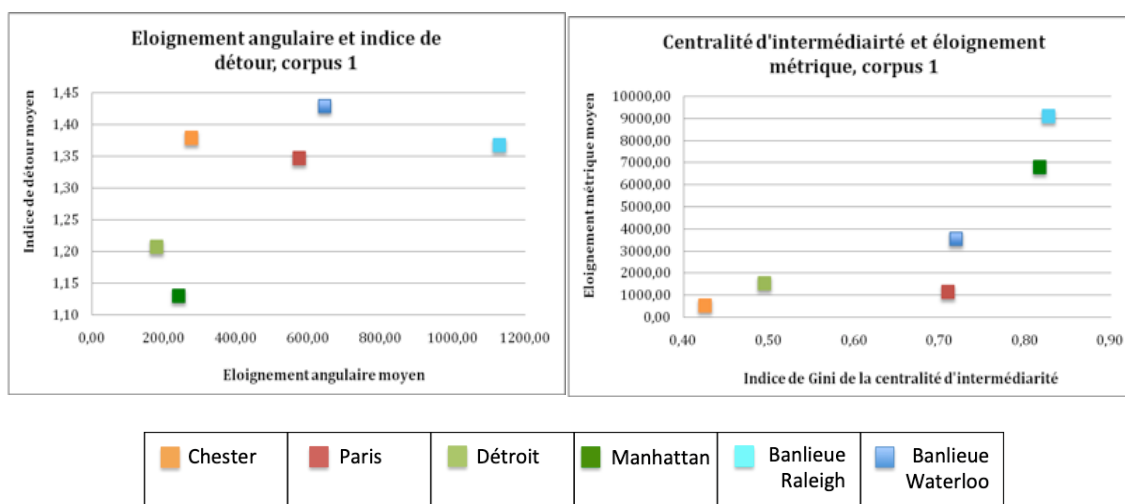


Figure C.3 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de référence des descripteurs d'accessibilité. Gauche : éloignement angulaire moyen et indice de détour moyen. Droite : indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et éloignement métrique moyen. Chaque point coloré correspond à un réseau du corpus 1.

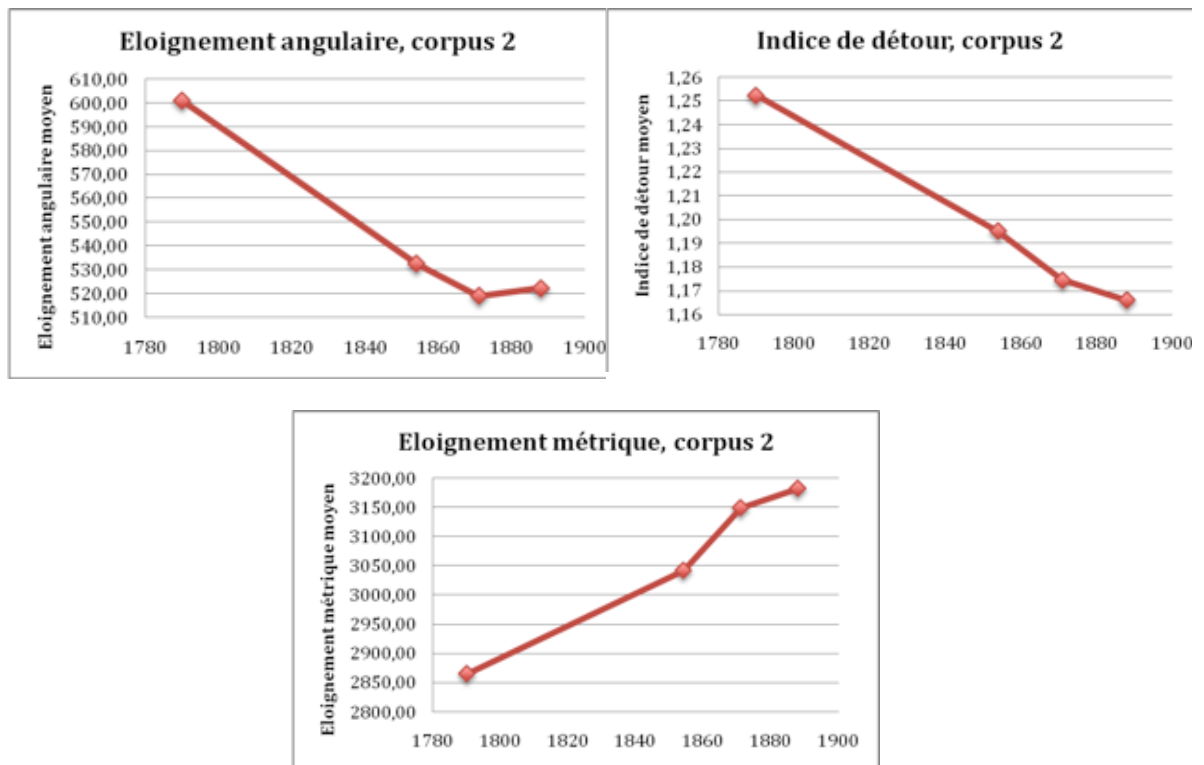


Figure C.4 : Graphiques représentant l'évolution de l'éloignement angulaire moyen, de l'indice de détour moyen, et de l'éloignement métrique moyen, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.

Annexe D : Etat de l'art sur les relations entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité

Nous avons choisi dans le chapitre 8 d'explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité, en testant un ensemble d'hypothèses émanant des résultats des chapitres 6 et 7. Toutefois, d'autres caractéristiques morphologiques sont décrites dans la littérature en analyse de réseaux comme potentiellement liées aux conditions d'accessibilité d'un réseau viaire. Nous présentons certaines de ces relations dans cette annexe.

I. Les relations entre caractéristiques morphologiques et indice de détour moyen

Liu et Zhao (2015) et Aldous et Shun (2010) suggèrent que la densité d'un réseau, qui correspond pour eux au rapport entre sa longueur totale et sa superficie, influent sur son indice de détour moyen, donc sur la continuité des plus courts chemins reliant les tronçons du réseau. De leur côté, Cardillo et al. (2006) et Buhl et al. (2006) décrivent une relation entre l'efficacité des réseaux (inverse de l'indice de détour moyen) et la longueur totale de ces réseaux²⁶².

II. Les relations entre caractéristiques morphologiques et centralité d'intermédiarité

Barrat et al. (2008) décrivent une relation entre la présence de hubs dans un réseau (intersections à plusieurs voies, dans le cas d'un réseau viaire) et la répartition inégale de la centralité d'intermédiarité. Ces hubs ont une centralité d'intermédiarité très élevée car ils se situent souvent sur les plus courts chemins. Cela engendre une répartition inégale de la centralité d'intermédiarité.

Pour tester cette relation entre la présence de hubs et la répartition inégale de la centralité d'intermédiarité, il serait intéressant de développer un descripteur morphologique qui rende compte de la présence de hubs dans un réseau viaire. Ces hubs s'apparentent à des intersections comprenant un très grand nombre de voies. Pour les identifier, on pourrait par exemple décrire la répartition (plus ou moins inégale) du degré des tronçons grâce à l'indice de Gini des degrés. Un indice de

²⁶² Ils calculent plus précisément l'efficacité relative et la longueur relative, qui sont une normalisation de l'efficacité et de la longueur des réseaux (cf chapitre 8).

Gini élevé suggérerait l'existence de quelques tronçons au degré très élevé par rapport aux autres, ce qui indiquerait la présence d'intersections formant des hubs.

III. Les relations entre caractéristiques morphologiques et éloignement métrique moyen

Plusieurs auteurs pointent du doigt l'existence d'une forte relation entre l'éloignement métrique moyen d'un réseau viaire et la taille ou la superficie de ce réseau. Par exemple, Smeed (*cité dans* Haggett & Chorley (1969)) avait démontré dès 1968 l'existence d'une relation entre la distance moyenne à traverser suivant les plus courts chemins, entre les tronçons d'un réseau viaire, donc l'éloignement métrique moyen, et l'aire de l'enveloppe qui englobe ce réseau. Sur les réseaux réels qu'il étudie, Smeed trouvait que l'éloignement métrique moyen d valait en moyenne :

$$d = 0,87 \cdot A^{1/2}$$

Cette formule indique que l'éloignement métrique moyen est proportionnel à la racine carrée de la surface du réseau. De leur côté, Barthelemy et al. (2013) et Courtat et al. (2011) trouvent que l'éloignement métrique moyen d'un réseau²⁶³ est proportionnel à la racine carrée de son nombre de sommets (N). Cela les incite à proposer une normalisation de l'éloignement métrique moyen (cf section III.1). De leur côté, Porta et al. (2006) décrivent une relation entre la longueur totale du réseau et son éloignement métrique moyen²⁶⁴.

III.1. Une normalisation de l'éloignement métrique moyen

La relation décrite ci-dessus entre éloignement métrique moyen et taille du réseau a incité plusieurs auteurs à proposer une normalisation de cet éloignement métrique moyen. Cette normalisation vise à supprimer l'effet de la taille du réseau, et à obtenir des éloignements métriques moyens dont l'ordre de grandeur est similaire, entre des réseaux viaires de taille très différente. Barthelemy et al. (2013) proposent de **normaliser l'éloignement métrique moyen, en le divisant par la racine carrée du nombre de sommets.**

Masucci & Molinero (2016) proposent une solution différente pour supprimer l'effet de la taille d'un réseau sur son éloignement métrique moyen. Leur travail porte sur le réseau viaire de Londres et celui de Chicago. Ils proposent de comparer

²⁶³ Pas nécessairement un réseau viaire, leurs propos portent plus généralement sur les réseaux pouvant être représentés sur un plan en deux dimensions (*two dimensional network*).

²⁶⁴ Ils calculent plus précisément l'inverse de l'éloignement métrique, à savoir la centralité de proximité.

l'éloignement métrique moyen de chacun de ces réseaux à celui de graphes théoriques générés à partir des réseaux qu'ils étudient. Ils choisissent des graphes considérés comme des cas extrêmes en matière d'éloignement métrique : l'arbre de recouvrement minimal, graphe dans lequel l'éloignement métrique entre les sommets est très élevé, et la triangulation de Delaunay, graphe dans lequel l'éloignement métrique entre les sommets est très faible. En positionnant chaque réseau (celui de Londres et celui de Chicago) par rapport à ces cas extrêmes, ils peuvent savoir lequel a l'éloignement métrique le plus faible.

Une autre solution consiste à comparer des réseaux de même emprise. C'est ce qu'ont fait Cardillo et al. (2006), qui ont étudié un corpus de 20 réseaux, tirés de l'ouvrage de Jane Jacobs *Great Streets*. Chacun de ces réseaux est circonscrit dans une emprise de 1 mile carré. Cette approche permet d'éviter que l'éloignement métrique ne varie dans de grandes proportions. Néanmoins, cette solution ne nous semble pas totalement satisfaisante, car elle ne permet pas d'étudier des villes dans leur globalité. De plus, dans le cas de réseaux très peu denses comme les lotissements étasuniens, l'emprise de 1 mile carré correspond à une très petite part du réseau d'ensemble. Cette coupe « artificielle » des réseaux fait apparaître des morphologies « vides », peu réalistes.

Enfin, certains auteurs proposent d'utiliser l'indice de détour comme une normalisation de l'éloignement métrique (Vragović et al., 2005). L'indice de détour s'obtient en effet en divisant la longueur métrique des plus courts chemins entre les sommets d'un graphe par la distance à vol d'oiseau entre ces sommets. On obtient alors une mesure sans unité qui permet de comparer des réseaux de tailles très différentes, et de montrer à quel point les chemins y sont courts, comparativement à des distances à vol d'oiseau. Rappelons que dans notre cas, nous avons préféré utiliser l'indice de détour pour évaluer la continuité des plus courts chemins entre les tronçons d'un réseau.

Bibliographie

- Aditjandra, P. T. (2013). The impact of urban development patterns on travel behaviour : Lessons learned from a British metropolitan region using macro-analysis and micro-analysis in addressing the sustainability agenda. *Research in Transportation Business & Management*, 7, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.03.008>
- Aldous, D. J., & Shun, J. (2010). Connected Spatial Networks over Random Points and a Route-Length Statistic. *Statistical Science*, 25(3), 275-288. <https://doi.org/10.1214/10-STS335>
- Alexander, C. (1967). A city is not a tree. *Ekistics*, 344-348.
- Allix, G. (2008). David Mangin : « La notion d'espace public libre d'accès et gratuit est de plus en plus menacée ». *Le Monde.fr*. http://www.lemonde.fr/planete/article/2008/12/15/david-mangin-la-notion-d-espace-public-libre-d-acces-et-gratuit-est-de-plus-en-plus-menacee_1131247_3244.html
- Alonzo, E. (2018). *L'architecture de la voie. Histoire et théories* (Parenthèses Eds).
- Antoni, J.-P. (2016). *Concepts, Méthodes et Modèles pour l'aménagement et les mobilités*. Economica. <https://www.economica.fr/livre-concepts-methodes-et-modeles-antoni-philippe,fr,4,9782717868913.cfm>
- Archer, J. (1983). Country and City in the American Romantic Suburb. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 42(2), 139-156. <https://doi.org/10.2307/989828>
- Badariotti, D. (2006). *Le renouvellement urbain en France : Du traitement morphologique à l'intervention sociale*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00121821/>
- Bailly, A.-S. (1974). La perception des paysages urbains. *L'Espace géographique*, 3(3), 211-217. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1974.1486>
- Banister, D., & Marshall, S. (2000). Encouraging transport alternatives : Good practice in reducing travel. <https://trid.trb.org/view/667180>
- Banos, A., Chardonnel, S., Lang, C., Marilleau, N., & Thévenin, T. (2005). Une approche multi-agents de la ville en mouvement. *Colloque SMAGET*, 17.
- Bardet, G. (1951). *Naissance et méconnaissance de l'urbanisme*. Sabri.
- Barles, S. (2000). L'essor de la circulation à Paris au cours du premier XIXe siècle : Quantification, réponses techniques et réglementaires. 5e conférence européenne d'histoire urbaine *European Cities : Networks and Crossroads*, Berlin.

- Barrat, A., Barthélemy, M., & Vespignani, A. (2008). *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge University Press. <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=377883>
- Barthelemy, M. (2011). Spatial networks. *Physics Reports*, 499(1-3), 1-101. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002>
- Barthelemy, M. (2015). From paths to blocks : New measures for street patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*. <https://doi.org/10.1177/0265813515599982>
- Barthelemy, M. (2018). *Morphogenesis of Spatial Networks*. Springer. <http://www.springer.com/us/book/9783319205649>
- Barthelemy, M., & Flammini, A. (2009). Co-evolution of density and topology in a simple model of city formation. *Networks and spatial economics*, 9(3), 401-425. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11067-008-9068-5>
- Barthelemy, M., Bordin, P., Berestycki, H., & Griboaudi, M. (2013). Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific reports*, 3. http://www.nature.com/srep/2013/130708/srep02153/full/srep02153.html?WT.ec_id=SREP-639-20130801
- Beauguitte, L. (2013). Les principaux logiciels pour l'analyse de réseau. *Quanturb*.
- Béguin, M., & Pumain, D. (2017). *La représentation des données géographiques, Statistique et cartographie (4e éd)*. Armand Colin. <https://livre.fnac.com/a10509766/Michele-Beguिन-La-representation-des-donnees-geographiques-4e-ed-Statistique-et-cartographie>
- Beimborn, E. A., & Kennedy, R. (1996). *Transportation Modeling Primer*. In *Inside the Blackbox, Making Transportation Models Work for Livable Communities*. Citizens for a Better Environment. <https://www4.uwm.edu/cuts/primer.htm>
- Benevolo, L. (1983). *Histoire de la ville*. Editions Parenthèses.
- Bentayou, G., & Benbouzid, B. (2009). L'urbanisme et ses études. Réflexions à partir de deux exemples de politiques d'aménagement urbain à Lyon. *Histoire & mesure*, XXIV(XXIV-2), 71-108. <https://doi.org/10.4000/histoiremesure.3961>
- Berrigan, D., Pickle, L. W., & Dill, J. (2010). Associations between street connectivity and active transportation. *International Journal of Health Geographics*, 9(1), 20. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-9-20>
- Boeing, G. (2017). OSMnx : New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Boeing, G. (2019). Urban spatial order : Street network orientation, configuration, and entropy. *Applied Network Science*, 4(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>

- Bonerandi, E. (2004). Mobilités, flux et transports. De la mobilité en géographie [Document]. Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/Mobil/MobilScient.htm>
- Bonin, O. (2014). Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques. Croissance et décroissance des réseaux, Actes de la troisième journée d'étude du groupe fmr. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01068589/>
- Bordreuil, J. S. (1995). De la densité habitante aux densités mouvantes : L'hyperurbanité. Développement périphérique et mobilité. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 67(1), 5-14. <https://doi.org/10.3406/aru.1995.1872>
- Bourlet, C., & Layec, A. (2013). Densités de population et socio-topographie : La géolocalisation du rôle de taille de 1300. In Paris de parcelles en pixels : Analyse géomatique de l'espace parisien médiéval et moderne. Presses Universitaires de Vincennes.
- Bove, B. (2013). Les périphéries de Paris au XIVE siècle : Essai d'application de la théorie géographique aux sources médiévales. *Cidade e periferia, III coloquio internacional evolucao da paisagem urbana*, Maria do Carmo Ribeiro, Arnaldo Sousa Melo (dir.), 27.
- Brandes, U. (2008). On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. *Social Networks*, 30(2), 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2007.11.001>
- Brès, A. (1998). Le système des voies urbaines : Entre réseau et espace. *Flux*, 14(34), 4-20. <https://doi.org/10.3406/flux.1998.1233>
- Bretagnolle, A., & Robic, M.-C. (2005). Révolution des technologies de communication et représentations du monde : 1. Monde-point et monde difforme (Années 1830-1840). *L'Information géographique*, 69, 150-167. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00152774>
- Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N., Solé, R. V., Valverde, S., Kuntz, P., & Theraulaz, G. (2006). Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. *The European Physical Journal B*, 49(4), 513-522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>
- Caniggia, G., & Malfroy, S. (1994). *Lecture de Florence*. Institut Supérieur d'Architecture Saint-Luc.
- Carbonnier, Y. (2009). La monarchie et l'urbanisme parisien au siècle des Lumières. : Grands projets et faiblesse du pouvoir. *Histoire urbaine*, 24(1), 33. <https://doi.org/10.3917/rhu.024.0033>

- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., & Porta, S. (2006). Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E*, 73(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.066107>
- Cervero, R., & Gorham, R. (1995). Commuting in Transit Versus Automobile Neighborhoods. *Journal of the American Planning Association*, 61(2), 210-225. <https://doi.org/10.1080/01944369508975634>
- Chanowitz, M. (2014). Is the grid system in city planning the most efficient? Quora. <https://www.quora.com/Is-the-grid-system-in-city-planning-the-most-efficient>
- Chapel, E. (2017). L'épaisseur des cartes—Un prisme d'observation pour l'histoire de l'urbanisme. *Revue française des méthodes visuelles*. <https://rfmv.fr/numeros/1/articles/l-epaisseur-des-cartes-un-prisme-d-observation-pour-l-histoire-de-l-urbanisme/>
- Chiaradia, A., Hillier, B., Schwander, C., & Wedderburn, M. (2012). Compositional and urban form effects on centres in Greater London. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning*, 165(1), 21-42. <https://doi.org/10.1680/udap.2012.165.1.21>
- Chiaradia, A., Wedderburn, M., & Cooper, C. H. (2014). Network geography and accessibility. *Proceedings of the 12th Transport Practitioners' Meeting*. <http://www.cf.ac.uk/sdna/wp-content/ChiaradiaCooperWedderburnTPM2014.pdf>
- Choay, F. (1965). *L'urbanisme : Utopies et realites, une anthologie* (Edition du Seuil). <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf=054644>
- Choay, F. (1996). *La Règle et le Modèle, sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme* (Seuil).
- Clot-Goudard, R., & Tillous, M. (2008). L'espace du réseau : Du flux au territoire. Le tournant pragmatiste engagé par Isaac Joseph. *Tracés. Revue de Sciences humaines*, 15, 107-126. <https://doi.org/10.4000/traces.683>
- Cohen, S., Bomier, J., & Schwab, N. (2002). Estimation et prédiction des temps de parcours sur un réseau autoroutier. *Modélisation du trafic: actes du groupe de travail 1999*.
- Commenges, H. (2013). *L'invention de la mobilité quotidienne. Aspects performatifs des instruments de la socio-économie des transports*. Université Paris Diderot-Paris VII.
- Condon, P. (2008). *An Interconnected Street System*. ubc urban studio. <http://www.urbanstudio.sala.ubc.ca/urbanstudio%202008/student%20materials/Chapter%203%20Draft%20Aug%2008.pdf>

- Cooper, C. (2015). Spatial localization of closeness and betweenness measures a self contradictory but useful form of network analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(8).
- Cooper, C. (2016). *Spatial Design Network Analysis (sDNA) version 3.4 Manual*. <http://www.cardiff.ac.uk/sdna/software/documentation>
- Cooper, C. H. V., Harvey, I., Orford, S., & Chiaradia, A. J. F. (2019). Using multiple hybrid spatial design network analysis to predict longitudinal effect of a major city centre redevelopment on pedestrian flows. *Transportation*. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10072-0>
- Cooper, C. H., & Chiaradia, A. J. (2015). sDNA : How and why we reinvented Spatial Network Analysis for health, economics and active modes of transport. *Proceedings of the GIS Research UK (GISRUK)*, 122-127. http://orca.cf.ac.uk/87900/1/GISRUK2015_submission_15.pdf
- Costa, L. da F., Travençolo, B. A. N., Viana, M. P., & Strano, E. (2010). On the efficiency of transportation systems in large cities. *EPL (Europhysics Letters)*, 91(1), 18003. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/91/18003>
- Costes, B. (2016). Vers la construction d'un référentiel géographique ancien : Un modèle de graphe agrégé pour intégrer, qualifier et analyser des réseaux géohistoriques. Université Paris-Est.
- Courtat, T., Douady, S., & Gloaguen, C. (2011). Centrality maps and the analysis of city street networks. <https://doi.org/10.4108/icst.valuetools.2011.245740>
- Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011). Mathematics and morphogenesis of cities : A geometrical approach. *Physical Review E*, 83(3), 036106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.036106>
- Crane, R. (1996). On Form versus Function : Will the New Urbanism Reduce Traffic, or Increase It? *Journal of Planning Education and Research*, 15(2), 117-126. <https://doi.org/10.1177/0739456X9601500204>
- Crawford, J. H. (2005). A Brief History of Urban Form: [carfree.com](http://www.carfree.com). <http://www.carfree.com/papers/huf.html>
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality in networks of urban streets. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 16(1), 015113. <https://doi.org/10.1063/1.2150162>
- Cura, R. (2016). *Inverse procedural Street Modelling : From interactive to automatic reconstruction* [Phdthesis, Université Paris-Est Marne-la-Vallée]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01497625>
- Cutini, V. (2001). Centrality and Land Use: Three Case Studies on the Configurational Hypothesis. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.3936>

- Darin, M. (1988). Les grandes percées urbaines du XIXe siècle : Quatre villes de province. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 43(2), 477-505. <https://doi.org/10.3406/ahess.1988.283500>
- Desrosières, A. (2012). Est-il bon, est-il méchant? Le rôle du nombre dans le gouvernement de la cité néolibérale. *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 7(2), 261. <https://doi.org/10.7202/1013061ar>
- Douady, C.-N. (2014). *De la trace à la trame*. L'Harmattan.
- Douady, C.-N. (2016). *La ville comme processus*. L'Harmattan. <http://livre.fnac.com/a10280542/Clement-Noel-Douady-La-ville-comme-processus>
- Ducruet, C. & Lugo, I. (2013). Structure and dynamics of transportation networks : Models, Methods and applications. *The SAGE handbook of transport studies*, 347.
- Ducruet, C. (2010). Les mesures globales d'un réseau. flux matrices réseaux.
- Dupuy, G. (1985). *Systèmes, réseaux et territoires. Principes de réseautique territoriale*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Syst%C3%A8mes%2C+r%C3%A9seaux+et+territoires+dupuy&btnG=
- Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*. Armand Colin. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00438867>
- Evans, G., & Larkham, P. J. (2004). Designing and Living in a New Industrial Suburb : Experiences in the Cannock Chase Coalfield from the 1950s to the 1970s. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(5), 673-691. <https://doi.org/10.1068/b303>
- Ewing, R. (1996). *Pedestrian- and Transit-Friendly Design* (Report prepared for the Public Transit Office, Florida Department of Transportation).
- Ewing, R., & Cervero, R. (2001). Travel and the Built Environment : A Synthesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1780(1), 87-114.
- Ewing, R., & Handy, S. (2009). Measuring the Unmeasurable : Urban Design Qualities Related to Walkability. *Journal of Urban Design*, 14(1), 65-84. <https://doi.org/10.1080/13574800802451155>
- Feriel, C. (2015). *Piétonniser les centres-villes (1960-1980). États, pouvoirs municipaux et sociétés urbaines face aux mutations des centres urbains au second XXe siècle (Europe, États-Unis)*. Paris Saclay. <http://www.theses.fr/2015SACLV008>
- Feriel, C. (2016). Un avenir pour les centres anciens. Piétonniser les centres-villes européens dans les années 1960-1970. <https://www.slideshare.net/iurbanistica/c16112un-avenir-pour-les-centres-anciens-pitonniser-les-centresvilles-europens-dans-les-annes-19601970-entre-modernisation-et-patrimonialisation-cdric-friel-acsupem-labex-futurs-urbains>

- Fialcofschi, R. (2009). Le "Journal de Paris" et les arts visuels, 1777-1788 [Thesis, Lyon 2]. <http://www.theses.fr/2009LYO20052>
- Fleury, A. (2004). La rue : Un objet géographique ? Tracés. *Revue de Sciences humaines*, 5, 33-44. <https://doi.org/10.4000/traces.3133>
- Flonneau, M. (2007). Compte-rendu : Nicholas Papayanis, *Planning Paris before Haussmann*, 2004. *Le mouvement social*, 221. <http://mouvement-social.univ-paris1.fr/document.php?id=719&format=print>
- Foltête, J.-C., Genre-Grandpierre, C., & Josselin, D. (2008). Impacts des réseaux viaires sur les mobilités urbaines : Quelques illustrations. In *Information géographique et dynamiques urbaines 1, analyse et simulation de la mobilité des personnes* (p. 139-165). Hermès-Lavoisier. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00402910>
- Fourier, C. (1822). *Traité de l'association domestique-agricole*. Bossange.
- Freeman, L. C. (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35-41. <https://doi.org/10.2307/3033543>
- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215-239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- Freiria, S., Ribeiro, B., & Tavares, A. O. (2015). Understanding road network dynamics : Link-based topological patterns. *Journal of Transport Geography*, 46, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.002>
- Garrison, W. L., & Marble, D. F. (1962). The structure of transportation networks (TR-62-11). Northwestern University. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/AD0282117>
- Garrison, William L. (1990). Networks : Reminiscence and lessons. *Flux*, 6(1), 5-12. <https://doi.org/10.3406/flux.1990.1169>
- Genre-Grandpierre, C. (2001). Des réseaux viaires défavorables aux modes doux. *Actes des Ve rencontre de Théo Quant*.
- Geurs, K., & Ritsema van Eck, J. (2001). Accessibility measures : Review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. <https://rivm.openrepository.com/handle/10029/259808>
- Gharbi, I. (2016). Infrastructures viaires et discontinuités urbaines : Quels remèdes pour une accessibilité meilleure dans le contexte de la ville-région contemporaine ? *Espace populations sociétés*, 2. <https://eps.revues.org/6305#authors>
- Ghorra-Gobin, C. (1998). *La ville américaine : Espace et société*. Nathan Université.
- Ghorra-Gobin, C. (2004). L'étalement de la ville américaine. Quelles réponses politiques? *Esprit* (1940-), 303 (3/4), 145-159. <https://www.jstor.org/stable/24249406>

- Ghorra-Gobin, C. (2014). Le « New Urbanism » et la soutenabilité. *Métropolitiques*. <https://www.metropolitiques.eu/Le-New-Urbanism-et-la.html>
- Gleyze, J.-F. (2007). Effets spatiaux et effets réseau dans l'évaluation d'indicateurs sur les nœuds d'un réseau d'infrastructure. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/5532?iframe=true&height=100%>
- Godillon, S. (2016). Conflits autour de la « pacification » du trafic automobile. Analyse des politiques de modération de la vitesse à Paris. *L'Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*, 30. <https://doi.org/10.4000/espacepolitique.3970>
- Grammenos, F., Pogharian, S., & Tasker-Brown, J. (2001). Residential street pattern design.
- Graser, A., Leodolter, M., Koller, H., & Brändle, N. (2016). Improving vehicle speed estimates using street network centrality. *International Journal of Cartography*, 2(1), 77-94. <https://doi.org/10.1080/23729333.2016.1189298>
- Grasland, C. (s. d.). Interaction spatiale. In *Hypergéogé*. Consulté 18 août 2018, à l'adresse <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article2>
- Griffiths, S. (2009). Persistence and change in the spatio-temporal description of Sheffield Parish c. 1750-1905. <http://discovery.ucl.ac.uk/15301/>
- Griffiths, S. (2012). The use of space syntax in historical research : Current practice and future possibilities. *Proceedings of the Eighth International Space Syntax Symposium*. Santiago de Chile: PUC. <http://www.sss8.cl/media/upload/paginas/seccion/8193.pdf>
- Griffiths, S., & Lünen, A. von. (2016). *Spatial Cultures : Towards a New Social Morphology of Cities Past and Present*. Routledge.
- Gudmundsson, A., & Mohajeri, N. (2013). Entropy and order in urban street networks. *Scientific Reports*, 3. <https://doi.org/10.1038/srep03324>
- Haggett, P., & Chorley, R. J. (1969). *Network Analysis in Geography*. Edward Arnold.
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73-76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>
- Haumont, A. (1993). La mobilité intra-urbaine : Rétrospective et prospective. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 59(1), 109-118. <https://doi.org/10.3406/aru.1993.1733>
- Hermenault, L. (2017). *La ville en mouvements. Circulations, échanges commerciaux et matérialité de la ville [Phdthesis, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I]*. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01551802/document>
- Hersemul, B. (2016). *L'occupation et l'appropriation des espaces publics dans les grands ensembles : L'étude du quartier des Comtes à Port-de-Bouc [Mémoire de*

Master]. Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional (IUAR) d'Aix-en-Provence.

Hillier, B., & Hanson, J. (1989). *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press.

Hillier, B., & Iida, S. (2005). Network and Psychological Effects in Urban Movement. In A. G. Cohn & D. M. Mark (Éds.), *Spatial Information Theory* (Vol. 3693, p. 475-490). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11556114_30

Hillier, B., & Shu, S. C. (2000). Crime and urban layout : The need for evidence. *Secure foundations: Key issues in crime prevention, crime reduction and community safety*, 224.

Howard, E. (1902). *Garden Cities of Tomorrow*. Sonnenschein & Co. https://ebooks.adelaide.edu.au/h/howard/ebenezer/garden_cities_of_tomorrow/complete.html

Huard, M. (2019). *Atlas historique de Paris*. Persée.

Huot, J.-L. (1997). Aux sources de l'urbanisme, le cas du Proche-Orient ancien. In *La ville régulière. Modèles et tracés* (p. 13-21). Picard. https://www.persee.fr/doc/geoca_0035-113x_1998_num_73_1_4810

Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility : A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101-107. <https://doi.org/10.1080/09595237100185131>

Isard, W. (1942). A Neglected Cycle : The Transport-Building Cycle. *The Review of Economics and Statistics*, 24(4), 149-158. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/1927670>

Jackson, K. T. (1987). *Crabgrass Frontier : The Suburbanization of the United States*. Oxford University Press.

Jacobs, J. (1961). *The death and life of great american cities*. Vintage.

Jiang, B. (2009). Street hierarchies : A minority of streets account for a majority of traffic flow. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8), 1033-1048. <https://doi.org/10.1080/13658810802004648>

Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological Analysis of Urban Street Networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151-162. <https://doi.org/10.1068/b306>

Jiang, B., Yin, J., & Zhao, S. (2009). Characterizing the human mobility pattern in a large street network. *Physical Review E*, 80(2), 021136. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.021136>

Jin, X. (2010). *Modelling the Influence of Neighbourhood Design on Daily Trip Patterns in Urban Neighbourhoods*. Memorial University of Newfoundland.

- Jin, X., & White, R. (2012). An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(5), 398-411. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.03.006>
- Joseph, I. (1984). *Le passant considérable : Essai sur la dispersion de l'espace public* (FeniXX). FeniXX.
- Joseph, I. (2004). Goffmann et l'écologie urbaine. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 95(1), 130-133. <https://doi.org/10.3406/aru.2004.2545>
- Kansky, K. J. (1963). *Structure of transportation networks : Relationships between network geometry and regional characteristics* [Université de Chicago]. <https://trid.trb.org/view/853238>
- Karduni, A., Kermanshah, A., & Derrible, S. (2016). A protocol to convert spatial polyline data to network formats and applications to world urban road networks. *Scientific Data*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.46>
- Kaufmann, V. (2012). Mobilité. In *Dictionnaire du Forum Vies mobiles*. <http://fr.forumviesmobiles.org/reperes/mobilite-446>
- Kostof, S. (1991). *The City Shaped : Urban Patterns and Meanings Through History* (Reprint). Bulfinch.
- Kumapley, R., & Fricker, J. (1996). Review of Methods for Estimating Vehicle Miles Traveled. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1551, 59-66. <https://doi.org/10.3141/1551-08>
- Lagesse, C. (2015). *Lire les Lignes de la Ville* [Phdthesis, Université Paris Diderot-Paris VII]. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01245898/document>
- Lagesse, C., Bordin, P., & Douady, S. (2015). A spatial multi-scale object to analyze road networks. *Network Science*, 3(01), 156-181. <https://doi.org/10.1017/nws.2015.4>
- Lämmer, S., Gehlsen, B., & Helbing, D. (2006). Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 363(1), 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.051>
- Laterrasse, J. (2018). *Urbanisme et trame urbaine : Ce que nous apprend l'histoire des villes*. e-Phaïstos. *Revue d'histoire des techniques / Journal of the history of technology*, V(V-1 2016). <https://doi.org/10.4000/ephaistos.1281>
- Lavedan, P. (1941). *Histoire de l'urbanisme : Renaissance et temps modernes*. Henri Laurens. <https://www.bcin.ca/bcin/detail.app?id=23126>
- Lavedan, P., Hugueney, J., & Henrat, P. (1982). *L'urbanisme à l'époque moderne : XVIe-XVIIIe siècles*. Librairie Droz.
- Lazega, E. (2007). *Réseaux sociaux et structures relationnelles* (3e éd.). Presses Universitaires de France.

- Le Corbusier. (1963). *Manière de penser l'urbanisme*. Gonthier.
- Le Goix, R. (2006). Les gated communities aux États-Unis et en France : Une innovation dans le développement périurbain? *Herodote*, no 122(3), 107-137. <https://www.cairn.info/revue-herodote-2006-3-page-107.htm>
- Le Goix, R. (2016). *Sur le front de la métropole, une géographie suburbaine de Los Angeles* (La Sorbonne Editions). <https://livre.fnac.com/a9838508/Renaud-Le-Goix-Sur-le-front-de-la-metropole-une-geographie-suburbaine-de-Los-Angeles>
- Leduc, T., & Chauvat, G. (2013). Visibilité et prévisibilité : Cartographie de la part cachée d'un paysage urbain. *SAGEO* 2013, 185-196. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01347228/>
- Leménorel, A. (1997). *La rue, lieu de sociabilité ?* (Vol. 214). Publication Univ Rouen Havre.
- Lemoigne, J.-L. (1990). La mémoire du réseau : Tout s'écoule... et pourtant. *Flux*, 6(2), 25-32. <https://doi.org/10.3406/flux.1990.1137>
- Leon, M. P. de, Dunnigan, B. L., Liu, Y., Fishman, R., Grengs, J., Alarcon, M. A. de, Larsen, L., Dewar, M., Linn, R., Graebner, L., & Griffin, T. L. (2015). *Mapping Detroit : Land, Community, and Shaping a City* (J. M. Thomas & H. Bekkering, Éd.s.; Illustrated Edition). Wayne State University Press.
- Levinson, D. (2012). Network Structure and City Size. *PLOS ONE*, 7(1), e29721. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029721>
- Levinson, D., & Huang, A. (2012). A Positive Theory of Network Connectivity. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(2), 308-325. <https://doi.org/10.1068/b37094>
- Levinson, D., & Yerra, B. (2006). Self-Organization of Surface Transportation Networks. *Transportation Science*, 40(2), 179-188. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0132>
- Lévy, A. (1999). Infrastructure viaire et forme urbaine. Génèse et développement d'un concept. In *Infrastructures et formes urbaines. Tome 2 : Architecture des réseaux. Espaces et sociétés*. L'Harmattan.
- Lévy, G. (2003). L'accessibilité des transports aux personnes handicapées et à mobilité réduite (p. 132). <https://sid.usal.es/idocs/F8/FD09009/accesibilite.pdf>
- Lévy, J., & Lussault, M. (2003). *Dictionnaire De La Géographie* | Rakuten. Belin.
- Liu, Z., & Zhao, S. (2015). Characteristics of road network forms in historic districts of Japan. *Frontiers of Architectural Research*, 4(4), 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.08.003>

- Louf, R., & Barthelemy, M. (2014). A typology of street patterns. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(101), 20140924-20140924. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0924>
- Magri, S., & Topalov, C. (1987). De la cité-jardin à la ville rationalisée. Un tournant du projet réformateur (1905-1925) dans quatre pays. *Revue française de sociologie*, 28(3), 417-451. <https://doi.org/10.2307/3321721>
- Malverti, X., & Picard, A. (1989). Les villes coloniales fondées entre 1830 et 1870 en Algérie (II). Les tracés de ville et le savoir des ingénieurs du génie (Research Report No 576/89). Ministère de l'équipement et du logement / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ministère de la recherche; Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01905850>
- Malverti, X., & Picard, A. (1989). Les villes coloniales fondées entre 1830 et 1870 en Algérie (II). Les tracés de ville et le savoir des ingénieurs du génie (Research Report No 576/89). Ministère de l'équipement et du logement / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ministère de la recherche; Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01905850>
- Marcus, L., & Colding, J. (2011). Towards a spatial morphology of urban social-ecological systems. 18th International Seminar on Urban Form. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:469884>
- Mariage, T. (1990). *L'univers de Le Nostre*. Editions Mardaga.
- Marion, P.-L. (2018). Carte à la une : La naissance du plan de ville, Rome par Bufalini (1551). *Geoconfluences*. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/carte-a-la-une/marion-bufalini-roma>
- Mark, D. M. (1986). Automated Route Selection for Navigation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1(9), 2-5. <https://doi.org/10.1109/MAES.1986.5005198>
- Marsault, X. (2012). Reconnaissance automatique de structure viaire urbaine. *Références*, 291-294. <http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0077/Temis-0077060/20403.pdf>
- Marshall, S. (2005). *Streets & patterns* (1st ed). Spon.
- Marshall, S. (2012). Science, pseudo-science and urban design. *Urban Design International*, 4(17). <https://doi.org/10.1057/udi.2012.22>
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street Network Studies : From Networks to Models and their Representations. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9427-9>
- Martin, M. (2001). Returning to Radburn. *Landscape Journal*, 20, 156-175. <https://doi.org/10.3368/lj.20.2.156>

- Masucci, A. P., & Molinero, C. (2016). Robustness and closeness centrality for self-organized and planned cities. *The European Physical Journal B*, 89(2). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2016-60431-2>
- Masucci, Adolfo Paolo, Smith, D., Crooks, A., & Batty, M. (2009). Random planar graphs and the London street network. *The European Physical Journal B*, 71(2), 259-271. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2009-00290-4>
- Mateo-Babiano, I., & Ieda, H. (2005). Theoretical discourse on sustainable space design : Towards creating and sustaining effective sidewalks. *Business Strategy and the Environment*, 14(5), 300-314. <https://doi.org/10.1002/bse.490>
- McNally, M. G., & Kulkarni, A. (1997). Assessment of Influence of Land Use-Transportation System on Travel Behavior. *Transportation Research Record*, 1607(1), 105-115. <https://doi.org/10.3141/1607-15>
- McShane, C., & Mocquot, B. (1984). De la rue à l'autoroute. 1900-1940. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 23(1), 17-28. <https://doi.org/10.3406/aru.1984.1090>
- Merlin, P. (1985). Les politiques de transport urbain. *La documentation française*, 4797.
- Merlin, P., & Choay, F. (1996). *Dictionnaire de l'aménagement et de l'urbanisme* (2e édition). Presses Universitaires de France.
- Mermet, E., & Varet-Vitu, A. (s. d.). Paris et son réseau de rues pour une spatialisation des adresses historiques, fin XVIIIe siècle-première moitié du XIXe siècle. Plateforme SIG de l'EHESS. Consulté 26 juin 2016, à l'adresse <https://psigehess.hypotheses.org/paris-et-son-reseau-de-rues-pour-une-spatialisation-des-adresses-historiques-fin-xviiiie-siecle-premiere-moitie-du-xixe-siecle>
- Mesqui, J., & Skriabine, P. (1984). Discussion. Voirie. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 23(1), 29-29. https://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_1984_num_23_1_1091
- Moreno, D. (2009). Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centrée. Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Morris, A. E. J. (2013). *History of Urban Form Before the Industrial Revolution*. Routledge.
- Moudon, A., Hess, P., Snyder, M., & Stanilov, K. (1997). Effects of Site Design on Pedestrian Travel in Mixed-Use, Medium-Density Environments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1578, 48-55. <https://doi.org/10.3141/1578-07>
- Nabaa, M. (2011). *Morphodynamique de réseaux viaires—Application au risque*. Université du Havre.

- Noizet, H., Bove, B., & Costa, L. (2013). Paris de parcelles en pixels (H. Noizet, B. Bove, & L. Costa, Éd.s.). Presses universitaires de Vincennes. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00857608>
- Novarina, G., & Sadoux, S. (2018). La garden city. Un réservoir de références à réinventer. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 113(1), 192-207. <https://doi.org/10.3406/aru.2018.3283>
- Oliveira, V. (2016). *Urban Morphology : An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Springer.
- Orfeuil, J.-P. (2004). Transports, pauvretés, exclusions ; pouvoir bouger pour s'en sortir (Ed. de l'Aube). La Tour-d'Aigues. <https://www.librairie-sciencespo.fr/livre/9782876789517-transports-pauvretes-exclusions-pouvoir-bouger-pour-s-en-sortir-jean-pierre-orfeuil/>
- Özbiç, A., Yeşiltepe, D., & Argin, G. (2015). Modeling walkability : The effects of street design, street-network configuration and land-use on pedestrian movement. *A| Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 12(3), 189-207. http://www.journalagent.com/itujfa/pdfs/ITUJFA_12_3_189_207.pdf
- Panerai, P., Castex, J., & Depaule, J.-C. (1997). *Formes urbaines : De l'îlot à la barre*. Editions Parenthèses.
- Papayanis, N. (2004). *Planning Paris Before Haussmann*. JHU Press.
- Payette-Hamelin, M. (2011). Pour une approche urbanistique de la conservation et de la mise en valeur du patrimoine bâti : L'expérience du canal de Lachine à Montréal [Aix-Marseille]. <http://www.theses.fr/2012AIXM1094>
- Pellegrino, P., Jeanneret, E. P., & Kaufmann, R. M. (1999). Infrastructures et modèles urbanistiques. In *Infrastructures et formes urbaines. Tome 2 : Architecture des réseaux. Espaces et sociétés*. L'Harmattan.
- Picon-Lefèbvre, V. (2000). Constuire la ville sur dalle : Maine-Montparnasse et la Défense : 1950-1975 [Thesis, Paris 1]. <http://www.theses.fr/2000PA010611>
- Pinon, P., & Le Boudec, B. (2014). *Les Plans de Paris—Histoire d'une capitale*. Passage.
- Piombini, A. (2006). Modélisation des choix d'itinéraires pédestres en milieu urbain. Approche géographique et paysagère [Phdthesis, Université de Franche-Comté]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00167224/document>
- Piombini, A., & Foltête, J.-C. (2007). Paysages et choix d'itinéraires pédestres en milieu urbain. Une nouvelle approche par les bifurcations. *Les cahiers scientifiques de transport*, 52, 87-105.
- Plunz, R. (2016). *A History of Housing in New York City*. Columbia University Press.

- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). Analyse du réseau des voiries urbaines : Une approche directe. 17.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006b). The network analysis of urban streets : A dual approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 369(2), 853-866. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.12.063>
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006c). The Network Analysis of Urban Streets : A Primal Approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705-725. <https://doi.org/10.1068/b32045>
- Porta, S., Latora, V., Wang, F., Strano, E., Cardillo, A., Scellato, S., Iacoviello, V., & Messori, R. (2009). Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(3), 450-465. <https://doi.org/10.1068/b34098>
- Porta, S., Romice, O., Maxwell, A., Russell, P., & Baird, D. (2014). Alterations in scale : Patterns of change in main street networks across time and space. *Urban Studies*, 51(16), 3383-3400. <https://doi.org/10.1177/0042098013519833>
- Pouyanne, G. (2004). *Forme Urbaine et Mobilité Quotidienne*. Université Montesquieu-Bordeaux IV.
- Pouyanne, G. (2005). L'interaction entre usage du sol et comportements de mobilité. Méthodologie et application a l'aire urbaine de Bordeaux. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, décembre(5), 723. <https://doi.org/10.3917/reru.055.0723>
- Prud'homme, J. (2016). Le réseau routier, déterminant structurel de la quantité de polluants émis par les déplacements automobiles. *Flux*, 3, 50-61. <http://www.cairn.info/revue-flux-2016-3-page-50.htm>
- Psarra, S., Kickert, C., & Pluviano, A. (2013). Paradigm lost : Industrial and post-industrial Detroit—An analysis of the street network and its social and economic dimensions from 1796 to the present. *Urban Design International*, 18(4), 257-281. <http://www.palgrave-journals.com/udi/journal/v18/n4/full/udi20134a.html>
- Pumain, D. (1982). *La dynamique des villes*. Economica.
- Rickert, Y. (2012). Une célébration du roi ? Pierre Patte et ses Monuments érigés en France à la gloire de Louis XV. *Les Cahiers de Framespa*. Nouveaux champs de l'histoire sociale, 11. <https://doi.org/10.4000/framespa.1842>
- Rifaat, S. M., Tay, R., & de Barros, A. (2011). Effect of street pattern on the severity of crashes involving vulnerable road users. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.024>
- Robert, S., Grosso, E., Chareille, P., & Noizet, H. (2013). Premières analyses morphologiques du parcellaire parisien. In *Paris de parcelles en pixels : Des plans Vasserot au SIG Alpage*. Presses Universitaires de Vincennes. <http://ggherres.ehess.fr/index.php?304>

- Rohe, W. M. (2009). From Local to Global : One Hundred Years of Neighborhood Planning. *Journal of the American Planning Association*, 75(2), 209-230. <https://doi.org/10.1080/01944360902751077>
- Roncayolo, M. (2008, juin). L'abecedaire de Marcel Roncayolo, introduction à une lecture de la ville [Communication personnelle].
- Rossi, A. (2006). *L'Architecture de la ville*. Infolio.
- Rui, Y., Ban, Y., Wang, J., & Haas, J. (2013). Exploring the patterns and evolution of self-organized urban street networks through modeling. *The European Physical Journal B*, 86(3). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30235-7>
- Saint-Julien, T., & Le Goix, R. (2007). Questions pour une région métropolitaine. In *La métropole parisienne, Centralités, inégalités, proximités* (Belin, p. 333). <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00631035>
- Shpuza, E. (2009). Evolution of Street Networks in Adriatic and Ionian Coastal Cities. 7th International Space Syntax Symposium. https://www.researchgate.net/profile/Ermal_Shpuza/publication/228919198_Evolution_of_street_networks_in_Adriatic_and_Ionian_coastal_cities_1769-2007/links/0c96052d03ce5801d8000000.pdf
- Shpuza, E. (2014). Allometry in the Syntax of Street Networks : Evolution of Adriatic and Ionian Coastal Cities 1800–2010. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(3), 450-471. <https://doi.org/10.1068/b39109>
- Sitte, C. (1996). *L'art de bâtir les villes*. Seuil.
- Southworth, M. (1997). Walkable Suburbs?: An Evaluation of Neotraditional Communities at the Urban Edge. *Journal of the American Planning Association*, 63(1), 28-44. <https://doi.org/10.1080/01944369708975722>
- Southworth, M., & Owens, P. M. (1993). The Evolving Metropolis: Studies of Community, Neighborhood, and Street Form at the Urban Edge. *Journal of the American Planning Association*, 59(3), 271-287. <https://doi.org/10.1080/01944369308975880>
- Speck, J. (2017). 4 ways to make a city more walkable.
- Sreelekha, M. G., Krishnamurthy, K., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2016). Assessment of Topological Pattern of Urban Road Transport System of Calicut City. *Transportation Research Procedia*, 17, 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.089>
- Strano, E., Nicosia, V., Latora, V., Porta, S., & Barthelemy, M. (2012). Elementary processes governing the evolution of road networks. *Scientific Reports*, 2, 296. <https://doi.org/10.1038/srep00296>
- Strano, E., Shai, S., Dobson, S., & Barthelemy, M. (2015). Multiplex networks in metropolitan areas : Generic features and local effects. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(111), 20150651. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0651>

- Strano, E., Viana, M., da Fontoura Costa, L., Cardillo, A., Porta, S., & Latora, V. (2012). Urban street networks, a comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(6), 1071–1086. <http://epb.sagepub.com/content/40/6/1071.short>
- Stransky, V. (1995). *Forme et fonction d'un réseau : Cas de la voirie urbaine de desserte locale* [Phdthesis, Université Paris XII Val de Marne]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00129522/document>
- Studeny, C. (1995). *L'Invention de la vitesse : France, XVIIIe-XXe siècle*. Gallimard.
- Thomson, W. (1883). *Electrical units of measurement. Popular lectures and adresses*, 1.
- Usui, H., & Asami, Y. (2011). An Evaluation of Road Network Patterns Based on the Criteria for Fire-Fighting. *Cybergeog: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.23825>
- Vallée, J., Commenges, H., Perchoux, C., Kestens, Y., & Chaix, B. (2015). Mobilité quotidienne et accès potentiel aux ressources urbaines : Quelles inégalités sociales ? <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01230217>
- Vaughan, L. (2015). *Suburban Urbanities*. UCL Press. <https://doi.org/10.14324/111.9781910634134>
- Vaughan, L. S., Dhanani, A., & Griffiths, S. (2013). Beyond the suburban high street cliché-A study of adaptation to change in London's street network: 1880-2013. *Journal of Space Syntax*, 4(2), 221–241. <http://discovery.ucl.ac.uk/1417189/>
- Viana Cerqueira, E. (2018). *Les inégalités d'accès aux ressources urbaines dans les franges périurbaines de Lille et Bello Horizonte (Brésil)*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- Viana, M. P., Strano, E., Bordin, P., & Barthelemy, M. (2013). The simplicity of planar networks. *Scientific Reports*, 3, 3495. <https://doi.org/10.1038/srep03495>
- Victor, N. (2016). *Evaluation des déplacements piétons quotidiens : Application à la ville de Luxembourg*. Université Lyon Jean Monnet.
- Viganò, P., Secchi, B., & Fabian, L. (2016). *Water & asphalt the project of isotropy*. Park Books.
- Vragović, I., Louis, E., & Díaz-Guilera, A. (2005). Efficiency of informational transfer in regular and complex networks. *Physical Review E*, 71(3), 036122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036122>
- Wang, F., Antipova, A., & Porta, S. (2011). Street centrality and land use intensity in Baton Rouge, Louisiana. *Journal of Transport Geography*, 19(2), 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.01.004>
- Watteaux, M. (2014). Le plan radio-quadrillé des territoires non planifiés. In *De la trace à la trame (L'Harmattan)*.

- Xie, F., & Levinson, D. (2007). Measuring the structure of road networks. *Geographical analysis*, 39(3), 336–356. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1538-4632.2007.00707.x/full>
- Xie, F., & Levinson, D. (2009). Topological evolution of surface transportation networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(3), 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.009>
- Zadeh, A. S. M., & Rajabi, M. A. (2013). Analyzing the effect of the street network configuration on the efficiency of an urban transportation system. *Cities*, 31, 285-297. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.08.008>
- Zhang, Y., Wang, X., Zeng, P., & Chen, X. (2011). Centrality Characteristics of Road Network Patterns of Traffic Analysis Zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2256(1), 16-24. <https://doi.org/10.3141/2256-03>
- Zhong, C., Arisona, S. M., Huang, X., Batty, M., & Schmitt, G. (2014). Detecting the dynamics of urban structure through spatial network analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(11), 2178-2199. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.914521>

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Synthèse des préconisations relatives à la circulation	78
Tableau 2.1 : Conditions de circulation recherchées par des théoriciens et praticiens de l'urbanisme lors de la conception des réseaux viaries.....	93
Tableau 2.2 : Mise en relation des conditions de circulation recherchées en urbanisme et des conditions d'accessibilité tirées des études de la mobilité urbaine.	108
Tableau 3.1 : Tableau relevant certaines contradictions dans les préconisations des auteurs évoqués en partie I.....	132
Tableau 3.2 : Tableau synthétisant les préconisations typiques choisies pour explorer la relation entre caractéristiques morphologiques et conditions d'accessibilité.....	147
Tableau 3.3 : Tableau regroupant des préconisations similaires entre l'âge classique et le Siècle des Lumières.....	167
Tableau 5.1 : Tableau synthétisant les cas d'étude empiriques choisis pour chacune des préconisations théoriques identifiées en chapitre 3.....	270
Tableau 5.2 : Tableau synthétisant les données filaires choisies, le nombre de tronçons de voies qu'elles comprennent, et leur emprise.....	287
Tableau 6.1 : Tableau synthétisant les caractéristiques morphologiques décrites dans la littérature pour les réseaux viaries organiques, quadrillés, arborescents, et les percées en étoile.....	293
Tableau 6.2 : Tableau indiquant pour chaque caractéristique morphologique le descripteur morphologique correspondant.....	294
Tableau 6.3 : Valeurs du coefficient de maillage pour les six réseaux du corpus 1.	300
Tableau 6.4 : Valeurs de la concentration de l'orientation cardinale des tronçons, pour les six réseaux viaries du corpus 1.....	307
Tableau 6.5 : Valeurs du coefficient de maillage pour les quatre réseaux du corpus 2.	313
Tableau 6.6 : Valeurs de la concentration de l'orientation cardinale des tronçons, pour les quatre réseaux viaries du corpus 2.....	321
Tableau 6.7 : Tableau synthétisant les spécificités, en termes de caractéristiques morphologiques, identifiées pour chaque type de réseau étudié, et pour la période haussmannienne.	330
Tableau 7.1 : Tableau présentant les conditions d'accessibilité décrites dans la littérature, pour les réseaux viaries organiques, quadrillés, arborescents, et les percées en étoile.	334

Tableau 7.2 : Tableau indiquant pour chaque condition d'accessibilité le descripteur d'accessibilité correspondant.....	335
Tableau 7.3 : Valeurs de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, pour les six réseaux du corpus 1.....	355
Tableau 7.4 : Valeurs de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, pour les quatre réseaux du corpus 2.....	367
Tableau 7.5 : Tableau synthétisant les spécificités, en termes de conditions d'accessibilité, identifiées pour chaque type de réseau que nous avons étudié, et pour la période haussmannienne.....	380
Tableau 8.1 : Tableau synthétisant les descripteurs morphologiques utilisés et leur mode de calcul.....	387
Tableau 8.2 : Tableau synthétisant notre acception de chaque condition d'accessibilité, ainsi que les descripteurs d'accessibilité utilisés pour décrire ces acceptions.....	388
Tableau 8.3 : Synthèse de l'ensemble des descripteurs (morphologiques et d'accessibilité) utilisés.....	391
Tableau 8.4 : Valeurs prises par les descripteurs morphologiques et les descripteurs d'accessibilité, pour nos dix cas d'étude.....	392
Tableau 8.5 : Tableau synthétisant les spécificités – en termes de morphologie et d'accessibilité – observées pour chaque type de réseau du corpus 1, et pour la période haussmannienne à Paris.....	396
Tableau 8.6 : Synthèse de nos hypothèses sur la relation entre descripteurs morphologiques (en lignes) et descripteurs d'accessibilité (en colonnes).....	397
Tableau 8.7 : Tableau indiquant les coefficients de corrélation entre chaque couple de descripteurs morphologiques et de descripteurs d'accessibilité.....	399

Table des figures

Figure 1 : Illustration présentée à l'exposition Paris Haussmann, visant à montrer que le réseau viaire du quartier de l'Opéra à Paris est « marchable ».....	20
Figure 2 : Schéma synthétisant la relation entre les préconisations des théoriciens et praticiens de l'urbanisme, la morphologie des réseaux viaires, et les conditions d'accessibilité offertes par ces réseaux.....	26
Figure 1.1 : Schéma représentant les trois principaux paradigmes dans lesquels nous classons les préconisations sur la conception des réseaux viaires en urbanisme.	31
Figure 1.2 : Plan de la ville de Milet.....	34
Figure 1.3 : Plan d'ensemble de la Rome de Sixte Quint, 1589, fresque de la Bibliothèque vaticane. Source : flickr.com.....	35
Figure 1.4 : Plans simplifiés de la Cité du Soleil (Campanella) à gauche, et de Neuf-Brisach (Vauban) à droite.....	36
Figure 1.5 : Représentation de la Cité idéale de Chauv (par Ledoux 1779), qui devait prolonger la forme de la Saline royale pour former un cercle parfait. Seule la Saline sera réalisée.....	37
Figure 1.6 : Plan d'une partie de la forêt de Compiègne, montrant des réseaux formés de faisceaux et de trames de voies rectilignes, formant des figures étoilées.....	38
Figure 1.7 : Plan de Llewellyn park (New Jersey) par Alexander Jackson Davis, 1857.....	42
Figure 1.8 : Plan de Riverside (Illinois) par Frederick Law Olmsted, 1869.....	43
Figure 1.9 : Vue depuis une rue de Bruxelles.....	44
Figure 1.10 : Image de la Place de la Comédie à Montpellier.....	46
Figure 1.11 : Opération de piétonisation dans le centre-ville d'Essen en Allemagne (1959-1960).....	48
Figure 1.12 : Gauche : Vue sur un grand ensemble. Droite : Espace libre dans un grand ensemble à Picon-Busseine, Marseille.....	49
Figure 1.13 : Proposition de Jane Jacobs pour assurer la perméabilité du réseau viaire, par la création de blocs de petites dimensions.....	51
Figure 1.14 : Image satellite d'une partie de Ladera Ranch (Californie), on remarque la densité du lotissement.....	52
Figure 1.15 : Vue sur le Boulevard des italiens à Paris, fin XIXe siècle.....	58
Figure 1.16 : Trafic automobile sur la Place de l'Étoile à Paris.....	61
Figure 1.17 : Le <i>Plan Voisin</i> , projet pour le centre de Paris. Croquis de Le Corbusier, 1925.....	62

Figure 1.18 : Plan de Chandigarh.	63
Figure 1.19 : Projet de hiérarchisation du réseau viaire de Manhattan, par l'architecte Harvey Wiley Corbett dans <i>City of the Future</i> (1913).....	64
Figure 1.20 : Plan de Broadacre city, F. L. Wright, 1934.	66
Figure 1.21 : Plan de la Cité jardin d'Howard..	67
Figure 1.22 : Plan de la cité jardin de Welwyn en 1949..	68
Figure 1.23 : Gauche : plan du projet initial de Radburn. Droite : vue sur une des voies en culs-de-sac qui desservent les habitations.	70
Figure 1.24 : Vue aérienne sur une <i>Planned Unit Development</i> de la ville de Dublin, Ohio..	72
Figure 1.25 : Plan de masse du grand ensemble Sarcelles-Lochères.....	73
Figure 2.1 : Isochrone au départ de l'Opéra de Paris, en considérant un déplacement à pied.	89
Figure 3.1 : Schéma représentant quelques exemples de leviers permettant d'agir sur les conditions d'accessibilité offertes aux usagers dans l'espace urbain.....	114
Figure 3.2 : Rue tracée à la Renaissance dans la ville de Ferrare (Italie)..	117
Figure 3.3 : Schéma représentant le principe de hiérarchisation des voies.....	118
Figure 3.4 : Plan du projet initial de Radburn. La hiérarchie du réseau apparaît dans sa morphologie, on distingue des artères, des collecteurs et des culs-de-sac.....	118
Figure 3.5 : Les rues droites et longues n'offrent pas de points de repère selon Reynaud. Septième Avenue, Manhattan, 1935.....	119
Figure 3.6 : Les réseaux en grille sont monotones selon Laugier et Reynaud.....	120
Figure 3.7 : Max Chanowitz explique que les réseaux en grille permettent une orientation facile, en particulier pour ceux qui ne connaissent pas la ville.....	120
Figure 3.8 : Schéma représentant un réseau hiérarchisé avec des voies courbes....	121
Figure 3.9 : Gauche : Reconstitution du plan de Brive (France) avant son expansion hors-les-murs. Droite : Brive après les différents alignements et percées opérées au XIXe siècle.....	122
Figure 3.10 : Schémas illustrant l'amélioration de la perméabilité d'un réseau viaire par la réduction de la dimension des mailles.....	122
Figure 3.11 : Gharbi illustre à travers ces schémas comment Mangin propose de « rendre la ville passante », grâce à un maillage continu de voies.....	123
Figure 3.12 : Plan de Barcelone par Ildefons Cerdà, 1859.	124
Figure 3.13 : Comparaison de la portion du réseau accessible en marchant un <i>mile</i> autour d'un point donné, à gauche dans le réseau en grille de Phinney Ridge à	

Seattle, à droite dans le réseau aux voies courbes et aux culs-de-sac de Bellevue (état de Washington).....	126
Figure 3.14 : Gauche : réseau viaire en grille, droite : réseau viaire morphologiquement hiérarchisé.	127
Figure 3.15 : Schéma illustrant les propos de Chanowitz (2014)	127
Figure 3.16 : Intersections à quatre voies : il est difficile de savoir qui a la priorité.	134
Figure 3.17 : Comparaison du nombre d'intersection au km ² dans un réseau en grille (à Vancouver) et dans un réseau hiérarchisé (à Surrey).....	135
Figure 3.18 : Comparaison de la longueur du chemin entre deux points, sur un réseau en grille à gauche, et un réseau radial à droite.	141
Figure 3.19 : Schéma résumant les trois sous-objectifs, la manière de les atteindre, et le résultat attendu.	144
Figure 3.20 : Schémas représentant les trois types de réseaux sélectionnés.....	146
Figure 3.21 : Extrait du plan de la ville de Barcelone, tracé par Paul Rapin de Thoyras en 1740.....	148
Figure 3.22 : Reconstitution du plan de Brive (France) avant son expansion hors-les-murs.....	150
Figure 3.23 : Plan de Londres en 1677, tracé par John Ogilby, William Morgan, Wenceslaus Hollar, intitulé <i>The first accurate and detailed map of London</i> ,.....	150
Figure 3.24 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux organiques par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots).....	152
Figure 3.25 : Extrait du plan de Savannah en 1818, tracé par Moss Eng. Co.....	153
Figure 3.26 : Plans représentant des réseaux quadrillés classés du plus régulier au plus souple.....	154
Figure 3.27 : Schéma représentant un réseau au quadrillage souple.....	154
Figure 3.28 : Schéma illustrant l'effet « gridlock » : les véhicules en rouge à l'arrêt au niveau des intersections paralysent la circulation.....	157
Figure 3.29 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux quadrillés par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme (selon leurs mots).....	158
Figure 3.30 : Image aérienne d'une banlieue suburbaine de Colorado Springs (Etats-Unis).	159
Figure 3.31 : Réseau en boucles et raquettes (<i>loops and lollipops</i>), et raquettes sur bâton (<i>lollipops on a stick</i>).	160

Figure 3.32 : Schéma représentant quelques-unes des conditions d'accessibilité attribuées aux réseaux arborescents par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.	163
Figure 3.33 : Plan d'ensemble de la Rome de Sixte Quint, 1589, fresque de la Bibliothèque vaticane.....	164
Figure 3.34 : Plan tracé par Jean de La Grive en 1746, représentant le château, le petit parc et la ville de Versailles.....	165
Figure 3.35 : Plan de Blondel pour la ville de Strasbourg, 1765 (projet non réalisé).. ..	166
Figure 3.36 : Plan tracé par Pierre Patte, intitulé « Partie du plan général de Paris où l'on a tracé les différents emplacements qui ont été choisis pour placer la statue équestre du roi » (1765).. ..	166
Figure 3.37 : Schéma représentant les conditions d'accessibilité attribuées aux percées configurées en étoile par les théoriciens et praticiens de l'urbanisme.	169
Figure 4.1 : Deux réseaux viaires (a et b) représentés par des graphes topologiques (c et d).	178
Figure 4.2 : Deux réseaux viaires différents (gauche et milieu) représentés par le même graphe topologique (droite).....	180
Figure 4.3 : Les deux réseaux viaires (a et b) de la figure 4.2, et leur carte axiale (c et d).	181
Figure 4.4 : Conversion en graphe d'une partie du réseau de l'île de la Cité à Paris (début XIXe siècle).....	183
Figure 4.5 : Passage d'un réseau viaire à un graphe topologique, puis à un graphe topologique dual.....	184
Figure 4.6 : Passage d'un graphe géométrique primaire (gauche) à un graphe dual (droite), réseau viaire d'Ahmedabad.....	185
Figure 4.7 : Cartes axiales (c et d) et leur représentation duale (e et f).....	185
Figure 4.8 : Graphique du nombre de sommets (N) en fonction du nombre d'arêtes (E) pour un ensemble de réseaux viaires représentés par des graphes primaires..	191
Figure 4.9 : Schémas illustrant des exemples de quelques degrés fréquents dans les réseaux viaires.....	195
Figure 4.10 : Graphique représentant, pour un ensemble de 20 réseaux viaires, le degré minimal, maximal et moyen des sommets (les calculs sont faits sur un graphe primaire).....	196
Figure 4.11 : Graphe indiquant en rouge les tronçons les plus courbes du réseau..	198

Figure 4.12 : Diagramme en radar (nommé aussi rose diagram) représentant l'orientation des tronçons dans le réseau viaire d'Amiens à gauche, et dans le centre-ville d'Amiens à droite.....	199
Figure 4.13 : Histogramme (gauche) et diagramme en radar (droite) de l'orientation des tronçons, pour la ville de Blackpool en Angleterre.....	199
Figure 4.14 : Graphiques représentant la quantité de tronçon suivant chaque orientation cardinale, dans le réseau viaire de la ville de Paris en 1789, 1826, 1836 et 1888.....	200
Figure 4.15 : Distribution statistique de la longueur des tronçons dans les réseaux viaires d'Ahmedabad (en bleu), du Caire (en rouge), de Los Angeles (en vert) et de Richmond (en jaune).....	202
Figure 4.16 : Longueur totale (en km) en fonction de la racine carrée du nombre de sommets N , pour un ensemble de 10 réseaux viaires représentés par des graphes primaires.....	203
Figure 4.17 : Haut gauche : Plus court chemin métrique entre deux points (minimise la distance métrique à parcourir).....	206
Figure 4.18 : Distribution statistique de l'éloignement métrique (inverse de la centralité de proximité, $1/C_c$), des tronçons du réseau viaire londonien.	210
Figure 4.19 : Cartes représentant l'éloignement métrique des tronçons, sur les réseaux d'Ahmedabad (haut gauche), Venise (haut droit), Richmond (bas gauche) et Walnut Creek (bas droit).....	212
Figure 4.20 : Cartes représentant l'éloignement angulaire (intégration topologique des axes) dans le réseau de Sheffield à gauche, et dans celui de Barnsbury à droite.	215
Figure 4.21 : Schéma (sur le graphe primaire d'un réseau fictif) représentant en rouge la distance à vol d'oiseau qui sépare deux points du réseau, et en bleu la distance via réseau qui les sépare.	216
Figure 4.22 : Cartes de la centralité de rectitude (inverse de l'indice de détour) des tronçons sur le réseau viaire d'Ahmedabad (gauche) et de Venise (droite).	219
Figure 4.23 : Graphe d'un réseau fictif.....	221
Figure 4.24 : Gauche : Distribution de la centralité d'intermédiarité des tronçons de voies du réseau viaire de Dresden. Droite : Courbe de Lorenz de la centralité d'intermédiarité des tronçons du réseau de Dresden.	224
Figure 4.25 : Cartes de la centralité d'intermédiarité de Dresden (gauche) et Vienne (droite).	225
Figure 4.26 : Droite : carte représentant (par un code couleur) la date de création de chaque tronçon de voie. Gauche : carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons, calculée sur le graphe du réseau en 2007..	226

Figure 5.1 : Vue cavalière sur Paris, dite « plan de Braun et Hogenberg », représentant le réseau vers 1530.....	237
Figure 5.2 : Plan géométral de Paris, dit « Paris, ses fauxbourgs et ses environs où se trouve le détail des villages, châteaux, grands chemins pavez et autres, des hauteurs, bois, vignes, terres et prez, levez géométriquement ».....	237
Figure 5.3 : Schéma de synthèse sur la construction des données filaires.	241
Figure 5.4 : Filaires représentant une partie des réseaux viaires actuels de Manhattan (à gauche) et de Détroit (à droite).	243
Figure 5.5 : « Plan de la ville de Paris sous Philippe le Bel » (XIV ^e siècle), tracé par Albert Lenoir en 1837.....	248
Figure 5.6 : « Zoom » sur le quartier des Halles et l'île de la Cité, à partir du « Plan de la ville de Paris » tracé par Albert Lenoir.	249
Figure 5.7 : Plan portait de Chester en 1588, par William Smith.....	250
Figure 5.8 : Reconstitution du plan de la ville de Chester en 1645, tracé par Joseph Hemingway en 1836.....	251
Figure 5.9 : Plan d'une partie de Manhattan, montrant la grille régulière du <i>Commissioner's Plan</i> , et le quadrillage plus irrégulier au sud de l'île..	252
Figure 5.10 : Vue sur la Seconde Avenue depuis la 42 ^{ème} rue de Manhattan, en 1861.	253
Figure 5.11 : Plan de Détroit en 1891 par Appleton D. & Co.,.....	255
Figure 5.12 : Quadrillage faisant ressortir les deux orientations principales (en rouge et en bleu) observables dans le réseau viaire de Détroit.....	255
Figure 5.13 : Plans illustrant des exemples de jonction entre des parties en grille d'orientations différentes.....	256
Figure 5.14 : Plan de localisation de notre cas d'étude : le réseau viaire de la banlieue ouest du comté de Waterloo.....	257
Figure 5.15 : Vue aérienne sur le réseau viaire de la banlieue ouest de Waterloo...257	
Figure 5.16 : Zoom sur quatre quartiers de la banlieue ouest de Waterloo.....	259
Figure 5.17 : Plan de localisation du réseau viaire de la banlieue nord de Raleigh. 260	
Figure 5.18 : Image satellite de la banlieue nord de Raleigh.....	260
Figure 5.19 : Zoom sur cinq quartiers de la banlieue nord de Raleigh.....	262
Figure 5.20 : Plan des lotissements conçus entre 1790 et 1850 à Paris..	265
Figure 5.21: Plan d'ensemble d'Eugène Andriveau-Goujon (1868) des travaux de Paris, indiquant les voies exécutées et projetées de 1851 à 1868.....	267

Figure 5.22 : Haut : Photographies de l'Avenue de l'Opéra avant et après son percement. Bas: Plan illustrant le percement de l'Avenue de l'Opéra.....	268
Figure 5.23 : Deux extraits du plan actuel de Paris : au nord du Palais royal (à gauche) et autour de la place de l'Etoile (à droite).....	269
Figure 5.24 : Trois filaires représentant le réseau viaire parisien autour de la Place de la Concorde,.....	273
Figure 5.25: Filaire du réseau viaire de Paris en 1300 après nettoyage.	275
Figure 5.26 : Aperçu des données sur SIG produites par le projet <i>Mapping Medieval Chester</i>	276
Figure 5.27 : Filaire du réseau viaire de Chester en 1500 après nettoyage.....	277
Figure 5.28 : Filaire du réseau viaire de Manhattan en 1930 après nettoyage..	278
Figure 5.29 : Filaire du réseau viaire de Détroit en 1837 après nettoyage.....	279
Figure 5.30 : Filaire du réseau viaire de la banlieue de Waterloo en 2016 après nettoyage.....	280
Figure 5.31 : Filaire du réseau viaire de la banlieue de Raleigh en 1999 après nettoyage.....	281
Figure 5.32 : Aperçu de la plateforme en ligne GeoHistoricalData.....	282
Figure 5.33 : Filaires représentant le réseau viaire parisien (de gauche à droite et de haut en bas) en 1790, 1854, 1871 et 1888, après nettoyage et délimitation selon l'enceinte des Fermiers Généraux.	286
Figure 5.34 : Schéma illustrant la répartition temporelle de nos données filaires..	287
Figure 5.35 : Schéma résumant le passage des préconisations typiques aux cas d'étude empiriques qui en sont représentatifs (en rouge), puis aux données filaires sur ces cas d'étude (en orange).	289
Figure 6.1 : Schéma représentant la discrétisation de la distribution statistique de l'orientation cardinale.	298
Figure 6.2 : Histogrammes du degré des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	302
Figure 6.3 : Cartes représentant le degré des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.....	303
Figure 6.4 : Histogrammes de la courbure des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	305
Figure 6.5 : Histogrammes de l'orientation cardinale des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	306

Figure 6.6 : Cartes de l'orientation cardinale des tronçons pour les réseaux (de gauche à droite et de haut en bas) de Chester, Paris en 1300, Détroit et la banlieue de Raleigh..	308
Figure 6.7 : Histogrammes de la longueur des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.	310
Figure 6.8 : Cartes de la longueur des tronçons, discrétisée en trois classes, pour le réseau de Paris (gauche) et celui de la banlieue de Waterloo (droite).....	310
Figure 6.9 : Histogrammes de l'espacement des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.	312
Figure 6.10 : Graphiques en camembert représentant la part de chaque degré dans le réseau viaire de Paris à différentes dates.....	314
Figure 6.11 : Histogrammes du degré des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.	315
Figure 6.12 : Carte représentant les tronçons de degré 4 (en violet) du réseau viaire parisien en 1790.....	315
Figure 6.13 : Cartes représentant une partie du réseau viaire parisien en 1854 (haut) et en 1871 (bas), indiquant en bleu les tronçons de degré supérieur à 6.	316
Figure 6.14 : Histogrammes de la courbure des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.	317
Figure 6.15 : Histogrammes de l'orientation cardinale des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.....	319
Figure 6.16 : Cartes de l'orientation cardinale des tronçons du réseau viaire parisien en 1300 (gauche) et en 1790 (droite).....	320
Figure 6.17 : Carte de l'orientation des tronçons, sur une partie du réseau viaire parisien en 1871.....	321
Figure 6.18 : Histogrammes de la longueur des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2..	322
Figure 6.19 : Histogrammes de l'espacement des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2..	323
Figure 6.20 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de références des descripteurs morphologiques..	327
Figure 6.21 : Courbes représentant l'évolution des valeurs de références des descripteurs morphologiques, dans le réseau parisien entre 1790 et 1888.....	329
Figure 7.1 : Histogrammes de l'éloignement angulaire des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	343

Figure 7.2 : Cartes représentant l'éloignement angulaire des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.....	345
Figure 7.3 : Histogrammes de l'indice de détour des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	347
Figure 7.4 : Cartes représentant l'indice de détour des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.....	350
Figure 7.5 : Carte de l'indice de détour des tronçons dans la banlieue de Raleigh, faisant figurer en pointillés les quartiers mentionnés dans le texte.	351
Figure 7.6 : Carte de l'indice de détour des tronçons dans la banlieue de Waterloo, faisant figurer en pointillés le terrain de golf du quartier Westmount.....	351
Figure 7.7 : Histogrammes de la centralité d'intermédiarité des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	354
Figure 7.8 : Cartes représentant la centralité d'intermédiarité des tronçons pour les six réseaux du corpus 1.....	357
Figure 7.9 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons du réseau de la banlieue de Raleigh, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau de la banlieue de Raleigh, indiquant les routes en rouge, et les autres types de voies en bleu turquoise.....	358
Figure 7.10 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons du réseau de la banlieue de Waterloo, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau de la banlieue de Waterloo, indiquant les artères en rouge, et les autres types de voies en bleu turquoise..	358
Figure 7.11 : Histogrammes de l'éloignement métrique des tronçons, pour les six réseaux viaires du corpus 1.....	360
Figure 7.12 : Histogrammes de l'éloignement angulaire des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.....	362
Figure 7.13 : Cartes représentant l'éloignement angulaire des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2.....	363
Figure 7.14 : Histogrammes de l'indice de détour des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.....	364
Figure 7.15 : Cartes représentant l'indice de détour des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2.....	365
Figure 7.16 : Histogrammes de la centralité d'intermédiarité des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.....	367
Figure 7.17 : Cartes représentant la centralité d'intermédiarité des tronçons pour les quatre réseaux du corpus 2.....	369

Figure 7.18 : Gauche: Carte de la centralité d'intermédiarité des tronçons du réseau parisien en 1888, discrétisée en deux classes. Droite : Carte des types de voies dans le réseau viaire parisien en 1888, indiquant les boulevards (en rouge), les avenues (en violet), les quais (en marron) et les ponts (en bleu marine).....	370
Figure 7.19 : Histogrammes de l'éloignement métrique des tronçons, pour les quatre réseaux viaires du corpus 2.....	371
Figure 7.20 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de références des descripteurs d'accessibilité.....	376
Figure 7.21 : Graphiques représentant l'évolution de l'éloignement angulaire médian, de l'indice de détour médian, de l'indice de Gini de la centralité d'intermédiarité, et de l'éloignement métrique médian, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.....	378
Figure 8.1 : Nuage de points croisant efficacité globale (inverse de l'indice de détour moyen) et nombre de sommets, pour un ensemble de 41 réseaux viaires de type organique.....	385
Figure 8.2 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et coefficient de maillage.....	401
Figure 8.3 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et courbure médiane des tronçons.....	402
Figure 8.4 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et concentration de l'orientation cardinale des tronçons.....	404
Figure 8.5 : Nuage de points croisant éloignement angulaire médian et longueur médiane des tronçons.....	405
Figure 8.6 : Nuage de points croisant indice de détour médian et coefficient de maillage du réseau.....	408
Figure 8.7 : Nuage de points croisant indice de détour médian et courbure médiane des tronçons.....	409
Figure 8.8 : Nuage de points croisant indice de détour médian et concentration de l'orientation cardinale des tronçons.....	410
Figure 8.9 : Nuage de points croisant indice de Gini de la centralité d'intermédiarité et nombre de tronçons du réseau.....	413
Figure 8.10 : Centralité d'intermédiarité des tronçons dans le réseau viaire de Manhattan (à droite) et dans un réseau théorique similaire, dans lequel le quadrillage de la ville se poursuit à l'intérieur de Central Park (à gauche).....	414
Figure 8.11 : Nuage de points croisant éloignement métrique médian et espacement médian des tronçons.....	416

Figure 9.1 : Schéma représentant la relation entre les préconisations faites en urbanisme, la morphologie des réseaux viaires, leurs conditions d'accessibilité, et les comportements de mobilité des usagers.....	427
Figure A.1 : Schémas représentant les quatre modèles qui forment le « modèle à quatre étapes ».....	434
Figure B.1 : Erreur topologique : absence de raccordement entre les tronçons.....	443
Figure B.2 : Correction de la topologie d'un graphe viaire primaire.....	443
Figure B.3 : Erreur géométrique : changement de direction dû à une erreur de dessin.	443
Figure C.1 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de référence des descripteurs morphologiques.	449
Figure C.2 : Graphiques représentant l'évolution de la courbure moyenne des tronçons, de leur longueur moyenne et de leur espacement moyen, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.....	450
Figure C.3 : Nuages de points représentant deux à deux les valeurs de référence des descripteurs d'accessibilité.	450
Figure C.4 : Graphiques représentant l'évolution de l'éloignement angulaire moyen, de l'indice de détour moyen, et de l'éloignement métrique moyen, pour le réseau parisien entre 1790 et 1888.....	451

Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité

Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes

Résumé

Cette thèse vise à explorer la relation entre la morphologie des réseaux viaires et l'accessibilité qui s'offre aux individus lors de leurs déplacements dans l'espace urbain. L'accessibilité est ici définie comme un ensemble de conditions favorables aux déplacements (de faibles distances à parcourir, un faible niveau d'encombrement, ...). Cette relation fait l'objet de nombreuses connaissances tacites en urbanisme. Des morphologies viaires types ou des interventions sur des réseaux existants sont préconisées en urbanisme pour les conditions d'accessibilité qu'elles sont supposées offrir. Toutefois, les effets réels de ces morphologies et de ces interventions sur les conditions d'accessibilité sont peu évalués de manière formalisée et systématique. Pour pallier ce manque, nous choisissons d'adopter une approche quantitative basée sur la théorie des graphes. Celle-ci permet une analyse de la morphologie et des conditions d'accessibilité des réseaux au moyen de descripteurs calculés sur ces graphes, puis l'étude de la relation entre descripteurs morphologiques et descripteurs d'accessibilité.

Notre travail est exploratoire. Il porte sur un ensemble de dix cas d'étude empiriques, choisis pour être représentatifs de cas théoriques préconisés en urbanisme. Nous avons constitué deux corpus d'étude. Le premier rassemble des réseaux à la morphologie type. C'est le cas des réseaux organiques tels que celui de Paris au Moyen Age, des réseaux quadrillés tels que celui de Manhattan, et des réseaux arborescents tels que celui des banlieues suburbaines étasuniennes. Le second corpus est constitué des états successifs d'un réseau dans lequel ont été menées des interventions types, préconisées dans la littérature. En l'occurrence, il s'agit de la création de percées en étoile dans le réseau viaire de Paris au XIXe siècle.

La description quantitative des caractéristiques morphologiques et des conditions d'accessibilité, menée sur les deux corpus, révèle des spécificités de chacun des réseaux et des interventions types analysés, tant en termes de morphologie qu'en termes d'accessibilité. Nos résultats permettent également d'identifier des tendances quant au lien entre les caractéristiques morphologiques des réseaux étudiés et leurs conditions d'accessibilité. Nous montrons notamment que ces tendances sont plus marquées pour le corpus de réseaux à la morphologie type, que pour le réseau parisien à différentes dates : à Paris, de fortes variations dans les descripteurs morphologiques s'accompagnent souvent de faibles variations dans les descripteurs d'accessibilité. D'un point de vue thématique, ce résultat suggère que les grands travaux menés au XIXe siècle par Haussmann ont certes affecté la morphologie du réseau viaire, mais ont eu un faible effet sur les conditions d'accessibilité offertes par ce réseau.

Enfin, nous concluons que l'adoption d'une approche quantitative pour traiter de la relation entre la morphologie d'un réseau viaire et ses conditions d'accessibilité nécessite des allers retours, entre les savoirs et interprétations propres à l'urbanisme, et les méthodes et mesures issues d'autres disciplines, en l'occurrence de la Science des réseaux.

Mots clefs : Morphologie des réseaux viaires ; Accessibilité ; Théorie des graphes ; Théories de l'urbanisme.

Exploring the effect of street networks' morphology on their accessibility conditions

An empirical approach based on graph theory

Abstract

This thesis aims to explore the relationship between the morphology of street networks and the accessibility offered to individuals during their trips in the urban space. The accessibility is defined as a set of favourable conditions for traveling (e.g. short distances to cover, low congestion level). This relationship is the subject of much tacit knowledge in the urban design community. Typical network morphologies or typical interventions on existing networks are recommended by urban designers, for the accessibility conditions they are supposed to offer. However, the actual effects of these recommendations on accessibility conditions are little evaluated in a formalized and systematic way. To compensate for this lack, we choose to adopt a quantitative approach based on graph theory. This allows an analysis of the morphology and accessibility conditions of networks by means of descriptors calculated on graphs, and then the study of the relationship between morphological and accessibility descriptors.

Our work is exploratory. It concerns a set of ten empirical case studies, chosen for their representativity of theoretical cases recommended in urban design. We have constituted two corpuses of study. The first brings together networks with a typical morphology. This is the case of organic networks such as Paris in the Middle Ages, grid networks like Manhattan, and tree-like networks like in some american suburbs. The second corpus is made up of successive states of a network in which typical interventions, recommended in the literature, have been carried out. In this case, it concerns the creation of star-shaped breakthroughs in the street network of Paris in the 19th century.

The quantitative description of the morphological characteristics and the accessibility conditions, carried out on the two corpuses, reveals some specificities of each typical network and intervention analyzed, both in terms of morphology and

accessibility. Furthermore, our results allow us to identify trends in the relationship between the morphological characteristics of the studied networks and their accessibility conditions. In particular, we show that these trends are more marked for the corpus of networks with a typical morphology than for the Parisian network at different dates : in Paris, strong variations in morphological descriptors are often accompanied by weak variations in accessibility descriptors. From a thematic point of view, this result suggests that the major works carried out in the 19th century by Haussmann certainly affected the morphology of the street network, but had a little effect on the accessibility conditions offered by this network.

Eventually, we conclude that the adoption of a quantitative approach to deal with the relationship between the morphology of a street network and its accessibility conditions requires a back and forth movement between the knowledge and interpretations specific to urban design and the methods and measures from other disciplines, in this case network science.

Key words : Morphology of street networks ; accessibility ; graph theory ; urban design theories.