



HAL
open science

Analyse, modélisation et simulation de la morphogénèse des réseaux viaires à partir de données géohistoriques : comprendre les trames passées pour imaginer les trames futures

Hanae El Gouj

► **To cite this version:**

Hanae El Gouj. Analyse, modélisation et simulation de la morphogénèse des réseaux viaires à partir de données géohistoriques : comprendre les trames passées pour imaginer les trames futures. Géographie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. Français. NNT : 2023UBFCC034 . tel-04517447

HAL Id: tel-04517447

<https://theses.hal.science/tel-04517447>

Submitted on 22 Mar 2024

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.

**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE
PREPAREE AU LABORATOIRE ThéMA - UMR 6049**

Ecole doctorale n° 594

Ecole doctorale Sociétés, espace, pratiques, temps (SEPT)

Doctorat de Géographie et Aménagement

**Analyse, modélisation et simulation de la morphogénèse des réseaux viaires
à partir de données géohistoriques**

Comprendre les trames passées pour imaginer les trames futures

Thèse présentée et soutenue par

Hanae El Gouj

à Besançon, le 15/12/2023

Composition du Jury :

Mme, Bretagnolle, Anne
Mr, Douady, Stéphane
Mr, Fusco, Giovanni
Mme, Lagesse, Claire
Mr, Perret, Julien
Mme, Tannier, Cécile

Professeur des universités, Université Paris 1
Directeur de recherche, CNRS, Laboratoire MSC
Directeur de recherche, CNRS, Laboratoire ESPACE
Maîtresse de conférences, Université de Franche-Comté
Directeur de recherche, IGN, Laboratoire LASTIG
Directrice de Recherche, CNRS, Laboratoire ThéMA

Rapportrice
Président du jury
Examineur
Co-directrice de thèse
Rapporteur
Co-directrice de thèse

Titre : Analyse, modélisation et simulation de la morphogénèse des réseaux viaires à partir de données géohistoriques : comprendre les trames passées pour imaginer les trames futures

Mots clés : Morphogénèse - Morphologie urbaine - Réseau viaire – Données géohistoriques - Théorie des graphes – Systèmes complexes.

Résumé : La morphologie urbaine résulte d'une accumulation de processus complexes, dont les indices et les logiques peuvent être décryptés en identifiant les caractéristiques de la structure spatiale. L'organisation (complexe) de cette structure suggère la présence d'un ordre sous-jacent dans la genèse urbaine.

Dans le cadre du présent travail, la morphologie urbaine est abordée à travers une approche analytique du réseau viaire, en portant un intérêt particulier au contexte historique de sa formation et aux caractéristiques structurelles induites par son tracé physique.

Le travail de recherche se structure en trois axes. Le premier axe présente les analyses morpho-historiques (du XVII^{ème} au XXI^{ème} siècle) menées sur les réseaux viaires historiques

(informations fournies par des cartes anciennes) et contemporains (BD TOPO), des villes de Dijon, Besançon et Pontarlier. Le deuxième axe porte sur l'identification de morphotypes de voies du réseau viaire, et des processus d'évolution morphologique associés. Enfin, le troisième axe décrit la conception et le test d'un nouveau modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires, WayMorph.

Les choix d'aménagement se traduisent par des disparités d'accessibilité au territoire qui sont lisibles dans la morphologie des réseaux viaires, et qui en retour influent sur le développement territorial. Mieux comprendre les dynamiques d'évolution des réseaux viaires peut se révéler d'un grand support à l'aménagement du territoire.

Title : Analysis, modeling and simulation of road network morphogenesis based on geohistorical data: understanding past patterns to plan future cities.

Keywords : Morphogenesis - Urban morphology - Road network - Geo-historical data - Graph Theory - Complex systems.

Abstract : Urban morphology results from complex processes, the patterns and logic of which can be deciphered by identifying characteristics of the spatial structure. The complex organization of this structure suggests the presence of an underlying order in urban evolution.

In this present work, urban morphology is approached through road network analysis, with a particular interest in the historical context of its development and the structural characteristics induced by its physical layout.

Research work is structured along three axes. The first axis presents morpho-historical analyses (from the 17th to the 21st century) of the historical road networks (data provided by

historical maps) and contemporary ones (from the BD TOPO), focusing on the cities of Dijon, Besançon and Pontarlier. The second axis focuses on identifying typo-morphologies of ways within the road network and the associated morphological evolution processes. Finally, the third axis presents a new simulation model of road network morphogenesis, namely WayMorph.

Planning decisions imply disparities in territorial access that are legible in the network morphology, and affect territorial development. A better understanding of the dynamics leading the evolution of road networks is of major support to territorial planning.

Avant-propos

Ce travail s'inscrit donc dans une dynamique de recherches et de collaborations initiée depuis plusieurs années dans le cadre de l'équipe de recherche Morphocity. Cette équipe engage des discussions et des réflexions pluridisciplinaires intégrant la physique, la géographie, l'anthropologie, l'architecture et l'urbanisme. Stéphane Douady (physicien, Directeur de recherche CNRS au laboratoire MSC) et Philippe Bonnin (anthropologue, Directeur de recherche CNRS au LAVUE) sont tous deux porteurs de cette équipe de recherche. Cette thèse prolonge le travail effectué au cours de trois thèses : celle de Thomas Courtat (mathématicien, 2008-2011), qui a initié l'analyse spatiale de systèmes viaires et la simulation de croissance de réseaux au sein de l'équipe; celle de Claire Lagesse (géomaticienne, 2012-2015), qui a développé l'analyse spatiale fine, la reconstruction des voies et la création d'indicateurs morphologiques stables et pertinents ; et celle de Romain Pousse (physicien, 2016-2019), qui a simulé différentes formes de croissance de réseaux urbains théoriques.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes co-directrices de thèse, Claire Lagesse et Cécile Tannier, dont la guidance et l'accompagnement inestimables ont été essentiels tout au long de cette aventure qu'est la thèse. Le soutien de Claire Lagesse, à la fois sur le plan thématique et méthodologique était indispensable pour la réalisation de ce travail, qui est d'ailleurs en continuité directe de sa thèse. Son implication au sein de différentes équipes de recherche a constamment alimenté les discussions et les réflexions scientifiques autour de ce travail. Parallèlement, les échanges continus avec Cécile Tannier ont enrichi ce travail de manière très significative, en particulier en ce qui concerne l'aspect modélisation de ce travail de recherche. Je lui suis extrêmement reconnaissante pour son accompagnement méticuleux dans la construction de ce manuscrit, ainsi que pour les discussions qui ont joué un rôle déterminant dans son achèvement.

Je remercie Anne Bretagnolle et Julien Perret d'avoir accepté d'être rapporteurs ainsi que Giovanni Fusco et Stéphane Douady de leur présence dans le jury.

Je souhaite remercier également les membres des comités de thèse, Samuel Carpentier-Postel et Didier Josselin, pour leurs conseils avisés.

Le chemin qui m'a amené à mener cette thèse n'aurait pas été possible sans les personnes qui ont joué un rôle clé dans ma formation universitaire. Je remercie Mourad AKKI pour m'avoir initié à l'urbanisme durant ma licence à l'École nationale d'architecture de Fès. Cette influence m'a permis d'appréhender des échelles au-delà de celle du bâti. Je remercie Gaëtan Desmarais et Denis Bocquet pour leur contribution pour ma formation à la recherche à l'INSA de Strasbourg. Je remercie également Denis Martouzet, pour m'avoir initié à ce qu'est vraiment la recherche durant mon stage au sein du laboratoire CITERES, marquant ainsi mes premiers pas vers l'idée de poursuivre une thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement toute l'équipe du projet ANR COMMUNES, avec qui j'ai pu collaborer depuis ma deuxième année de thèse. Je remercie plus particulièrement Alexis Litvine et Thomas Thévenin pour les discussions enrichissantes autour de l'acquisition des données géohistoriques. L'expérience au sein de cette équipe, en parallèle à la poursuite de cette thèse, a fait des difficultés inhérentes à la situation une véritable opportunité d'épanouissement sur le plan scientifique et humain.

Je remercie l'ensemble des membres du laboratoire ThéMA pour l'environnement bienveillant régnant. Je souhaite particulièrement Gilles Vuidel pour sa collaboration pour le développement informatique du modèle, son assistance technique dans la gestion de la base de données et sa rapidité impressionnante. Je remercie Jérôme pour sa réactivité et son efficacité à résoudre nos problèmes techniques. Merci aussi à Pauline pour son accompagnement pour la recherche et la gestion bibliographique.

Un grand merci aux doctorants de l'axe MVT, Julia-Pearl, Julien, Marion et Maud, pour nos échanges et discussions scientifiques, ainsi que pour leur amitié et leur soutien moral. Mes remerciements vont également à Baptiste et Sindy.

Merci à mes amis de longue date, malgré la distance qui nous sépare : Chaymae, Ikrame, Maha, Michkate et Samahe. Un merci spécial à Amal qui m'a apporté un sentiment de réconfort lorsque je me suis sentie seule à certains moments et qui m'a soutenue durant la dernière ligne droite de cette thèse. Je remercie toute personne qui a contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui, ce qui m'a permis de trouver la confiance et la force nécessaires, même lorsque cela ne semblait pas évident et que je ne pensais pas en avoir.

Enfin, mais avant tout, je remercie ma famille. Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers mes parents qui m'ont toujours soutenu jusqu'au bout.

Cette thèse, je la dédie à vous deux...

Sommaire

Avant-propos.....	1
Remerciements.....	3
Sommaire	7
Introduction générale	13
Un contexte scientifique interdisciplinaire	13
Etudes de l'évolution morpho-historique de réseaux viaires : deux grands courants.....	19
Notre approche morpho-historique des réseaux viaires.....	21
Structure du manuscrit.....	24

Première partie : Analyses morpho-historiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier

Introduction de la partie 1	29
Chapitre 1 - Concepts, données et méthodes.....	31
1.1 Concepts et méthodes à la base de l'étude morphologique de réseaux viaires	32
1.2 Données viaires géohistoriques	47
1.3 Méthodes choisies pour l'étude morpho-historique des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier	56
1.4 Synthèse du chapitre 1	75
Chapitre 2 - Analyses morphologiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier à différentes dates.....	79
2.1 Illustration des apports de chaque indicateur pour l'analyse de réseaux viaires anciens	80
2.2 Analyses des réseaux viaires contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier	95
2.3 Synthèse du chapitre 2	124
Chapitre 3 - Analyses diachroniques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier entre le 17 ^{ème} et le 21 ^{ème} siècle.....	125
3.1 Suivi des évolutions à l'échelle de chaque voie.....	126
3.2 Suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau viaire.....	152
3.3 Permanences et changements des structures viaires dans le temps	165
3.4 Synthèse du chapitre 3	177
Chapitre 4 - Propriétés structurelles des réseaux viaires invariantes dans l'espace et le temps.....	179
4.1 Propriétés structurelles étudiées	180

4.2	Propriétés structurelles des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier	185
4.3	Synthèse du chapitre 4	215
	Conclusion de la partie 1	217

Deuxième partie : Approche-typo-morphologique des réseaux viaires urbains

	Introduction de la partie 2	221
	Chapitre 5 -Typo-morphologies urbaines : aperçu des méthodes et principaux résultats	223
5.1	Typo-morphologies de formes de villes	225
5.2	Typo-morphologies de trames viaires	231
5.3	Synthèse du chapitre 5	245
	Chapitre 6 - Identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution associés	247
6.1	Identification de motifs viaires à partir du croisement d'indicateurs deux à deux	249
6.2	Une typo-morphologie des voies en huit classes.....	258
6.3	Confrontation de la typo-morphologie aux résultats d'une classification ascendante hiérarchique.....	272
6.4	Synthèse du chapitre 6	284
	Conclusion de la partie 2	285

Troisième partie : Simulation de la morphogénèse des réseaux viaires

	Introduction de la partie 3	289
	Chapitre 7 - Un aperçu des expériences de simulation de la morphogénèse viaire	291
7.1	Modèles origine-destination	293
7.2	Modèles de reproduction et de complétion de textures (motifs, patterns)	297
7.3	Modèles de génération de tissus urbains	303
7.4	Modèles topologiques et morphologiques à base de graphes	314
7.5	Synthèse du chapitre 7	329
	Chapitre 8 - Proposition d'un modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph	333
8.1	Cadres méthodologique, conceptuel, et heuristique.....	335
8.2	Le modèle de Courtat (2012) comme socle de réflexion	336
8.3	Proposition d'un nouveau modèle de morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph.	357
8.4	Récapitulatif des variables et paramètres du modèle WayMorph	367

8.5	Paramétrage initial du modèle WayMorph.....	372
8.6	Synthèse du chapitre 8	378
Chapitre 9 - Evaluation, calibrage et validation du modèle WayMorph		379
9.1	Evaluation du modèle.....	381
9.2	Calibrage et validation empirique du modèle	430
9.3	Synthèse de chapitre 9	457
Chapitre 10 -Simulation des réseaux viaires de différentes formes de villes		459
10.1	Simulation de formes de villes simples.....	460
10.2	Simulation de formes de villes plus complexes	499
10.3	Synthèse du chapitre 10	540
Conclusion de la partie 3		541
Conclusion générale.....		543
	Discussion	543
	Perspectives.....	545
	Ouverture	549
Bibliographie		551
Liste des figures		585
Liste des tableaux		607
Liste des annexes.....		609
Annexes.....		611
Table des matières.....		689

Introduction générale

Introduction générale

Cette thèse porte sur l'analyse, la modélisation et la simulation de la morphogénèse de réseaux viaires dans un contexte urbain. Dans l'introduction de ce travail de recherche, nous commencerons par présenter le contexte scientifique dans lequel notre travail s'inscrit. L'approche adoptée est interdisciplinaire et trouve ses racines aussi bien dans la morphologie urbaine et la théorie des graphes que dans la théorie des systèmes complexes. Mettre en contexte la thèse par rapport aux différents domaines scientifiques dont elle relève permettra de comprendre les questions de recherche abordées et de définir les objectifs et les hypothèses de la recherche.

Un contexte scientifique interdisciplinaire

La ville : un système complexe en perpétuelle évolution

L'INSEE¹ définit les unités urbaines par deux propriétés : une variable spatiale liée à la continuité du bâti et une variable statistique basée sur un nombre d'habitants minimal (2000 habitants). La pertinence de ces critères de définition a été largement remise en question dans la littérature scientifique (Baumont et al., 1996; Choay, 1994; Pumain & Robic, 1996). Quant au seuil du nombre d'habitants, il peut être considérablement différent d'un pays à l'autre (par exemple 10 000 habitants en Espagne). En outre, les villes présentent une grande diversité en raison de l'hétérogénéité de leurs composantes, leurs interactions et les grandes disparités de leur organisation spatiale.

La ville est un objet à la fois social et spatial, constitué d'un ensemble d'entités en interaction. Ces entités sont souvent très hétérogènes et reliées par plusieurs relations, le tout faisant système. Il s'agit d'un système complexe composé de personnes, de réseaux sociaux et physiques, qui accueillent ces personnes et leurs activités. La façon dont les villes occupent et/ou structurent l'espace, façonne les interactions entre toutes ces entités, permettant de créer une vie sociale, économique et matérielle. Les villes se développent et évoluent perpétuellement sous l'effet de nombreux changements incrémentaux, menés par une multitude d'agents au fil du temps. Les nouvelles formes spatiales qui apparaissent reflètent l'évolution des organisations et les pratiques sociales, économiques et politiques.

¹ Institut National de la Statistique et des Études Économiques

Le rapport de la banque mondiale en 2020 précise : « *Aujourd'hui, 55 % de la population mondiale, soit 4,2 milliards d'habitants, vivent en ville. Cette tendance devrait se poursuivre : d'ici 2050, le nombre actuel de citadins devrait doubler, et pratiquement 7 personnes sur 10 dans le monde vivront en milieu urbain* »². Cette mondialisation de l'urbain s'accompagne de nombreux défis, en termes d'accroissement de la demande de logements, de réseaux, de services et d'emplois. Il serait notamment nécessaire de construire de nombreuses infrastructures supplémentaires pour répondre aux besoins de cette population mondiale. L'évolution des villes est donc au cœur des grandes préoccupations contemporaines.

Comment les villes vont évoluer est une question ouverte. Et la maîtrise de leur développement - pour éviter une expansion urbaine intenable - est un enjeu primordial de l'aménagement du territoire. Afin de mieux planifier les villes, il est indispensable de comprendre comment la forme physique d'une ville et les modes d'occupation du territoire se conjuguent pour entraîner leur croissance ou leur déclin, impactant l'avenir de plusieurs générations. La compréhension de la genèse de la ville et de son évolution passée est un préalable important pour apporter des réponses adaptées aux défis de son développement futur, notamment en termes d'aide à la décision pour les acteurs politiques de la ville (Batty, 2013). L'apport scientifique dans la planification urbaine prospective (Ramalho & Hobbs, 2012; Turner et al., 2007) est aujourd'hui plus important que jamais.

En raison de leur complexité, les villes sont toutefois un objet d'étude difficile à appréhender dans sa globalité. « *Les villes sont des entités complexes et demandent pour être analysées correctement le recours à une science du complexe* » (Jacobs, 1993). L'analyse de la ville est ainsi menée par des chercheurs de différentes disciplines (géographes, physiciens, historiens, architectes, etc.). Des réseaux de recherche internationaux et pluridisciplinaires se structurent autour des questions urbaines. Des approches complémentaires sont développées et explorées, chacune se concentrant sur l'analyse d'un sous-ensemble spécifique d'aspects pour comprendre l'organisation des villes et leur évolution.

² www.banquemonde.org. Rapport consulté en 2020.

La morphologie urbaine en tant que domaine de recherche

La morphologie urbaine en tant que domaine de recherche a émergé d'abord dans la sphère de l'architecture et de l'urbanisme à partir de la fin des années 1950. Au cours des années qui ont suivi, ce domaine a fait l'objet de renouvellements conceptuels et méthodologiques conséquents.

Les premières recherches ont été menées en Italie par S. Muratori à l'école d'architecture de Venise (aujourd'hui IUAV – Istituto Universitario Architettura Venezia), puis à celle de Rome (La Sapienza). Ce qui a donné naissance à l'école italienne de morphologie urbaine qui était en opposition au mouvement moderne de l'urbanisme fonctionnel des CIAM (Congrès International d'Architecture Moderne). La diffusion des travaux italiens sur la morphologie urbaine (Caniggia, 1963; Rossi, 1966) a ouvert la voie à l'enracinement des études morphologiques en Europe et a donné naissance à l'école italienne, française, anglaise de morphologie urbaine, et à l'expansion de leur influence en Amérique du Nord.

L'approche morphologique de l'école italienne est centrée sur la dimension historique et considère la ville comme un lieu de mémoire collective, chargé de valeurs symboliques (Rossi, 1966). « *L'approche morphologique est un historicisme absolu, selon lequel la réalité est histoire et se conçoit comme un processus d'auto-formation : le passé explique le présent et le présent contient l'avenir* » (Gerosa, 1992). La dimension spatiale repose sur la notion d'échelle introduit par G. Caniggia (1963) avec une catégorisation des entités urbaines en quatre niveaux d'échelles hiérarchisés : l'édifice, le quartier, la ville et le territoire.

L'école française émerge vers la fin des années 1960 avec des travaux de recherche menés au sein de l'École d'architecture de Versailles (Castex & Panerai, 1970; Panerai et al., 1997), qui adoptent et développent les concepts italiens de morphologie urbaine. La dimension historique est moins ancrée dans l'approche morphologique de l'école française tandis que la dimension spatiale est centrée sur le parcellaire. Le tissu urbain est perçu comme résultant de l'interaction entre le parcellaire, le réseau viaire et les bâtiments. Les chercheurs mettent davantage l'accent sur la proposition de méthodes applicables à des projets urbains plutôt que sur des réflexions théoriques (Mangin & Panerai, 1999; Panerai et al., 1999). Ils associent les dimensions physique et fonctionnelle de la ville (Novarina & Trotta-Brambilla, 2018).

L'école anglaise de morphologie urbaine s'est développée à partir de travaux fondateurs sur l'évolution des villes qui se focalisent sur l'analyse de la forme de l'environnement urbain (Conzen, 1960; Ravetz, 1974). La dimension historique et la dimension spatiale de la ville sont

associées. La dimension spatiale porte sur la décomposition du tissu urbain en quatre systèmes : le système parcellaire, le système viaire, le système bâti et le système des espaces libres. La dimension historique concerne la durée de vie et la persistance et l'évolution des éléments de ces systèmes. Quatre processus ont été identifiés pour appréhender l'évolution des formes urbaines : (1) "L'accumulation", désignant l'introduction de nouvelles formes dans les tissus urbains existants. (2) "L'adaptation", qui décrit comment les formes urbaines évoluent au fil du temps. (3) "La transformation", qui décrit les modifications intentionnelles (planifiées) des formes urbaines. (4) "Le remplacement", qui implique la substitution intégrale des anciennes formes par de nouvelles. March et Steadman (March, 1976; March & Martin, 1972; March & Steadman, 1971; Steadman, 1983) ont proposé une description mathématique de ces processus.

Merlin et Choay (1988) définissent la morphologie urbaine, en tant que domaine scientifique interdisciplinaire, comme une science de la forme physique de la ville et de la constitution progressive de son tissu. Pour eux, l'objet d'analyse relève à la fois de la forme physique des implantations humaines et du fonctionnement des hommes (individus, groupes) dans leur(s) territoire(s), dans l'objectif de décrypter l'ordre sous-jacent de la forme des villes.

Dans les années 90, les débats scientifiques³ évoquaient toujours un certain nombre d'ambiguïtés concernant la définition des structures urbaines et de leur évolution. Malgré les divergences dans les méthodes et les objectifs adoptés, les chercheurs se sont accordés sur le fait que l'analyse de la structure urbaine suppose de définir une représentation spatiale du système morphologique urbain. Ce dernier peut être décomposé, de manière simplifiée, en trois éléments fondamentaux : le parcellaire, le réseau de voirie et le bâti (Moudon, 1997). Les relations entre ces éléments sont à l'œuvre dans la constitution des tissus urbains, leurs modifications et leurs évolutions (Kropf, 2018).

³ La communauté scientifique autour de la morphologie urbaine a été réunie en 1996 lors du premier Séminaire Internationale de la Forme Urbaine (SIFU – ou ISUF, International Seminar on Urban Form).

Le réseau viaire comme objet d'étude

Parmi les trois entités morphologiques qui composent la ville (le bâti, les parcelles et le réseau viaire), le tracé des rues est celui le plus pérenne au cours du temps (Fleury, 2004; Garden, 2006; Gourdon, 2002). La trame urbaine combine en effet permanences (tracé des rues, patrimoine) et changements (parcelle par parcelle, bâtiment par bâtiment). Les cycles de vie respectifs de ces composantes sont très différents. Le réseau de voirie, étant le plus pérenne, est une entité morphologique durable et fondatrice de cette trame urbaine (Marshall, 2005; Southworth & Ben-Joseph, 2013). Lorsque les bâtiments sont détruits et reconstruits, ou lorsque les parcelles sont divisées ou fusionnées, les réseaux de rues perdurent quant à eux dans le territoire et ne subissent souvent que des modifications mineures (Lagesse, 2015). Les principales modifications du réseau viaire ont lieu à la périphérie des villes ou dans les espaces entre les villes, sous la forme d'ajouts ou, plus rarement, de suppression de segments de rues ou de routes. Au sein même des villes, les modifications importantes du réseau viaire sont rares. Lorsqu'elles existent, elles ont souvent le résultat de grands projets de restructuration urbaine, à l'image des percements parisiens de Haussmann ou du plan Cerdà à Barcelone au XIXe siècle (Hachi & Lagesse, 2017). Notons également que la configuration du réseau viaire est considérée comme étant résiliente face à la perturbation (Fusco, 2020). Lorsque se produit une catastrophe naturelle à l'instar du tsunami qui ravagea une partie du Japon en 2011, le premier élément à être reconstruit est ce réseau routier, et il l'est le plus souvent à l'identique (Miyake, 2021). Le réseau de routes et de rues d'un territoire est étroitement lié au fonctionnement de celui-ci, à travers les accessibilités qu'il induit (Tannier, 2020). Le réseau de voirie apparaît donc comme une entité urbaine particulièrement révélatrice de l'organisation spatiale des villes (Gourdon, 2020 ; Lagesse, 2015).

L'analyse de la ville à travers ses réseaux, et plus particulièrement son réseau de voirie, a été largement abordée dans la littérature scientifique. La théorie des graphes permet une formalisation mathématique des réseaux viaires au moyen de graphes spatiaux. Cette modélisation présente un grand potentiel pour une meilleure compréhension de l'organisation spatiale des territoires. Les travaux de recherche autour des graphes spatiaux ont connu un essor significatif vers les années 1960. L'une des recherches les plus célèbres dans

ce domaine est le problème des Ponts de Königsberg⁴, qui remonte à 1735 (Euler, 1953). L'application de la théorie des graphes à des réseaux spatiaux a débuté par des travaux sur le réseau autoroutier (Garrison, 1960), les réseaux de transports (Kansky, 1963), et les voies rapides (Taylor et al., 1995). Garrison et Marble (1962) ont introduit la théorie des graphes dans l'étude des réseaux de transport en géographie et en science régionale (Lowe & Moryadas, 1975). Néanmoins ces travaux étaient contraints par les limitations en termes de quantité de données, de techniques de modélisation, et de capacités informatiques de l'époque (Garrison & Marble, 1962; Haggett & Chorley, 1969).

Les premiers travaux de la syntaxe spatiale (Hillier & Hanson, 1989; Peponis et al., 1983) ont initié une nouvelle méthodologie de représentation et d'analyse de l'espace par un graphe spatial à travers l'application des théories des graphes au cas particulier du réseau viaire urbain. Une communauté scientifique s'est progressivement constituée depuis une cinquantaine d'années autour de ces travaux fondateurs.

Durant les dernières décennies, des contributions significatives de la théorie des réseaux complexes (un domaine spécifique de la recherche en physique lié aux systèmes complexes) ont porté sur la caractérisation quantitative des modèles de rues urbaines (Barthelemy, 2011).

Durant plusieurs années, ces deux approches du réseau viaire (d'une part, la morphologie urbaine et la syntaxe spatiale, et d'autre part, l'analyse de graphes spatiaux et la théorie des réseaux complexes) ont été principalement développées séparément. Plus récemment toutefois, plusieurs études ont associé ces approches pour mettre en évidence le rôle fondamental de la structure des réseaux viaires dans l'organisation spatiale des villes (Badaritti et al., 2007; Hamaina et al., 2012; Jiang & Claramunt, 2004; Lagesse, 2015; Marshall, 2005) et dans leur fonctionnement (Araldi, 2019; Foltête, 2007; Genre-Grandpierre et al., 2015; Lee et al., 2023; Li et al., 2021; Mehmood et al., 2021; Nes & Zhaohui, 2009; Peponis et al., 2007; Tang et al., 2013), et dans leur évolution sur le long terme (Barthelemy, 2015; Bettencourt et al., 2007; Porta et al., 2014; Strano et al., 2012).

⁴ Le problème des Ponts de Königsberg consistait à déterminer s'il était possible de traverser chacun des 7 ponts de la ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad, en Russie) une seule fois, en commençant et en finissant à un même endroit, sans revenir en arrière. Euler a démontré que c'était impossible, ce qui a jeté les bases de la théorie des graphes et a eu des implications significatives dans divers domaines des mathématiques et de la science.

Études de l'évolution morpho-historique de réseaux viaires : deux grands courants

Approches par graphes en syntaxe spatiale

A partir des années 80, des travaux se basant sur la morphologie urbaine ont abouti au développement de la syntaxe spatiale (Hillier & Leaman, 1972). La syntaxe spatiale souligne l'importance d'analyser la forme urbaine avec des critères scientifiques pour assurer sa compréhension, en vue d'une pratique normative et rigoureuse de la planification urbaine (Hillier, 1987).

Les premières recherches portant spécifiquement sur l'évolution morphologique des réseaux viaires à travers l'application des théories des graphes ont émergé dans le domaine de la syntaxe spatiale (Azimzadeh & Klarquist, 2001; Karimi & Motamed, 2003; Kubat, 1999). Ces études ont adopté une représentation du réseau au moyen de cartes axiales (voir chapitre 1, sous-section 1.1.2.1) et ont examiné les propriétés des réseaux en utilisant des indicateurs quantitatifs (voir chapitre 1, sous-section 1.1.3.2). La plupart des études se sont focalisées sur des villes spécifiques en considérant différentes dates. Par exemple, Kubat (1999) a analysé l'évolution d'Istanbul (Turquie) à 3 dates (1840, 1922 et 1964), Karimi et Motamed, (2003) ont étudié Ispahan (Iran) pendant la période safavide (16^{ème} et 17^{ème} siècles) et en 2002. Griffiths (2009) a examiné les persistances et changements dans la structure viaire de Sheffield Royaume-Uni, en 1750 et 1905. Ces travaux ont abordé les changements de la forme urbaine à partir d'une analyse comparative de la structure syntaxique du réseau viaire d'une période historique à l'autre, sans aborder les mécanismes sous-jacents à son évolution. D'autres études se sont focalisées sur des ensembles régionaux. Par exemple Shpuza (2009) a étudié à 3 dates le réseau viaire d'un ensemble de 23 villes côtières de la Mer Adriatique et la côte Est de la Mer Ionienne, dans l'objectif d'identifier des principes génériques communs de l'évolution urbaine dans un vaste ensemble régional.

Durant la dernière décennie, d'autres chercheurs ont exploré le lien entre les transformations de différentes dimensions de l'urbain (fonctionnelles, sociales et économiques) et l'évolution des réseaux viaires avec une approche de syntaxe spatiale. Griffiths et al. (2013) ont analysé le déclin des rues commerçantes dans deux banlieues de l'agglomération londonienne à partir d'une analyse du réseau viaire, associée à des données historiques l'utilisation des sols à 4 dates (1869, 1915, 1956 et 2013). Psarra et al. (2013) ont analysé le cas du Détroit industriel

et post-industriel, avec une analyse du réseau de rues et de ses dimensions sociales et économiques de 1796 à 2013. Vaughan et al. (2013) ont utilisé des cartes historiques numérisées, des données historiques et contemporaines sur l'utilisation des sols ainsi qu'une analyse de la syntaxe spatiale afin d'identifier les paramètres historiques et morphologiques du changement et de la continuité dans le réseau de rues de la banlieue londonienne entre 1880 et 2013. Une équipe de recherche affiliée au "University College London" poursuit ces travaux de recherche sur l'évolution du réseau viaire avec une approche de syntaxe spatiale. Les premiers travaux se concentrent sur l'analyse (Al Sayed, 2013; Al Sayed et al., 2009, 2010, 2012; Al Sayed & Penn, 2016), tandis que des recherches plus récentes sont davantage axées sur la modélisation et la simulation de cette évolution (Al Sayed et al., 2022; Al Sayed & Penn, 2017; Penn & Al Sayed, 2017). Ces travaux concernent particulièrement sur les villes de Barcelone (Espagne) à 11 dates (de 1260 à 2008) et Manhattan (Etats-Unis) à 16 dates (de 1642 à 2008).

Approches par graphes en physique et en géographie

Au cours des deux dernières décennies, les études de l'évolution morphologique des réseaux viaires se sont répandues, en raison de la disponibilité croissante de données détaillées et de l'essor des outils informatiques. Les professionnels de l'architecture, de l'urbanisme et de l'aménagement intègrent désormais des analyses menées en collaboration avec des chercheurs en géographie quantitative et en physique théorique, afin de comprendre et décrire comment la forme des réseaux évolue en réponse aux diverses transformations urbaines. La grande majorité de ces travaux se basent sur une représentation du réseau viaire par un graphe composé de nœuds et de liens.

Les premiers travaux adoptant la théorie des systèmes complexes et la théorie des graphes pour l'analyse des réseaux viaires ont émergé à partir des années 2000. Ces travaux ont apporté des contributions importantes à la caractérisation quantitative de la structure de ces réseaux en se concentrant sur leur topologie (Buhl et al., 2006; Cardillo et al., 2006; Crucitti et al., 2006; Lämmer et al., 2006; Omer & Jiang, 2008; Porta et al., 2006c).

Dans les années 2010, les analyses quantitatives de l'évolution historique du réseau viaire dans les contextes urbains étaient encore limitées, à l'exception de quelques travaux pionniers centrés sur les grandes villes européennes : Paris (France) à 6 dates (de 1789 à 2010), avec les recherches menées par Barthelemy et al. (2013), Londres (Angleterre) à 9 dates (de 1786 à 2010), avec les travaux de Masucci et al. (2013 et 2014), ainsi que Milan (Italie) dont l'évolution

du réseau a été analysée à 7 dates (de 1833 à 2007), par Strano et al. (2012). Au cours des cinq dernières années, l'intérêt scientifique pour l'étude des réseaux viaires n'a cessé de progresser. D'autres travaux ont étudié l'évolution historique de réseaux viaires de villes de différentes tailles à savoir, Porto (Portugal) à quatre dates (de 1951 à 2011) (Serra et al., 2017), Changchun (Chine) à douze dates (de 1912 à 2017) (S. Wang et al., 2019), Zurich (Suisse) à neuf dates (de 1955 à 2012) (Casali & Heinimann, 2019), Manille (Philippines) à cinq dates (de 1875 à 2021) (Cirunay & Batac, 2023).

Certains chercheurs ont axé leurs travaux sur la relation entre la morphologie du réseau viaire et les dynamiques d'évolution à l'échelle de la ville, à savoir l'expansion (Strano et al., 2012), la densification (Barthelemy et al., 2013), la dispersion et l'étalement (Gudmundsson & Mohajeri, 2013). D'autres chercheurs ont centré leur attention sur la relation entre l'évolution des propriétés du réseau viaire et les limites de la ville (Masucci, Stanilov, et al., 2013; Masucci et al., 2015). D'autres encore se sont focalisés sur l'impact des transformations urbaines sur la morphologie des réseaux de rues à une échelle intermédiaire (Hachi & Lagesse, 2017).

Notre approche morpho-historique des réseaux viaires

Objectifs et hypothèses de recherche

Les recherches dans le domaine de la morphologie urbaine, et en particulier celles menées en syntaxe spatiale (Cardillo et al., 2006; Hillier et al., 1976; Jiang & Claramunt, 2004), ont montré que la géométrie des rues, en particulier leur alignement, est un élément essentiel de l'organisation et du fonctionnement d'une ville. En parallèle, l'analyse des réseaux viaires à partir de la théorie des graphes établit un lien entre la topologie du réseau (façon dont sont reliés ses éléments entre eux) et certaines caractéristiques structurelles et fonctionnelles des villes (Crucitti et al., 2006; Hamaina et al., 2012; Lagesse et al., 2016; Porta et al., 2006b). Ces études suggèrent que les caractéristiques morphologiques du réseau viaire peuvent révéler des informations importantes sur l'ordre sous-jacent de la ville et sur les processus gouvernant son évolution.

Dans la continuité de ces travaux, ce travail de recherche se focalise sur les caractéristiques morphologiques à travers l'analyse de la forme, de la topologie et de l'inscription spatiale du réseau viaire. La question générale qui est posée est la suivante : **quelles informations pouvons-nous obtenir sur une ville à partir de l'analyse fine de son réseau viaire au cours du temps ?** Ce travail de recherche a donc pour premier objectif de mieux comprendre la

structuration progressive de la trame urbaine, à travers l'analyse statique de son réseau viaire ainsi que l'analyse de l'évolution de ce dernier au cours du temps. Pour cela, nous prenons trois cas d'étude, les agglomérations de Dijon (département de la Côte d'Or), Besançon et Pontarlier (département du Doubs), que nous analyserons à partir de données géohistoriques vectorisées à partir de cartes anciennes (du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle) et des données obtenues via la BD TOPO⁵ de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) pour les périodes contemporaines.

La première hypothèse de cette recherche est que la forme du réseau viaire, qui traverse les époques sans subir de modification majeure dans sa structure existante, peut être révélatrice de l'organisation et de la croissance passée d'un territoire.

Le deuxième objectif est de proposer une approche analytique permettant une lecture fine de la morphogenèse des réseaux viaires des villes étudiées, et qui peut être appliquée à tout territoire, dès lors que des données viaires sont disponibles.

L'étude des caractéristiques des réseaux viaires suggère l'existence de certaines propriétés communes. Par exemple la distribution statistique de la longueur des segments de rue, calculée sur un large échantillon de villes (Lämmer et al., 2006), suit une loi log-normale, que ce soit pour Paris ou l'île de Manhattan qui ont pourtant des histoires de construction et des formes bien différentes (Lagesse, 2015). Cela nous amène à formuler une deuxième question de recherche : **quelles sont les propriétés structurelles des réseaux viaires qui peuvent être déduites des analyses morpho-historiques ?**

La deuxième hypothèse est qu'il est possible d'identifier certaines propriétés structurelles universelles des réseaux viaires indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction.

D'un point de vue urbanistique, la morphologie du réseau de rues est une traduction de l'histoire urbaine à travers ses processus de naissance, croissance, transformation et évolution (Courtat et al., 2011c; Samaniego & Moses, 2008; Strano et al., 2012). L'étude de la manière particulière dont le réseau s'est développé et a été préservé dans le temps permet de comprendre les mécanismes gouvernant la formation et l'évolution de la forme urbaine.

⁵ BDTOPO 2019. www.geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/bdtopo

Toutefois, les preuves empiriques des mécanismes de base qui régissent l'évolution des réseaux au cours du temps sont encore peu nombreuses et leur modélisation en est à ses premiers pas. C'est pourquoi l'analyse et la modélisation de la morphogénèse du réseau viaire constitue le cœur de ce présent travail. La troisième question de recherche se pose donc ainsi : **quelles sont les processus d'évolution des réseaux viaires et comment les modéliser ?**

Le troisième objectif est de concevoir un modèle de morphogénèse capable d'incorporer ces processus d'évolution par des mécanismes génératifs. L'idée est de partir de modèles existants, retranscrivant la croissance des réseaux viaires, de les enrichir et de modéliser, sous la forme de règles morphologiques et topologiques simples, les processus évolutifs mis en évidence lors des analyses morpho-historiques menées précédemment. Ce modèle de morphogénèse doit être conçu avec un nombre réduit de paramètres ajustables et doit être facilement applicable à tout territoire pour lequel nous disposons des données viaires adéquates.

La troisième hypothèse est qu'il est possible de reproduire par simulation les différents processus d'évolution du réseau viaire à partir de règles morphologiques et topologiques simples.

Mieux comprendre les transformations morphologiques passées aidera les différents acteurs de la planification territoriale à imaginer les réseaux viaires du futur.

Terrains d'étude

Les villes de Dijon (département de la Côte d'Or), Besançon et Pontarlier (département du Doubs) sont toutes trois situées dans la région Bourgogne Franche-Comté. Ce territoire régional est caractérisé par la diversité des villes qu'il comporte et les différentes formes de polarisation qu'elles présentent. Les trois villes ont été choisies en tenant compte de leurs différences en termes de population, de contextes locaux et de structures urbaines.

Les villes de Dijon, avec environ 160 000 habitants, et Besançon, avec environ 120 000 habitants, sont les plus grands centres urbains de la région, concentrent de nombreux services de niveau régional et sont entourées de communes très rurales. L'agglomération urbaine de Pontarlier possède, elle, environ 30 000 habitants. C'est une zone frontalière qui polarise de nombreux échanges avec la Suisse (travail, achats), possède une forte activité agricole et un tourisme axé sur les activités de pleine nature. Ces trois agglomérations urbaines ont des

dynamiques de construction très différentes ce qui suppose des logiques de croissance également différentes, a priori transcrites dans la forme de leurs réseaux viaires. Elles sont liées par leur proximité spatiale, via le réseau routier régional, ainsi que par des flux de déplacements importants entre elles (domicile-travail, domicile-loisir).

En termes de topographie, le territoire de l'agglomération de Dijon est caractérisé par une relative platitude. L'agglomération de Besançon est marquée par un centre-ville dans une boucle de la rivière Doubs, entourée par des collines au Sud-Ouest et au Nord-Est. Le site est dominé par la Citadelle, située sur une colline au Sud. La topographie de l'agglomération de Pontarlier est quant à elle montagneuse en raison de sa proximité avec le massif du Jura.

Le choix de ces terrains d'étude a aussi été motivé par une raison d'ordre pratique liée à l'acquisition des données. En effet, ce travail de thèse s'adosse à un projet de recherche financé par la région Bourgogne Franche-Comté (BFC) : COVADEO⁶ (2019-2021 – direction : C. Lagesse). Dans le cadre de ce projet, des cartes historiques de la région BFC (du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle) ont été collectées et numérisées. Une sélection de ces cartes sources a été utilisée comme support pour la vectorisation des données relatives aux réseaux anciens étudiés dans le cadre de ce travail de recherche.

Structure du manuscrit

La thèse est organisée en trois parties (Figure 0.1).

La première partie présente l'ensemble des analyses morpho-historiques menées sur les réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier. Dans le chapitre 1, nous présentons un état de l'art des concepts et méthodes élaborés dans le domaine de l'analyse morphologique des réseaux viaires. Ensuite, nous abordons la question de l'acquisition des données géohistoriques mobilisées pour les analyses. Enfin, nous détaillons les méthodes choisies pour l'étude morpho-historique des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier. Le chapitre 2

⁶ Ce projet propose le développement d'une plateforme web permettant la saisie collaborative de données géohistoriques à partir de cartes anciennes numérisées. Cette plateforme est dédiée à l'alimentation d'une base de données géographiques, regroupant les géométries des réseaux de rues au travers du temps de la région Bourgogne Franche-Comté. La plateforme web sera mise en ligne vers la fin de l'année 2023, la base de données est d'ores et déjà opérationnelle, et comporte les données historiques des villes de Dijon, Besançon et Pontarlier (territoires d'étude de la thèse).

présente les analyses morphologiques menées sur les réseaux anciens et contemporains des trois territoires d'étude à différents temps t . Le chapitre 3 aborde l'analyse de l'évolution des réseaux viaires considérés (du XVII^{ème} au XXI^{ème} siècle) à partir d'une approche diachronique. Le chapitre 4 présente les propriétés structurelles invariantes identifiées pour les réseaux viaires étudiés.

La deuxième partie porte sur l'identification de morphotypes de voies du réseau viaire et des processus d'évolution morphologique associés. Le chapitre 5 introduit l'approche typomorphologique de la forme urbaine et du réseau viaire. Le chapitre 6 est dédié à une typomorphologie des trames viaires en identifiant d'abord des motifs élémentaires, et ensuite des morphotypes de voies. Ces morphotypes sont associés aux processus (modes) d'évolution morphologique identifiés dans la partie 1 de la thèse.

La troisième partie traite de la simulation de la morphogenèse des réseaux viaires. Le chapitre 7 offre un aperçu des expériences de simulation de la morphogénèse des réseaux viaires. Le chapitre 8 propose un modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires intégrant les mécanismes génératifs associés aux processus d'évolution identifiés, en vue de simuler les morphotypes de voies définies dans la partie 2. Le chapitre 9 traite de l'évaluation, du calibrage et de la validation empirique du modèle proposé. Le chapitre 10 présente les résultats de simulation de différents types de réseaux viaires.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale dans laquelle l'ensemble des résultats sont discutés et des perspectives de recherche sont proposées.

Première partie : Analyses morpho-historiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier

Chapitre 1 :

Concepts, données et méthodes

Chapitre 2 :

Analyses morphologiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier à différentes dates

Chapitre 3 :

Analyses diachroniques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier entre le 17^{ème} et le 21^{ème} siècle

Chapitre 4 :

Propriétés structurelles des réseaux viaires invariantes dans l'espace et le temps

Deuxième partie : Approche typo-morphologique des réseaux viaires urbains

Chapitre 5 :

Typo-morphologies urbaines : aperçu des méthodes et principaux résultats

Chapitre 6 :

Identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution associés

Troisième partie : Simulation de la morphogénèse des réseaux viaires

Chapitre 7

Un aperçu des expériences de simulation de la morphogénèse viaire

Chapitre 8

Proposition d'un modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph

Chapitre 9

Evaluation, calibrage et validation du modèle WayMorph

Chapitre 10

Simulation des réseaux viaires de différentes formes de villes

Figure 0.1 : Structure de la thèse.

Première partie

Analyses morpho-historiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier

Introduction de la partie 1

Cette première partie de la thèse porte sur l'étude approfondie des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier et de leur évolution morphologique au cours du temps, à partir de données géohistoriques.

La morphologie urbaine est abordée à travers une approche analytique du réseau viaire, en portant un intérêt particulier au contexte historique de sa formation et aux caractéristiques structurelles de son tracé physique. D'un point de vue urbanistique, la morphologie du réseau de rues est une traduction de son histoire, en considérant que les réseaux exercent un effet structurant sur l'espace urbain

Dans le chapitre 1, nous commençons par exposer les concepts à la base de l'étude morpho-historique des réseaux viaires, leurs fondements théoriques, ainsi que les différentes méthodes d'analyse possibles. L'un des principaux enjeux de cette recherche est ensuite abordé, à savoir la disponibilité des données viaires, en particulier lorsqu'on considère une large période de l'évolution des villes. Les choix méthodologiques adoptés pour l'étude des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier sont définis en termes de représentation, d'analyse et de caractérisation des réseaux par un ensemble d'indicateurs.

Dans le chapitre 2, nous illustrons d'abord les apports de chaque indicateur choisi dans le chapitre précédent, pour l'analyse de réseaux anciens. Nous montrons en quoi la structure du réseau recèle des informations sur l'histoire de sa construction et son organisation. Les réseaux viaires sont ici considérés comme des éléments structurels hors de toute considération fonctionnelle. Ensuite, nous mobilisons ces indicateurs pour analyser les réseaux contemporains. Nous montrons que la structure du réseau contemporain est effectivement porteuse d'informations sur son histoire et son organisation passée. Les éléments contextuels de chaque territoire enrichissent la caractérisation quantitative de chaque réseau viaire par des interprétations qualitatives du lien entre sa topologie et son évolution historique.

Dans le chapitre 3, la morphologie des réseaux viaires des trois villes est étudiée sur la base de leurs propriétés topologiques et géométriques à travers le temps. Des analyses différentielles sont menées pour permettre une lecture diachronique de l'évolution des réseaux viaires appuyée uniquement sur des critères quantitatifs. De telles analyses impliquent notamment une interprétation de l'évolution des propriétés locales, des centralités et des structures des réseaux viaires. Le suivi dans le temps des permanences et

des changements constitue un aspect important de notre lecture de la morphogenèse du tissu viaire des territoires étudiés.

Le chapitre 4 est centré sur la deuxième hypothèse énoncée dans l'introduction générale, qui suggère que certaines propriétés structurelles caractérisent tous les réseaux viaires, indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction.

Chapitre 1

Concepts, données et méthodes

Ce premier chapitre fournit d'abord une définition des notions clés de la thèse que sont le graphe, le graphe viaire, la géométrie métrique et la topologie. On y discute également des différentes méthodologies de représentation et de caractérisation des réseaux viaires (section 1.1). Est abordée ensuite la question des données géohistoriques, et plus spécifiquement celles constituées et mobilisées dans le cadre de ce travail de recherche (section 1.2). Le chapitre se termine par la présentation des méthodes que nous avons choisies pour l'étude morpho-historique des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier (section 1.3).

1.1 Concepts et méthodes à la base de l'étude morphologique de réseaux viaires

Depuis les années 1960, la théorie des graphes a été largement appliquée à l'étude de réseaux non-géographiques naturels, biologiques ou sociaux (Portugali, 2000; Salingaros, 2003), dans l'objectif de déceler leurs similitudes (Albert & Barabási, 2002). Les chercheurs ont notamment identifié et expérimenté un ensemble de méthodologies destinées à évaluer les propriétés structurelles et les centralités des réseaux (Chartrand et al., 1998; Freeman, 1977; Nieminen, 1974; Parlebas, 1972). L'intérêt de ce domaine de recherche n'a pas échappé aux mathématiciens et aux physiciens, vu le développement de la communauté de la "science des réseaux". En géographie urbaine et en géographie des transports, de nombreux travaux de recherche ont aussi adopté une modélisation de l'espace par un graphe (Garrison, 1960; Garrison & Marble, 1962; Haggett & Chorley, 1969; Kansky, 1963). La spatialisation des graphes et leur application à la modélisation des réseaux viaires constitue ainsi un champ d'études à part entière.

1.1.1 Modélisation du réseau viaire par un graphe : la géométrie métrique et la topologie

La géométrie est la branche des mathématiques qui étudie les propriétés et les relations des formes, des dimensions et de l'espace. Elle peut être divisée en plusieurs sous-domaines, dont deux principaux sont la topologie et la géométrie métrique (Goldman, 1998). La topologie se concentre sur les propriétés géométriques concernant la relation entre les formes, telles que la connectivité, la compacité, la continuité et les déformations, tout en ignorant les notions de distance et de mesure précise (James, 2000; Jänich, 2006; Willard, 2012). La géométrie métrique, en revanche, se concentre sur les mesures de distances et les propriétés qui leur sont liées (Rudin, 1953). Outre la distance, elle introduit les notions d'angle et de mesure précise. Ainsi, la géométrie d'un réseau viaire se rapporte à la fois à sa topologie et à sa géométrie métrique, chacune abordant des aspects différents de l'espace et des entités géométriques considérées (nœuds et arcs).

Plusieurs études ont d'ailleurs montré que la géométrie métrique n'est pas suffisante pour décrire les réseaux viaires (leur structure et leur usage) (Foltête, 2007; Genre-Grandpierre & Foltête, 2003). Dans le cas des réseaux de voirie urbaine, c'est le plus souvent l'analyse de la

topologie qui est privilégiée (Buhl et al., 2006; Crucitti et al., 2006; Lagesse et al., 2016; Porta et al., 2006c).

1.1.2 Modèles de représentation

1.1.2.1 Graphe direct (primaire) et graphe dual

La formalisation mathématique des réseaux par la théorie des graphes permet de construire un modèle abstrait (simplifiant la réalité) de représentation géographique. Cette modélisation permet de mettre en évidence la topologie des réseaux, qui décrit certaines de leurs caractéristiques relationnelles (façon dont sont reliés les éléments entre eux). À l'instar d'un graphe mathématique $G = (N, A)$ constitué d'un ensemble de nœuds (N) et d'un ensemble d'arcs (A) les reliant, un graphe viaire est construit à partir du réseau de rues, en positionnant les nœuds aux intersections et les arcs devenant ainsi les tronçons reliant deux intersections. Le réseau de rues peut être représenté par un graphe spatial dit "planaire", c'est à dire un ensemble de nœuds et d'arcs $\{N, A\}$ intégrés dans une surface bidimensionnelle, avec la condition que les liens (arcs) ne se croisent pas. Cependant, il existe des situations où le graphe viaire n'est pas planaire (Boeing, 2020). Cela se produit lorsque des routes ne sont pas situées au même niveau, comme dans les cas où une route passe sous un pont ou lorsque plusieurs niveaux de routes se chevauchent (par exemple, autoroutes surélevées, tunnels, etc.). Le graphe viaire est donc défini comme un graphe spatial ou géométrique, qui est une configuration particulière du graphe planaire. Sur ce graphe viaire, les arcs sont des tronçons ayant une géométrie définie dans l'espace. À l'information topologique vient donc s'ajouter une information de géométrie métrique.

La communauté scientifique adoptant les méthodes de la théorie des graphes représente les réseaux spatiaux avec deux approches principales : primaire (ou également dite directe) et duale. Ces appellations suggèrent une hiérarchie entre les deux approches qui n'est pas délibérée (Marshall, 2016).

Approche directe

L'approche directe consiste à représenter le réseau de rues sous forme d'un graphe planaire, aussi connu sous le nom de graphe primaire (Hamaina et al., 2012; Lagesse, 2015; Porta et al., 2006a). Dans la mesure où les segments de rues représentent des liens (arcs) et les intersections à la jonction des segments de rues représentent les nœuds du graphe primaire (direct) (Figure 1.1 - c), la préservation de la géométrie réelle de ces réseaux permet de lier leurs propriétés topologiques à leur inscription spatiale.

L'intérêt principal de l'approche directe est son lien intuitif avec la réalité du terrain. Dans le cadre de l'analyse des réseaux viaires urbains, l'approche directe est jugée plus avantageuse par rapport à l'approche duale présentée ci-après. Elle est davantage compréhensible, dans le sens où elle couple la topologie et la géométrie métrique. Elle permet aussi d'améliorer l'exploitation et l'analyse d'énormes quantités d'informations collectées tandis qu'il est difficile d'interpréter leur graphe dual. Cependant, cette représentation n'est pas suffisante pour décrire la complexité des réseaux de rues. Les propriétés topologiques des graphes primaires sont en effet très similaires à celles des graphes géométriques aléatoires (Domingo, 2016).

Le réseau viaire peut donc être décrit par l'analyse de ces deux représentations complémentaires, l'une est inscrite dans l'espace euclidien (la représentation primaire) et l'autre inscrite dans un espace symbolique topologique (la représentation duale) (Figure 1.1).

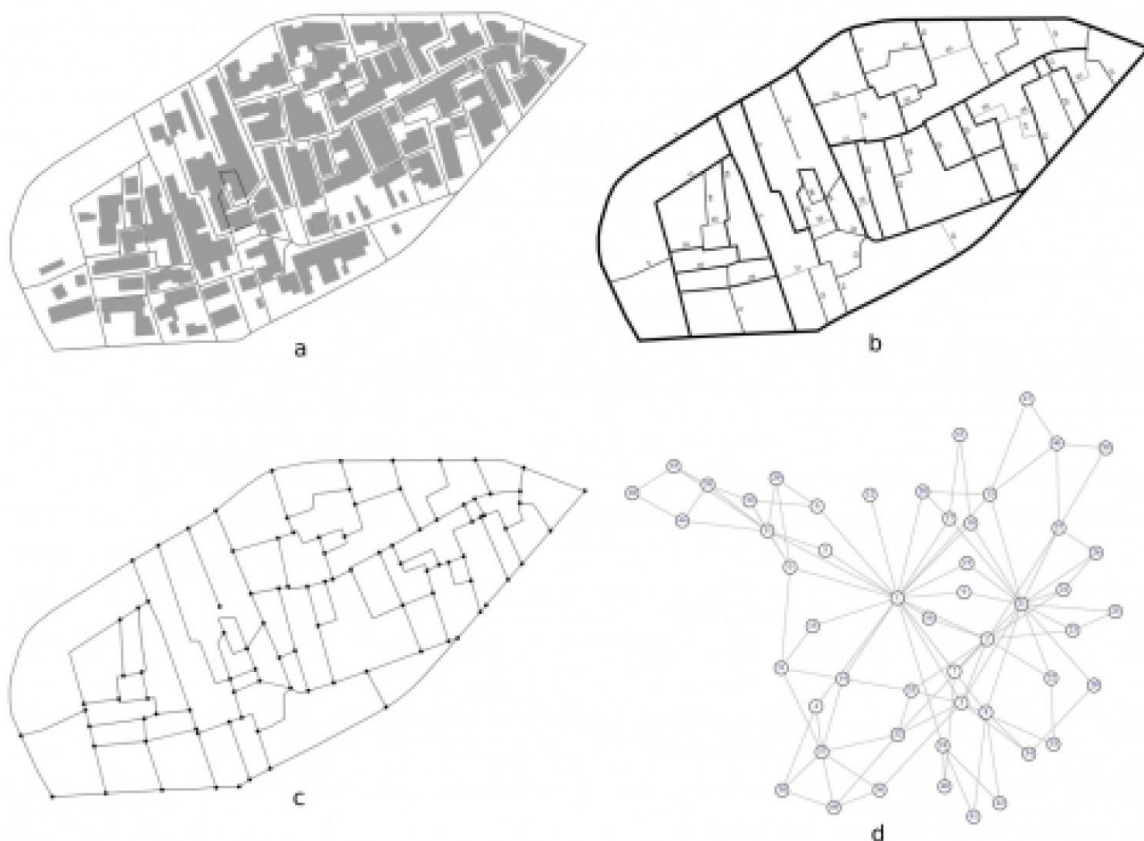


Figure 1.1. a- Le quartier "Trentemoult" à Rezé (France). b- Le réseau de rues correspondant agrégé selon les noms de rues. c- Le graphe direct associé. d- Le graphe dual associé.

Source : Hamaina et al. (2012).

Approche duale

L'approche duale a été initiée par la représentation du réseau par un graphe linéaire ("line graph") utilisée dans les travaux de la syntaxe spatiale (cf. section suivante). Différents travaux ont choisi de représenter le réseau sous forme d'un graphe dual pour étudier certaines propriétés topologiques (Jiang & Claramunt, 2004; Masucci et al., 2014; Porta et al., 2006b). Les lignes axiales ou les portions de rues alignées sont représentées par des nœuds et leurs intersections sont représentées par des liens (arcs) sur le graphe (Figure 1.1 - d). Les avantages et les inconvénients de cette représentation ont été largement passés en revue (Al Sayed et al., 2022; Batty, 2004; Desyllas & Duxbury, 2001; Jiang & Claramunt, 2004; Penn, 2003; Porta et al., 2006a; Ratti, 2004). L'approche duale est également critiquée de par la perte d'information sur les distances.

1.1.2.2 Carte axiale

La syntaxe spatiale (Hillier et al., 1976; Hillier & Hanson, 1989) prône un recours constant à l'approche réseau à l'échelle des villes, des quartiers, des rues et même des bâtiments. Elle offre une méthode de modélisation des structures spatiales urbaines, qui permet d'analyser la forme des réseaux viaires à partir d'un nombre réduit d'indicateurs (Figure 1.2 – c). Elle considère essentiellement les contraintes visuelles liées à la mobilité. Elle est établie à partir de l'idée que les humains se déplacent essentiellement en ligne droite dans des espaces convexes guidés par la profondeur de leur champs de vision (Penn & Turner, 2002). En suivant ce raisonnement, des cartes axiales sont construites à partir des lignes de perspectives), en conservant le plus petit ensemble des lignes axiales les plus longues couvrant l'espace entre les bâtiments (Figure 1.2 - b) (Hillier et al., 1976; Peponis et al., 1983).

Initialement, les travaux en syntaxe spatiale ont exploré la relation entre les configurations spatiales et les processus sociaux et économiques à l'œuvre dans un environnement urbain. Les premiers travaux ont étudié la structure du réseau viaire en lien avec une analyse psychologique du piéton évoluant dans celui-ci (Hillier & Iida, 2005; Penn, 2003), partant de l'idée que la structuration spatiale doit être examinée en relation avec les activités des individus qui s'y déplacent. Cela implique une segmentation du réseau en considérant différentes définitions de la continuité en fonction du mouvement des individus.

Ultérieurement, la syntaxe spatiale a mobilisé les outils et méthodes de la théorie des graphes pour modéliser l'espace par un graphe linéaire ("*line graph*") à partir de la carte axiale (Figure 1.3). Chaque ligne axiale est représentée par un nœud dans le graphe et chaque intersection

entre deux lignes est représentée par un arc reliant deux nœuds du graphe. L'information géographique disparaît ainsi derrière l'information topologique.

Malgré le large succès des applications de la syntaxe spatiale, les critiques les plus fréquentes formulées à son égard sont, d'une part, la simplification excessive de la structure spatiale du réseau par les cartes axiales (Ratti, 2004), et d'autre part, la perte d'information sur les distances métriques sur le graphe (dual) linéaire (Porta et al., 2006b).

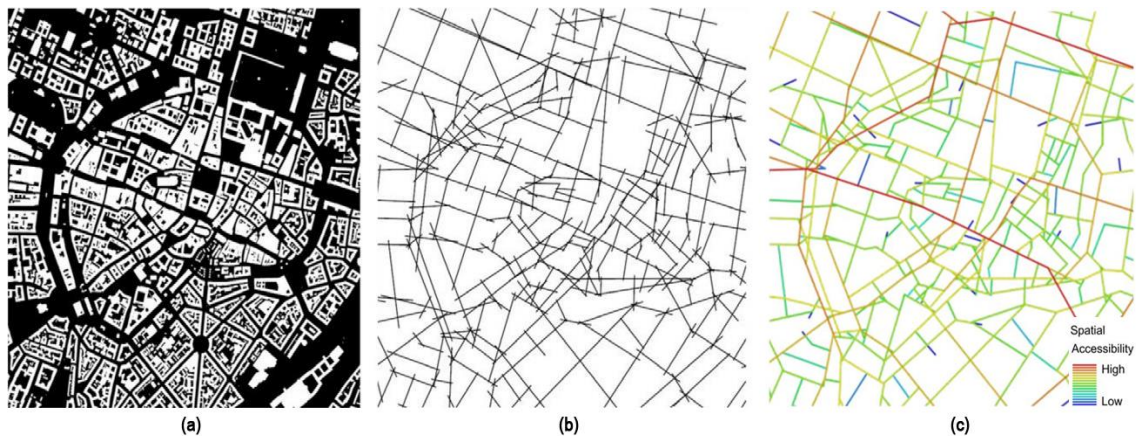


Figure 1.2. (a) Empreinte du bâti. (b) Carte axiale résultante. (c) Indicateur d'accessibilité calculé sur la carte axiale. Source : Domingo (2016).

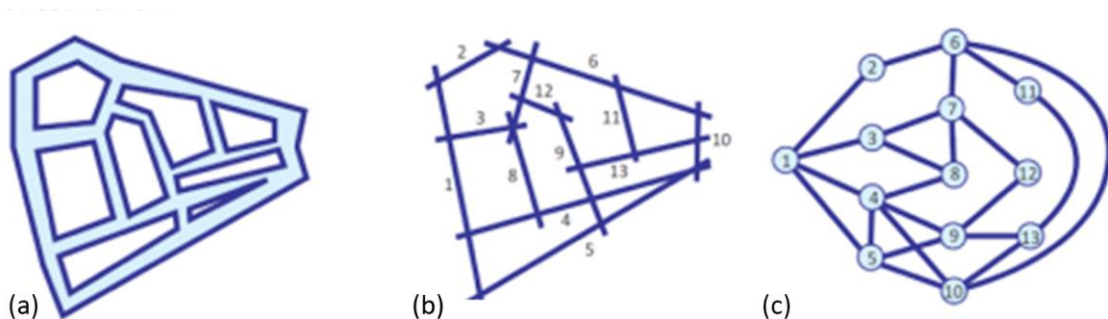


Figure 1.3. (a) Un espace urbain fictif. (b) Carte axiale résultante. (c) Graphe linéaire ("line graph") correspondant. Source : Jiang & Claramunt (2004).

1.1.2.3 Modélisation du réseau viaire à travers la continuité : création d'un hypergraphe (sur-réseau)

La notion de continuité revêt une importance capitale dans l'ensemble des études du réseau viaire. Cette continuité a été traduite par la définition d'éléments alignés au sein des réseaux viaires sous différentes formes (lignes axiales, lignes droites, alignement de segments, rues, voies).

La modélisation du réseau viaire par les cartes axiales repose sur la définition de la continuité basée sur les déplacements des individus. Cependant, la carte axiale entraîne la division des rues en différents tronçons, ce qui entraîne la perte de la continuité du réseau au-delà de l'intersection ; cette information est d'autant plus perdue sur le graphe dual linéaire. Les entités primaires du réseau, c'est-à-dire les segments de rue, ne sont pas les entités de déplacement constitutives des réseaux urbains. En général, les entités de déplacement sont constituées par des assemblages des segments appartenant à une même route (Jiang & Claramunt, 2004; Lagesse, 2015; Porta et al., 2006a).

Compte tenu de ces limites, d'autres approches ont été proposées dans la littérature pour segmenter le réseau viaire et améliorer la définition de la continuité de ses entités (tronçons/segments). Ainsi, plusieurs méthodologies ont été proposées la création d'un "sur-réseau" (hypergraphe), qui est construit par l'association des arcs d'un graphe. Certaines sont basées sur la toponymie des rues (Jiang & Claramunt, 2004), d'autres sur l'association d'arcs à chaque sommet en se basant sur leurs propriétés géométriques (Courtat, 2012; Figueiredo & Amorim, 2005; Lagesse, 2015; Perna et al., 2011; Porta et al., 2006a). C'est en suivant ce raisonnement qu'un hypergraphe est construit à partir du réseau viaire, en positionnant les nœuds aux intersections des rues, les arcs devenant ainsi les tronçons entre deux intersections, et les rues naissant de l'association d'arcs.

La méthode de segmentation par la toponymie des rues (dite "SN") (Jiang & Claramunt, 2004), est basée sur des propriétés dérivées des conventions historiques de dénomination. La méthode SN repose sur le principe simple selon lequel deux segments de rue contigus portant le même nom appartiennent à la même entité du réseau (route) (Figure 1.4). La méthode repose sur l'hypothèse que les systèmes de dénomination des rues encapsulent les perceptions de la manière dont les rues sont identifiées et utilisées. Cette segmentation a l'avantage d'être très efficace d'un point de vue sémantique, principalement pour les petites rues. Néanmoins, l'inconvénient est qu'elle introduit une composante nominative qui n'a pas forcément de cohérence spatiale. Par exemple, le nom d'une rue peut changer à une intersection donnée en raison des limites administratives (par exemple, le passage d'un arrondissement à un autre). Dans les grandes villes comme Londres ou Paris, le nom d'une même rue peut aussi changer plusieurs fois pour marquer des carrefours majeurs.

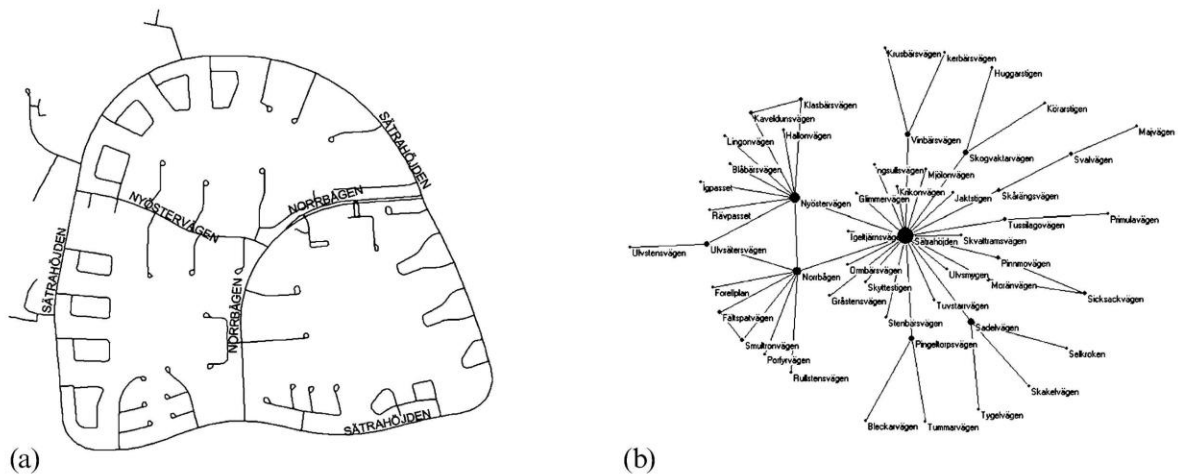


Figure 1.4. Le réseau du quartier de Sättra (a) et (b) son graphe correspondant. Note : Chaque nœud est étiqueté par le nom de la rue correspondante. Source : Jiang & Claramunt (2004).

Figueiredo & Amorim, (2005) ont, eux, proposé une méthode d'association des axes de la carte axiale si leur angle est inférieur ou égal à un seuil (45°). Toutefois le réseau de rues résultant dépend alors du point de départ de l'algorithme.

Porta et al. (2006a) ont proposé un modèle purement spatial pour construire le graphe des rues, appelé la négociation de la continuité des intersections (ICN : *Intersection Continuity Negotiation*). La méthode ICN est basée sur le principe que chaque paire de segments alignés dans l'espace sont susceptibles d'appartenir à la même rue. Les segments de rues sont donc associés sur la base du classement de la mesure de leur angle à chaque intersection. Plus l'angle obtenu sera proche de 180° , plus ils seront alignés et donc susceptibles de former une seule rue. Cependant, cette méthode présente des limites d'application sur des entités géométriques non linéaires. Par exemple, les rocade périphériques (de forme circulaire) dans les villes comme Paris ou Londres seront décomposées en différentes entités, en ne reconnaissant comme une même entité que les segments les plus alignés. Ces rocades, étant des éléments structurants de la trame viaire, devraient pourtant être représentées comme une seule entité dans le graphe primaire et dual.

Courtat et al. (2011b) ont introduit la notion de "rue" dans une représentation multi-échelle du réseau viaire par un hypergraphe rectiligne (*Straight hypergraph*). Ils ont proposé deux algorithmes dépendant d'un seul paramètre pour passer des segments de rue aux rues. Le premier algorithme (*Angular tolerance*) est basé sur un angle seuil, et considère que deux segments de rue adjacents font partie de la même rue s'ils se croisent à une intersection mais restent presque alignés (Figure 1.5 – a). Sur une même "rue", les changements de directions

sont considérés comme "des points annexes" et seules les intersections sont considérées comme des nœuds. Avec le deuxième algorithme (*The minimal reciprocal alignment*), deux segments sont associés s'ils sont les plus alignés (Figure 1.5 – b).

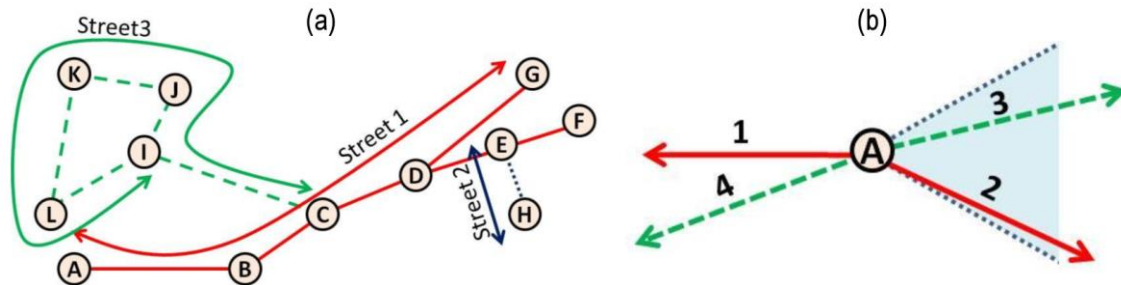


Figure 1.5. (a) Premier algorithme (*Angular tolerance*) appliqué sur la rue 1, qui est ramifiée (au sommet D), et sur la rue 3, qui contient une boucle. (b) Deuxième algorithme (*The minimal reciprocal alignment*) : à l'intersection A, le segment 1 pourrait être associé à 3 et 2. L'angle le plus proche de π est formé avec le segment 3, mais les segments 3 et 4 correspondent à un angle réciproquement minimal, ils sont donc associés. Et les segments 1 et 2 sont associés. Le même raisonnement conduit aux mêmes associations quel que soit le premier segment considéré. Source : Courtat et al. (2011b).

En révisant la méthode ICN (Porta et al., 2006a), Lagesse (2015) a évalué l'optimisation de la déviation globale par rapport à la déviation optimisée localement, en considérant le champ des possibles de tous les angles d'association de segments de rue (entre 0 et 180°). Les résultats de cette étude systématique ont permis d'identifier un angle seuil de 60° en-dessous duquel les arcs ne sont pas associés. Les arcs alignés respectant cet angle seuil sont, eux, associés pour former une "voie". La voie a la particularité d'être un objet multi-échelle, partant de la plus petite impasse pour aller jusqu'aux chemins historiques et aux grandes voies modernes qui traversent tout le territoire. Cette propriété lui permet d'être insensible aux effets de découpe de la carte (Lagesse et al., 2015) et les indicateurs calculés sur cet objet sont robustes au regard d'un changement des limites de la zone d'étude.

Pour surmonter les problèmes méthodologiques de l'ICN et du SN expliqués ci-avant, (Masucci et al., 2014) ont proposé une méthodologie hybride d'extraction du graphe dual en associant l'approche géométrique à une approche symbolique (considérant les attributs hiérarchiques des segments de rue). Cette méthode est baptisée "*Hierarchical intersection continuity negotiation*" (HICN). D'abord, les segments sont classés selon une hiérarchie à quatre niveaux,

basée sur les autoroutes, les routes de classe A et de classe B, et les routes secondaires⁷. Ensuite, la méthode ICN est appliquée avec un seuil de $\pi/2$ (deux segments formant un angle inférieur à $\pi/2$ ne peuvent pas appartenir à la même route) d'abord aux autoroutes, puis aux routes A, et enfin aux routes B. Enfin, l'association des routes secondaires est contrainte par la règle selon laquelle deux segments de rue avec l'attribut route secondaire ne peuvent pas appartenir à la même entité s'ils sont sur les côtés opposés d'une route principale.

Marshall (2015) a adopté le même modèle de continuité de réseau viaire basé sur l'alignement des tracés de rues et leur classification. Les segments de rue sont hiérarchisés en 4 classes (A, B, C ou non classé, selon une classification appliquée en Grande-Bretagne). Suivant le même raisonnement que Masucci et al. (2014), cette hiérarchisation empêche un segment d'une classe inférieure d'être associé à une route de classe supérieure. En outre, une route de la classe A peut continuer le long d'un autre tronçon de la même hiérarchie même si une route de classe B a un meilleur alignement. Cependant, il est difficile de généraliser cette méthode car il s'agit d'une classification spécifique à la Grande-Bretagne.

1.1.3 Méthodologies de caractérisation des réseaux viaires

Au-delà de la représentation des réseaux viaires, la caractérisation des éléments d'un graphe est l'une des principales préoccupations des scientifiques, d'où le développement d'un ensemble d'indicateurs. Les premiers travaux de caractérisation des réseaux viaires se sont focalisés sur les mesures topologiques à partir de plusieurs indicateurs issus de la théorie des graphes. Tous ces indicateurs participent à la caractérisation des tissus urbains par l'introduction d'effet de continuité, discontinuité, centralité, et de proximité (Freeman, 1977).

1.1.3.1 Distances

L'analyse des réseaux spatiaux par la théorie des graphes est basée particulièrement sur la distinction entre la distance topologique et la distance métrique. Les définitions de ces distances sont diverses (Bonnin & Douady, 2013; Porta et al., 2006a).

⁷ Cette classification est introduite au Royaume-Uni dans les années 1930. Pour les cartes qui ne présentaient qu'une distinction générique entre routes principales et routes secondaires, les classes A et B ont été attribuées aux routes principales en fonction de leur classification ultérieure, mais uniquement si la route est reliée à une autre route principale.

Distance topologique

En théorie des graphes, la distance entre chaque paire de nœuds est définie par le nombre d'arcs contenu dans le plus court chemin qui les sépare (Chartrand et al., 1998). Cette distance est également appelée distance géodésique (Bouttier et al., 2003; Jiang & Claramunt, 2002). Appliquée au graphe dual, la distance topologique correspond à la distance géodésique si les arcs ne sont pas pondérés. Chaque passage par un nœud du graphe est équivalent à un changement d'arc. La distance est donc calculée par le nombre de nœuds traversés. Sur un graphe primaire, la longueur topologique d'un chemin est égale au nombre total des segments le composant. Le chemin associé à cette distance est appelé le chemin le plus simple. Dans le cas où aucun poids n'est appliqué sur les arcs, le chemin le plus simple correspond au nombre minimum d'arcs le long de tous les trajets possibles entre deux nœuds dans un graphe.

Distance métrique

En géographie, l'utilisation de distances métriques est privilégiée. La distance métrique la plus commune est la distance euclidienne (ou distance à vol d'oiseau). Elle correspond à la distance rectiligne entre deux nœuds projetés du réseau sur un plan horizontal, sans considérer la géométrie des arcs qui les relient.

En prenant en compte la distance métrique parcourue (sur un réseau de circulation), on définit une distance géographique. Autrement dit, la distance géographique est la distance d'un parcours entre un point de départ A et un point de destination B. Elle est souvent supérieure à la distance euclidienne, car elle est contrainte par la présence d'obstacles. Elle correspond à la distance géodésique appliquée au graphe primaire dont les arcs sont pondérés par leurs longueurs. Le chemin associé à cette distance est appelé le chemin le plus court.

Ainsi, sur un parcours entre deux objets du réseau, le chemin le plus simple⁸ (Pailhous, 1970) minimise la distance topologique, tandis que le chemin plus court minimise la distance géographique (Figure 1.6). Certains auteurs suggèrent que le chemin le plus simple est une bonne approximation du chemin le plus court (Courtat, 2012), tandis que d'autres insistent sur l'intérêt de considérer les deux (Viana et al., 2013).

⁸ Le chemin le plus simple a été mis en évidence par Pailhous (1970), en adoptant le point de vue d'un chauffeur de taxi qui cherche en priorité à rejoindre les grands axes (réseau principal) avant de bifurquer vers une route de desserte locale (sous-réseau) afin d'atteindre sa destination.

Cette distinction entre les distances topologique et métrique a permis de définir un certain nombre d'indicateurs pour analyser les réseaux viaires, en révélant à la fois les effets introduits par la topologie du réseau et ceux introduits par sa géométrie métrique.

Avignon Intra-Murros

- origine / destination
- chemin le plus simple
- chemin le plus court
- voies

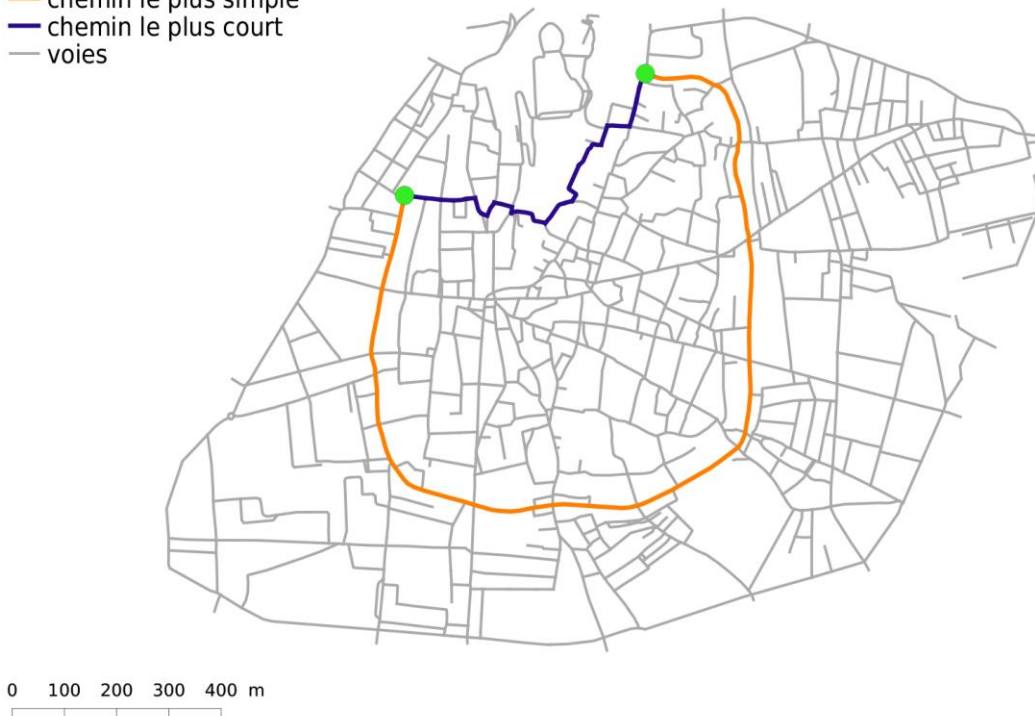


Figure 1.6. Illustration du chemin le plus court et du chemin le plus simple entre deux points de la ville d'Avignon intra-muros, en considérant le nombre de voies.

Réalisée par : Estelle Degouys. Source : Lagesse (2015).

1.1.3.2 Centralités

Indicateurs issus de la théorie des graphes

La toute première approche de la centralité a été formulée par Bavelas (1948) pour analyser les réseaux de communication. Il a avancé l'idée qu'un nœud est central dans le réseau lorsqu'un grand nombre de chemins les plus courts passent par celui-ci. Cette définition a posé les bases d'un indicateur structurel fondamental dans la théorie des graphes : la centralité d'intercalation ou d'intermédiarité (*betweenness centrality*).

Les premiers indicateurs de centralité ont été appliqués dans un premier temps sur des graphes formalisant des liens sociologiques (Bavelas, 1951; Leavitt, 1951; Parlebas, 1972).

Cependant, la centralité dans les graphes non connexes⁹ posait une contrainte de calcul : la distance entre deux points situés dans deux parties non connectées étant infinie. Partant de ce constat, Freeman (1977) a proposé une formalisation mathématique de la centralité d'intermédiarité, la rendant compatible avec des graphes non connexes. Ensuite d'autres mesures de centralité ont été développées, notamment le degré (*degree centrality*) (Freeman, 1977; Nieminen, 1974) et la centralité de proximité (*closeness centrality*) (Freeman et al., 1979; Sabidussi, 1966; Wasserman & Faust, 1994).

Le degré mesure la centralité d'une entité par le nombre de connexions avec les autres entités du graphe dans un voisinage immédiat. Les nœuds importants sont ceux qui possèdent le plus grand nombre de connexions. La centralité de proximité¹⁰ détermine la distance topologique à partir d'un élément du réseau vers tous les autres : être central c'est être le moins éloigné des autres. Ces deux centralités sont considérées comme appartenant à la même famille (Latora & Marchiori, 2004). À l'inverse, la centralité d'intermédiarité se réfère à une entité centrale vue comme étant intermédiaire dans les liens qui relient l'ensemble des entités entre elles. Ces trois indicateurs de centralité (degré, proximité et intermédiarité) ont été largement utilisés, modifiés et étendus pour différentes analyses (Altman, 1993; Bonacich, 1972, 1987, 1991; Stephenson & Zelen, 1989).

Ensuite, la communauté scientifique des systèmes complexes a proposé d'autres indicateurs, notamment la centralité d'efficacité, la centralité de rectitude et la centralité d'information. Celles-ci sont fondées sur la mesure de l'efficacité globale d'un réseau (Latora & Marchiori, 2007), sachant que l'efficacité entre deux nœuds correspond à l'inverse de la longueur du chemin le plus court qui les relie. La centralité d'efficacité est normée par la comparaison de la longueur du plus court chemin avec la distance euclidienne. Elle assimile être central au fait de communiquer efficacement avec les autres (en optimisant la longueur du chemin le plus court). La centralité de rectitude définit, elle, le fait d'être central comme celui d'être atteignable plus directement par toutes les entités du réseau (Vragović et al., 2005). La centralité d'information (Latora & Marchiori, 2004) combine la centralité de proximité et la

⁹ Un graphe non connexe est un type de graphe où l'ensemble de ses nœuds ne forme pas une seule composante connexe, c'est-à-dire qu'il existe au moins deux sous-ensembles distincts de nœuds qui ne sont pas connectés entre eux par des liens (arcs).

¹⁰ La centralité de proximité correspond à la plus petite somme des poids des arcs le long de tous les trajets possibles entre deux arcs i et j dans un graphe. Ce qui se simplifie en nombre minimal d'arcs traversés dans le cas d'un graphe topologique non pondéré.

centralité d'intermédiarité, en assimilant la centralité au fait d'être indispensable à toutes les autres entités du réseau.

Indicateurs de la syntaxe spatiale

Les indicateurs appliqués en syntaxe spatiale peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur portée : locale, globale ou contextuelle (Béra & Claramunt, 2004).

Les indicateurs locaux considèrent le voisinage direct d'un nœud. Les indicateurs globaux sont basés sur l'ensemble des nœuds, et présentent des variations de la moyenne des plus courts chemins vers tous les autres nœuds du graphe. Les indicateurs contextuels visent à prendre en compte la structure du graphe de manière plus détaillée, en considérant le nombre de possibilités d'aller d'un nœud à un autre.

Sur cette base, cinq mesures syntaxiques peuvent être calculées : la connectivité, la valeur de contrôle, l'intégration (locale et globale), le choix global et la distance angulaire.

- **Connectivité**

La connectivité est le paramètre le plus souvent utilisé. Elle est définie comme le nombre de nœuds directement liés à chaque nœud dans le graphe. Elle spécifie le nombre de voisins immédiats et correspond à la centralité d'ordre (i. e. le degré).

- **Valeur de contrôle**

Le deuxième indicateur est la valeur de contrôle, qui exprime le degré de choix que chaque nœud représente pour les nœuds qui lui sont directement liés. La valeur de contrôle d'un nœud est déterminée par la somme des valeurs inverses de la connectivité de tous les voisins de la ligne axiale sélectionnée. Cet indicateur mesure le degré avec lequel un nœud sur le graphe (correspondant à une ligne axiale) contrôle l'accès à ses voisins immédiats. Il prend en compte toutes les connexions alternatives que chacun de ses voisins possède (Jiang et al., 2000; Klarqvist, 2015).

- **Intégration**

L'un des principaux indicateurs de la syntaxe spatiale est l'intégration globale (Jiang & Claramunt, 2002, 2004) qui correspond à une normalisation de la centralité de proximité telle que définie par Bavelas (1948) et revue par Freeman (1977). Cet indicateur est calculé sur le graphe linéaire pour chaque nœud (correspondant à une ligne sur la carte axiale). Il est associé à la notion de profondeur, qui peut être définie comme le nombre d'étapes entre un nœud donné et tous les autres nœuds. Un nœud est dit profond si de nombreuses étapes le séparent des autres nœuds. En revanche, un nœud est dit peu profond si seulement quelques pas le

séparent des autres nœuds. Si d_{ij} est la distance la plus courte entre deux points i et j dans un graphe G , alors la profondeur totale du nœud i est la somme des distances les plus courtes qui le séparent de tous les nœuds du graphe.

L'intégration est relative au nombre de chemins les plus simples (avec le moins de changement de direction) (Hillier, 1998), entre chaque nœud et tous les autres nœuds du graphe (intégration globale), ou par rapport aux nœuds situés dans son voisinage immédiat (intégration locale). L'intégration décrit donc la profondeur moyenne d'un nœud par rapport à certains ou tous les autres nœuds du graphe linéaire.

- **Choix global**

Le choix global est une adaptation de la centralité d'intermédiarité (*betweenness centrality*). Il s'agit d'une mesure globale du flux à travers une ligne axiale. Un nœud a une forte valeur de choix lorsque la plupart des chemins les plus courts reliant chaque paire de nœuds du graphe linéaire passent par lui.

- **Distance angulaire**

L'utilisation de l'indicateur de distance angulaire n'est pas très répandue en syntaxe spatiale. Toutefois certains travaux se sont affinés autour de la notion d'angle à chaque intersection qui impacte la perception du réseau par l'utilisateur (Turner, 2001). L'approche développée, caractérise les lignes axiales selon une distance qualifiée d'angulaire. La distance angulaire évalue ainsi la sensibilité des itinéraires aux angles entre segments (Hillier & Vaughan, 2007). Plus une combinaison de segments est continue et alignée, plus les tronçons routiers apparaîtront comme "centraux".

Approche de multi-centralité des graphes viaires

Porta et al. (2006c, 2006b) ont comparé les résultats des différentes centralités sur le graphe direct et le graphe dual après application du modèle de représentation ICN (voir section 1.1.2.3), et démontré que les critères de définition de la continuité des arcs du réseau (qui précède le calcul des centralités) affectent profondément les résultats (Figure 1.7, figure 1.8 et figure 1.9). Ainsi, en adoptant une approche directe et géographique, aucun indicateur ne rend compte de l'intégralité de l'organisation et de l'ordre sous-jacent des réseaux, puisqu'ils traduisent la centralité selon des critères différents (Crucitti et al., 2006).

L'approche de multi-centralité (MCA : Multiple Centrality Assessment) (Porta et al. 2006c, 2006b) est une méthode d'application des différentes mesures de centralité évoquées précédemment, pour l'analyse de graphes viaires créés avec la méthode ICN. L'approche est fondée sur une représentation directe (primaire) et métrique des réseaux viaires urbains.

Quatre indicateurs de centralité sont calculés pour capturer les structures essentielles des réseaux viaires urbains réels : la centralité de proximité, la centralité d'intercalation (ou d'intermédiarité), la centralité de rectitude et la centralité d'information (ou d'importance vis-à-vis des autres) (Figure 1.7 et Figure 1.8). L'indicateur de centralité de proximité (dénommé indicateur d'intégration globale) est très influencé par l'effet de bord. Il ne révèle que le centre de l'emprise du réseau considéré, et échoue à mettre en évidence une hiérarchie de routes centrales. La centralité d'intercalation permet principalement de mettre en évidence une centralité des rues longues, les résultats sont toutefois influencés par les effets de bords. Par ailleurs, la centralité de rectitude indique quelles sont les zones les plus centrales ainsi que les axes centraux du réseau, sans aucun effet de bord remarquable. La centralité d'information apparaît être l'indicateur le plus synthétique, en déterminant les arcs les plus indispensables dans la structure réseau.

Chaque indicateur appliqué aux réseaux viaires permet des lectures particulières de la centralité qui permettent de mieux comprendre leur nature complexe et leur fonctionnement. Les indicateurs fournissent une première idée sur la structure (nature et densité) des réseaux et leur efficacité (centralité et proximité). Cependant, ils s'avèrent insuffisants pour certaines applications, notamment pour comparer des réseaux de taille différente, ce qui nécessite de normaliser les indicateurs (Porta et al., 2006a).

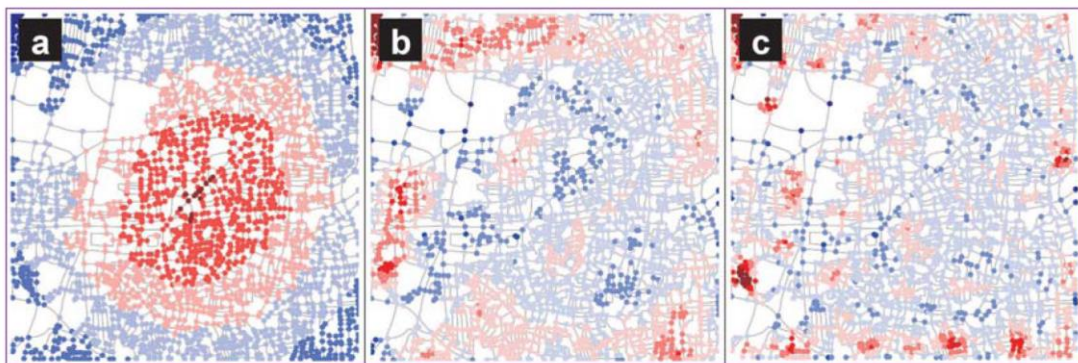


Figure 1.7. Mesure de centralité du réseau viaire de la ville d'Ahmedabad avec une approche directe. Dans cette figure, le coloriage rouge/bleu a été effectué sur les nœuds. (a) Proximité globale calculée sur l'ensemble du réseau ; (b) Proximité locale calculée sur un sous-graphe dont les nœuds sont à moins de 400 mètres du nœud étudié ; (c) Proximité locale : idem (b), mais avec une distance maximale de 200 mètres seulement. Source : Porta et al. (2006a).

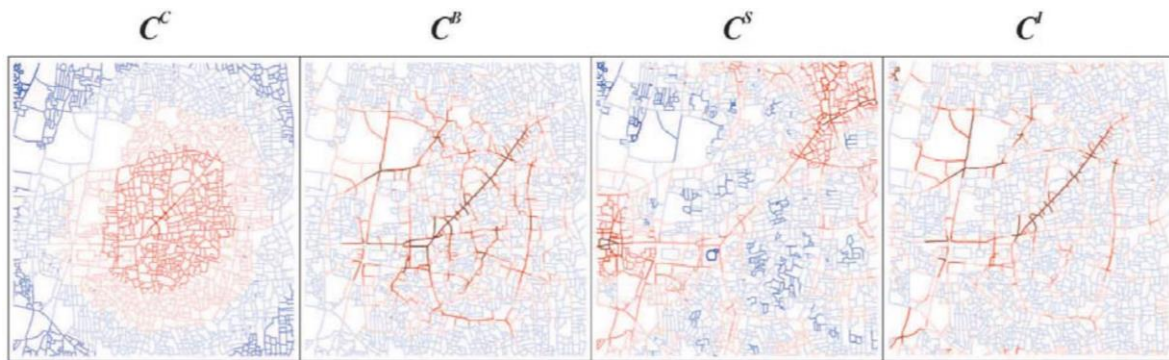


Figure 1.8. Approche directe : Quatres indicateurs de centralité (C^C = proximité, C^B = intercalation, C^S = rectitude, C^I = information) calculés sur le réseau viaire d'Ahmedabad représenté par un graphe direct (noeuds = intersections, arcs = routes). Source : Porta et al. (2006a).



Figure 1.9. Approche duale : Quatres indicateurs de centralité centralité (C^C = proximité, C^B = intercalation, C^S = rectitude, C^I = information) calculés sur le réseau viaire d'Ahmedabad représenté par un graphe dual (noeuds = routes , arcs = intersections). Source : Porta et al., 2006a.

1.2 Données viaires géohistoriques

L'étude de la morphogenèse des réseaux viaires requiert des données géohistoriques mais la création de ces données représente une lourde tâche. Peu de cartes historiques sont déjà numérisées et géoréférencées, et leur qualité est très variable selon les techniques de production adoptées et les conditions de conservation. Il s'agit donc de collecter et numériser manuellement les cartes historiques choisies pour un projet, de procéder à une vectorisation manuelle des données souhaitées (réseaux viaires et données complémentaires), une étape dont la durée varie en fonction de l'ampleur de chaque projet, et enfin de procéder à la vérification et la validation de ces données.

Les données géohistoriques sont imparfaites par nature, en raison des lacunes de l'information, des imprécisions géographiques et des incertitudes de datation. Par

conséquent, la création d'une base de données géohistoriques représente un véritable défi pour assurer la véracité et la cohérence des données (Perret, 2016).

Dans cette section, nous présentons d'abord un aperçu de quelques expériences d'acquisition de données géohistoriques. Cette sous-section reprend partiellement le contenu d'un article auquel nous avons contribué dans le cadre de notre participation au projet ANR COMMUNES (Litvine et al., 2022)¹¹. Ensuite, nous abordons les intérêts et les limites des cartes historiques comme source de données. Nous questionnons le fait d'extraire efficacement des informations à partir de cartes historiques qui sont souvent des sources de données partielles et imparfaites. Par la suite, nous abordons les enjeux relatifs à l'utilisation des données viaires géohistoriques. Il s'agit de discuter de comment structurer, organiser, stocker et analyser correctement des données géohistoriques. Enfin, nous présentons la méthode adoptée dans le cadre de ce travail pour la création des données vectorielles des réseaux viaires historiques à partir des réseaux actuels. Cette dernière sous-section reprend partiellement le contenu d'un article élaboré dans le cadre du projet COVADEO¹² (El Gouj et al., 2022).

1.2.1 Expériences d'acquisition et de traitement de données géohistoriques

L'intérêt scientifique pour l'acquisition et le traitement de données cartographiques anciennes remontent à une dizaine d'années (Kar et al., 2016, 2016; Sieber et al., 2016; Smith et al., 2017). Des approches collaboratives de type "crowdsourcing" ont été adoptés dans plusieurs travaux de recherche, menant au développement d'outils remarquables. Nous pouvons citer en particulier :

- *Georeferencer* (Fleet et al., 2012) qui a été conçu pour la participation collaborative au géoréférencement de cartes historiques. Cet outil a été utilisé par la "*British Library*" et la "*National Library of Scotland*" pour géoréférencer la plupart de leurs collections cartographiques.

¹¹ Litvine, A., El Gouj, H., Meyer, J., Starzec, A., Thévenin, T., Séguéy, I., Mimeur, C., Hare, D., Boissard, R., & Roy, D. (2022). Setting a standard for open and collaborative data acquisition for historical cartography: Digitizing the french État-major maps as a collaboration between the ANR COMMUNES and open historical maps. Proceedings of the 6th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geospatial Humanities, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3557919.3565811>

¹² El Gouj, H., Rincón-Acosta, C., & Lagesse, C. (2022). Urban morphogenesis analysis based on geohistorical road data. *Applied Network Science*, 7(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00440-0>

- *Building Inspector*¹³ (Vershbow, 2013) est un outil open-source en ligne créé par le "New York Public Library Lab" (NYPL) pour la numérisation du parcellaire et des bâtiments à partir de cartes historiques de la ville de New York.
- *GB1900* (Fleet et al., 2018; Southall et al., 2017) a permis de collecter plus de 2,5 millions de toponymes d'entités représentées sur des cartes historiques ("*Ordnance Survey maps*") à l'aide d'une plateforme web. Ce projet, centré sur l'extraction de noms de lieux plutôt que des géométries, a connu une grande réussite.
- *Machine Reading Maps* (2021), l'Institut Turing de Londres, l'Université de Californie du Sud (USC), et l'Université du Minnesota (UMN) développent actuellement des outils d'apprentissage automatique (*machine learning*) pour détecter du texte sur des cartes numérisées. Ces outils visent également à interpréter ce texte en l'associant à des bases de connaissances externes qui définissent des catégories sémantiques (par exemple, montagnes, villes, routes).

En France, les travaux de recherche menés dans les laboratoires de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) représentent des avancées significatives pour la production et l'utilisation des données géohistoriques. Le projet de recherche GeoHistoricalData¹⁴, par exemple, a mis en place une approche collaborative pour la collecte des données géohistoriques à partir des cartes Cassini¹⁵. De manière similaire, le projet GeOpenSim¹⁶ a porté sur la création et la modélisation de bases de données spatio-temporelles pour l'étude des dynamiques territoriales. Ces projets ont apporté d'importantes contributions méthodologiques, scientifiques et techniques en termes de création de bases de données spatio-temporelles (Perret, Boffet Mas et al., 2009), de classification des tissus

¹³ Le code est disponible sur GitHub. Au moment de la rédaction de cette thèse, le site semblait être hors ligne. <http://buildinginspector.nypl.org/>

¹⁴ Projet de recherche démarré en 2013. Collaboration IGN, EHESS, CEA, IFSTTAR, ArScAn, Géographie-Cités, BnF, INRA, LIVE, ThéMA, Charta SRL, Le Ny conseil, Archives Nationales, geospective, NYPL, Stanford Collaboration avec l'EHESS à travers deux thèses de doctorat : Bertrand Dumenieu (2011-2015) et Benoît Costes (2012-2016). Collaboration avec Belgrand GEBD (IFSTTAR, IGN, ENPC, UPE) - MEDDE 2011-2015 geohistoricaldata.org

¹⁵ www.gallica.bnf.fr/html/und/cartes/france-en-cartes/la-carte-de-cassini

¹⁶ Projet de recherche financé par l'Agence Nationale de la Recherche (2008-2011), dont l'objectif est la création d'une plate-forme Géographique OpenSource de Simulation dans le cadre d'une collaboration entre l'IGN, le LSIIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection), et le LIVE (Laboratoire image ville environnement de l'université de Strasbourg).

urbains (Puissant et al., 2011) et de simulation des dynamiques urbaines (Curie et al., 2010; Perret et al., 2010).

Outre la collecte des données, plusieurs recherches se sont également penchées sur le traitement et l'appariement des données correspondant à différentes périodes. Dans ce cadre, les thèses de doctorat de Dumenieu (2015) et Costes (2016) ont permis le développement de techniques d'appariement diachronique permettant de reconstruire systématiquement, pour des zones d'étude étendues, les évolutions morphologiques passées. Dumenieu (2015) a proposé une approche globale pour la production de bases de données spatio-temporelles à partir de sources géohistoriques. Costes (2016) a proposé une approche pour l'intégration, la qualification et l'analyse de réseaux viaires géohistoriques. Dans la continuité de ces travaux, une plateforme web collaborative et open source de géocodage a été proposée, en se basant sur la construction de répertoires géographiques composés d'objets géohistoriques extraits de cartes topographiques historiques (Cura et al., 2018).

Plus récemment, une collaboration entre le projet de recherche ANR COMMUNES¹⁷ et *Open Historical Maps (OHM)*¹⁸ a permis de mettre en place une participation collaborative à grande échelle pour la numérisation des réseaux viaires à partir des cartes d'Etat-Major (Litvine et al., 2022). OHM est une plateforme gratuite et libre d'accès de participation collaborative pour la numérisation de données géohistoriques, basée sur Open Street Map (OSM). Elle dispose d'une interface de numérisation des données qui garantit à la fois une utilisation facile pour des utilisateurs ne disposant pas de compétences particulières dans le domaine, et intègre également une étape de validation par des contributeurs plus experts.

L'extraction automatique (Mäyrä et al., 2023; Uhl & Duan, 2021) et semi-automatique (Schlegel, 2023) des données géographiques à partir de cartes historiques a progressé de manière significative au cours des trois dernières années. Pour l'extraction automatique des segments de route, l'approche la plus performante a consisté à comparer les réseaux existants avec les données historiques et à déduire la présence de routes modernes sur d'anciennes cartes (Jiao et al., 2022; Uhl et al., 2022). Cependant, malgré les avancées, ces techniques présentent des limites importantes. Pour effectuer certains types d'analyse de réseau, il est

¹⁷ Le projet, financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (2020-2023), a pour objectif la réalisation d'une infrastructure géospatiale qui, à terme, permettra de reconstituer le maillage administratif de la France métropolitaine et le réseau multimodal des transports du XVIIIe siècle à nos jours. doi. 10.5281/zenodo.3727274.

¹⁸ www.openhistoricalmap.org

souvent nécessaire de recourir à des opérations manuelles de nettoyage et de vérification approfondies, qui sont à la fois chronophages et coûteuses (J. Wang et al., 2022). Ces techniques ne sont pas en mesure de classer automatiquement les segments extraits en fonction de leur typologie d'origine. Il est donc difficile de distinguer une large route d'une petite piste, ce qui a un impact significatif sur des analyses relatives à l'accessibilité ou à la vitesse de circulation.

On notera que la participation collaborative dans les applications visant l'acquisition de données géographiques a suscité des interrogations importantes, tant sur le plan ontologique que sur le plan épistémologique, ainsi que sur la qualité des données ainsi obtenues (Daniel et al., 2018; Senaratne et al., 2017; Sieber & Haklay, 2015; Vasseur et al., 2006), et que l'acquisition de données relative au réseau viaire demeure encore très limitée.

1.2.2 Limites des cartes historiques comme sources de données viaires

1.2.2.1 Hétérogénéité spatiale et temporelle de la carte

Concernant les cartes historiques de grande échelle, telles que les cartes Cassini ou les cartes d'Etat-Major, il est important de distinguer clairement la temporalité propre à l'évolution du réseau et la temporalité propre à la réalisation de la carte. Comme une carte est souvent réalisée par plusieurs personnes, parfois sur plusieurs feuilles, il est inévitable qu'elle présente une variabilité spatiale et temporelle. Dans le cas de la carte d'Etat major, par exemple, la cartographie de la France s'est étalée sur plusieurs années (de 1820 à 1866).

En outre, en cartographie historique, l'interprétation du réseau viaire peut varier d'un cartographe à l'autre, entraînant des divergences quant à ce qui est considéré (et donc représenté) comme faisant partie du réseau et ce qui ne l'est pas (Bonin, 2016). Ainsi, la précision des données peut varier en raison de biais locaux de sélection des routes à représenter. Il est donc essentiel d'effectuer une évaluation visuelle des éventuelles variations de densité du réseau entre les différentes feuilles d'une même carte.

1.2.2.2 Hétérogénéité des représentations graphiques du réseau viaire

La représentation graphique du réseau viaire peut aussi présenter une notable hétérogénéité entre différentes cartes historiques, mais également entre les différentes feuilles d'une même carte. En effet, les cartographes adoptent des choix variés quant à la symbolisation des routes, des chemins et des voies de communication en général. Cette hétérogénéité graphique peut

découler de plusieurs facteurs. Tout d'abord, elle peut refléter les normes et les conventions cartographiques propres à chaque époque et région (Bonin, 2016). En outre, en fonction de l'objectif de la carte et de la période à laquelle elle a été créée, les représentations du réseau viaire peuvent varier considérablement. L'hétérogénéité peut également découler des différences dans la perception des cartographes eux-mêmes : chacun d'eux peut interpréter et symboliser les routes en fonction de sa propre compréhension et de son expérience. Il est donc indispensable de tenir compte de cette hétérogénéité pour exploiter et étudier les cartes historiques en vue de comprendre l'évolution des réseaux à travers le temps.

1.2.3 Précautions requises pour la création et l'utilisation de données viaires géohistoriques

1.2.3.1 Interprétation du contenu de cartes anciennes

La vectorisation des cartes historiques implique une interprétation sémantique des conventions graphiques adoptées par le cartographe. Par exemple, une route ayant une représentation très rectiligne sera probablement une route importante dans sa fonction et/ou dans son emprise. Cette information sémantique relative à l'importance de la voie se traduit aussi assez souvent par une représentation symbolique spécifique dans la légende de la carte (souvent la largeur et la couleur du trait).

Une route n'est pas toujours un objet simple à appréhender dans le temps. D'une période à l'autre, les tracés sont en effet régulièrement réaménagés pour répondre à des contraintes de charges transportées, et/ou s'adapter aux évolutions des flux supportés (Gourdon, 2020). Cela soulève des questions essentielles à savoir dans quelle mesure l'objet représenté (la route) demeure identique au fil du temps, et quelles routes sont représentées en fonction de leur nature (Bordin, 2010).

Certaines évolutions des caractéristiques des routes peuvent aussi être difficiles à expliquer, notamment des modifications de la largeur ou de l'épaisseur des tracés sur la carte (qui suppose un changement/différence de la typologie de la route). En outre, une carte historique peut simultanément représenter le réseau effectivement existant à l'époque et le réseau en cours de développement (y compris les routes en projet).

Par conséquent, la compréhension de l'évolution des tracés des routes au fil du temps est un enjeu important pour toute analyse géohistorique. Les données créées à partir de cartes historiques doivent être homogénéisées pour permettre leur comparaison avec des données

contemporaines. Mais certaines informations relatives à leur variation spatiale au cours du temps doivent être préservées (Gourdon, 2002), au-delà de la simple détection de particularités locales qui pourraient laisser supposer des anomalies de représentation.

1.2.3.2 Connexité du réseau

La notion de connexité du réseau renvoie à des caractéristiques physiques des routes et au concept d'itinéraire. Un réseau est dit connexe lorsque tous ses éléments (routes ou chemins) sont liés entre eux, permettant ainsi la circulation continue et ininterrompue (sans rencontrer de discontinuités ou d'obstacles) entre tous les points du réseau. Certaines cartes historiques peuvent présenter des discontinuités du réseau qui laissent supposer que certaines localités ne sont pas connectées. Toutefois, cela peut résulter d'une sélection spécifique du réseau viaire opérée par le cartographe. Il est crucial de se pencher sur les critères qui influencent cette sélection. Ces critères peuvent être associés à une classification administrative et/ou juridiques, telles que les classifications nationales, régionales ou départementales des voies. Ils peuvent aussi être associés à l'usage attribué aux voies, impliquant que celles moins utilisées comme les chemins ou les pistes, entre autres, ne soient pas représentées rigoureusement.

La création de données de réseaux viaires à partir de cartes historiques nécessite d'évacuer les biais de sélection des éléments du réseau liés à des classifications administratives et/ou juridiques ou à leur usage. Il s'agit à la fois d'assurer la connexité du réseau dans son ensemble et d'éviter de détecter une évolution de la connectivité locale du réseau entre deux dates, qui résulterait uniquement d'une modification des critères de sélection des éléments représentés par les cartographes, ce qui s'avère très compliqué.

1.2.3.3 Imprécisions géométriques

Pour les réseaux interurbains, la précision géométrique des relevés de terrains était sans doute bien inférieure à celles des cartes modernes. Ce faisant, le calcul d'indicateurs de réseau portant sur la métrique (mesures de longueurs, d'angle, de sinuosité) peut être remis en question, étant donné que les données géométriques peuvent ne pas être suffisamment précises pour calculer avec exactitude ces mesures (Bonin, 2016). Des restrictions analogues peuvent également concerner les réseaux urbains. Cependant, l'échelle plus fine des cartes historiques représentant des réseaux urbains suppose une meilleure précision géométrique.

1.2.4 Création d'une base de données géohistoriques de réseaux viaires dans le cadre du projet COVADEO

Le projet COVADEO (collecte, visualisation et analyse de données viaires géohistoriques) vise à fournir des données viaires pour la région Bourgogne Franche-Comté (BFC), située l'est de la France, pour différentes périodes historiques (de la période gallo-romaine au 20^{ème} siècle). Le projet consiste à collecter et géoréférencer les cartes historiques sur lesquelles les réseaux viaires peuvent être identifiés¹⁹, puis à numériser les informations géométriques des réseaux routiers correspondants. Ces cartes proviennent de différentes sources, notamment des archives départementales, des bibliothèques municipales et de la bibliothèque numérique Gallica (qui appartient à la Bibliothèque nationale de France).

Les cartes collectées sont réparties à travers la région BFC avec une couverture spatiale hétérogène. La couverture temporelle des zones géographiques par les cartes est également variable (voir Annexe 1)²⁰.

Les cartes sont géoréférencées et organisées dans un catalogue qui rassemble des données relatives au contenu physique (par exemple, les réseaux viaires, les zones urbaines et rurales) et identifie la présence d'éléments cartographiques (par exemple, la légende, l'orientation, le titre, l'auteur et l'échelle) (voir Annexe 2). Le catalogue enregistre la période historique à laquelle appartient chaque carte et son emprise spatiale. Le catalogue de cartes est stocké sur les serveurs de la Maison des sciences de l'homme et de l'environnement (MSHE) Claude-Nicolas Ledoux (Besançon). Les fichiers du catalogue sont organisés de manière hiérarchique, du niveau national au niveau local, pour une recherche efficace (voir Annexe 3). Une base de données géohistorique a été créée à partir de ce catalogue (Figure 1.10).

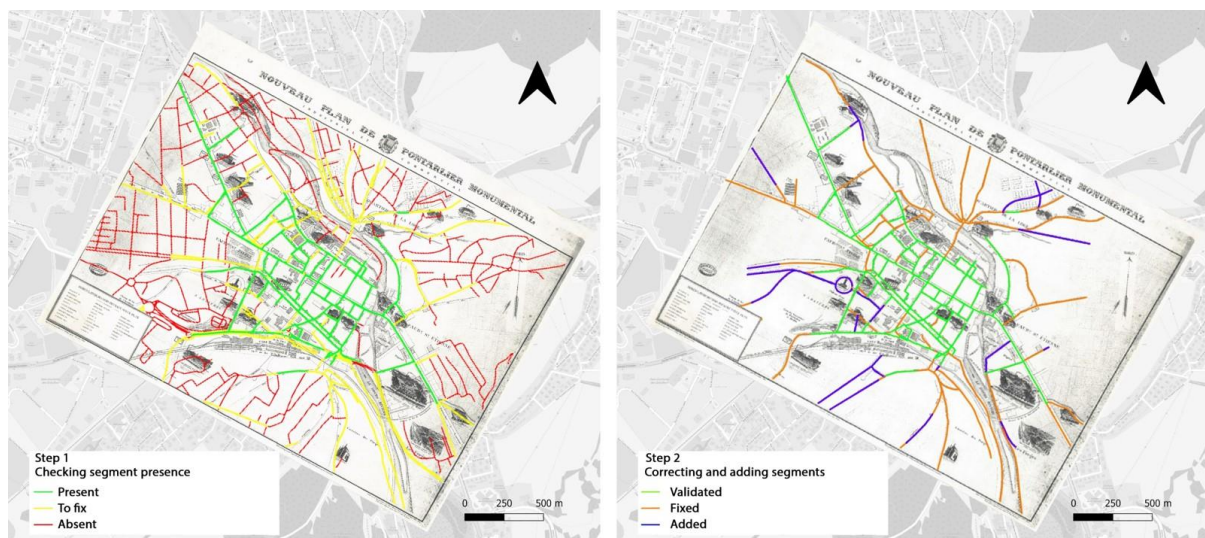
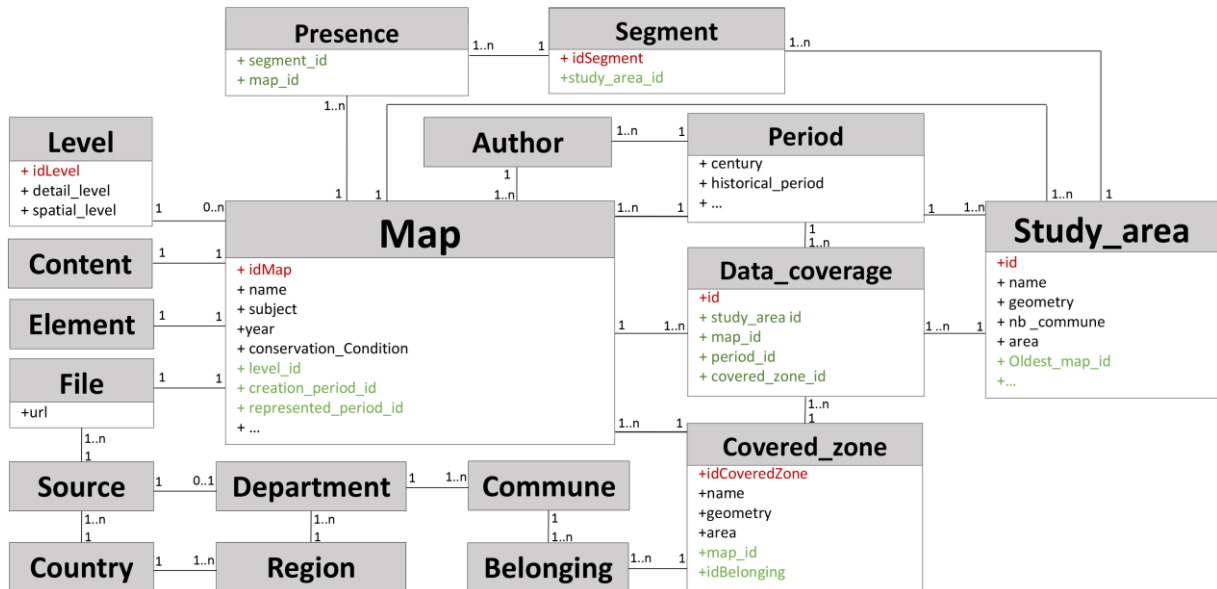
Le présent travail se focalise sur l'usage de cartes historiques d'échelle spatiale communale uniquement. La vectorisation des réseaux anciens a été réalisée sur la base des réseaux actuels afin d'assurer l'appariement des données dans le temps (Figure 1.11). La méthode consiste à superposer la couche vectorielle du réseau viaire actuel de la BD TOPO²¹ sur chaque carte historique et déterminer si chaque segment du réseau viaire existant est présent, absent ou

¹⁹ 440 cartes ont été collectées, dont 325 ont été géoréférencées, en date de novembre 2021.

²⁰ La carte de synthèse de la couverture spatiale et temporelle des cartes collectées, numérisées et géoréférencées sur la région BFC, seront publiées lors de la mise en ligne de la plateforme COVADEO prévue fin 2023.

²¹ BDTOPO 2019. www.geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/bdtopo

doit être modifié sur la carte historique. Les segments de route nécessitant un ajustement sont modifiés et les segments manquants sont ajoutés. Les réseaux viaires historiques des trois villes étudiées ont été vectorisés manuellement en suivant cette méthodologie.



1.3 Méthodes choisies pour l'étude morpho-historique des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier

1.3.1 Modèles de représentation et de caractérisation des réseaux viaires

1.3.1.1 La construction des voies

Pour le présent travail de recherche, nous avons choisi de considérer comme entité élémentaire du réseau non pas le segment de rue, ni l'arc, mais la voie (Lagesse, 2015).

Soit G un graphe primaire constitué d'arcs A (liens) et de nœuds N (intersections), défini comme $G = (N, A)$. Les intersections de degré 2 (connectant 2 segments) sont considérées comme des points annexes ; seuls les points d'extrémité ou les nœuds d'intersection avec 3 segments (liens) ou plus sont considérés comme des nœuds. Les nœuds sont donc positionnés aux intersections et les points annexes aux changements de direction. Les segments de rues qui sont connectés entre eux par des points annexes (Figure 1.12 - a) forment un arc (Figure 1.12 - b). Ainsi, entre deux nœuds du graphe, les arcs ne sont pas nécessairement rectilignes.

Pour construire les voies, nous avons choisi d'adopter la méthode ICN (négociation de la continuité des intersections, présentée précédemment dans 1.1.2.3) (Porta et al., 2006c) révisée par Lagesse (2015). D'abord, le graphe est construit à partir du réseau viaire, en positionnant les nœuds aux intersections. Les tronçons entre chaque paire de nœuds sont les arcs du graphe. Ensuite, l'hypergraphe est construit par l'association des arcs. Il s'agit de regrouper les arcs les plus alignés en fonction de leurs angles d'intersection à un nœud donné. La voie peut être composée d'un arc unique ou bien de nombreux arcs et peut s'étendre alors sur toute la zone d'étude (i. e. une ville entière).

Les voies sont construites de la manière suivante. A chaque nœud, les arcs connectés sont appariés en fonction de leur angle de déviation minimal, avec un seuil maximal $\theta_{\max} = 60^\circ$ (Figure 1.12 - c). Cet angle de déviation désigne l'angle d'intersection formé par les premiers segments droits (reliant le nœud et le premier point annexe) de chaque paire d'arcs qui se connectent à un nœud donné. L'objet "voie" est construit de manière itérative, par ajout successif d'arcs à la voie. Les arcs dont l'angle d'intersection dépasse 60° avec tous les autres arcs constituent des voies distinctes. La construction de la voie est indépendante de l'ordre dans lequel le réseau est lu. Le réseau résultant est un hypergraphe non orienté composé d'un ensemble de nœuds et de voies $H = (N, V)$.

La voie est un objet multi-échelle partant de la plus petite impasse pour aller jusqu'aux chemins historiques et aux grandes voies modernes qui traversent tout le territoire. Les indicateurs que l'on peut calculer sur la voie sont robustes au regard des limites de la zone d'étude (Lagesse et al., 2015), tant que le réseau est découpé de manière cohérente²². Les cartes résultantes ont en outre la particularité d'être directement "parlantes" aux acteurs sociaux, et de faire sens pour les urbanistes et historiens qui les étudient. La voie est donc un objet privilégié pour l'analyse des réseaux viaires.

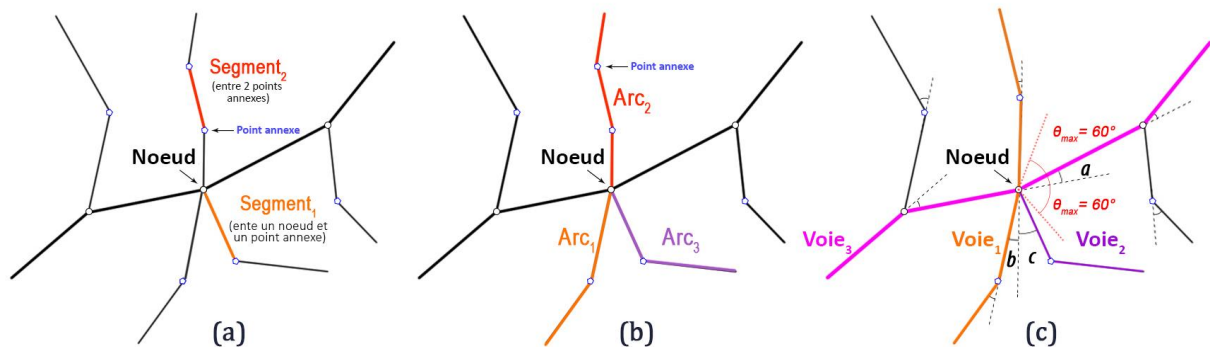


Figure 1.12. Méthode de construction des voies sur un échantillon de réseau : (a) un échantillon de segments de rues au sens mathématique du terme (lignes droites entre deux points) entre un nœud et un point annexe, ou entre points annexes ; (b) construction d'un graphe comportant des arcs et des nœuds ; (c) un hypergraphe avec des voies formées par un alignement d'arcs continus, en se basant sur leur angle de déviation minimal et le seuil choisi $\theta_{\max} = 60^\circ$. Par exemple, en tenant compte que l'angle b entre l'arc 1 et l'arc 2 est inférieur à l'angle c entre l'arc 2 et l'arc 3, la voie 1 est construite par l'association de l'arc 1 et de l'arc 2. L'arc 3 forme une voie distincte à lui seul. Source : El Gouj et al. (2022).

1.3.1.2 Le choix des indicateurs

Indicateurs locaux

A partir du réseau représenté par l'hypergraphe direct des voies, nous calculons différents indicateurs locaux redéfinis et/ou développés par Lagesse (2015). Le degré correspond au nombre de voies V dans un graphe G qui intersectent une voie de référence (V_{ref}) (Équation 1.1).

$$\text{Équation 1.1. : } \text{degré}(v_{ref}) = \text{Card}(v \in G/v \cap v_{ref})$$

²² Par exemple, si une rocade périphérique est segmentée ou divisée en plusieurs morceaux lors du découpage du réseau, cela peut impacter la robustesse des résultats.

La connectivité est donnée, pour une voie V_{ref} , par le nombre d'arcs qu'elle intersecte à chacun de ses nœuds $n \in V_{ref}$ (Équation 1.2). Elle diffère légèrement du degré car une voie peut être intersectée par davantage d'arcs que de voies, selon la configuration de la jonction (à une intersection en X, une voie intersecte deux arcs ; une jonction en T, une voie intersecte un seul arc). Quand on considère uniquement les arcs et non pas les voies, la connectivité est toujours égale au degré.

$$\text{Équation 1.2 : } connectivité(v_{ref}) = \sum_{n \in v_{ref}} Card(a / [(n \in a) \wedge (a \notin v_{ref})])$$

Le degré de desserte, proposé par Lagesse (2015), représente la différence entre la connectivité et le degré. Il identifie le nombre d'intersections en X par opposition aux jonctions en T d'une voie de référence V_{ref} avec une autre voie (Figure 1.13). Cet indicateur met en évidence les voies dont la connectivité est supérieure au degré (Équation 1.3). Plus cette différence est grande, plus la voie croise son voisinage de manière centrale et fait partie d'une structure continue permettant un accès direct à l'ensemble du réseau.

$$\text{Équation 1.3 : } degré\ de\ desserte(v_{ref}) = connectivité(v_{ref}) - degré(v_{ref})$$

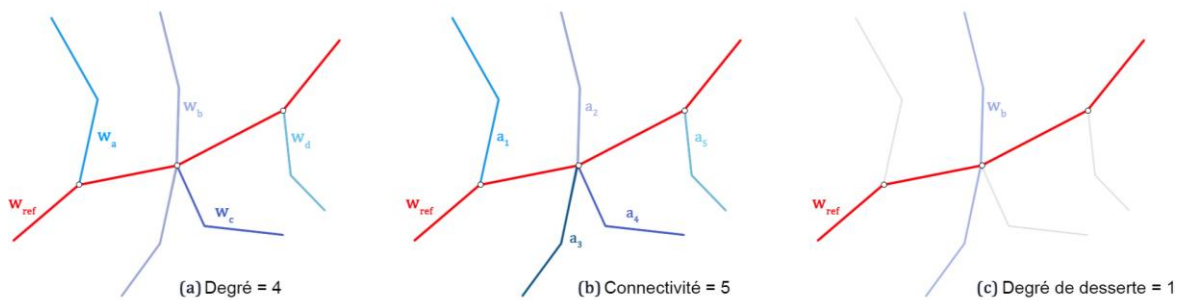


Figure 1.13. Schémas illustrant le calcul des indicateurs (a) degré, (b) connectivité et (c) degré de desserte sur le même échantillon de réseau. (a) Le degré est le nombre de voies qui croisent la voie de référence V_{ref} , soit 4. (b) La connectivité est le nombre d'arcs qui croisent V_{ref} , soit 5. (c) Le degré de desserte est le nombre de voies qui croisent V_{ref} dans une intersection en X, soit 1. Source : El Gouj et al. (2022).

L'orthogonalité caractérise une voie en fonction de son angle de connexion avec son voisinage direct. Cet indicateur, également proposé par Lagesse (2015), est calculé en additionnant les valeurs des sinus des angles de la connexion entre la voie de référence et les arcs qu'elle intersecte (en considérant toujours le plus petit angle à chaque nœud $\theta_{a_i a_j}$ et en le normalisant par le nombre de connexions (la connectivité de la voie) (Équation 1.4). Les valeurs de cet indicateur varient entre 0 et 1 : plus il est proche de 1 et plus les angles sont proches d'un angle droit, tandis que plus il tend vers 0, plus les connexions au réseau se font

suivant un angle aigu. Calculée localement, pour chaque voie, l'orthogonalité permet d'identifier les motifs dans le tissu viaire. Elle met en évidence la manière dont chaque voie est incluse dans le réseau au regard de deux cas extrêmes possibles : les voies incluses dans des structures très maillées comme les grilles parfaitement régulières de Manhattan, et celles dont les intersections se font avec un angle faible comme les bidonvilles en structure arborescente (Buhl et al., 2006).

$$\text{Équation 1.4 : } \textit{orthogonalité}(v_{ref}) = \frac{\sum_{n \in v_{ref}} \sum_{a_i \cap n \wedge a_j \notin v_{ref}} \min(\sin(\theta_{a_i a_j})) / (a_j \cap n \wedge a_j \in v_{ref})}{\textit{connectivité}(v_{ref})}$$

L'indicateur d'espacement, aussi proposé par Lagesse (2015), est construit sur des critères géométriques. Il définit la distance métrique moyenne entre deux intersections (pour chaque voie), en divisant la longueur de la voie (en mètres) par sa connectivité (nombre d'arcs qu'elle intersecte) (Équation 1.5). Cela équivaut à une mesure inverse de la densité linéaire locale du réseau. Cette caractérisation peut être utilisée pour identifier les lieux où le réseau viaire est concentré en clusters denses, et ceux où l'espacement est plus important, comme souvent observé autour des rocade périphériques.

$$\text{Équation 1.5 : } \textit{espacement}(v_{ref}) = \frac{\textit{longueur}(v_{ref})}{\textit{connectivité}(v_{ref})}$$

Indicateurs globaux

Des indicateurs globaux de centralité, le degré (*degree centrality*), la centralité de proximité (*closeness centrality*) et la centralité d'intermédiarité (*betweenness centrality*), sont calculés à partir de la représentation duale de l'hypergraphe des voies. Ces indicateurs de centralité sont largement utilisés pour explorer la topologie des réseaux viaires (cf. sous-section 1.1.3.2). Ils ont été adaptés pour être calculés sur les voies (Lagesse, 2015). Dans l'hypergraphe dual H' , les voies sont représentées par des nœuds et les nœuds sont représentés par des arcs. Les centralités de proximité et d'intermédiarité font appel à deux notions indispensables pour la compréhension de la structure spatiale du réseau viaire : le chemin le plus court et le chemin le plus simple (voir définition dans 1.1.3.1 et illustration sur la figure 1.6).

Sur un graphe dual, la centralité de proximité se réfère au nombre de fois où il faut changer de chemin ou tourner pour aller d'un nœud de référence à tous les autres nœuds. En considérant les voies comme des éléments continus du réseau, un changement de voie est donc considéré comme un tournant. Appliquée aux voies, la centralité de proximité représente la proximité topologique de la voie avec l'ensemble du réseau en calculant l'inverse de la somme de toutes les distances topologiques les plus simples d_{simple} entre la voie de

référence et toutes les voies du réseau (Équation 1.6). Le chemin le plus simple topologiquement est celui avec le nombre minimum de voies. Plus la centralité de proximité est importante, plus la voie permet un accès facile à l'ensemble du réseau à travers des chemins topologiques simples.

$$\text{Équation 1.6 : } \textit{centralité de proximité} (v_{ref}) = \frac{1}{\sum_{v \in G} d_{simple}(v, v_{ref})}$$

La centralité d'intermédiarité concernant les voies est donnée par la somme des chemins topologiques les plus courts entre chaque paire de voies (V_1, V_2) qui passent par une voie de référence (V_{ref}), divisée par le nombre total de chemins les plus courts possibles entre ces deux voies (V_1, V_2) (Équation 1.7). Cet indicateur quantifie le nombre de fois où une voie est utilisée le long des chemins les plus courts entre toutes les paires de voies (nœuds du graphe dual).

$$\text{Équation 1.7 : } \textit{centralité d'intermédiarité} (v_{ref}) = \sum_{v_1 \neq v_2 \neq v_{ref} \in G} \frac{\sigma_{v_1 v_2}(v_{ref})}{\sigma_{v_1 v_2}}$$

L'analyse des réseaux à partir de l'objet voie est également possible en considérant d'autres indicateurs qui n'ont pas été discutés ici, puisqu'ils fournissent en grande partie des informations similaires à ceux présentés dans cette sous-section. Lagesse (2015) a mené une étude systématique pour repérer les corrélations entre ces indicateurs et a choisi de privilégier les plus pertinents. Toutefois, les résultats de cette étude ont montré que les informations apportées par la centralité d'intermédiarité peuvent être redondantes avec celles apportées par le degré. Malgré cela, nous avons choisi de l'inclure dans nos analyses. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un indicateur classique en théorie des graphes, et nous souhaitons évaluer ses résultats sur l'analyse de réseaux historiques.

1.3.1.3 Procédures informatiques de construction des voies et de calcul des indicateurs

Le plugin Morpheo²³ (Lagesse, 2015) est utilisé sur QGIS pour la construction de l'hypergraphe du réseau viaire, puis pour le calcul des indicateurs. La construction des voies sur Morpheo est lancée à partir d'une couche vectorielle des segments du réseau viaire. Cette couche doit impérativement respecter certaines caractéristiques : une géométrie linéaire simple ("*LineString*") et un système de projection en EPSG 3857.

²³ Package Python et plugin QGIS développé initialement dans le cadre du projet ANR MoNuMoVi (2012 - 2016) pour la caractérisation de graphes spatiaux, permettant la construction de voies et le calcul d'indicateurs.
<https://plugins.qgis.org/plugins/morpheo/>

Les données vectorielles des réseaux viaires, en particulier les réseaux historiques vectorisés manuellement, peuvent contenir quelques erreurs, telles que des connexions de segments légèrement déplacées aux intersections. Pour corriger ces erreurs, une zone tampon de 4 mètres est créée autour des nœuds (le paramètre "*buffer*" sur la figure 1.14). Si ces zones tampons se touchent, les nœuds concernées sont fusionnés pour former un seul nœud. En outre, un filtrage est appliqué pour les arcs très courts (le paramètre "*Min. edge Length*" sur la figure 1.14). Enfin, une distance d'accrochage est appliquée pour connecter les segments s'ils se situent à une distance tolérée par rapport à autre segment ou nœud du réseau (le paramètre "*Snap dist.*" sur la figure 1.14). Toutes ces procédures sont intégrées à Morpheo.

Pour le calcul des indicateurs, certains attributs sont calculés dès la construction de l'hypergraphe direct : le degré, la connectivité, l'espacement et l'orthogonalité. D'autres sont calculés à partir de l'hypergraphe dual (Figure 1.15) : la centralité de proximité ("*closeness centrality*") et la centralité d'intermédiarité ("*betweenness centrality*"). Le degré de desserte est calculé à partir de la connectivité et du degré.

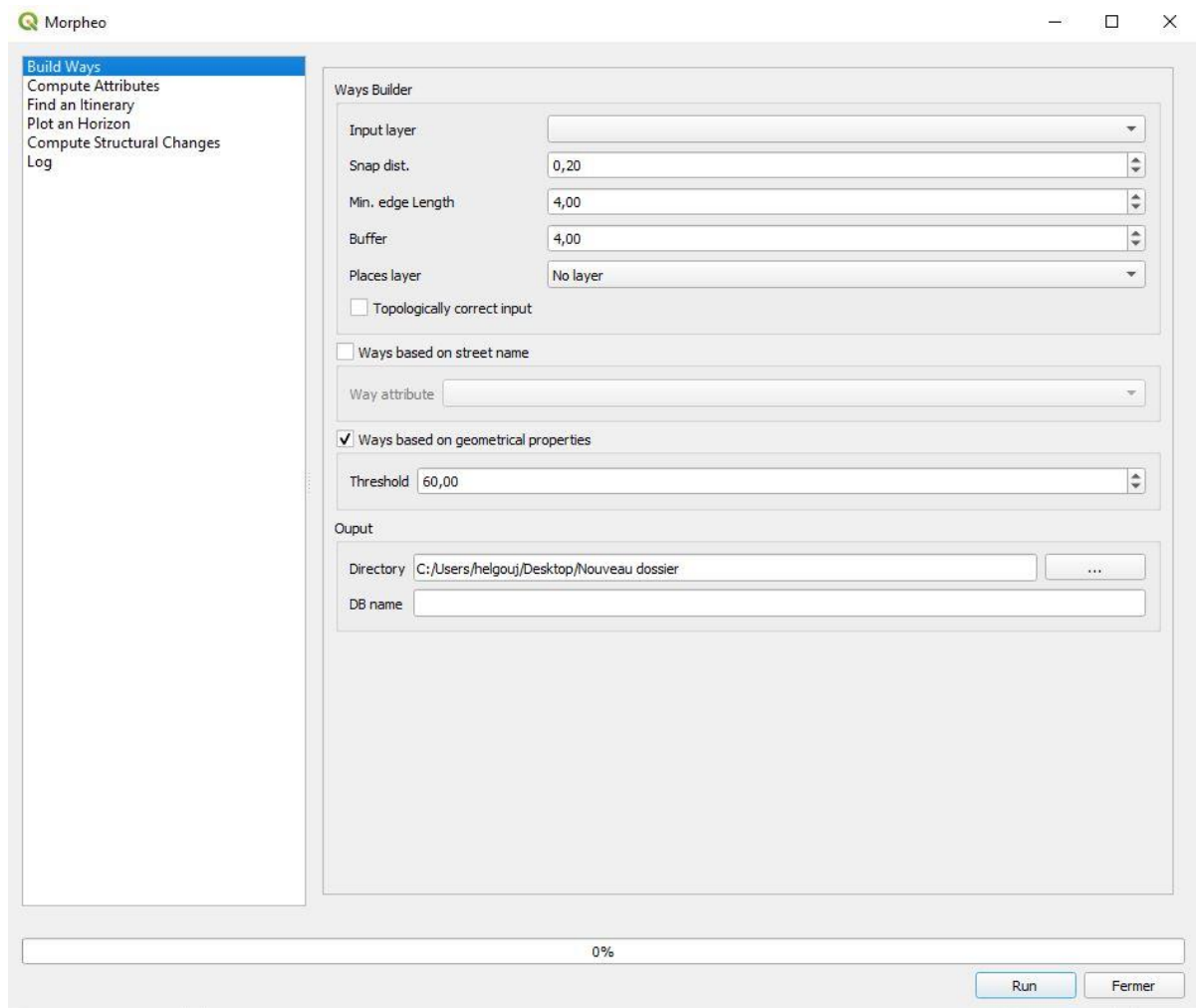


Figure 1.14. Fenêtre du plugin Morpheo sur QGIS pour la construction des voies.

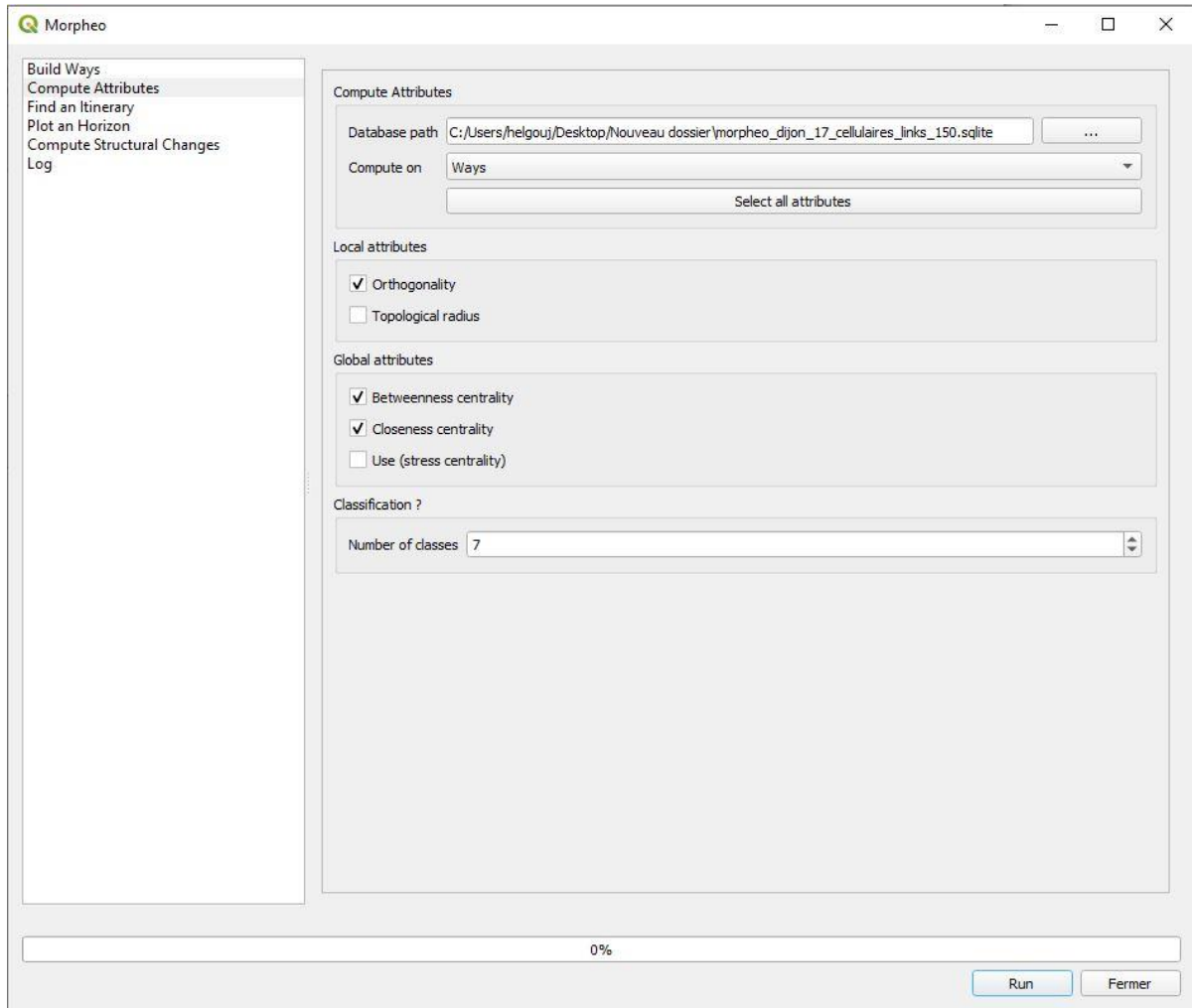


Figure 1.15. Fenêtre du plugin Morpheo sur QGIS pour le calcul des indicateurs.

1.3.2 Protocole d'analyse

1.3.2.1 Couverture temporelle des analyses

Les cartes géohistoriques collectées pour les trois villes de Dijon, Besançon et Pontarlier présentent une fréquence temporelle variable selon les siècles. Le réseau le plus ancien pour chaque territoire correspond à la fin du 17^{ème} siècle. Pour le 18^{ème} siècle, les réseaux anciens à une ou deux dates sont disponibles pour chaque territoire. À partir du 19^{ème} siècle, des cartes à plusieurs dates sont disponibles, ce qui permet de suivre de manière plus fine l'évolution des réseaux jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle (en considérant au minimum un réseau toutes les 30 ou 50 années). Au final, une légère différence de couverture temporelle existe entre les trois villes (10 dates historiques pour Dijon et Besançon, et 8 dates pour Pontarlier). Deux réseaux contemporains sont analysés pour chaque territoire, correspondant aux années 2010 et 2019.

Pour le réseau viaire de Dijon, nous considérons 12 dates correspondant respectivement aux années : 1690²⁴, 1790, 1839, 1844, 1855, 1867, 1876, 1883, 1900, 1944, 2010 et 2019. Pour le réseau viaire de Besançon, nous considérons 12 dates correspondant respectivement aux années : 1696, 1745, 1786, 1834, 1848, 1860, 1878, 1883, 1900, 1937, 2010 et 2019. Pour le réseau viaire de Pontarlier, nous considérons 10 dates correspondant respectivement aux années : 1692, 1736, 1760, 1830, 1842, 1912, 1921, 1931, 2010 et 2019.

1.3.2.2 Analyses synchroniques et diachroniques

D'abord, des analyses statiques, synchroniques, des réseaux seront menées à différents temps t pour mettre en évidence la configuration et la structure du réseau à différentes dates, des plus anciennes aux plus contemporaines (Tableau 1.1). Ensuite, des analyses différentielles des réseaux seront menées, successivement entre un temps t et un temps $t+1$, qui permettent une lecture diachronique de son évolution (Tableau 1.2).

Ces analyses mobiliseront les méthodes de représentation et de caractérisation des réseaux viaires présentées dans la section 1.3.1. Ces analyses seront complétées par l'étude des propriétés structurelles de ces réseaux invariantes dans l'espace et le temps (Tableau 1.2).

²⁴ La carte source est datée à la fin du 17^{ème} siècle, par simplification, nous convenons de l'annoter avec la date 1690 tout au long de la thèse.

1.3.2.3 Emprises spatiales considérées

La représentation du réseau viaire sur les cartes anciennes est souvent réduite et n'englobe pas nécessairement l'étendue spatiale totale de chaque ville à chaque date. Considérer la même couverture spatiale au fil du temps pour étudier l'évolution sur une même emprise impliquerait une restriction des résultats à une zone limitée autour du centre et les résultats obtenus ne refléteraient pas les réelles tendances de chaque ville mais plutôt de leur noyau urbain central, ce qui ne répond pas aux objectifs de ce travail. Par conséquent, c'est l'emprise spatiale de chaque réseau à chaque date qui sera prise en considération lors de l'analyse morphologique des réseaux historiques. Notons que l'emprise spatiale du réseau à un temps $t+1$ peut être plus petite qu'à t de par la différence des couvertures spatiales des cartes historiques évoquée précédemment.

L'analyse des réseaux à des dates contemporaines se base sur des réseaux extraits de la BD TOPO 2010 et 2019 en définissant une zone large (approximativement 200 km² pour Dijon et Besançon et 100 km² pour Pontarlier) autour de la zone urbaine de chaque territoire.

Dans le cadre des analyses diachroniques, les données imposent de considérer l'emprise spatiale à un temps t pour étudier les modifications du réseau viaire entre chaque paire de dates successives (un temps t et $t+1$). Dans certains cas particuliers, nous avons choisi de considérer une emprise spatiale qui correspond à l'intersection entre les deux zones de couverture des réseaux en t et $t+1$. Le premier cas se présente lorsque la zone de couverture à un temps $t+1$ est plus petite que celle à temps t (Figure 1.16). Le second cas est lorsque les deux zones sont décalées, sans nécessairement que l'une soit plus petite que l'autre (Figure 1.17).

Pour l'identification des propriétés structurelles, les analyses sont menées en considérant l'emprise spatiale propre à chaque date.

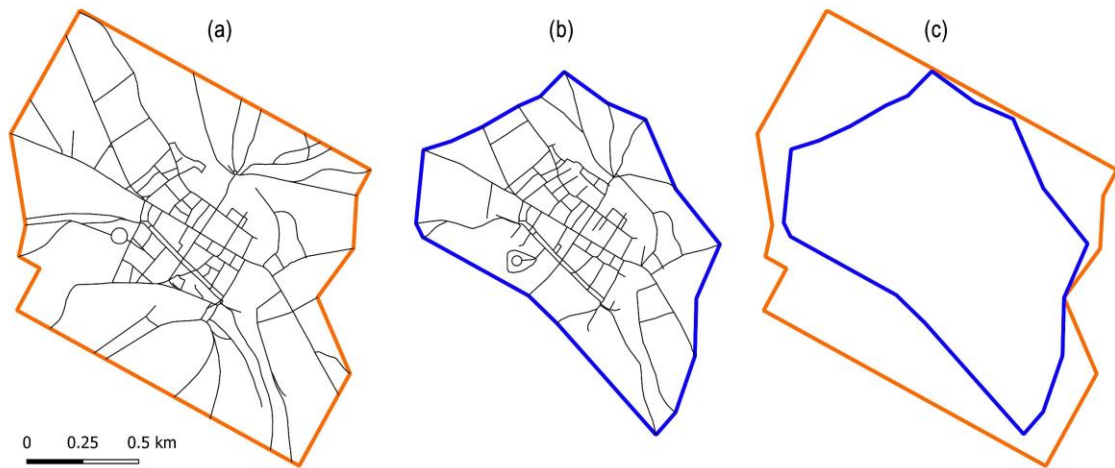


Figure 1.16. Variation de la zone de couverture du réseau viaire de Pontarlier à deux dates. (a) Le réseau viaire historique de Pontarlier en 1692 et le polygone correspondant à la couverture spatiale de la carte source. (b) Le réseau viaire historique de Pontarlier en 1842 et le polygone correspondant. (c) L'emprise spatiale commune entre les deux dates correspond au polygone bleu (le plus petit).

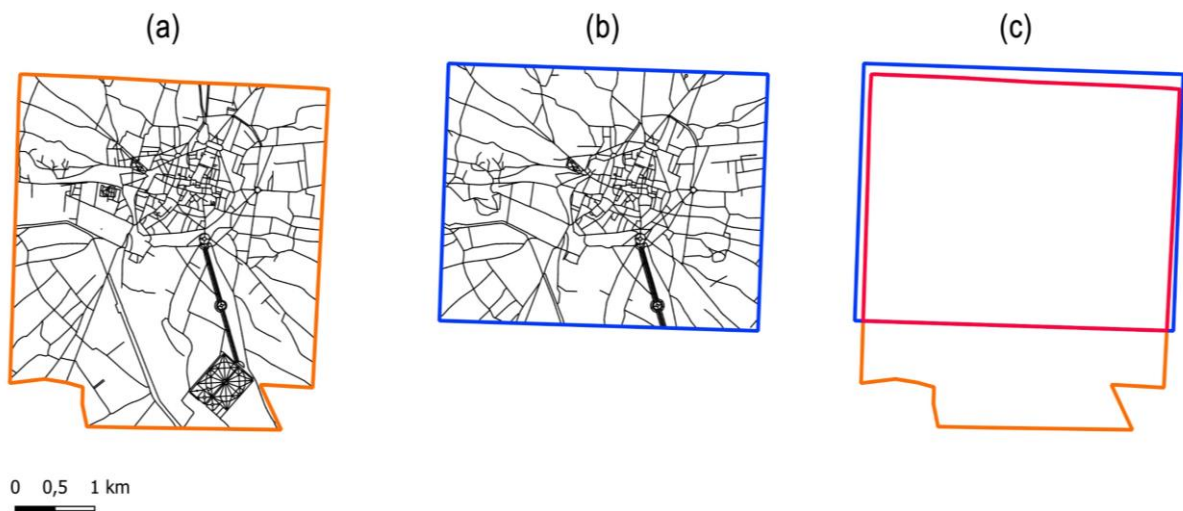


Figure 1.17. Variation de la zone de couverture du réseau viaire de Dijon à deux dates. (a) Le réseau viaire historique de Dijon en 1867 et le polygone correspondant à la couverture spatiale de la carte source. (b) Le réseau viaire historique de Dijon en 1876 et le polygone correspondant. (c) L'emprise spatiale commune entre les deux dates correspond à l'intersection (en rouge) entre les deux polygones de couverture avec une emprise spatiale plus réduite par rapport à celle des deux dates.

Chapitre	2 - Analyses morphologiques des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier								
Section	Illustration des apports de chaque indicateur pour l'analyse de réseaux historiques						Analyses des réseaux viaires contemporains		
	Apports en termes de caractérisation de la structure viaire historique à un temps t			Apports en termes de caractérisation de la morphogenèse de réseaux historiques au travers du temps					
Emprise spatiale	Couverture spatiale de la carte source			Couverture spatiale de la carte source			Périmètre de 200 km ²	Périmètre de 200 km ²	Périmètre de 100 km ²
Temporalité	1 date historique correspondant au même siècle			3 dates historiques correspondant à un siècle différent			1 date contemporaine au 21 ^{ème} siècle		
Villes	Dijon, Besançon et Pontarlier			Dijon	Besançon	Pontarlier	Dijon	Besançon	Pontarlier
Siècles	20 ^{ème}	19 ^{ème}	18 ^{ème}	Du 18 ^{ème} au 20 ^{ème}	Du 18 ^{ème} au 20 ^{ème}	Du 18 ^{ème} au 20 ^{ème}	21 ^{ème}		
Dates	Dijon 1944 Besançon 1937 Pontarlier 1931	Dijon 1883 Besançon 1848 Pontarlier 1842	Dijon 1790 Besançon 1786 Pontarlier 1692	1790 1883 1944	1786 1883 1937	1692 1842 1931	2019		
Indicateurs*	Degré	Espacement	Orthogonalité	Degré de desserte	Centralité d'intermédiarité	Centralité de proximité	L'ensemble des indicateurs calculés sur les voies		
Objectifs	Etudier un indicateur à la fois pour les trois villes : 1 indicateur, 1 siècle, 3 villes			Etudier l'évolution de trois indicateurs considérés séparément : 1 indicateur, 1 ville, 3 siècles			Etudier l'organisation spatiale d'une ville à partir de la caractérisation de son réseau viaire : 6 indicateurs, 3 villes, 1 siècle		

Tableau 1.1. Protocole pour les analyses morphologiques des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier.

*Le choix des indicateurs est expliqué dans chaque section correspondante.

Chapitre	3- Analyses diachroniques de l'évolution des réseaux viaries de Dijon, Besançon et Pontarlier									4- Propriétés structurelles invariantes dans l'espace et le temps		
Section	Suivi des évolutions à l'échelle de la voie			Suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau viaire			Identification des permanences et des changements des structures viaries dans le temps					
Emprise spatiale	Même emprise spatiale entre chaque paire de cartes			Même emprise spatiale entre chaque paire de cartes			Même emprise spatiale entre chaque paire de cartes			Emprise spatiale de la carte source ou périmètre considéré pour les réseaux contemporains		
Temporalité	Tous les siècles et dates disponibles			Tous les siècles et dates disponibles			Tous les siècles et dates disponibles			Tous les siècles et dates disponibles		
Villes	Dijon	Besançon	Pontarlier	Dijon	Besançon	Pontarlier	Dijon	Besançon	Pontarlier	Dijon	Besançon	Pontarlier
Siècles	Du 17 ^{ème} au 21 ^{ème}			Du 17 ^{ème} au 21 ^{ème}			Du 17 ^{ème} au 21 ^{ème}			Du 17 ^{ème} au 21 ^{ème}		
Dates	10 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)		8 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)	10 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)		8 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)	10 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)		8 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)	10 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)		8 dates historiques + 2 dates récentes (2010 et 2019)
Indicateurs*	Indicateurs calculés sur les voies			Degré Centralité d'intermédiarité Centralité de proximité			Indicateurs calculés sur les voies Métriques du graphe			Degré des voies et des nœuds Longueur et espacement des voies Métriques du graphe viaire		
Objectifs	Suivre de l'évolution des propriétés locales et des centralités de chaque voies			- Comparer la distribution spatiale des différentes centralités sur une période donnée - Suivre l'évolution de leur distribution spatiale au cours du temps			Suivre de l'évolution des structures viaries dans le temps			Identifier les propriétés invariantes dans l'espace et le temps		

Tableau 1.2. Protocole pour les analyses diachroniques et l'analyse de propriétés structurelles invariantes des réseaux viaries historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier. *Le choix des indicateurs est expliqué dans chaque section correspondante.

1.3.2.4 Représentation des résultats

Dans la section 1 du chapitre 2, nous illustrons l'apport des indicateurs pour l'analyse synchronique des réseaux viaires historiques en termes de caractérisation de la structure viaire à un temps t , d'une part, et en termes de caractérisation de la morphogénèse de réseaux historiques au travers du temps, d'autre part. L'objectif est d'illustrer les résultats de ces indicateurs et leur apport sans représenter exhaustivement tous les indicateurs sur les réseaux historiques des trois villes à toutes les dates. En effet, représenter les 6 indicateurs calculés sur les réseaux historiques des 3 villes aux différentes dates impliquerait la présentation de 168 cartes. Nous faisons donc le choix de présenter les résultats pour un indicateur à la fois, en sélectionnant spécifiquement une ville et une date. Dans un premier temps, les résultats des indicateurs locaux à savoir le degré, l'orthogonalité et l'espacement, calculés sur les réseaux viaires historiques sont présentés pour les trois villes en considérant des dates du même siècle pour chaque indicateur (Tableau 1.1). En fonction des indicateurs, une seule et unique période historique (siècle) est considérée pour l'analyse des trois villes (avec une date de référence différente pour chaque ville par siècle). Les résultats sont présentés sous la forme d'une carte et d'un histogramme de distribution, pour chaque indicateur calculé pour le réseau de chaque ville à une date spécifique pour chaque ville. Dans un second temps, les résultats d'un indicateur local (degré de desserte) et de deux indicateurs globaux de centralité, à savoir la centralité d'intermédiarité et la centralité de proximité, sont présentés pour certains réseaux historiques. Les résultats sont présentés sous la forme d'une carte et d'un histogramme de distribution pour chaque indicateur calculé sur chaque réseau viaire d'une ville choisie, aux trois périodes historiques considérées (trois dates spécifiques pour chaque ville).

Dans la section 2 du chapitre 2, les résultats des analyses synchroniques (à un temps t) menées sur les réseaux contemporains se focalisent sur les interprétations des indicateurs en relation avec le contexte urbain et géographique des territoires concernés. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes concernant le réseau contemporain (2019) de chaque ville (Tableau 1.1). Des cartes thématiques sont présentées en complément des cartes d'indicateurs pour mieux étayer cette analyse. Ces cartes incluent des cartes historiques, des cartes de réseaux de transport et des cartes topographiques.

Dans le chapitre 3, les résultats des analyses diachroniques présentent le suivi des évolutions à l'échelle de la voie, le suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau dans son ensemble, ainsi que l'identification des permanences et des changements des structures viaires dans le temps (Tableau 1.2). Les résultats du suivi des évolutions à l'échelle de la voie sont présentés sous la forme de cartes montrant l'évolution du rang des voies pour chaque indicateur. Les procédures d'appariement des données permettant ce suivi sont détaillées dans la sous-section suivante (1.3.2.5). Une discrétisation spécifique de l'évolution des rangs des voies entre chaque paire de dates est considérée pour la cartographie de chaque indicateur calculé sur chaque réseau étudié. Pour le suivi de l'évolution de la voie à partir d'un même indicateur, l'objectif n'est pas de comparer les valeurs absolues du rang mais plutôt d'identifier les voies dont le rang normalisé a évolué ou régressé entre chaque paire de dates. Pour chaque indicateur, les rangs sont normalisés par le nombre de voies, afin que la lecture de l'évolution des valeurs ne soit pas influencée par la taille de chaque réseau.

Dans le chapitre 4, les propriétés structurelles des réseaux invariantes dans l'espace et le temps sont étudiées pour les trois villes aux différentes dates (Tableau 1.2). Les résultats relatifs aux métriques du graphe (nombre de nœuds, d'arcs et de voies) sont représentés sous la forme de diagrammes temporels pour chaque métrique ou de nuages de points mettant en corrélation deux métriques à la fois. Les résultats relatifs à certains indicateurs sont représentés au moyen d'histogrammes de distribution. Dans tous les cas, la même échelle est adoptée pour chaque axe (abscisses et ordonnées) afin d'assurer la pertinence de la comparaison visuelle des résultats.

1.3.2.5 Appariement des résultats des indicateurs pour les analyses diachroniques

Dans le cadre de ce travail, les analyses morpho-historiques des réseaux viaires sont menées sur les voies du réseau. Toutefois l'appariement de ces données pour deux dates différentes n'est pas possible à l'échelle des voies puisque ces dernières changent et se reconfigurent dans le réseau d'une date à l'autre. Les voies sont construites à chaque temps t à partir de l'association d'arcs, eux-mêmes composés de segments, qui peuvent être différents entre un temps t et $t+1$. Un segment présent en t et appartenant à une voie V_1 , s'il existe encore en $t+1$, il peut appartenir à une autre voie V_2 . Une voie présente en t , existant encore en $t+1$, peut être modifiée par allongement (ajout d'un ou plusieurs segments), ou tronçonnée (désagrégation d'un ou plusieurs segments à ses extrémités). Ainsi un suivi de l'évolution du réseau ne peut être assuré directement à l'échelle des voies.

Les analyses diachroniques différentielles nécessitent donc de partir de l'objet voie, le "désagréger" à l'échelle du segment de rue en intégrant les attributs relatifs aux indicateurs calculés sur les voies, appairer les données puis réagréger les segments à l'échelle de la voie.

Concrètement, les étapes suivantes sont proposées :

(1) Les segments associés pour former une seule voie sont désagrégés. Chaque segment hérite la valeur des indicateurs de la voie à laquelle il appartient sur le graphe à un temps t (Tableau 1.3).

ID BDTOPO (Segment)	ID_Voie	Indicateur ₁	Indicateur ₂
1	V ₁	X ₁	Y ₁
2	V ₁	X ₁	Y ₁
3	V ₁	X ₁	Y ₁
4	V ₂	X ₂	Y ₂
...
z	V _i	X _i	Y _i

Tableau 1.3. Table attributaire des segments désagrégés à un temps t .

(2) La jointure entre les segments d'un réseau entre un temps $t-1$ et un temps t est réalisée à partir de leur identifiant BD TOPO (Tableau 1.4). Chaque segment possède alors un ensemble d'attributs qui caractérisent la voie à laquelle il appartient ("ID_voie") à différents temps t .

ID BDTOPO (Segment)	ID_Voie _{t-1}	Indicateur _{1_t-1}	Indicateur _{2_t-1}	ID_Voie _t	Indicateur _{1_t}	Indicateur _{2_t}
1	V _{1_t-1}	X _{1_t-1}	Y _{1_t-1}	V _{1_t}	X _{1_t}	Y _{1_t}
2	V _{1_t-1}	X _{1_t-1}	Y _{1_t-1}	V _{1_t}	X _{1_t}	Y _{1_t}
3	V _{1_t-1}	X _{1_t-1}	Y _{1_t-1}	V _{1_t}	X _{1_t}	Y _{1_t}
4	V _{2_t-1}	X _{2_t-1}	Y _{2_t-1}	V _{2_t}	X _{2_t}	Y _{2_t}
...
z	V _{i_t-1}	X _{i_t-1}	Y _{i_t-1}	V _{i_t}	X _{i_t}	Y _{i_t}

Tableau 1.4. Jointure entre les segments d'un réseau à deux temps $t-1$ et t (correspondant à deux dates) en se basant sur leur identifiant BD TOPO.

(3) Pour chaque segment, calcul du rang pour chaque indicateur (à chaque temps t).

(4) Pour chaque indicateur, calcul de l'évolution du rang normalisé par rapport au nombre de voies i (Équation 1.8), contenues dans le réseau correspondant entre un temps $t-1$ et un temps t (Tableau 1.5).

$$\text{Équation 1.8 : } E_{xi} = \frac{x_{i(t)} - x_{i(t-1)}}{i}$$

ID BDTOPO (Segment)	ID_Voie_t1	Indicateur1_t1	ID_Voie_t2	Indicateur1_t2	Evolution rang normalisé Indicateur1 (t2-t1)
1	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}
2	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}
3	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}
4	V2_t1	X2_t1	V2_t2	X2_t2	E _{x2}
...
z	V _i _t1	X _i _t1	V _i _t2	X _i _t2	E _{xi}

Tableau 1.5. Evolution du rang normalisé dans chaque indicateur pour chaque segment entre chaque temps t et $t+1$.

(5) Pour chaque voie, calcul de l'évolution moyenne du rang normalisé de tous les segments qui la constituent entre $t-1$ et t (Tableau 1.6).

ID BDTOPO (Segment)	ID_Voie_t1	Indicateur1_t1	ID_Voie_t2	Indicateur1_t2	Evolution rang normalisé Indicateur1 (t2-t1)	Moyenne de l'évolution du rang normalisé Indicateur1_t2
1	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}	M _{1_t2}
2	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}	M _{1_t2}
3	V1_t1	X1_t1	V1_t2	X1_t2	E _{x1}	M _{1_t2}
4	V2_t1	X2_t1	V2_t2	X2_t2	E _{x2}	M _{2_t2}
...
z	V _i _t1	X _i _t1	V _i _t2	X _i _t2	E _{xi}	M _{i_t2}

Tableau 1.6. Moyenne de l'évolution du rang normalisé dans un indicateur pour chaque voie à un temps t par rapport à un temps $t-1$.

(6) Pour chaque temps t , les segments sont réagregés à l'échelle de la voie (à un temps t) avec des attributs relatifs à l'évolution de chaque indicateur (par rapport à $t-1$) (Tableau 1.7).

ID_Voie_t2	Indicateur1_t2	Evolution rang normalisé Indicateur1 (t2-t1)	Moyenne de l'évolution du rang normalisé Indicateur1_t2	Indicateur2_t2	Evolution rang normalisé Indicateur2 (t2-t1)	Moyenne de l'évolution du rang normalisé Indicateur2_t2
V1_t2	X1_t2	X1	M1_t2	X1_t2	E _{x1}	M1_t2
V2_t2	X2_t2	X2	M2_t2	X2_t2	E _{x2}	M2_t2
V3_t2	X3_t2	X3	M3_t2	X3_t2	E _{x3}	M3_t2
...
V _i _t2	X _i _t2	X _i	M _i _t2	X _i _t2	E _{xi}	M _i _t2

Tableau 1.7. Données agrégées à l'échelle des voies à un temps t .

1.4 Synthèse du chapitre 1

Les fondements de l'étude morphologique des réseaux viaires sont la théorie des graphes et la syntaxe spatiale. Dans ce contexte, diverses approches ont été développées et adoptées pour représenter les réseaux viaires, notamment la carte axiale ainsi que les graphes viaires directs et duals. Ces approches présentent à la fois des avantages et des limitations. Par exemple, la carte axiale est critiquée pour sa tendance à simplifier excessivement l'espace et à être sensible à la sinuosité des segments de rue. D'un autre côté, le graphe dual est critiqué pour la perte d'information sur les distances métriques, qui découle de l'inscription spatiale du réseau viaire. Quant au graphe direct, il est jugé insuffisant pour saisir la structure et la complexité des réseaux de rues. En réponse à ces limites, une approche de modélisation alternative a émergé la modélisation du réseau viaire à travers la continuité par la création d'un hypergraphe (sur-réseau). Cet hypergraphe peut être créé au moyen de différentes méthodes, certaines privilégiant une continuité basée sur la toponymie des rues, tandis que d'autres se concentrent sur les caractéristiques géométriques du réseau, en particulier les angles formés entre les segments.

Plusieurs indicateurs ont été développés pour caractériser le réseau à partir de ces différents modes de représentation (graphes directs et duals, hypergraphes).

Dans le cadre de ce travail de recherche, notre objectif est d'analyser la structure et l'évolution des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier du 17^{ème} au 21^{ème} siècle. Cela nécessite l'acquisition de données géohistoriques, en plus des données viaires contemporaines disponibles (BD TOPO 2010 et 2019), ce qui représente plusieurs défis. D'une part, l'acquisition et la qualité des documents sources peuvent être soumises à des restrictions. D'autre part, la création des données vectorielles à partir de ces sources est une lourde tâche. Les données géohistoriques peuvent notamment présenter des imperfections liées à des lacunes de l'information, des imprécisions géographiques et des incertitudes de datation. Nous avons mené une collecte de cartes historiques de Dijon, Besançon et Pontarlier dans le cadre du projet COVADEO, qui ont nécessité une étape de géoréférencement, puis de vectorisation manuelle avec une méthode régressive permettant de reconstruire le réseau historique correspondant à chaque carte (et date respective) à partir du réseau viaire actuel.

Pour l'étude de réseaux historiques et contemporains des trois villes, nous avons choisi d'adopter une méthode de représentation du réseau par un hypergraphe basé sur les voies. Ces voies sont ensuite caractérisées par un ensemble d'indicateurs, qui sont plus robustes aux

effets de bords (voir Annexe 12). Cette robustesse est précieuse pour lire la structure de ces réseaux indépendamment de la taille du réseau étudié, compte tenu de la variation des zones de couverture respectives des cartes historiques d'où sont extraites les données. De plus, lorsque les indicateurs caractérisant le réseau sont calculés sur les voies, les résultats sont plus fiables, visibles et faciles à interpréter que lorsque des arcs sont utilisés (comme illustré sur la figure 1.18). Les indicateurs de centralité calculés sur les arcs, étant très sensibles au découpage du réseau, ils sont plus significatifs lorsqu'ils sont calculés sur les voies. Cette sensibilité des indicateurs de centralités aux effets de bord, lorsqu'il sont calculés sur les arcs, est illustrée également dans Hamaina et al. (2012) pour la ville de Nantes, dans Lagesse et al. (2015) pour la ville d'Avignon et dans Lagesse et al. (2016) pour la ville de Paris.

La caractérisation des réseaux à partir de ces indicateurs permet une lecture à deux échelles : locale et globale. Le degré, la connectivité, le degré de desserte, l'orthogonalité et l'espacement sont les indicateurs locaux considérés, dont le calcul ne dépend que de la voie de référence et de son voisinage direct. La centralité d'intermédiarité (*betweenness*) et la centralité de proximité (*closeness*) sont des indicateurs à l'échelle globale du réseau.

En étudiant ces indicateurs, l'objectif est d'abord de comprendre la structure du réseau. Une première lecture est donc basée sur la morphologie et la topologie du réseau à un temps t , dépourvue de toute autre information (Chapitre 2). Le suivi de l'évolution de ces réseaux caractérisés par les indicateurs au travers le temps est mené grâce à l'appariement des données à différentes dates. Les analyses basées sur ce suivi apporteront des premières réponses sur les dynamiques d'évolution (Chapitre 3). Ces analyses seront complétées par l'investigation des propriétés structurelles invariantes des réseaux viaires des trois villes aux différentes dates (Chapitre 4).

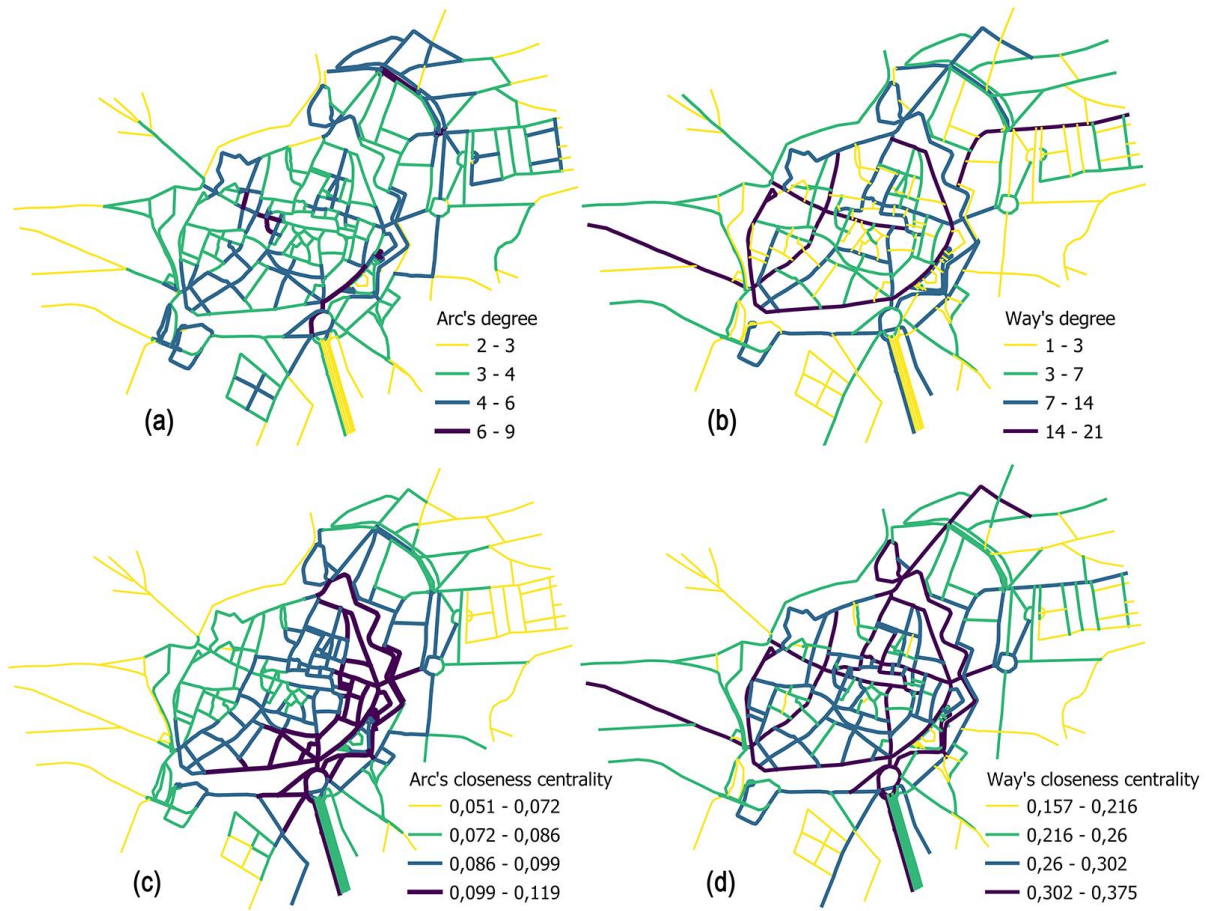


Figure 1.18. Le degré calculé sur (a) les arcs et (b) les voies ; la centralité de proximité calculée sur (c) les arcs et (d) les voies du réseau viaire historique de Dijon en 1790.

Source : El Gouj et al. (2022).

Chapitre 2

Analyses morphologiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier à différentes dates

Le chapitre précédent a permis de définir le cadre conceptuel de la thèse, les données utilisées ainsi que les méthodes et le protocole d'analyse adoptés pour ce travail. Dans ce deuxième chapitre, nous présentons les analyses morphologiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier à différentes dates, entre le 17^{ème} et le 21^{ème} siècle. Pour ces analyses les réseaux viaires sont considérés comme des éléments structurels des tissus urbains hors de toute considération fonctionnelle.

La section 2.1 vise à illustrer les apports de chaque indicateur pour l'analyse morphologique de réseaux historiques datant du 17^{ème} au 20^{ème} siècle. Les analyses portent sur une échelle intra-urbaine, partant de données viaires historiques vectorisées à partir de cartes anciennes à l'échelle communale. L'objectif est de mettre en évidence les informations apportées par chaque indicateur pour la lecture de la morphologie du réseau, sans introduire au préalable le contexte spécifique de chaque terrain d'étude. Cette section est basée principalement sur l'article El Gouj et al. (2022).

La section 2.2 présente les analyses des réseaux viaires contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier (au 21^{ème} siècle). L'organisation spatiale des villes est étudiée à partir de la caractérisation de leur réseau viaire en ajoutant des éléments d'interprétations liés à l'évolution historique et au fonctionnement de chaque territoire. Le réseau interurbain joue un rôle crucial dans les déplacements et les liaisons entre les villes. En considérant les voies comme des éléments continus du réseau, il est possible de mettre en évidence ces liaisons interurbaines sans qu'il soit nécessaire de considérer l'entièreté du réseau régional.

2.1 Illustration des apports de chaque indicateur pour l'analyse de réseaux viaires anciens

Les réseaux viaires historiques de trois villes de tailles différentes (Dijon, Besançon et Pontarlier) sont étudiés à partir des indicateurs calculés sur leur hypergraphe (voies). Ces analyses morphologiques sont menées sur les réseaux de voirie anciens considérant à chaque fois une date au sein de trois périodes historiques différentes (18^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème} siècle).

Dans la première sous-section, nous illustrons l'apport de trois indicateurs locaux (le degré, l'orthogonalité et l'espacement) pour analyser la structure viaire de chaque ville à un temps t . Dans la deuxième sous-section, nous illustrons l'apport de trois autres indicateurs (le degré de desserte et les deux indicateurs globaux : la centralité d'intermédiarité et la centralité de proximité) pour la comparaison de la morphologie de réseaux anciens à trois dates, une pour chacune des trois périodes (18^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème} siècle).

2.1.1 Apports en termes de caractérisation de la forme des réseaux à une seule date

Nous considérons ici trois indicateurs calculés sur les voies à savoir le degré, l'orthogonalité et l'espacement. Les résultats de chaque indicateur sont analysés et comparés pour les réseaux des trois villes d'étude (Dijon, Besançon et Pontarlier) à une même période. L'objectif est de déceler les caractéristiques spécifiques et les similitudes entre ces réseaux en se basant sur une lecture de leur morphologie.

En termes de représentation des résultats, toutes les valeurs d'un indicateur donné sont discrétisées conjointement pour les trois villes. Ainsi, la cartographie d'un même indicateur sur les trois villes correspond aux mêmes classes ce qui permet une comparaison visuelle plus simple des résultats obtenus pour chaque ville.

Pour chaque indicateur, un histogramme de la distribution de valeurs est aussi présenté (avec la même échelle sur l'axe des ordonnées et l'axe des abscisses). Concernant les histogrammes représentant le degré et l'espacement, les valeurs sur l'axe des ordonnées représentent la densité de probabilité et non le nombre d'occurrences. Cela permet de visualiser la distribution des valeurs de manière normalisée, ce qui est utile pour comparer des distributions de différentes tailles ou échelles. En revanche, pour les histogrammes correspondant à l'orthogonalité, les valeurs sur l'axe des ordonnées représentent le nombre

d'occurrences puisque les valeurs de cet indicateur sont déjà normalisées. Sur l'ensemble des histogrammes, les données sont regroupées en classes identiques à celles adoptées pour la cartographie des indicateurs. Les couleurs des barres des histogrammes sont aussi les mêmes que celles choisies pour la cartographie des indicateurs.

2.1.1.1 Le degré des voies des réseaux du 20^{ème} siècle

Le degré permet de classer les voies en fonction de leur capacité à connecter différentes voies du réseau. Il permet de les hiérarchiser en identifiant les voies principales, capables de relier différents secteurs, et celles secondaires ou tertiaires assurant des liaisons plus locales. Les voies les plus connectées et les plus importantes sont caractérisées par les valeurs de degré les plus élevées (en rouge sur la figure 2.1). Ces voies correspondent aux routes les plus anciennes, en particulier la "rue de la Liberté" à Dijon, la "Grande Rue" à Besançon et la "rue des Salins" à Pontarlier, ou aux principales voies de circulation (avenues, boulevards, routes départementales).

Pour Dijon, le développement de la ville n'est pas contraint par le contexte géographique et son réseau viaire est en possibilité d'expansion dans toutes les directions. On constate sur la carte que les voies ayant des valeurs de degré élevées forment une structure continue en prolongement des voies du centre-ville.

Dans le cas de Besançon, le cœur de la ville (quartier de "La Boucle") est façonné par la rivière du Doubs. Son développement est également contraint par la topographie et les collines au Sud. Ainsi, la ville s'étend principalement vers le Nord-Est, le Nord et le Sud-Ouest. Cette organisation spatiale est visible sur la carte.

Pour Pontarlier, les contraintes naturelles et topographiques marquent sa morphologie, ainsi que sa situation géographique de territoire de liaison entre la France et la Suisse. Par conséquent, les voies les plus significatives sont celles qui relient la ville au territoire régional (Besançon au Nord, Dole et Dijon au Nord-Ouest) et celles qui la relient à Lausanne (en Suisse) vers le Sud.

On constate ainsi que tous les éléments morphologiques d'un territoire sont étroitement liés les uns aux autres et interagissent de manière déterminante sur son organisation. L'usage de l'espace a également un impact important comme le cas de Pontarlier, où les flux de circulation impactent l'organisation du réseau viaire. L'indicateur de degré met donc en évidence les principaux axes de développement des trois réseaux, en tenant compte des contraintes topologiques et des flux fonctionnels.

La comparaison des histogrammes met en évidence l'une des principales propriétés topologiques d'un réseau complexe : la distribution des degrés. En effet, les distributions des valeurs du degré calculé sur les trois réseaux viaires historiques suivent une loi normale, dont la courbe de densité est une gaussienne asymétrique à gauche. La courbe de densité de chaque histogramme lisse la distribution réelle des valeurs de degré et permet une meilleure visualisation de la forme générale de la distribution.

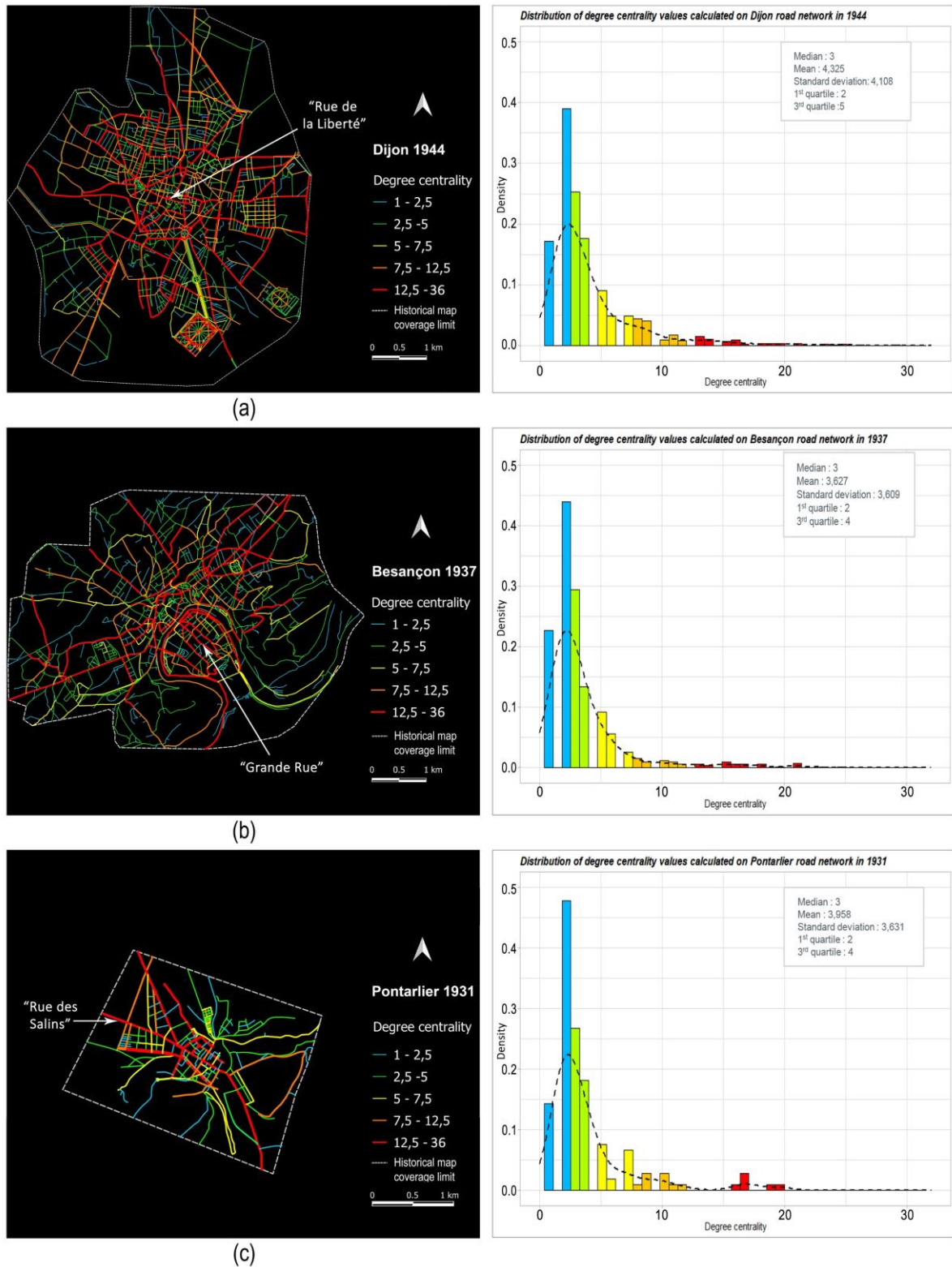


Figure 2.1. Le degré calculé sur les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1944, (b) Besançon en 1937 et (c) Pontarlier en 1931. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs du degré des voies. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.1.1.2 L'espacement des voies des réseaux du 19^{ème} siècle

L'indicateur d'espacement calculé sur les réseaux viaires historiques des trois villes présente les valeurs les plus faibles et les valeurs moyennes au niveau du centre-ville (Figure 2.2). Ceci est lié à la forte densité linéaire du réseau viaire au centre de chaque ville. Les résultats de cet indicateur peuvent être interprétés en considérant le lien entre la topologie locale des voies et les pratiques de déplacement qu'elle permet ou favorise. Les voies courtes et fortement connectées sont les plus rapprochées et présentent des niveaux d'espacement plus faibles (représentées en jaune et vert sur la figure 2.2). Pour les trois villes étudiées, ces voies assurent principalement un accès local et facilitent les déplacements piétons au sein du centre-ville. Inversement, les voies les plus longues et les moins connectées (représentées rouge et en orange dans la Figure 2.2) ont des niveaux d'espacement plus élevés et peuvent être utilisées pour des transitions rapides entre différents points du territoire. Les valeurs de cet indicateur peuvent également être expliquées par la topographie, notamment pour Besançon et Pontarlier où le développement urbain est façonné par les contraintes topographiques.

Les histogrammes représentant la distribution des valeurs d'espacement calculé sur les voies (Figure 2.2) présentent à la fois des similitudes et des variations entre les réseaux viaires historiques des trois villes. Avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses²⁵, l'ajustement des trois distributions à une courbe de densité révèle une distribution bimodale formée par deux courbes gaussiennes. La forme globale de la courbe reste la même quelle que soit la taille du réseau. Les distributions permettent notamment d'identifier des voies au niveau du centre-ville de Dijon avec une forte densité de valeurs intermédiaires. Le réseau fortement espacé au niveau de la zone périphérique au centre-ville de Besançon, reflète l'expansion de la ville durant cette période historique. Cela se traduit, sur les distributions, par un pic de la courbe de densité qui correspond à une valeur d'espacement plus élevée (par rapport à Dijon et Pontarlier). Pour le réseau viaire de Pontarlier, le pic de la courbe de densité correspond aux valeurs moyennes d'espacement, avec peu de voies très espacées. Cela s'explique par le fait que le développement la ville était très concentré au niveau du centre-ville durant la période historique à laquelle correspond le réseau.

²⁵ Il s'agit d'une distribution à longue queue, donc la représentation de l'histogramme avec une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses nous permet de mieux visualiser la distribution.

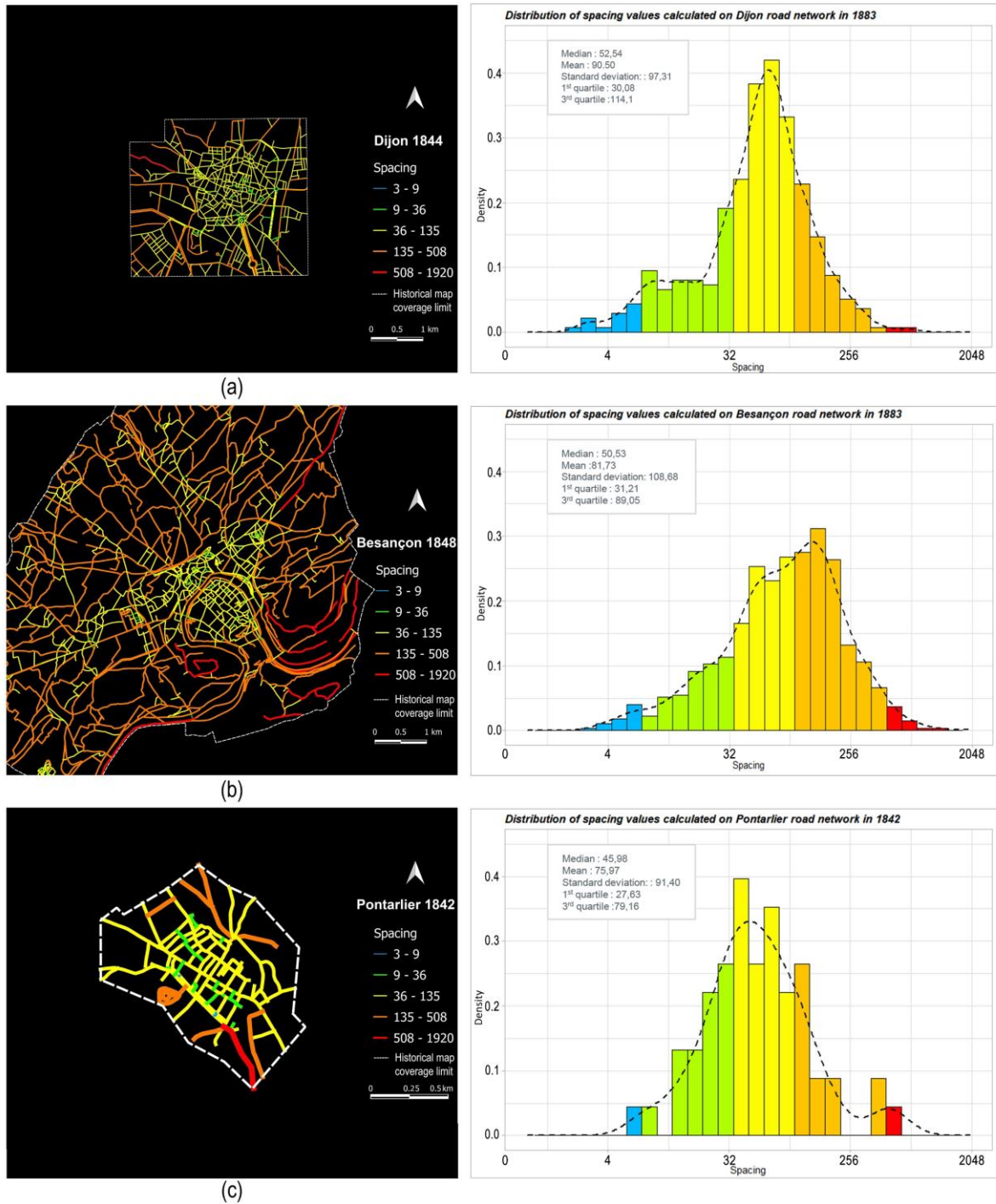


Figure 2.2. L'espacement calculé sur les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1883, (b) Besançon en 1883 et (c) Pontarlier en 1842. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs de l'espacement des voies selon une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.1.1.3 L'orthogonalité des voies des réseaux du 18^{ème} siècle

Les valeurs les plus élevées de l'indicateur d'orthogonalité (représentées en rouge sur la figure 2.3) caractérisent les voies dont l'angle d'intersection est proche de 90°, avec un réseau principalement maillé au cœur de la ville. Les voies ayant les valeurs les plus faibles (représentées en vert et bleu) sont organisées suivant une structure plus arborescente. Les valeurs modérées (en orange) assurent la transition entre les deux structures, comme pour les voies reliant le cœur de la ville aux nouveaux segments de réseau ayant été créés en périphérie.

Les voies à trafic rapide présentent principalement une faible orthogonalité car toutes les voies locales s'y connectent à des angles faibles afin de ne pas perturber le flux de circulation ou de ne pas générer de problèmes de croisement. Les routes permettant un accès local sont plus susceptibles d'être organisées suivant une structure en grille.

Les histogrammes représentant la distribution des valeurs d'orthogonalité calculées sur les voies (Figure 2.3) sont assez semblables pour les réseaux viaires historiques des trois villes. La courbe de densité (représentant la distribution approximative des valeurs) correspond à une courbe gaussienne asymétrique à droite. Nous constatons également que la queue gauche de la distribution est identique pour les trois réseaux. En revanche, la hauteur de la dernière barre de l'histogramme, correspondant à une valeur d'orthogonalité égale à 1, varie entre les trois réseaux. Cette variation illustre la prédominance d'une structure très orthogonale au niveau du réseau historique de Dijon et, plus particulièrement, de Pontarlier. Ceci peut être lié à la topographie plane de Dijon et du centre de la ville de Pontarlier.

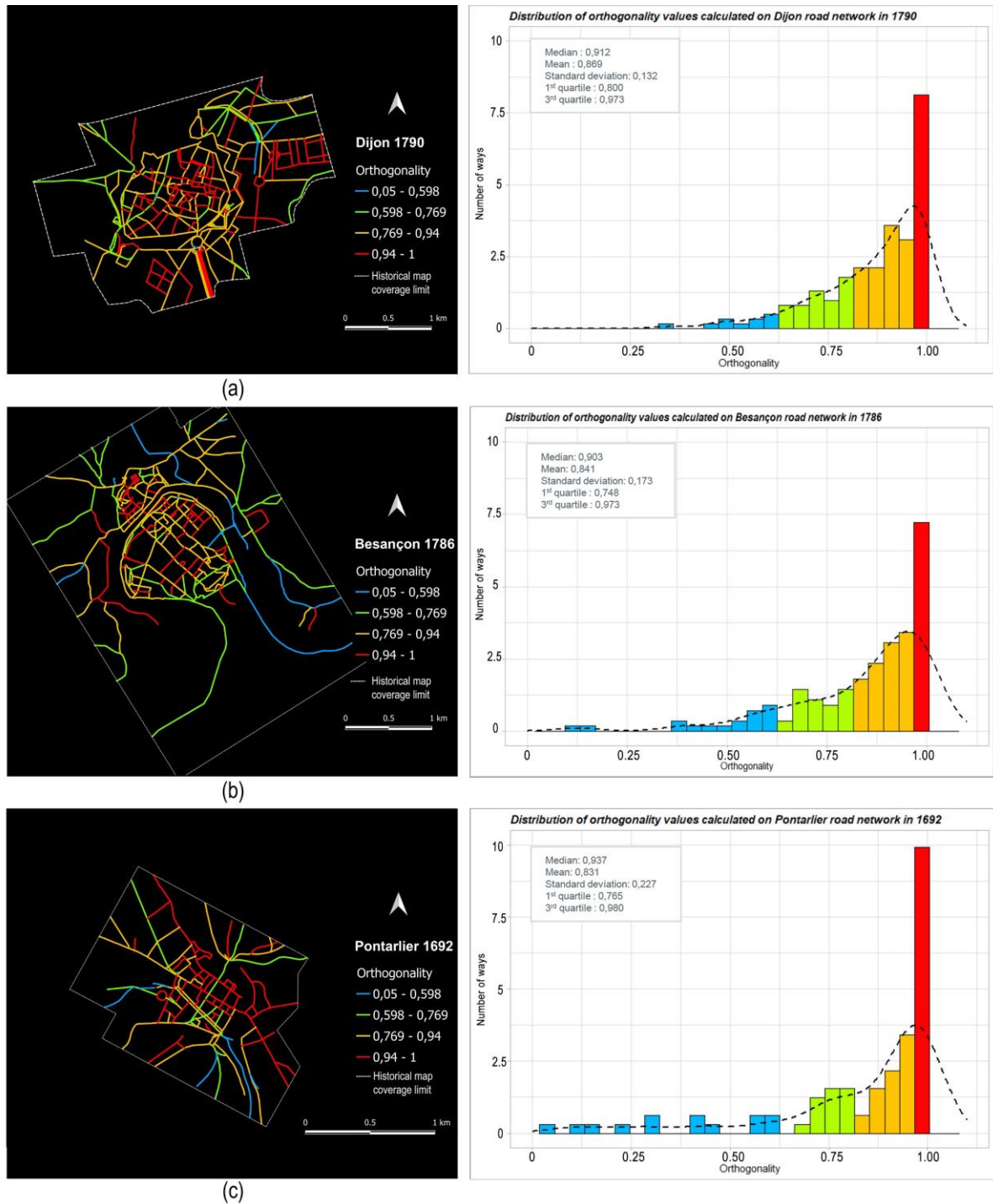


Figure 2.3. L'orthogonalité calculée pour les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1790, (b) Besançon en 1786 et (c) Pontarlier en 1692. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs d'orthogonalité. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.1.2 Apports en termes de caractérisation de la forme des réseaux à différentes dates

La comparaison de chaque indicateur, pour le réseau d'une même ville à différentes dates, permet une première lecture de l'évolution morphologique de ce réseau dans le temps. Les résultats présentés concernent un seul indicateur pour chaque ville sur différentes périodes historiques : le degré de desserte pour Dijon (au 18^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème} siècle), la centralité d'intermédiarité pour Besançon (au 18^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème} siècle), et la centralité de proximité pour Pontarlier (à la fin 17^{ème} siècle, au 19^{ème} et au 20^{ème} siècle). Pour chaque période, une seule date est choisie. L'indicateur considéré pour chaque ville a été choisi en fonction de l'intérêt des informations qu'il met en évidence et de ce qui peut être déduit du contexte et de la dynamique propres à la ville. Dijon, la plus grande des trois villes, représente un cas d'étude pertinent pour suivre l'évolution de la capacité du réseau à assurer l'accessibilité aux nouveaux quartiers périphériques depuis le centre-ville. Besançon, ville dont le développement urbain a été contraint par son hydrographie et sa topographie, s'est étendue dans trois directions à partir du centre (Nord-Est, Nord-Ouest et Sud-Ouest). Cette particularité a modifié les distributions spatiales des centralités et les usages du territoire au cours du temps, ce qui peut être étudié à partir de l'indicateur de centralité d'intermédiarité. Pontarlier, la plus petite ville étudiée, est caractérisée par un réseau qui s'est densifié au niveau du centre historique au cours du temps. Le suivi de l'évolution de la centralité de proximité permettra de préciser le lien entre l'historicité (l'ancienneté) et la topologie du réseau, et de vérifier si les routes les plus anciennes demeurent les plus centrales.

En termes de représentations des résultats, toutes les valeurs d'un indicateur donné sont discrétisées conjointement pour les réseaux d'une même ville aux trois dates considérées.

2.1.2.1 Dijon : degré de desserte en 1790, 1883 et 1944

Le degré de desserte calculé pour les réseaux viaires anciens de Dijon est présenté sur la figure 2.4. Comme cet indicateur définit le nombre de croisements d'une voie de référence formant des intersections en X et non pas des jonctions en T, il met en évidence l'inclusion de la voie dans la structure globale du réseau. Les voies avec les valeurs de degré de desserte les plus élevées (en rouge et orange sur la figure 2.4) correspondent aux principales routes à trafic rapide au sein de la structure urbaine, et aux anciennes routes qui se sont étendues au fil du temps. Les valeurs moyennes correspondent aux routes assurant une desserte à une échelle locale, et les plus faibles valeurs correspondent à des impasses.

Dans le cas de Dijon, les voies du centre historique de la ville présentent un degré de desserte important pour ce qui concerne les réseaux de 1790 et 1883, et ces valeurs sont encore plus importantes pour le réseau de 1944 (comme l'exemple de la "rue de la Liberté"). Le centre-ville forme donc la colonne vertébrale du développement urbain, puisque ses principales artères sont des passages indispensables pour accéder à l'ensemble de la ville. Entre les deux premières périodes, l'évolution du degré de desserte des voies du centre-ville s'explique par le fait que le réseau viaire s'est densifié à l'intérieur et autour de celui-ci. Puis, avec la croissance de la ville au fil du temps, de nouvelles voies se sont greffées/connectées aux voies du centre historique, suite au développement de nouveaux quartiers. Par exemple, la "rue de la Liberté" s'est connectée à de nouvelles voies émergentes aux limites du centre-ville, puis à des routes départementales vers le Nord-Est et le Nord-Ouest, entraînant l'augmentation de son degré de desserte (comme le montrent les histogrammes de la Figure 2.4). Concernant la "rue Monge", son degré de desserte a évolué tout au long des deux premières périodes, puis a régressé pour le réseau de 1944. Les nouvelles voies, qui ont émergé en dehors du centre-ville, se sont rattachées à la voie en continuité de cette rue avec principalement des intersections en T. Au fil du temps et du développement de la ville, les voies les plus importantes en termes de desserte sont devenues celles qui relient le centre historique aux différents secteurs de la ville.

Les distributions des valeurs du degré de desserte calculé sur les réseaux historiques de Dijon à trois temporalités correspondent à une loi normale, dont la courbe de densité correspond à une gaussienne asymétrique à gauche.

Au final, l'indicateur du degré de desserte permet de mieux comprendre la manière dont les différentes voies du réseau se connectent entre elles. Il met en évidence les structures traversantes dans le réseau qui exercent une influence majeure sur la desserte locale et l'accessibilité globale.

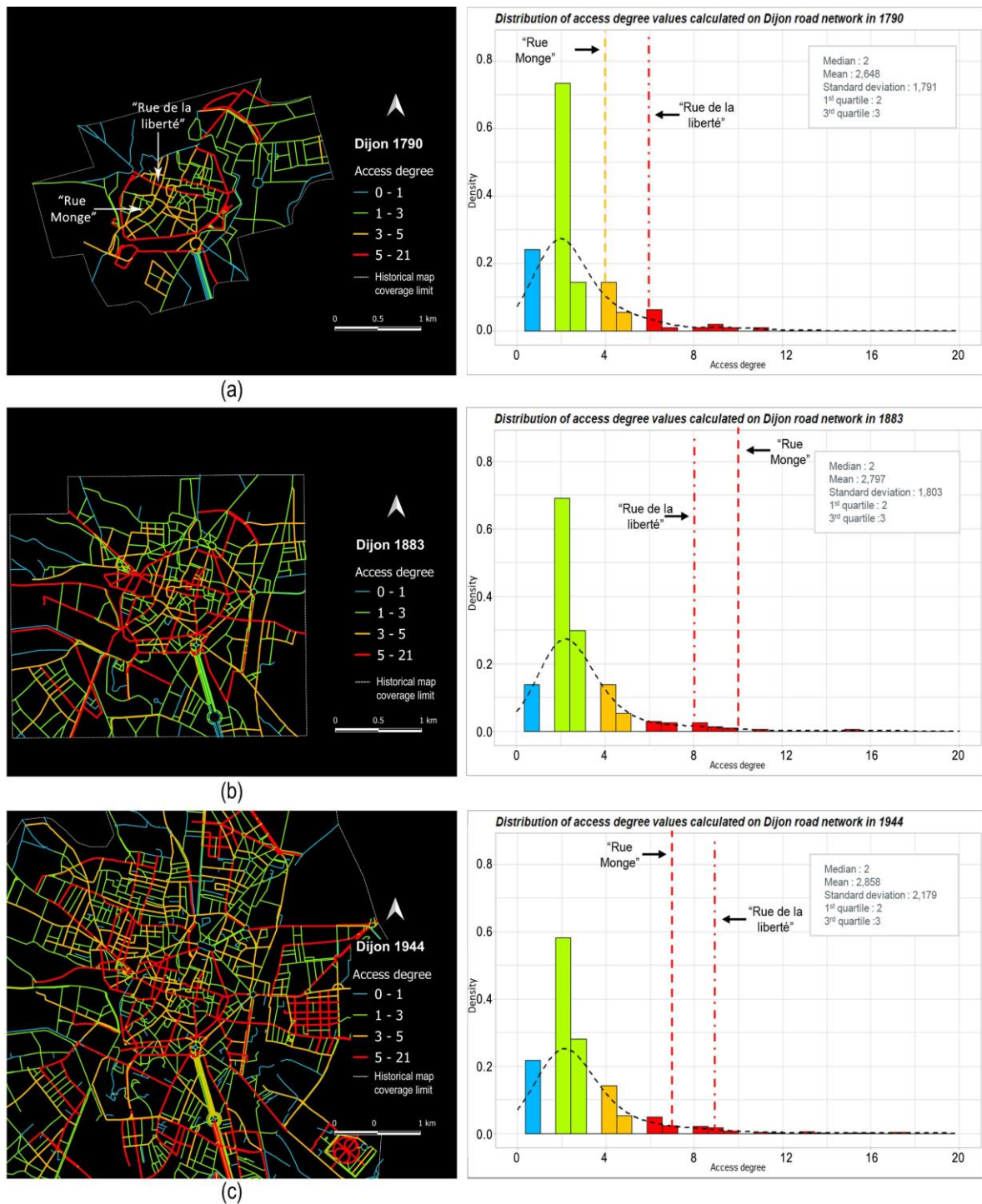


Figure 2.4. Degré de desserte calculé pour le réseau viaire historique de Dijon en (a) 1790, (b) 1883 et (c) 1944. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs du degré de desserte. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.1.2.2 Besançon : centralité d'intermédiarité en 1786, 1883, et 1937

La Figure 2.5 illustre la centralité d'intermédiarité calculée sur les réseaux viaires historiques de Besançon. Les valeurs de centralité d'intermédiarité les plus élevées (représentées en rouge et orange sur la figure 2.5) correspondent aux voies les plus fréquemment utilisées, permettant un déplacement efficace au sein du réseau. En revanche, les voies à usage limité comme les impasses et les chemins piétons d'accès restreint correspondent aux valeurs les plus faibles (représentées en vert et bleu).

On observe que la structure initiale du réseau viaire de Besançon s'est développée au fil des années en renforçant la centralité des nouvelles zones urbaines autour du centre historique. Malgré l'étalement urbain, les voies les plus importantes de la ville en termes de centralité d'intermédiarité sont toujours situées autour du centre-ville et au niveau des axes reliant Besançon au territoire régional à l'Est et à l'Ouest.

L'évolution de la centralité d'intermédiarité des voies est principalement liée à l'émergence de nouveaux segments qui sont connectés à cette structure initiale pour optimiser les déplacements au sein du réseau. Plus le réseau se densifie, plus il y a de mouvements à travers les voies principales préexistantes et donc, progressivement, leur position se renforce dans la hiérarchie de la structure viaire urbaine. Par exemple, la "rue de Vesoul" et la "rue de Dole" sont connectées aux abords du centre historique, et elles sont aussi connectées au réseau régional (car elles traversent la route départementale D683). Ces voies sont fréquemment utilisées pour accéder au cœur de la ville, pour se déplacer entre les différents quartiers de la ville et pour rejoindre le réseau routier régional (centralité d'intermédiarité plus élevée).

Les histogrammes représentant les distributions du logarithme des valeurs de la centralité d'intermédiarité des voies, sur les réseaux historiques de Besançon aux trois dates, suggèrent que la centralité d'intermédiarité suit une distribution normale. La courbe de densité correspond à une gaussienne dont les paramètres varient légèrement entre les trois réseaux.

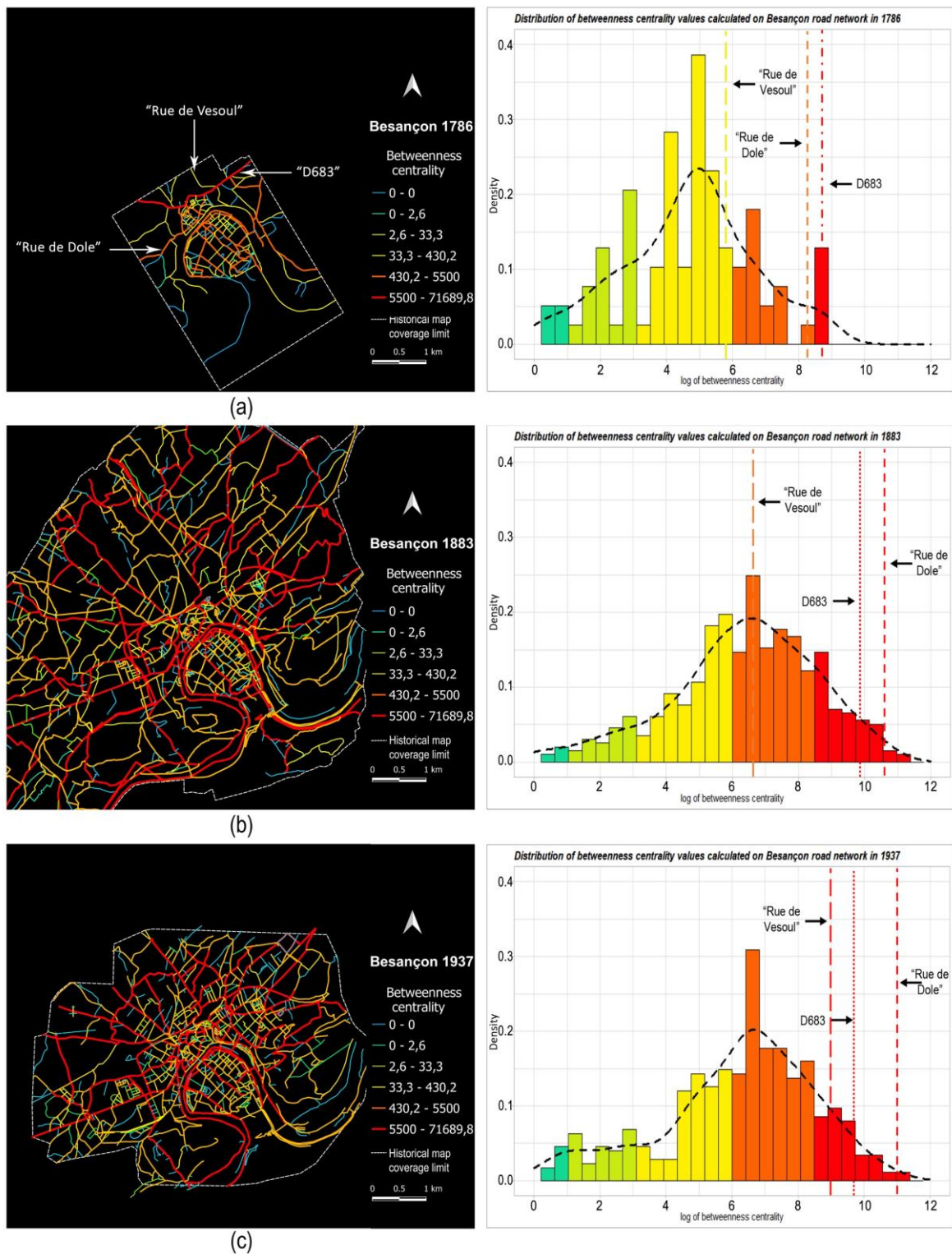


Figure 2.5. Centralité d'intermédierité calculée pour le réseau viaire historique de Besançon en (a) 1786, (b) 1883 et (c) 1937. Les histogrammes représentent la distribution du logarithme de la centralité d'intermédierité des voies. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.1.2.3 Pontarlier : centralité de proximité en 1692, 1842 et 1931

La centralité de proximité reflète un gradient d'accessibilité topologique. Des niveaux élevés de centralité de proximité correspondent à des voies connectées à l'ensemble du réseau, via des chemins topologiques simples et assurant un accès facile avec des déplacements efficaces. La lecture de cet indicateur pour la ville de Pontarlier (Figure 2.6) montre que les valeurs les plus élevées (en rouge sur la figure 2.6) correspondent aux voies du centre historique et aux voies les plus anciennes reliant Pontarlier au territoire régional, notamment à Besançon (au Nord), à Dole (au Nord-Ouest), et à Lausanne en Suisse (au Sud-Est). Dans le deuxième cas, il s'agit de routes à trafic rapide (y compris des routes départementales) qui sont reliées au centre historique (la "rue de Besançon", par exemple). Les voies croisées centralement, mises en évidence sur le plan de 1692 sont les plus anciennes voies de la ville ("rue des Salins" et "rue de la Gare"). Leur zone de croisement correspond au centre du centre-historique. Au fil du temps, cette structure initiale a évolué pour former le squelette de la ville (i.e. les voies structurantes). La centralité de la structure globale est restée stable, mais certaines voies principales présentent une évolution de leur centralité au fil du temps.

Les histogrammes de distribution des valeurs de la centralité de proximité aux trois périodes, présentent des similarités avec une forme de distribution bimodale formée par deux courbes gaussiennes. Des différences sont observables en termes des valeurs de l'indicateur et du nombre de voies correspondant aux deux pics respectifs pour chaque distribution.

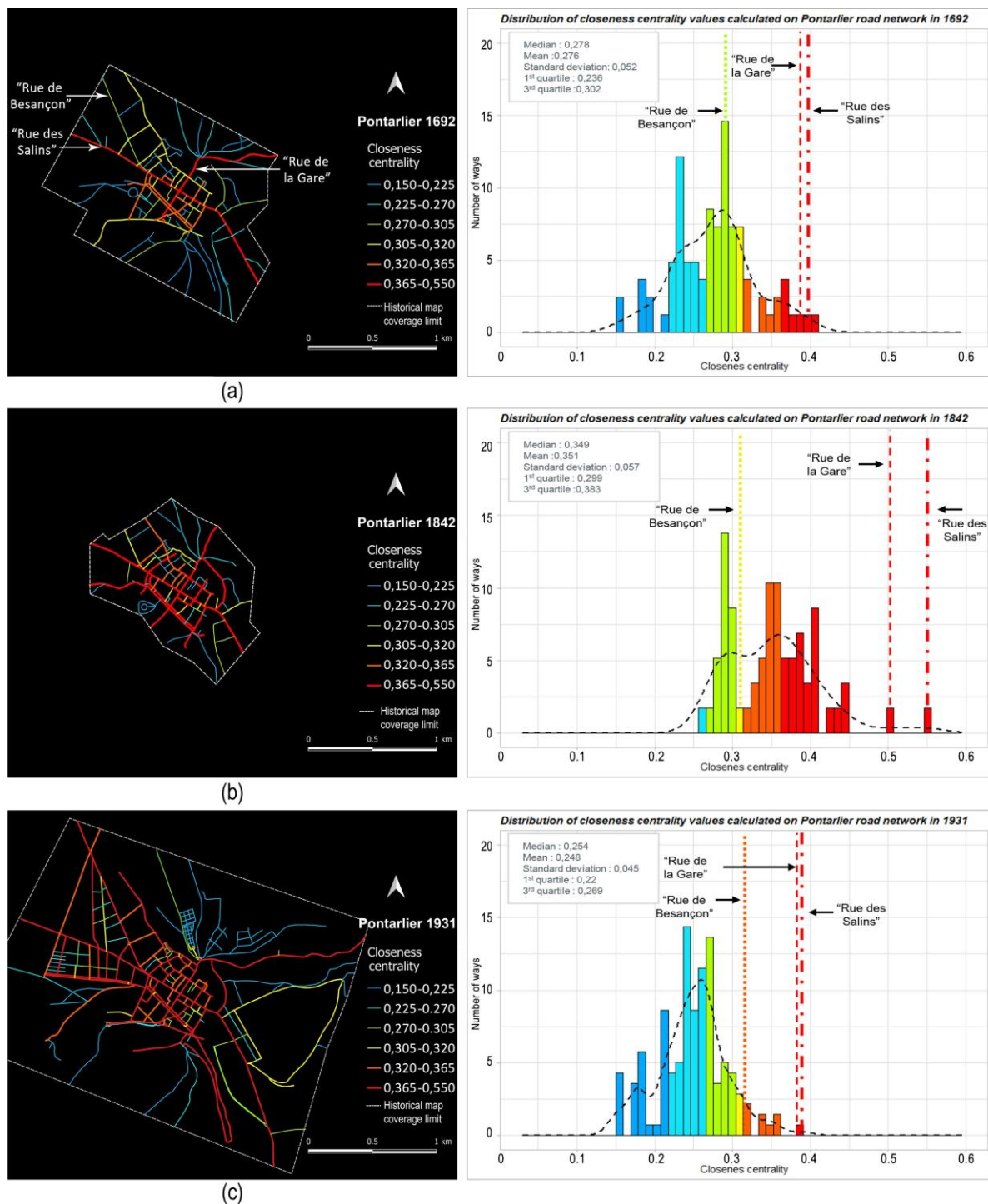


Figure 2.6. La centralité de proximité calculée sur les voies du réseau viaire historique de Pontarlier en (a) 1692, (b) 1842 et (c) 1931. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).

2.2 Analyses des réseaux viaires contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier

Cette section présente une grille de lecture de l'organisation spatiale de chaque ville²⁶ à partir de la caractérisation de son réseau viaire, au moyen des différents indicateurs considérés.

2.2.1 Dijon

2.2.1.1 Contexte historique et géographique

La ville Dijon a joué un rôle significatif dans le développement de la Bourgogne en tant que région historique et culturelle. Historiquement, la ville a prospéré sous le règne romain, et son emplacement stratégique sur la route commerciale reliant la Méditerranée au nord de l'Europe a contribué à son développement. La carte de Cassini révèle les tracés des chaussées en étoile qui se connectent au centre-historique intramuros de la ville, et partent dans toutes les directions et conférant à Dijon son statut de véritable carrefour (Figure 2.7 et Figure 2.8). Ces routes sont supports du développement du réseau urbain autour du centre historique et du réseau interurbain (par l'émergence de voies de moindre importance connectant ces voies principales), comme nous pouvons l'observer sur la carte d'Etat-Major (Figure 2.8). Ces routes correspondent actuellement à des autoroutes (A39 et A38) et à des routes départementales (D700, D903, D971, D971, D996) assurant des connexions Est-Ouest et Nord-Sud. Toutefois, ces routes ne se rejoignent pas au niveau du centre puisque le réseau du centre historique reste renfermé dans les remparts et n'est connecté que ponctuellement avec l'extérieur. Ainsi, des routes ont émergé à l'extérieur des remparts en contournant le centre historique pour connecter routes principales préexistantes. Au niveau du centre historique, le réseau viaire de Dijon présente une pérennité remarquable. À l'échelle de l'agglomération, le réseau routier national et régional façonne la structure radioconcentrique du territoire.

²⁶ Des extraits de cartes à deux échelles, à savoir celle de l'agglomération et celle de la ville, sont inclus en annexes (Annexes 4 à 9), pour chaque territoire étudié. Ces cartes sont destinées à faciliter l'identification (ou localisation) des éléments géographiques (rues, routes, collines, rivières, etc.) évoqués dans les analyses.



Figure 2.7. Extrait de la carte de Cassini représentant le tracé des routes connectées au centre historique intramuros de Dijon. Source : www.geoportail.gouv.fr



Figure 2.8. Extrait de la carte d'Etat Major (1826 – 1866) pour le territoire autour de Dijon, représentant le tracé des routes principales et urbaines. Source : www.geoportail.gouv.fr

2.2.1.2 La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré

Les valeurs les plus élevées du degré (en rouge et orange sur la figure 2.9), calculé sur les voies du réseau contemporain de Dijon (en 2019), mettent en évidence les principaux axes du territoire, qui correspondent aux autoroutes ainsi qu'aux routes départementales mentionnées précédemment. Ils mettent également en évidence les voies de contournement, notamment les boulevards périphériques et la route nationale N274 (Annexe 4). Les structures viaires du centre-ville historique, qui sont en continuité avec ces axes, se distinguent également par des valeurs de degré élevées, correspondant aux voies les plus anciennes du réseau.

Le réseau viaire du centre-ville historique présente une structure réticulée qui ne suit pas une trame régulière, ce qui induit une discontinuité des voies. C'est pourquoi la plupart des voies du centre-ville présentent des valeurs faibles en termes de degré. En périphérie, les voies les plus connectées du réseau délimitent morphologiquement des quartiers, au sein desquels les voies sont faiblement connectées au niveau local (en bleu et vert sur la figure 2.9). Les réseaux viaires de chaque quartier peuvent présenter des particularités qui résultent de la planification urbaine, des contraintes géographiques ou encore des dynamiques socio-économiques qui leur sont propres. Le degré des voies permet donc de lire l'organisation spatiale de la ville dans son ensemble.



Figure 2.9. Le degré des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.

2.2.1.3 Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité

La centralité d'intermédiarité met également en évidence les structures principales du réseau, notamment les autoroutes, les routes nationales et départementales. Les valeurs les plus élevées correspondent également à des voies indispensables au sein du réseau, à savoir les boulevards périphériques, les avenues et les voies secondaires ou tertiaires connectant les voies principales.

Il convient de souligner que les voies avec les valeurs avec les plus élevées en termes de degré sont aussi caractérisées par les valeurs les plus élevées en termes de centralité d'intermédiarité. Toutefois, l'information particulière apportée par la centralité d'intermédiarité réside dans sa capacité à fournir une hiérarchisation plus fine des différentes voies en fonction de leur usage et leur rôle dans l'efficacité des déplacements au sein du réseau. Certaines voies peu connectées (avec une valeur de degré faible) peuvent assurer un rôle central dans le réseau (avec une valeur élevée de centralité d'intermédiarité), en agissant comme des liens entre deux voies principales. Cela facilite le déplacement au sein du réseau en rendant possible des itinéraires avec des chemins plus courts.

Les voies avec une forte centralité d'intermédiarité (représentées en rouge et orange sur la figure 2.10) correspondent aux voies avec une probabilité de fréquentation plus importante, permettant une circulation fluide à travers le réseau. Les voies avec une faible centralité d'intermédiarité correspondent à des voies à usage limité comme les impasses et les chemins piétons d'accès restreint (représentés en vert et bleu sur la figure 2.10).

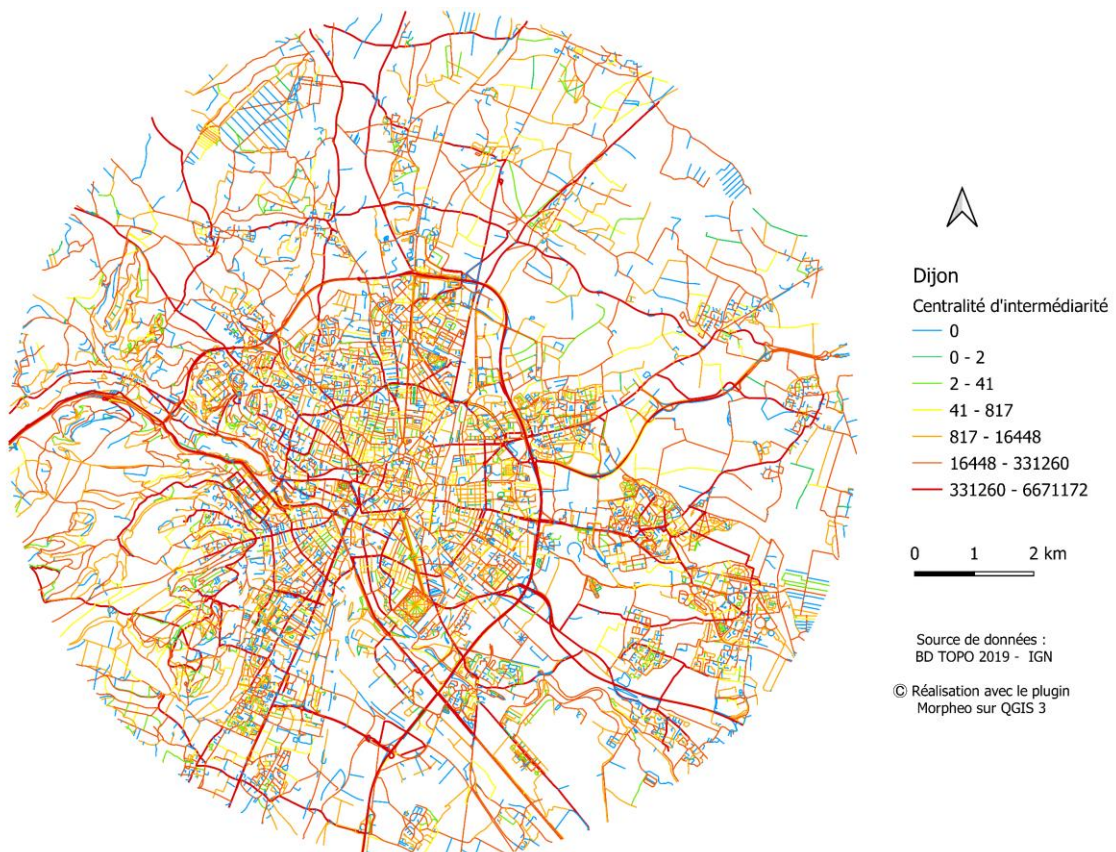


Figure 2.10. La centralité d'intermédiarité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.

2.2.1.4 L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité

La centralité de proximité calculées sur les voies du réseau de Dijon (Figure 2.11) présente un réseau avec un accès plus facile (avec un nombre minimum de tournants) au niveau de certaines zones périphériques par rapport au centre-ville. En plus des voies principales, certaines voies de la zone Ouest plus éloignée du centre-ville se distinguent particulièrement par une forte centralité de proximité. Cette zone correspond à des quartiers résidentiels pavillonnaires. Ces voies constituent l'une des structures anciennes du réseau viaire de Dijon étant donné que, en dehors du développement urbain aux abords immédiat du centre historique, la croissance de la ville s'est principalement orientée vers l'Ouest et le Sud-Ouest dans un premier temps. En outre, les voies les plus anciennes du réseau, celles du centre-ville telles que la "rue de la liberté", la "rue Monge" et la "rue Chabot Charny" (voir Annexe 5), sont également caractérisées par des valeurs de centralité de proximité élevées.

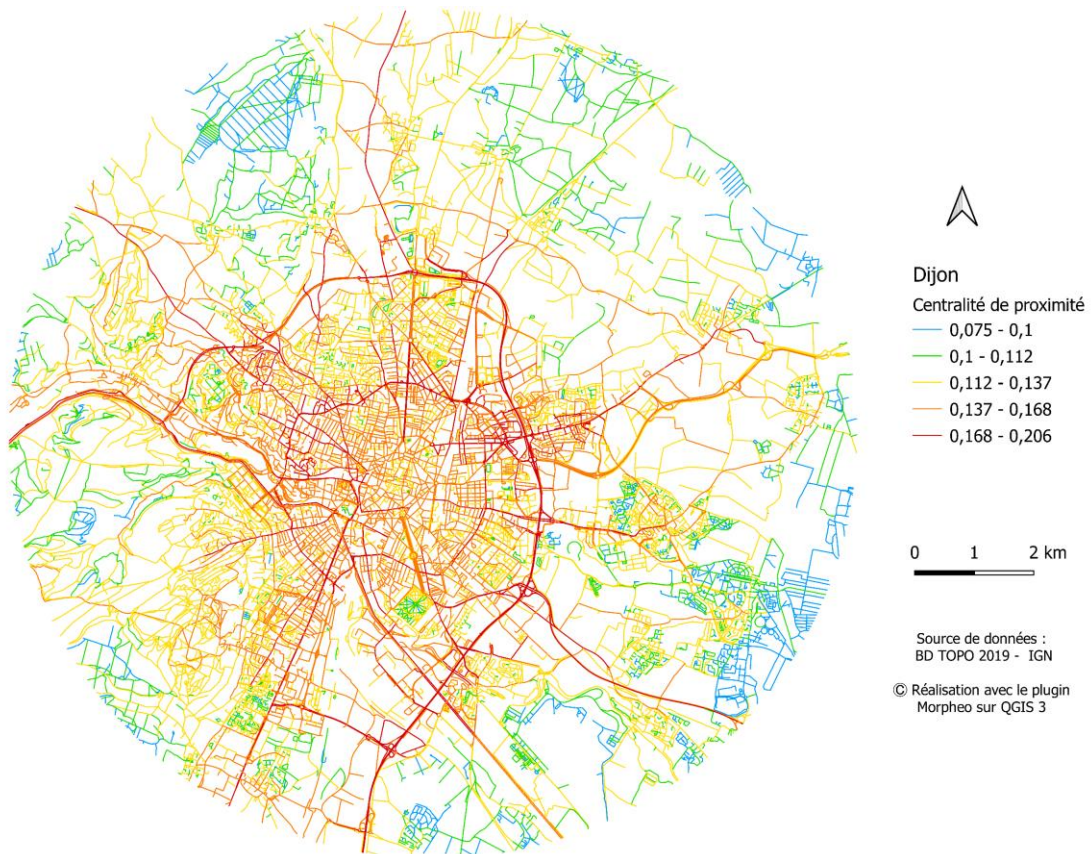


Figure 2.11. La centralité de proximité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.



Figure 2.13. Le degré de desserte des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.

2.2.1.6 Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies

À une échelle macroscopique, le réseau de l'agglomération de Dijon est caractérisé par une structure radiale et arborescente, représentant de faibles valeurs en termes d'orthogonalité des voies (représentées en bleu et en vert sur la figure 2.14). En revanche, à une échelle microscopique, les voies du réseau se rattachent localement de manière fortement orthogonale (illustrées en rouge sur la figure 2.14). Ces voies orthogonales correspondent à un remplissage interstitiel impliquant la densification du réseau. Au niveau du centre-ville historique et au niveau de certains quartiers périphériques (notamment ceux situés dans les communes de "Talant" et de "Quetigny" (voir Annexe 4), le réseau est caractérisé par une structure faiblement orthogonale. En revanche, les quartiers limitrophes au centre-ville se caractérisent par une structure viaire très orthogonale (Figure 2.15), tels que le quartier universitaire à l'Est, "Bourroches" au Sud-Ouest du centre-ville, "Montchapet" au Nord-Ouest, ainsi que "Maladière" au Nord. Il est important de noter que ces quartiers ont été créés ou ont été sujets à des efforts de planification à grande échelle, notamment dans le cadre d'un premier plan d'aménagement en 1930.



Figure 2.14. L'orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.



Figure 2.15. Délimitation géographique de la ville de Dijon. Source : www.dijon.fr

2.2.1.7 La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies

L'indicateur d'espacement révèle les distinctions entre les structures denses et les structures plus espacées. Les valeurs d'espacement les plus élevées (représentées en rouge et orange sur la figure 2.16) sont associées aux principales artères routières, au réseau périurbain et aux voies du réseau situées dans des zones au relief non plat au Sud-Ouest du territoire (Figure 2.17). À l'inverse, les centres urbains de la commune de Dijon et des communes limitrophes présentent une densité de réseau plus élevée, avec des voies caractérisées par des valeurs d'espacement faibles à moyennes (représentées en vert, bleu et jaune sur la figure 2.16). Les valeurs les plus faibles correspondent aux petites ruelles des quartiers résidentiels ou aux voies d'accès local. Les valeurs moyennes correspondent à la trame viaire urbaine principale. Le réseau de l'agglomération de Dijon n'est pas particulièrement contraint par des contraintes naturelles ou topographiques, à l'exception de la zone Sud-Ouest (Figure 2.17). Cela se traduit par l'émergence d'un modèle d'urbanisation radioconcentrique.

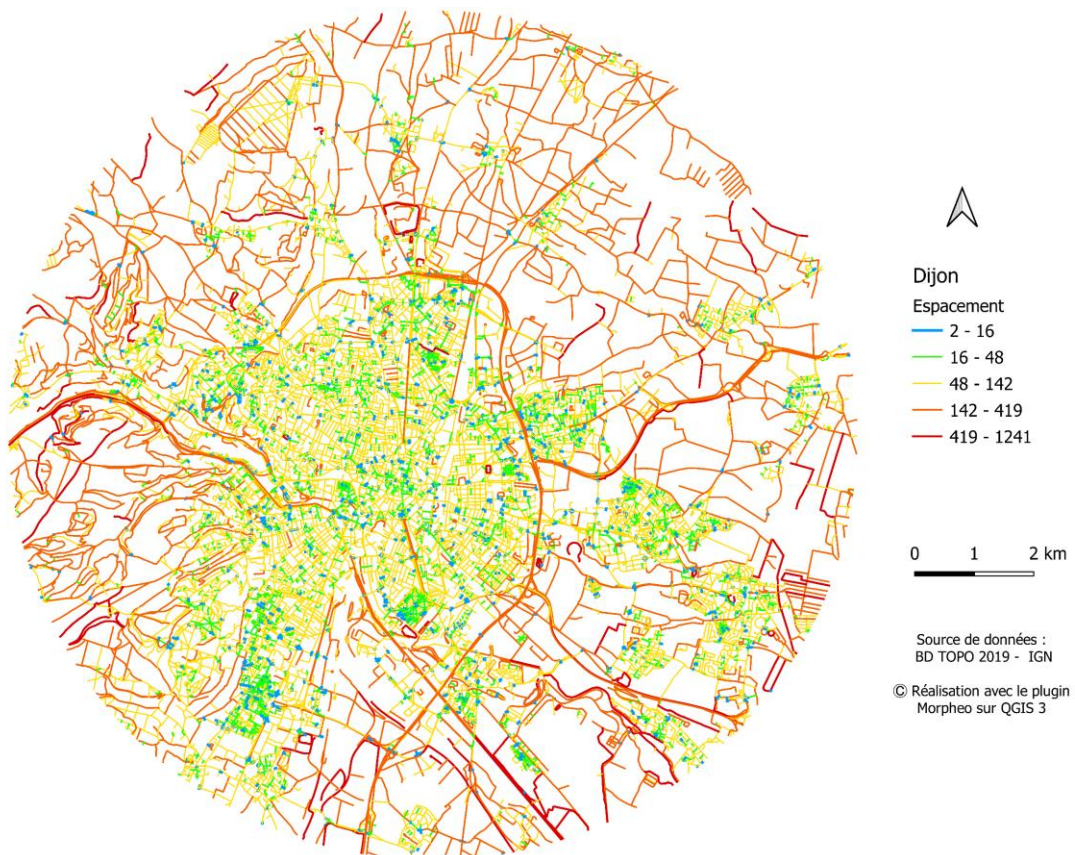


Figure 2.16. L'espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.

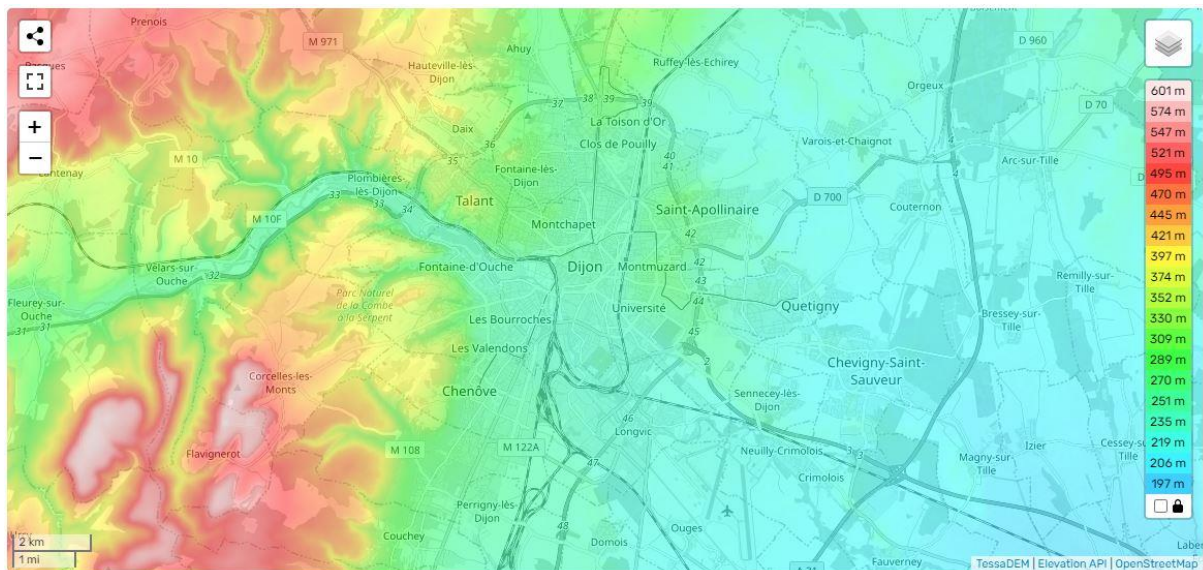


Figure 2.17. Carte topographique du territoire autour de l'agglomération de Dijon.
Source : www.fr-fr.topographic-map.com.

2.2.2 Besançon

2.2.2.1 Contexte historique et géographique

La structure et l'évolution du réseau viaire de l'agglomération de Besançon est étroitement liée à son contexte historique et géographique. Besançon a été fondée à l'époque romaine sous le nom de "Vesontio". La ville était un important centre administratif, militaire et économique de la région. Sa situation, dans une vallée entourée de collines et traversée par la rivière Doubs en "Boucle", en faisait un site stratégique.



Figure 2.18. Extrait de la carte de Cassini représentant le tracé des routes connectées au centre-historique de Besançon. Source : www.geoportail.gouv.fr



Figure 2.19. Extrait de la carte d'Etat Major (1826 – 1866) pour le territoire autour de Besançon, représentant le tracé des routes principales et urbaines.

Source : www.geoportail.gouv.fr

Ce contexte géographique de Besançon a largement influencé la structure de son réseau viaire. La topographie a posé des contraintes et des opportunités pour un développement urbain et routier selon une structure en éventail. Ce schéma est caractérisé par des voies radiales raccordées au centre-historique et orientées vers le Nord, Nord-Ouest et Nord-Est formant une circonférence de 180°, ce qui crée une configuration rappelant la forme des doigts d'une main. Cette structure du réseau viaire est visible sur la carte Cassini (Figure 2.18). L'accès à la "Boucle" (délimitée par le Doubs) était uniquement possible depuis l'Ouest, en empruntant un unique pont (le pont Battant). Ces routes ont persisté dans le temps. En outre, les premières zones urbanisées à l'extérieur du centre intramuros ne se sont pas développées autour du noyau urbain initial, mais plutôt le long de ces axes routiers (Figure 2.19). Ensuite, avec l'urbanisation croissante et la construction d'autres ponts sur le Doubs, la ville s'est développée autour du noyau urbain existant, en se rattachant à la structure initiale formée par les routes les plus anciennes, notamment la "rue de Dole", la "rue de Vesoul" et la "rue de Belfort".

L'évolution du réseau de voirie de Besançon est le résultat d'une interaction complexe entre son histoire, sa géographie et l'expansion urbaine. Des éléments historiques et géographiques se reflètent encore aujourd'hui dans la structure du réseau viaire.

2.2.2.2 La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré

Les résultats de l'indicateur du degré calculé sur les voies du réseau de Besançon (en 2019), mettent en évidence les routes principales et anciennes du territoire. Les voies les plus connectées (représentées en rouge et orange sur la figure 2.20) correspondent aux routes les plus anciennes évoquées précédemment sur lesquelles s'est construit le réseau. Ces voies correspondent également aux routes départementales et nationales en continuité de ces routes (voir Annexe 6). Par exemple, la route département D673 en continuité de la "rue de Dole", la D572 en continuité de la "rue de Vesoul", et la D683 en continuité de la "rue de Belfort" vers le Nord-Ouest. De plus, les routes reliant la ville au territoire régional vers le Sud-Est (la D571), et vers le Sud-Ouest (la D683) ainsi que la route nationale N57 contournant la ville, sont aussi mises en évidence avec des valeurs de degré élevées.

Au niveau du centre-ville, cet indicateur révèle également les voies principales à l'échelle locale, avec des valeurs relativement élevées (représentées en orange sur la figure 2.20), à savoir la "Grande-rue", la "rue Mégevand", la "rue des Granges" et la "rue Charles Nodier", qui traversent de manière parallèle la "Boucle" (voir Annexe 7). Cet indicateur appliqué à la voie permet donc de lire la hiérarchie des voies au sein du réseau viaires à différentes échelles.

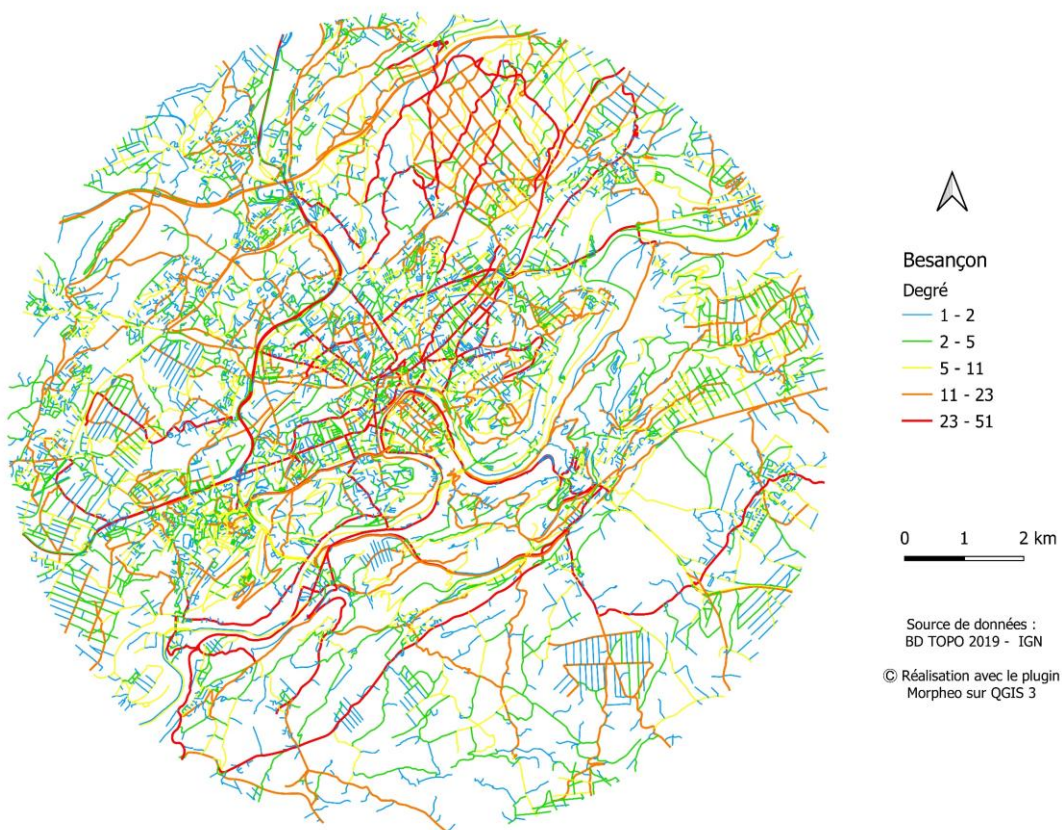


Figure 2.20. Le degré des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.

2.2.2.3 Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité

La centralité d'intermédiarité met également en évidence les mêmes structures principales du réseau que celles révélées par le degré. De plus, certaines voies peu connectées (caractérisées par des valeurs de degré faibles) se distinguent par des valeurs élevées de centralité d'intermédiarité (représentées en rouge et en orange sur la figure 2.21), permettant d'assurer un déplacement efficace au sein du réseau et ce, à différentes échelles. Les voies caractérisées par une faible centralité d'intermédiarité (représentées en bleu et en vert sur la figure 2.21), correspondent à des voies à usage limité comme les impasses ou les voies d'accès local. Cet indicateur permet donc une lecture plus fine de la hiérarchie des voies du réseau viaire de l'agglomération de Besançon.

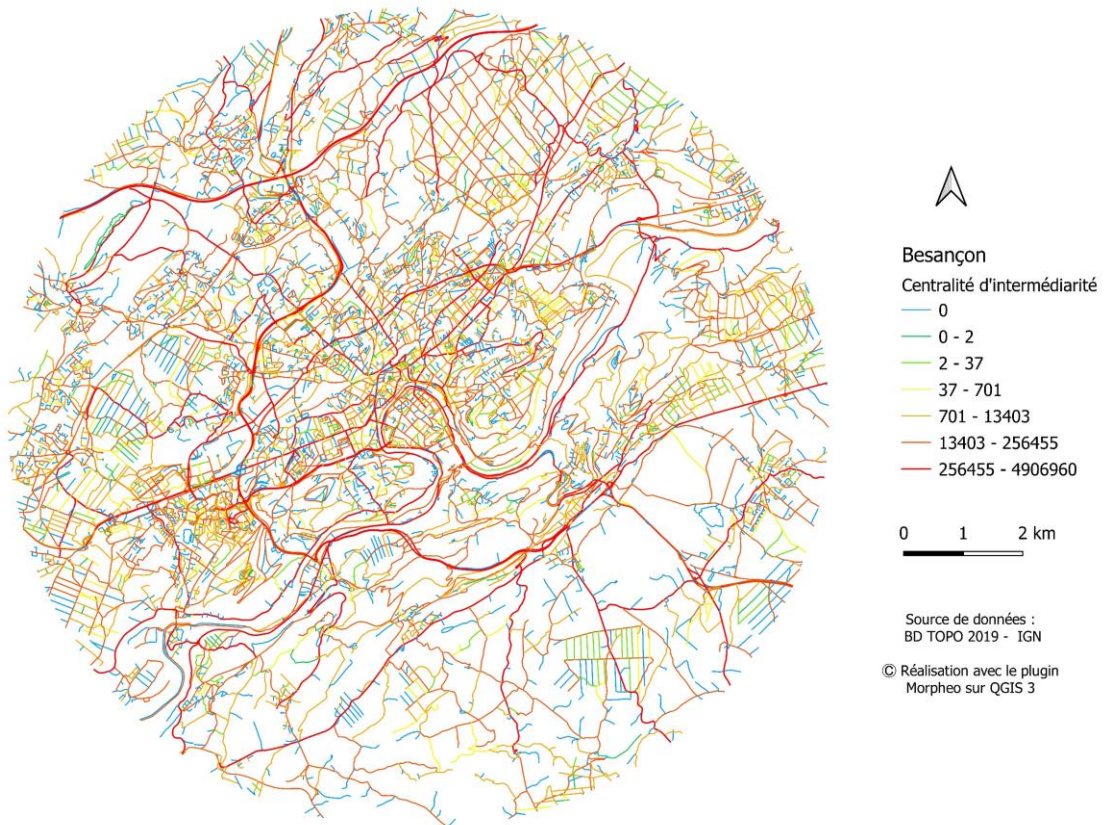


Figure 2.21. La centralité d'intermédiarité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.

2.2.2.4 L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité

Les voies du réseau viaire avec les valeurs les plus élevées de centralité de proximité se situent principalement au niveau de la zone Nord-Est et Nord-Ouest aux abords immédiats du centre-ville historique (représentées en rouge et en orange sur la figure 2.22). Les voies principales les plus anciennes du réseau (mise en évidence précédemment) sont aussi caractérisées par des valeurs importantes.

En revanche, le réseau viaire en périphérie est caractérisé par des voies avec de faibles valeurs de centralité de proximité, en particulier sur le plateau au Sud-Est de la "Boucle". Au niveau des collines (de "Bregille" et de "Chaudanne" (voir Annexe 7)) à proximité immédiate du centre-ville, les voies se distinguent par les plus faibles valeurs.

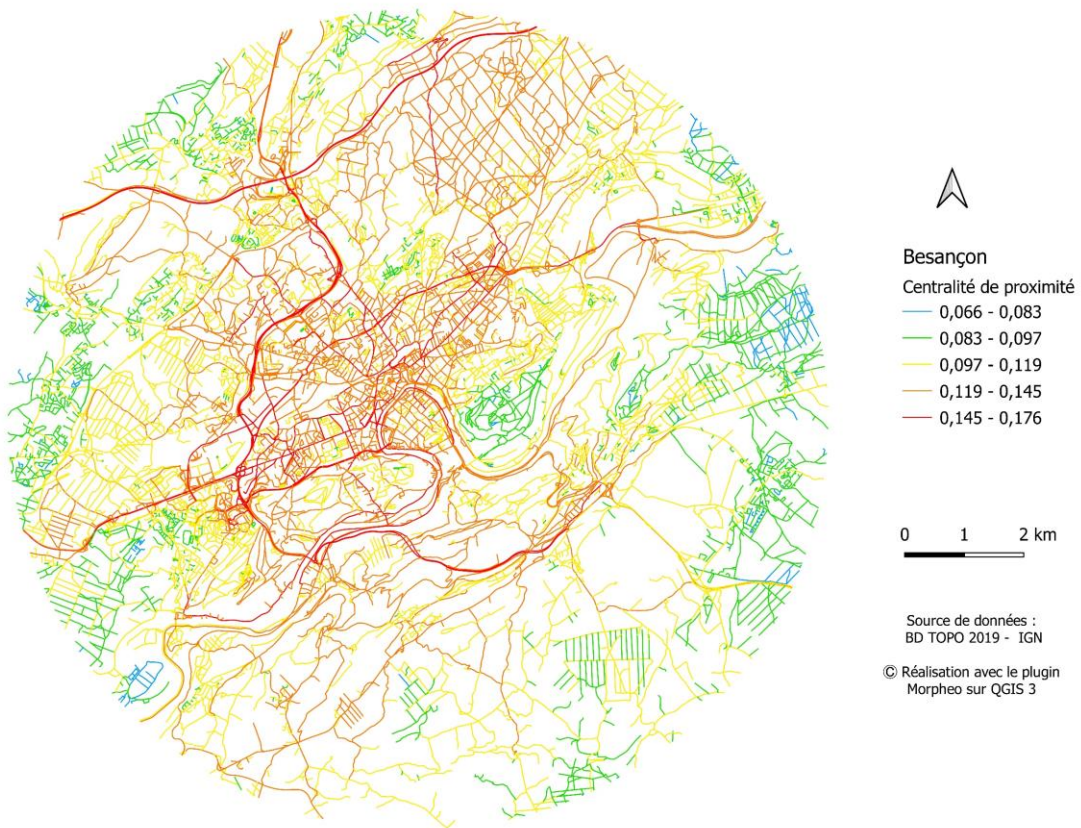


Figure 2.22. La centralité de proximité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.

2.2.2.5 Les voies traversantes identifiées au moyen du degré de desserte

Les voies du réseau viaire caractérisées par les valeurs les plus élevées de degré de desserte (Figure 2.23) correspondent aux routes nationales et départementales traversant l'agglomération de Besançon (Figure 2.24). Ces voies jouent des rôles variés dans le système de circulation à l'échelle du réseau. Certaines voies assurent principalement des liaisons Est-Ouest (comme l'autoroute A36 au Nord, les Boulevards Winston Churchill et Léon Blum, et la départementale D104 en continuité de la D464 au Sud). D'autres voies permettent une connexion du réseau routier à l'échelle régionale (comme la route nationale N57 et la départementale D308), tout en contournant le centre urbain, assurant ainsi une desserte rapide et directe entre différentes zones. En outre, certaines voies assurent une desserte centre-périphérie (comme la "rue de Dole" et la départementale D683).

Par ailleurs, les voies correspondant aux chemins de bois et de forêt sont aussi mises évidence avec un degré de desserte élevé puisque tous ces chemins se croisent en X.

La lecture du réseau, à partir de cet indicateur, révèle également que les voies de circulation rapide ne traversent pas le centre-ville, mais contournent ce dernier.

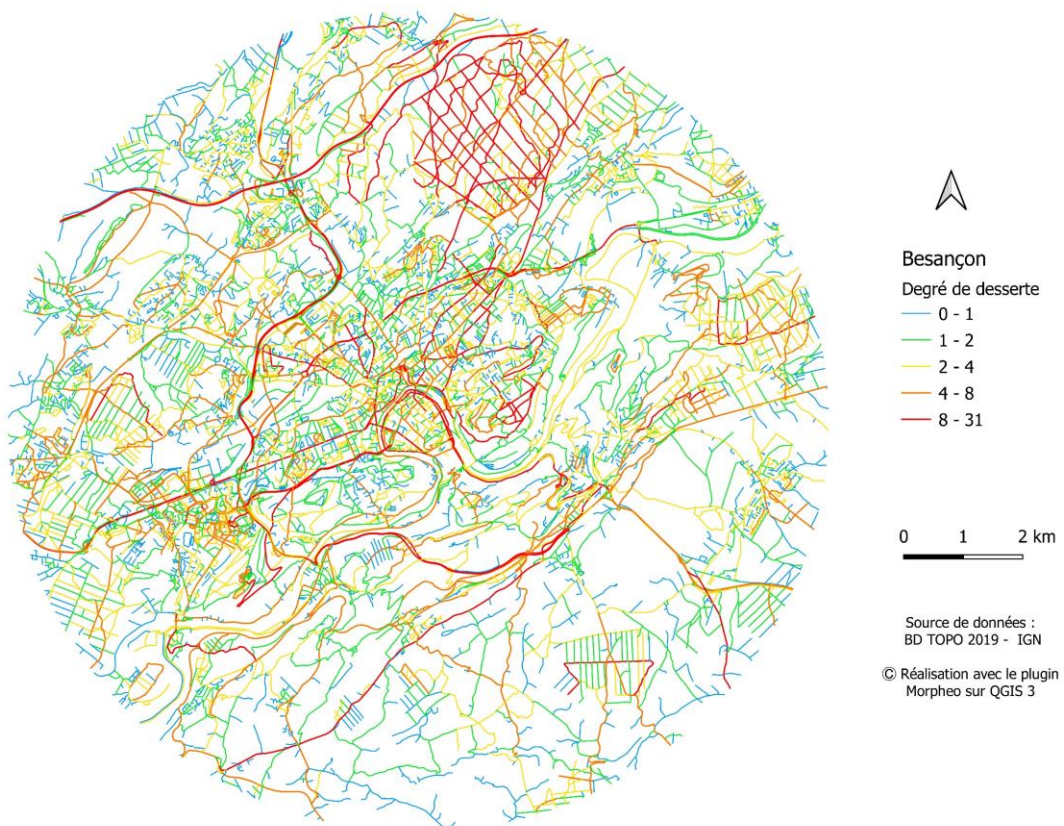


Figure 2.23. Le degré de desserte calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.



Figure 2.24. Routes nationales et départementales et autoroutes traversant l'agglomération de Besançon. Source : www.geoportail.gouv.fr

2.2.2.6 Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies

Le réseau viaire de l'agglomération de Besançon est caractérisé par une structure arborescente en éventail à une échelle macroscopique. Les voies de cette structure se distinguent par de faibles valeurs d'orthogonalité (représentées en bleu et en vert sur la figure 2.25). En revanche, les voies locales du réseau présentent des fortes valeurs d'orthogonalité (illustrées en rouge sur la figure 2.25). Au centre comme en périphérie, les voies de remplissage interstitiel sont fortement orthogonales. Cependant, il est important de noter qu'au niveau des zones qui sont géographiquement contraintes, comme le long du cours du Doubs ou sur les zones de collines avoisinantes, les voies présentent une faible orthogonalité.

2.2.2.7 La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies

Les valeurs d'espacement les plus élevées (représentées en rouge et orange sur la figure 2.26) correspondent principalement au réseau périurbain avec des intersections très espacées. Les valeurs d'espacement faibles à moyennes (représentées en vert, bleu et jaune sur la figure 2.26) correspondent à des zones denses du réseau. La lecture de la densité du réseau viaire à partir de l'indicateur d'espacement, confirme un modèle d'urbanisation suivant une structure en éventail orientée Nord, Nord-Est et Nord-Ouest. Ce modèle d'urbanisation résulte principalement des contraintes naturelles et topographiques de ce territoire (Figure 2.27).

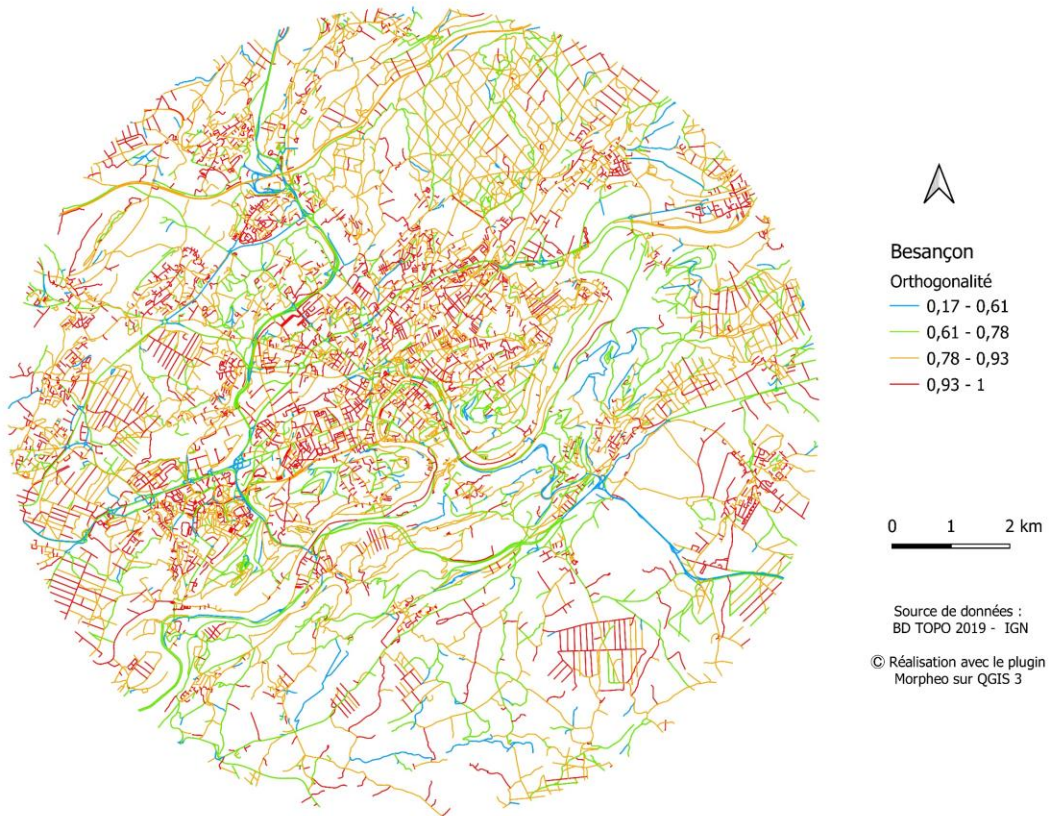


Figure 2.25. L'orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.

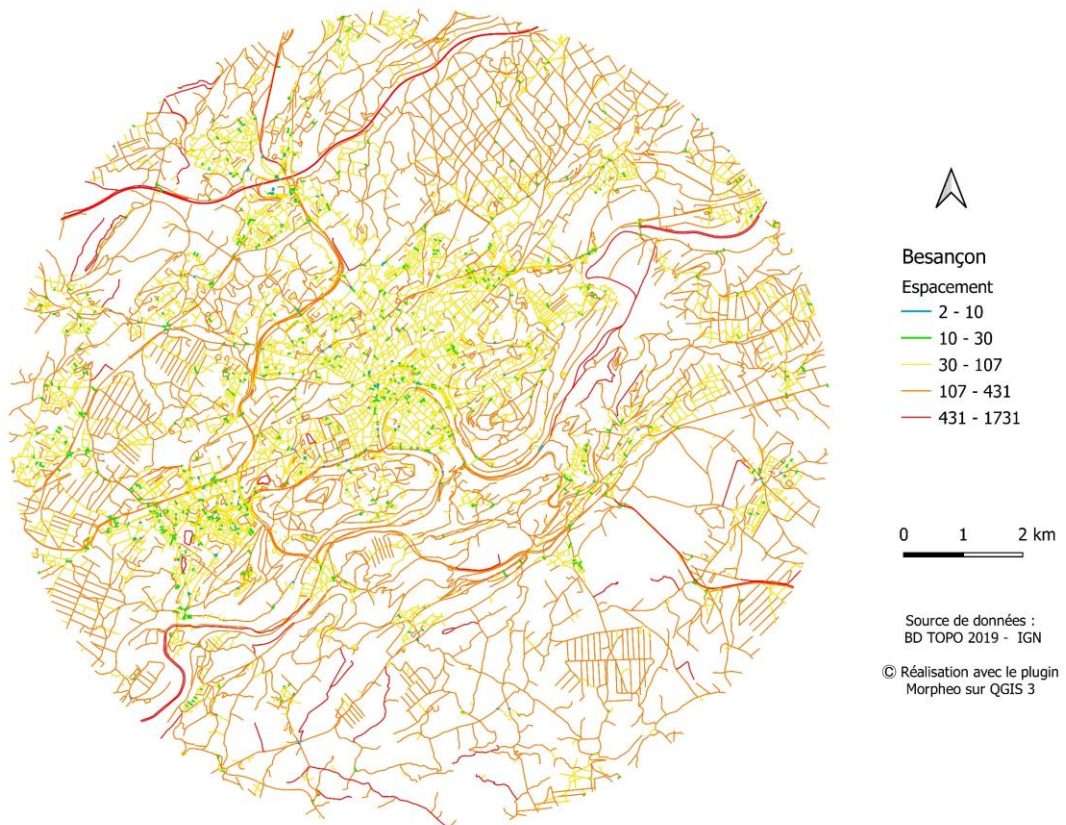


Figure 2.26. L'espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.

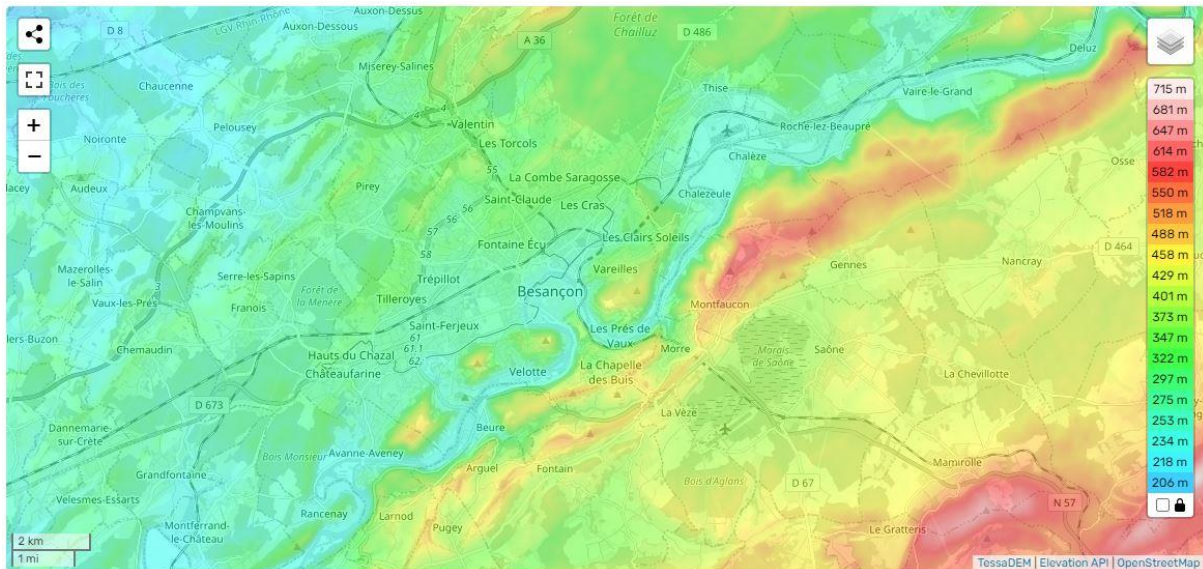


Figure 2.27. Carte topographique du territoire autour de l'agglomération de Besançon.

Source : www.fr-fr.topographic-map.com

2.2.3 Pontarlier

2.2.3.1 Contexte historique et géographique

Historiquement, de par sa situation géographique, l'agglomération de Pontarlier représentait un axe stratégique de grand intérêt en termes de commerces et de déplacements des armées. Sur la carte de Cassini (Figure 2.28), nous retrouvons le tracé de la chaussée royale reliant Pontarlier à Dijon en passant par Dole, aménagée initialement en suivant le tracé de la voie romaine "Alphone Rousset", qui fut une voie de commerce principale. Cette route correspond à l'ancienne route nationale N72, avant son déclassement dans le département du Doubs en route départementale en 1972.

La route reliant Pontarlier et Besançon est représentée sur la carte de Cassini (Figure 2.28) et correspond à la récente route nationale N72, avant son détournement partiel sur une rocade périphérique au Nord-Est de Pontarlier (voir Annexe 8). Le tracé de cette route reprend celui de l'ancienne route nationale 67²⁷.

Ces principaux axes sont supports au développement du centre-ville historique, comme nous pouvons l'observer sur la carte d'Etat Major (Figure 2.29), ainsi qu'au développement d'activités commerciales (Figure 2.30 et Figure 2.31).

²⁷ *Atlas des grandes routes de France*, Michelin (1959).



Figure 2.30. Photographie historique de la Rue des Salins, représentant le jour de marché. Source : www.estrepublikain.fr



Figure 2.31. Photographie historique de la Rue de Besançon, avec une continuité de rez-de-chaussée commerciaux. Source : www.delcamp.net

2.2.3.2 La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré

Les résultats de l'indicateur du degré calculé sur les voies du réseau de Pontarlier mettent en évidence les routes principales du territoire évoquées précédemment (routes départementales et nationales). Les voies les plus connectées (représentées en rouge et orange sur la figure 2.32) correspondent notamment aux routes les plus anciennes sur lesquelles s'est construit le réseau. La lecture de la structure du réseau à partir du degré des voies permet de repérer les axes les plus structurants.

Toutefois, la présence de grands carrefours crée une discontinuité des routes principales, dont certains tronçons présentent de faibles valeurs de degré. Nous pouvons remarquer la fragmentation de la route départementale D72 avec la "Rue des Salins" en plusieurs voies, entre le carrefour de l'aérodrome et l'intersection de cette dernière avec la "Rue de la Libération" connectée à la route départementale D74 (Figure 2.32) (voie Annexe 9). L'effet des aménagements sur le réseau (e.g. les carrefours) est notamment visible au niveau de la connexion entre la route départementale D74 et la route nationale N57. Un tronçon de cette dernière a été détourné vers l'Est pour assurer une intersection avec la D130, reliée à son tour à la D74 vers l'Ouest. La discontinuité est donc créée intentionnellement pour éviter un croisement direct entre les trois routes qui peut éventuellement engendrer une congestion au niveau de cette intersection.

Le rôle de connexion interurbaine de la Rue de Besançon a été substitué par une ramification de la route départementale D74, dont un tronçon est parallèle à cette même route. Cette voie ramifiée est donc mieux connectée à l'échelle du réseau, notamment de par ses intersections avec des voies de connexions Nord-Est vers le Sud-Ouest au niveau du centre-ville.

Le degré des voies permet ainsi de lire à la fois la hiérarchie des voies dans le réseau et l'impact des différents aménagements de la voirie sur sa structure.

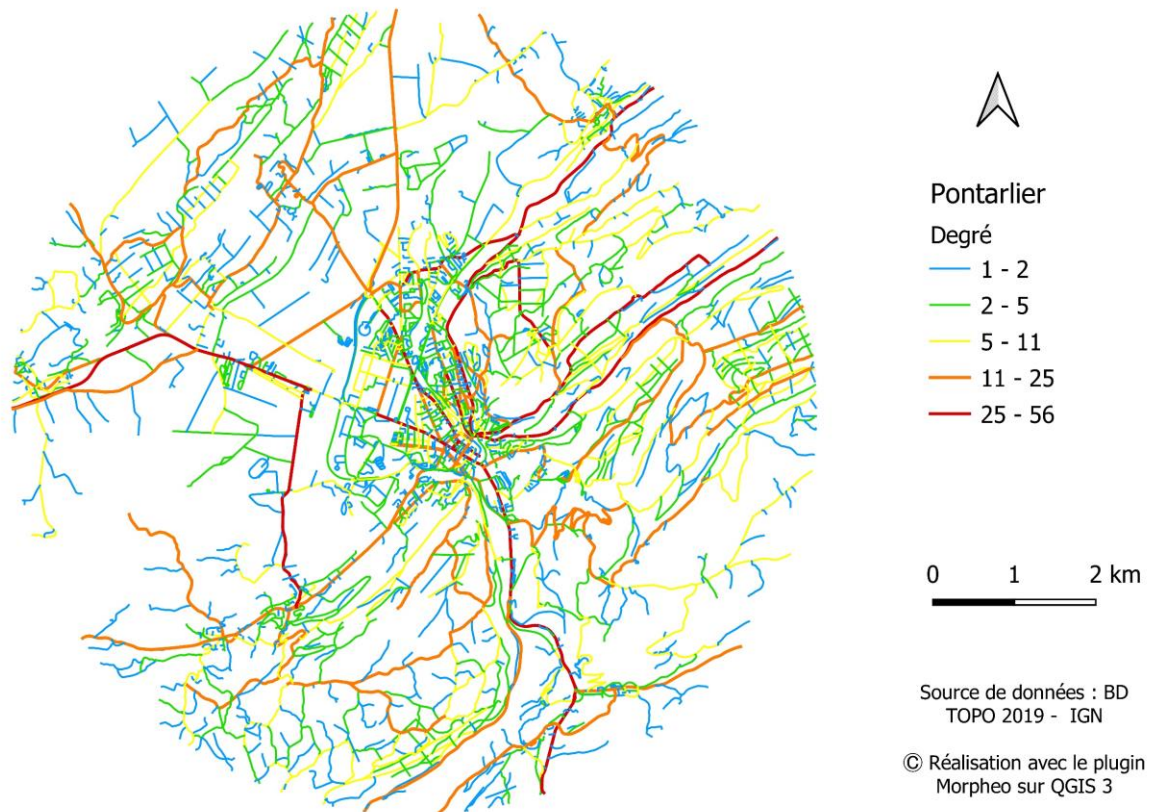


Figure 2.32. Degré des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.

2.2.3.3 Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité

La centralité d'intermédiarité et le degré sont globalement corrélés, et dans certains cas complémentaires pour la lecture des axes structurants du réseau (boulevards périphériques, avenues, voies pénétrantes, etc.). Pour certaines voies, leur hiérarchie en termes de degré et de centralité d'intermédiarité est identique. Des variations de ces deux centralités peuvent toutefois être identifiées à l'échelle du réseau. Dans le cas de Pontarlier, la rocade périphérique (N57 (voir Annexe 8)) à l'Est illustre cette variation. Les voies formant cette rocade sont peu connectées au reste du réseau (avec un faible degré). Toutefois elles permettent un déplacement efficace au sein du réseau, permettant ainsi d'atteindre rapidement l'ensemble du réseau (avec une forte centralité d'intermédiarité).

Les voies caractérisées par des valeurs élevées de centralité d'intermédiarité (représentées en rouge et en orange sur la figure 2.33) sont des voies connexion entre les différents tissus urbains. Les voies dont la centralité d'intermédiarité est faible (représentées en bleu et en

vert sur la figure 2.33), correspondent à des impasses et des voies d'accès piéton avec une utilisation limitée à un niveau plus local. Le réseau périphérique est marqué par une structure arborescente comportant de nombreuses impasses. Au niveau du centre-ville et du péricentre, les voies caractérisées par des valeurs faibles sont principalement situées au sein de lotissements enclavés.

Ainsi, les interprétations des résultats de la centralité d'intermédiarité sont principalement liées à l'efficacité du mouvement à travers les voies du réseau.

2.2.3.4 L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité

La centralité de proximité met en évidence les voies permettant un accès facile (avec nombre minimum de tournants) à l'ensemble du réseau de l'agglomération de Pontarlier. Les résultats de cet indicateur traduisent un gradient centre-périphérie, mais qui n'est pas uniforme sur tout le territoire. Les voies les plus centrales (représentées en rouge sur la figure 2.34) correspondent au centre-ville historique. Ces voies représentent les structures historiques qui ont persisté au travers le temps, et qui sont support au développement du réseau. Les voies connectant ce centre-historique à la périphérie présentent également des valeurs moyennes à élevées (représentées en orange sur la figure 2.34).

Les voies des quartiers péricentraux au Nord-Ouest, correspondant à des lotissements pavillonnaires, permettent également un accès facile avec un minimum de tournant aux différents îlots urbains de cette zone. Les voies de la zone industrielle au Nord de la D72 présentent des valeurs plus élevées en termes de centralité de proximité par rapport à celles de la zone Sud, en raison de leur connexion directe au réseau viaire des quartiers résidentiels au Nord. En effet, la zone industrielle Nord (dont les premiers aménagements ont eu lieu dans les années 1960) est plus ancienne que celle au Sud. Vers l'Est et l'Ouest, le gradient de centralité est moins marqué. Cela peut être expliqué par les choix d'aménagement des anciens faubourgs (Saint-Etienne et Saint-Claude), qui sont actuellement des quartiers pavillonnaires, avec un accès limité depuis l'extérieur. En périphérie, les voies les plus centrales sont principalement les plus anciennes, qui relient Pontarlier au territoire régional et à la Suisse.

Le croisement des résultats de la centralité de proximité sur le réseau viaire de Pontarlier avec les informations sur les dates de création des différents quartiers révèle des éléments de lecture intéressants. Ces interprétations nous renseignent à la fois sur l'historicité du réseau et sur la manière dont sa centralité topologique actuelle découle de son histoire passée.

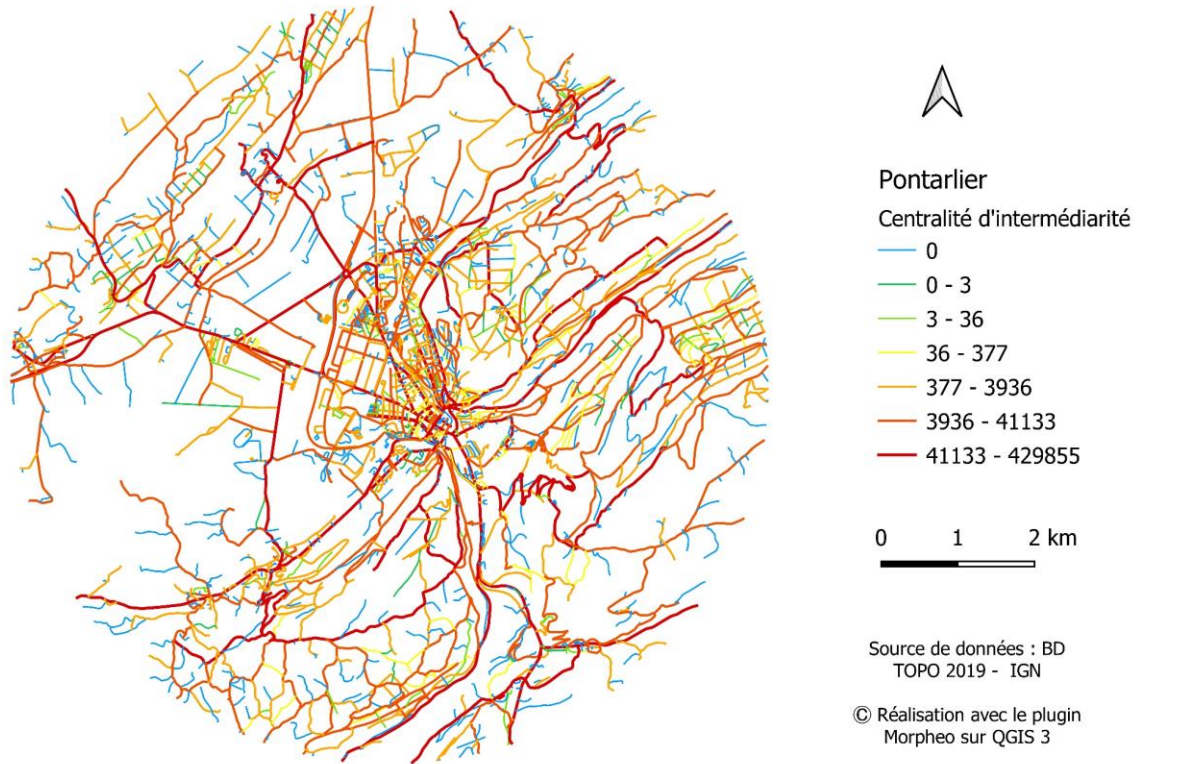


Figure 2.33. Centralité d'intermédialité calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.

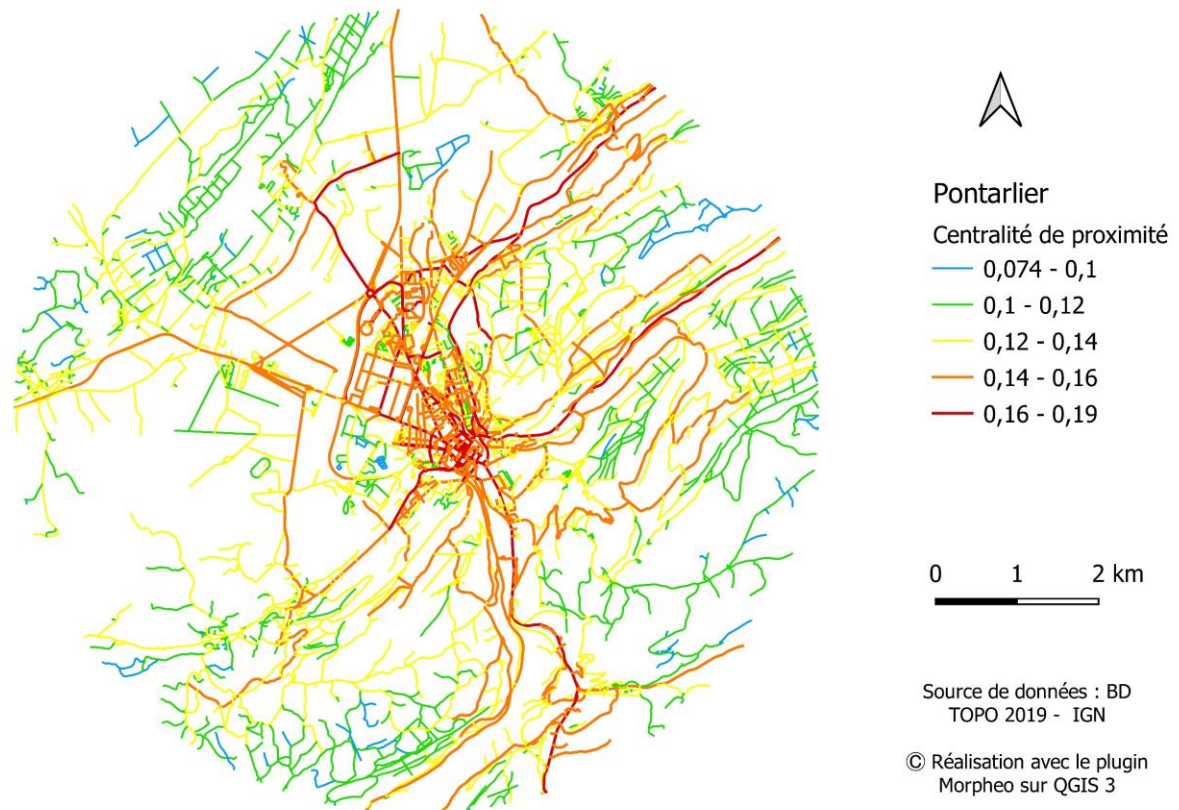


Figure 2.34. Centralité de proximité calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.

2.2.3.5 Les voies traversantes identifiées au moyen du degré de desserte

L'agglomération de Pontarlier s'organise autour des principaux axes mis en évidence précédemment par le degré des voies. Le degré de desserte apporte une information complémentaire en la caractérisant la voie par le nombre de voies qu'elle n'intersecte pas à leur extrémité. Les voies qui croisent leur voisinage centralement, correspondent à des voies permettant un accès direct entre différentes localités. Au niveau du centre-ville historique, les voies avec des valeurs élevées de degré de desserte (représentées en rouge sur la figure 2.35), correspondent à des routes principales, des boulevards et des avenues.

En comparant les deux indicateurs de degré et de degré de desserte, les voies avec un degré élevé (représentés en rouge et en orange sur la figure 2.32) sont plutôt assimilées à un faible degré de desserte (représentés en bleu et en vert sur la figure 2.35), de par leur faible continuité au niveau des intersections du réseau. Les voies de degré intermédiaire qui s'accordent aux voies principales du réseau (notamment la route nationale) en intersection en T et non pas de manière transversale. Les voies avec un fort degré et un faible degré de desserte assurent un rôle de transit. À une échelle locale, les voies caractérisées par des valeurs faibles de degré, et des valeurs élevées de degré de desserte assurent une desserte locale directe aux différents îlots urbains.

Au niveau de la ville de Pontarlier, les voies supports de transports en commun (ligne de bus régulière dans le cas de Pontarlier) (Figure 2.37) correspondent à des voies dont le degré de desserte est élevé. La ligne de service régulier de transport en commun relie les différentes zones de la ville (le centre-ville, la zone commerciale des "Grands Planchants", la porte de la zone commerciale de Doubs, etc.). Cette ligne dessert aussi le pôle multimodal et la gare de Pontarlier, cœurs de correspondances avec d'autres réseaux de transport par exemple avec les lignes "Mobigo" vers la Vallée de la Loue, Ornans et Besançon. Le plan du réseau du transport en commun de Pontarlier (Figure 2.37) illustre le fait que les voies supports de ces transports correspondent à des voies avec un fort degré de desserte, notamment la "Rue de la Libération" et la "Rue de la Gare" (voir Annexe 8). Le degré de desserte indique aussi des valeurs importantes au niveau de certains croisement en périphérie. Ces croisements correspondent aux centres des communes périphériques de la ville de Pontarlier (voir Annexe 8), notamment Vuillencin, Dommartin et Houtaud au Nord-Ouest, les Grandes-Narboz au Sud-Ouest, La Cluse-et-Mijoux au Sud et Arçon au Nord-Est. Cet indicateur apporte une information sur le niveau de desserte des voies du réseau, qui peut être corrélée à l'urbanité du territoire.

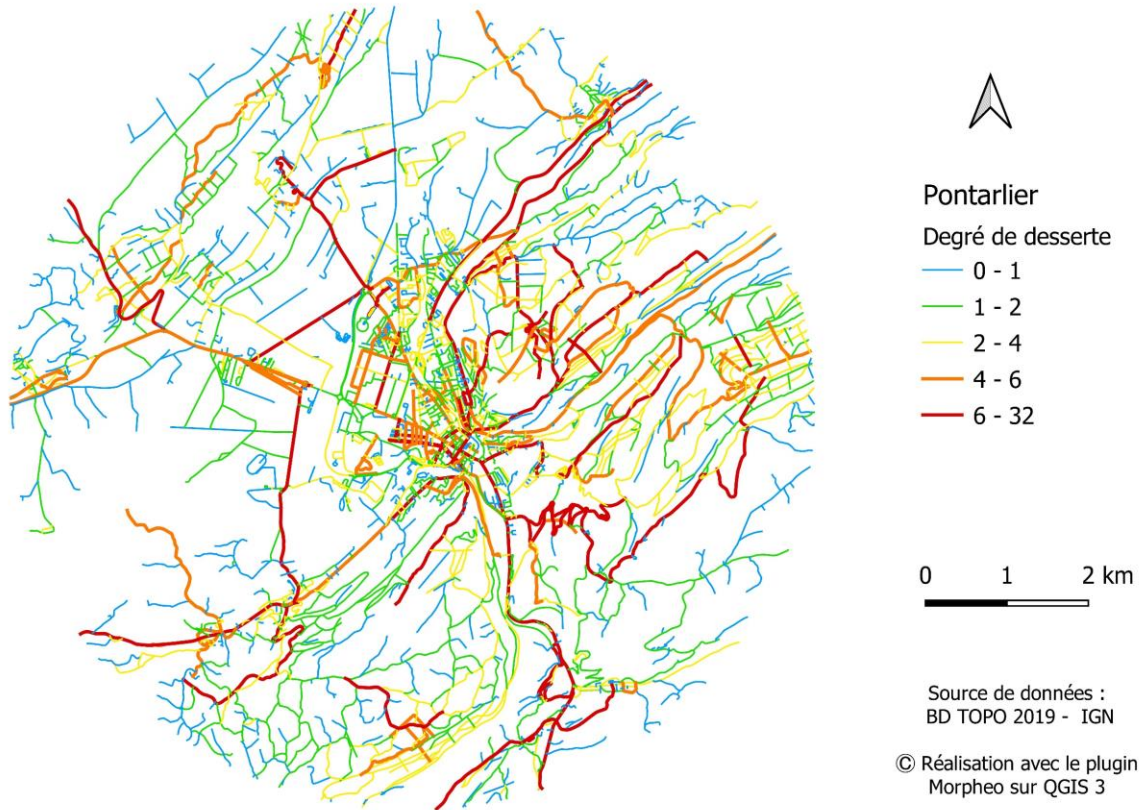


Figure 2.35. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.



Figure 2.36. Routes nationales et départementales traversant l'agglomération de Pontarlier.

Source : www.geoportail.gouv.fr

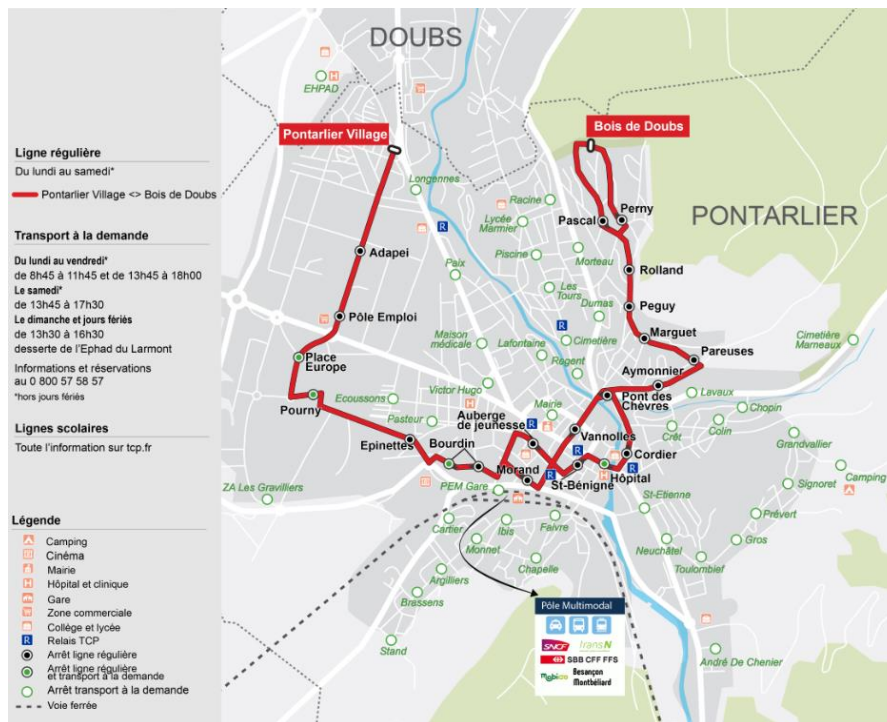


Figure 2.37. Plan réseau des transports en commun de Pontarlier.

Source : www.ville-pontarlier.fr

2.2.3.6 Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies

Au niveau du centre-ville historique, le réseau viaire se rattache principalement aux deux axes principaux (Rue des salins et Rue de Besançon), créant une trame interstitielle fortement orthogonale (avec des angles de connexion proche de 90°) (représentées en rouge sur la figure 2.38).

Les quartiers péricentraux principalement pavillonnaires (Figure 2.39), notamment "Castors-bois de Doubs" et "La chapelle", ainsi que les nouveaux quartiers comme "Côté Larmont", sont caractérisés par une structure principale arborescente du réseau viaire et une subdivision orthogonale des îlots. Le quartier industriel au Nord de la ville est structuré en îlots de grande superficie délimités par un réseau très orthogonal. À l'inverse, la périphérie de l'agglomération est marquée par une structure viaire arborescente (des voies avec des angles de connexion proche 0), qui correspond notamment aux voies de circulation rapides comme les routes nationales et départementales (représentées en bleu et en vert sur la figure 2.38). Par ailleurs, des voies transversales ou ramifiées sont connectées orthogonalement à cette structure. La lecture du réseau viaire de l'agglomération de Pontarlier à partir de l'indicateur d'orthogonalité permet de distinguer les caractéristiques morphologiques des différents tissus urbains (centre-ville, quartier pavillonnaire, quartier industriel, etc.) (Figure 2.39).

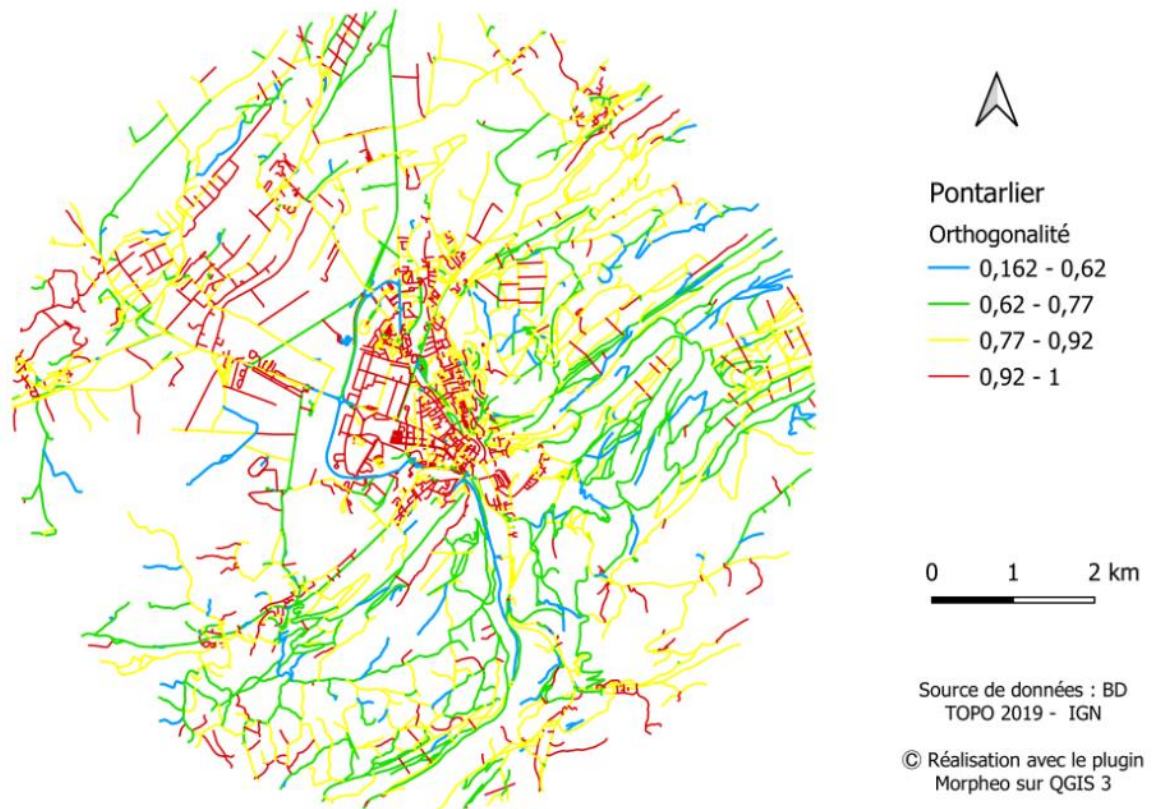


Figure 2.38. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019



Figure 2.39. Délimitation géographique des cinq quartiers et des lieux d'intérêts symboliques associées à la ville de Pontarlier. Source : www.ville-pontarlier.fr

2.2.3.7 La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies

L'indicateur d'espacement met en évidence les voies du réseau avec des intersections très espacées (représentées en rouge et en orange sur la figure 2.40), correspondant dans le cas de Pontarlier aux zones périphériques et aux zones caractérisées par une topographie très accidentée (Figure 2.41). À l'inverse, les structures denses du réseau se distinguent par des valeurs d'espacement faibles à moyennes (représentées en bleu, vert et jaune sur la figure 2.40), et correspondent aux rues du centre-ville et des centres des communes limitrophes à la commune de Pontarlier.

L'espacement du réseau montre une rupture à la fois topologique et fonctionnelle entre la pratique piétonne et carrossable. Un réseau avec des voies peu espacées est propice au déplacement piéton tandis qu'un réseau avec des voies très espacées est davantage conçu pour les déplacements motorisés.

En outre, les contraintes topographiques exercent une influence marquante sur la densité et la configuration du réseau viaire. Dans les zones topographiquement accidentées, les routes pourraient suivre les courbes de niveau pour minimiser les pentes abruptes, ce qui peut entraîner des trajectoires sinueuses et une densité de voies plus faible. À l'inverse, dans les zones plates, le réseau viaire se développe de manière plus dense. Cette interaction entre le relief et la structure du réseau contribue à façonner la connectivité, l'accessibilité et la fluidité des déplacements sur un territoire donné.

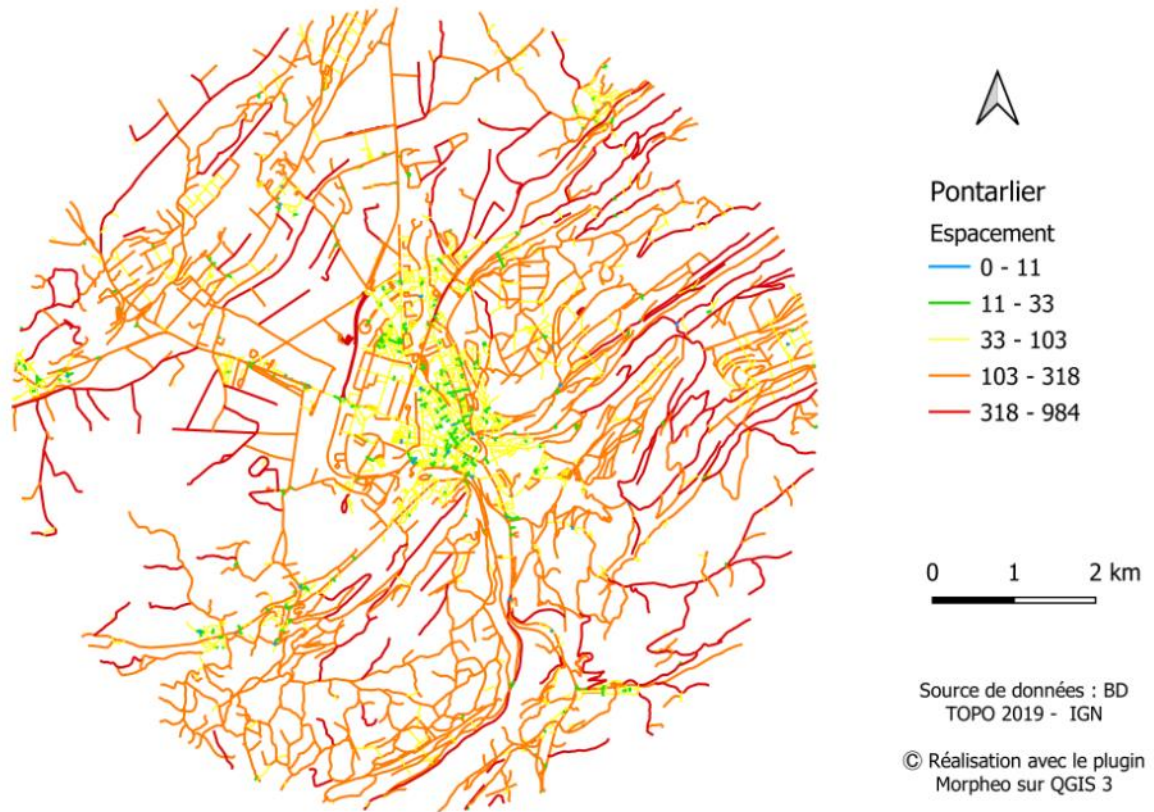


Figure 2.40. Espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.

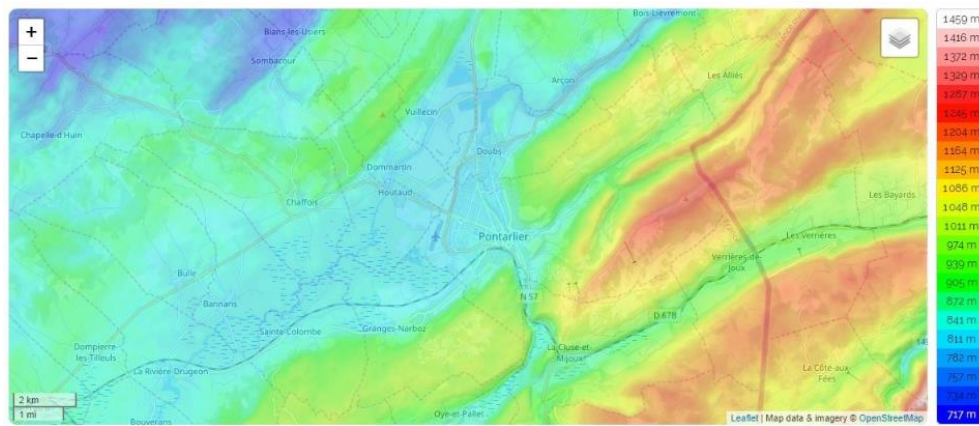


Figure 2.41. Carte topographique : Pontarlier, Doubs, Bourgogne-Franche-Comté.
Source : www.fr-fr.topographic-map.com

2.3 Synthèse du chapitre 2

Les indicateurs choisis permettent de lire et de comprendre la structuration des réseaux viaires urbains. Les indicateurs caractérisant les voies permettent de révéler les structures principales du réseau, d'identifier ses centralités et de mettre en évidence l'ancienneté des voies. Ces indicateurs nous renseignent également sur le niveau de desserte assurée par le réseau, sur les motifs qui le caractérisent et sur les densités qu'il induit. Dans ce chapitre 2, nous avons montré qu'il est possible de caractériser tout type de réseau viaire, sans une connaissance préalable de celui-ci, à partir de la seule étude et interprétation des valeurs des indicateurs. Les méthodes et le protocole d'analyse adoptés sont parfaitement transposables à d'autres villes pour lesquelles les données viaires historiques sont disponibles.

Les résultats des analyses révèlent aussi que la morphologie d'un réseau viaire est souvent liée à certaines prédispositions naturelles et à la capacité physique du territoire relative à la topographie et à d'autres éléments géographiques (comme la présence d'une rivière). Un réseau viaire à la fois persiste et évolue dans le temps. Cette dualité peut être retrouvée dans la présence d'une trame permanente qui structure le territoire et une évolution continue des éléments qui la composent. La trame permanente correspond aux voies les plus anciennes, qui sont souvent des itinéraires de passage, dont le tracé est façonné par la géographie du site et par le réseau routier interurbain. Cette trame joue un rôle déterminant dans l'évolution du réseau, car au fil du temps, les structures et voies qui s'y raccordent.

Les résultats des analyses morphologiques des réseaux viaires anciens et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier (du 17^{ème} au 21^{ème} siècle) affirment notre première hypothèse de recherche selon laquelle la topologie et l'inscription spatiale des réseaux viaires sont révélatrices de l'organisation et de la croissance passée d'un territoire. La pérennité du réseau dans le temps est ce qui lui permet de conserver des informations historiques dans son inscription spatiale et sa topologie.

Les résultats apportent également des premiers éléments de réponse concernant la deuxième hypothèse de recherche, qui suppose que certaines propriétés morphologiques sont communes à tous les réseaux viaires (indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction). Les distributions statistiques des valeurs de chaque indicateur révèlent en effet des similitudes entre les réseaux viaires des trois villes, ainsi que pour le réseau d'une même ville à différentes dates.

Chapitre 3

Analyses diachroniques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier entre le 17^{ème} et le 21^{ème} siècle

Ce troisième chapitre porte sur l'étude de l'évolution morphologique des réseaux viaires des territoires considérés au cours du temps. Les analyses diachroniques concernent les trois villes (à 12 dates pour Dijon et Besançon, et 10 dates pour Pontarlier), traçant l'évolution de leur réseau partant du réseau ancien du 17^{ème} siècle jusqu'au réseau le plus récent en 2019.

La section 3.1 présente un suivi des évolutions morphologiques à l'échelle de chaque voie, à partir d'une analyse fine de l'évolution des indicateurs dans le temps.

La section 3.2 présente un suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau viaire, à partir de la lecture des distributions spatiales et statistiques des voies les plus centrales.

La section 3.3 porte sur l'identification des permanences et des changements des structures viaires dans le temps, à partir de l'analyse de leur évolution et de leurs caractéristiques morphologiques distinctives.

3.1 Suivi des évolutions à l'échelle de chaque voie

Cette section présente une étude systématique, et dans le détail de chaque voie, des évolutions observées dans le temps, pour chaque indicateur. Pour ce faire, nous considérons l'emprise spatiale de la zone d'étude en t par rapport à $t+1$ (par exemple Dijon en 1883 au regard de 1876 dans l'emprise de 1876). Cette analyse est effectuée pour chaque paire de dates successives que nous avons retenu pour chaque ville. Le suivi de l'évolution des réseaux viaires des trois villes est possible grâce à l'appariement des résultats des indicateurs, qui permet de comparer le rang hiérarchique normalisé de chaque voie pour chaque indicateur, entre un temps t et un temps $t+1$ (voir sous-section 1.3.2.5). Les résultats sont cartographiés à l'échelle de la voie. Sur chaque carte, les voies en vert sont celles dont la position dans la hiérarchie des voies (rang), pour l'indicateur concerné, augmente entre chaque paire de dates. Les voies en orange et rouge sont celles dont le rang hiérarchique décroît. La cartographie de l'évolution des rangs des voies pour un même indicateur présente des classes spécifiques, pour chaque paire de dates.

Dans la première sous-section, nous explorons les propriétés géométriques des voies qui sont relatives aux indicateurs locaux, à savoir le degré, le degré de desserte, l'orthogonalité et l'espacement, et qui sont uniquement influencées par le voisinage local de la voie. Dans la deuxième sous-section, nous étudions les centralités globales, à savoir la centralité de proximité et la centralité d'intermédiation.

Notre objectif est de parvenir à des explications possibles de la stabilité et de l'instabilité de chaque indicateur dans le temps. Nous cherchons aussi à mieux saisir la manière dont l'évolution morphologique à une échelle locale, celle du segment de rue, a un impact sur le réseau viaire à l'échelle des voies et du graphe viaire, et si cet impact est similaire ou non pour les trois villes.

3.1.1 Propriétés locales des voies

Le suivi de l'évolution du réseau viaire en termes de rang hiérarchique normalisé des voies, en prenant en compte le degré et le degré de desserte, révèle plusieurs tendances d'évolution en termes de connectivité du réseau et de son niveau de desserte. Pour rappel, le degré met en évidence les voies les plus importantes d'un graphe, celles qui possèdent le plus grand nombre de connexions. Il représente une propriété locale de la voie dans le sens où il ne

dépend pas de la valeur mesurée sur les autres voies du graphe. Le degré de desserte est aussi une propriété locale de la voie.

Concernant l'espacement et l'orthogonalité, le suivi dans le temps du rang hiérarchique normalisé des voies, nous renseigne principalement sur l'évolution des caractéristiques géométriques locales au niveau des intersections du réseau viaire. Pour rappel, l'espacement d'une voie correspond à la distance métrique moyenne entre ses intersections. L'orthogonalité d'une voie caractérise les angles formés par ses intersections.

3.1.1.1 Le réseau viaire de Dijon (1690 - 2019)

Entre 1690 et 1883, une évolution positive et continue du rang hiérarchique des voies au regard de leur degré et de leur degré de desserte est globalement constatée pour les voies principales du centre historique, pour les voies traversantes (qui intersectent en X d'autres voies), ainsi que pour la voie concentrique qui délimite cette zone (Figure 3.1). Cependant, entre 1790 et 1839, les voies principales du centre historique subissent une perte significative de leur connectivité et de leur niveau de desserte. Cela peut être expliqué par l'émergence de davantage de voies partant du centre vers le péricentre immédiat. À partir de 1855, les voies principales sont caractérisées par une amélioration de leur rang par rapport au degré. Cette évolution est due au fait que tous les segments de rues émergents se rattachent à ces voies de manière intercalaire ou ramifiée (avec des intersections en forme de T ou de Y). Ces connexions renforcent leur connectivité sans nécessairement améliorer leur niveau de desserte. En ce qui concerne le degré de desserte, les voies qui sont directement reliées aux voies principales du centre ne montrent une amélioration qu'à partir de l'année 1876 par rapport à 1867. Durant cette période les voies principales sont davantage connectées à plusieurs voies traversantes (avec des intersections en X).

Entre 1690 et 1883, le réseau se développe par extension, via le prolongement des voies principales et l'émergence de nouvelles voies qui y sont rattachées. Il se développe également en connectant différents lieux grâce aux voies traversantes qui se raccordent aux voies principales.

A partir de 1883, ces tendances évolutives persistent jusqu'à 2019 (Figure 3.2), en parallèle à une densification progressive du réseau qui renforce la connectivité des voies radiales et des voies qui les connectent, assurant une meilleure desserte aux différents quartiers. Les voies les mieux connectées, qui sont souvent les plus longues, gagnent en importance (augmentation du degré) au fil du temps tandis que les voies locales subissent une évolution

négative significative en termes de degré et de degré de desserte. Ces voies locales correspondent à des voies de remplissage interstitiel, notamment celles plus anciennes du centre-historique ainsi que celles des nouveaux îlots en péricentre et en périphérie, qui sont courtes et peu connectées.

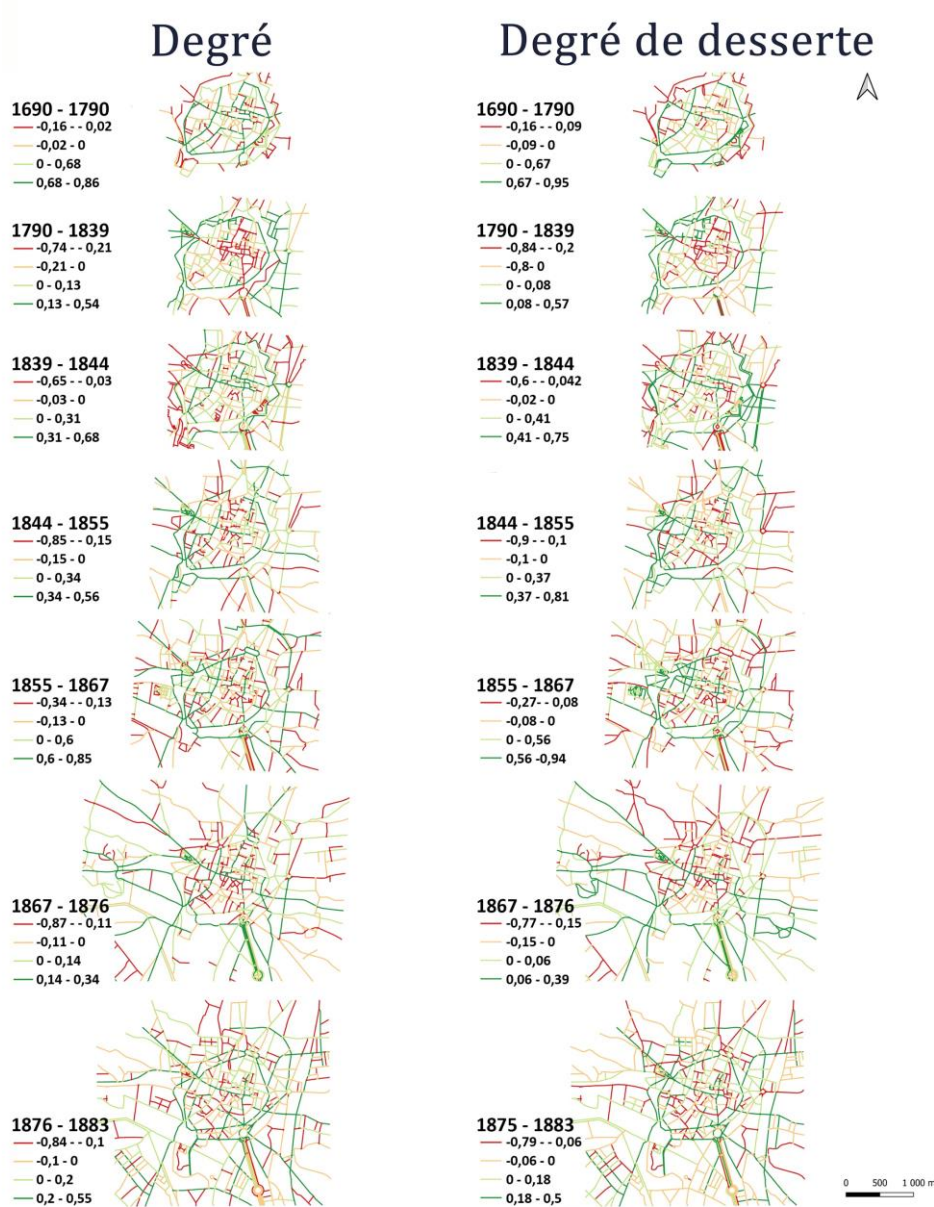


Figure 3.1. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard du degré et du degré de desserte entre 1690 et 1883.



Figure 3.2. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard du degré et du degré de desserte entre 1883 et 2019.

Entre 1690 et 1855, le rang hiérarchique normalisé des voies en termes d'espacement évolue positivement en péricentre mais régresse au niveau du centre historique (Figure 3.3). Entre 1855 et 1883, une évolution positive et continue du rang hiérarchique en termes d'espacement est globalement constatée pour les voies connectant le centre au péricentre, puis à la périphérie (Figure 3.4). En revanche, les voies qui se rattachent à ces voies radiales perdent progressivement leur position hiérarchique à mesure que le réseau se développe. Ceci peut s'expliquer par la densification locale et progressive du réseau en dehors du centre historique. Sur cette même période (1855-1883), les voies du réseau viaire du centre historique connaissent une régression de leur rang hiérarchique en termes d'orthogonalité tandis qu'une progression significative est observée pour les voies de remplissage interstitiel en péricentre. Le réseau s'étend par des voies arborescentes avec des intersections de plus en plus espacées à mesure que l'on s'éloigne du centre, tout en se densifiant par remplissage interstitiel avec des voies principalement orthogonales.

Entre 1883 et 2010 (Figure 3.4), on note une tendance à l'augmentation du rang hiérarchique de l'espacement des voies les plus longues, en particulier celles qui relient le centre-ville à la périphérie et celles en périphérie. En revanche, les voies situées au niveau des zones où le réseau se densifie progressivement connaissent une régression de leur rang. En ce qui concerne l'orthogonalité, les voies du centre-ville et du péricentre perdent leur position hiérarchique, tandis qu'en périphérie, les voies sont caractérisées par une progression de leur position hiérarchique.

Entre 2010 et 2019, les tendances d'évolution observées précédemment au regard de l'espacement et de l'orthogonalité se stabilisent. Les voies principales connectant le centre à la périphérie, les voies concentriques ainsi que les voies inter-quartiers affichent une évolution positive de leur rang en termes d'espacement, et inversement une régression en termes d'orthogonalité. En revanche, les voies du centre et celles des quartiers péricentraux et périphériques connaissent une régression de leur rang en termes d'espacement et une évolution positive en termes d'orthogonalité. A l'issue de ces évolutions, la structure du réseau de Dijon est clairement radioconcentrique, avec des voies radiales et concentriques espacées ainsi que des structures locales orthogonales et denses.

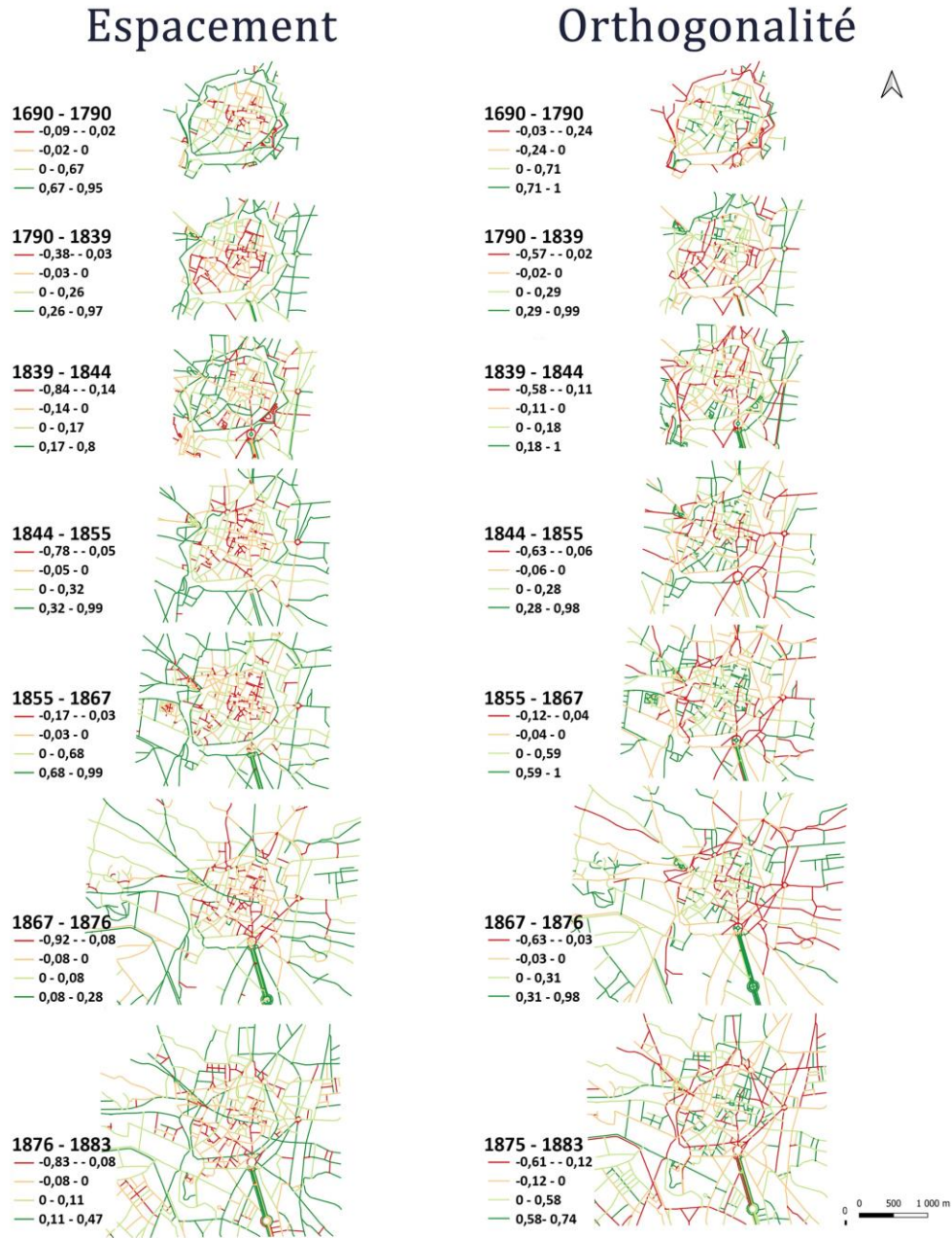


Figure 3.3. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1690 et 1883.

Espacement

Orthogonalité

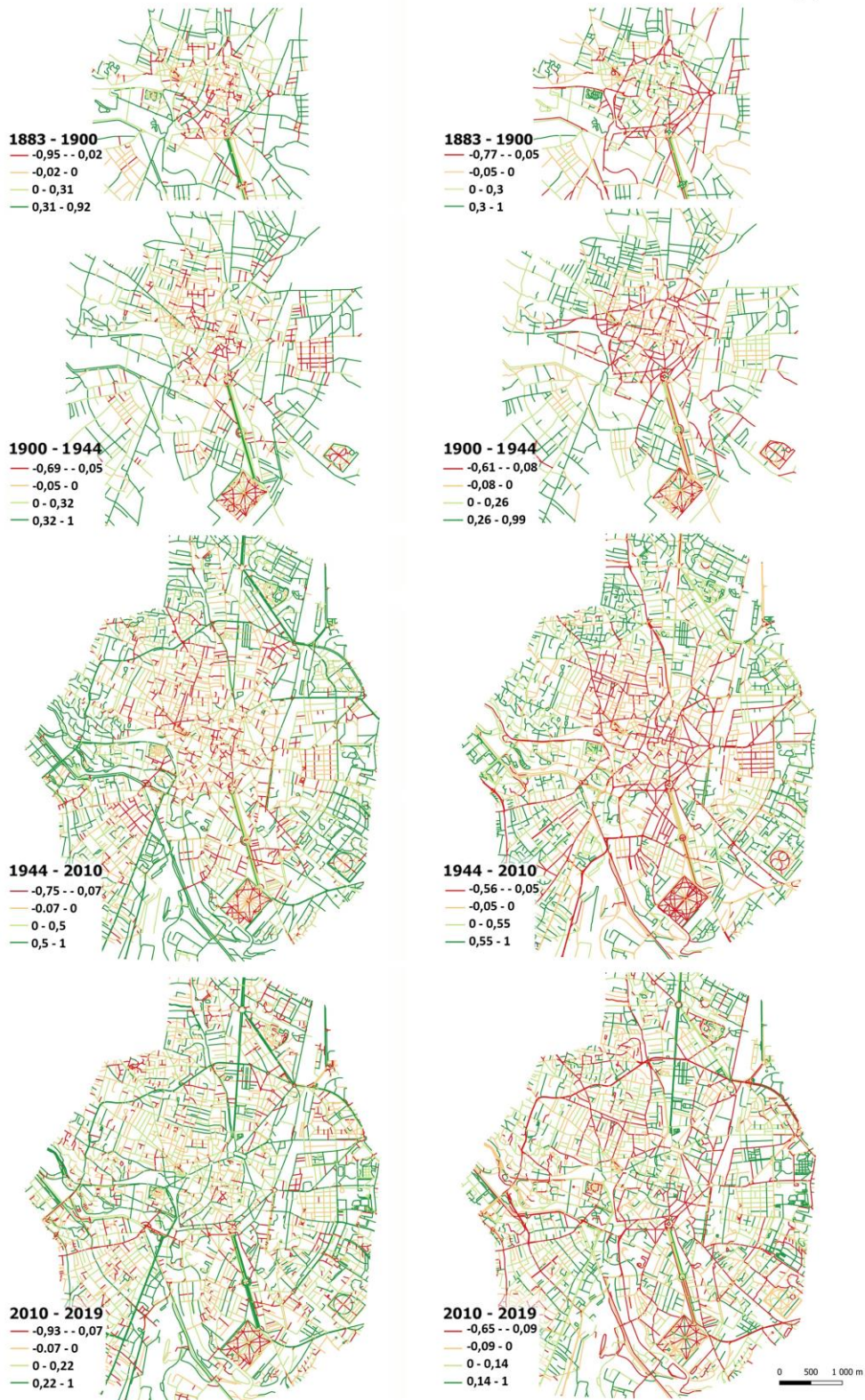


Figure 3.4. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1883 et 2019.

3.1.1.2 Le réseau viaire de Besançon (1696 - 2019)

Entre 1696 et 1878 (Figure 3.5), une progression constante et positive du rang hiérarchique en termes de degré est observée pour les principales voies du centre historique (la "Boucle"), notamment celles qui traversent ce centre de manière parallèle, ainsi que la voie qui contourne la "Boucle". Les évolutions observées pour les voies du centre perdurent jusqu'en 1937 (Figure 3.10).

À partir de 1860, les voies radiales connectant la "Boucle" au péricentre et ensuite à la périphérie (au Nord-Est, Nord, Nord-Ouest et Sud-Ouest), sont caractérisées par une évolution positive de leur rang par rapport au degré et au degré de desserte (Figure 3.5 et Figure 3.6). Cette évolution peut être expliquée par des logiques de rattachement similaires à ceux évoqués précédemment pour le réseau viaire de Dijon. Cela signifie que les nouveaux segments de rues se relient aux voies existantes les mieux connectées de manière intercalaire (en T), ramifiée (en Y) ou traversante (en X).

Entre 1878 et 1900, le réseau s'est densifié principalement vers le Nord de la "Boucle", ce qui entraîne une progression du rang hiérarchique en termes de degré pour les voies préexistantes du péricentre Nord. Les nouveaux segments renforcent la connectivité de ces voies préexistantes sans nécessairement améliorer leur niveau de desserte, puisqu'ils s'y rattachent principalement de manière intercalaire. Entre 1900 et 1937, le réseau se développe davantage vers le Nord-Ouest, renforçant ainsi la connectivité et le niveau de desserte des voies à ce niveau.

À partir de 1937, le développement du réseau s'oriente principalement vers l'Ouest, ce qui favorise la connectivité des voies principales à ce niveau, mais entraîne une forte diminution de la connexion des voies situées au péricentre et au Nord-Est du territoire. Durant cette période, la structure morphologique du réseau au niveau de La "Boucle" demeure stable. Cette stabilité entraîne une régression du rang hiérarchique des voies du centre par rapport aux voies radiales. Ces voies radiales se développent davantage en tant que structures très connectées, ce qui améliore également le niveau de desserte aux autres voies du réseau.

Au fil des différentes années, une régression notable du degré et du degré de desserte des voies locales, au profit des grandes voies de circulation, est constatée à mesure que le réseau évolue. Ces voies locales correspondent à des rues interstitielles qui sont généralement courtes et peu interconnectées.

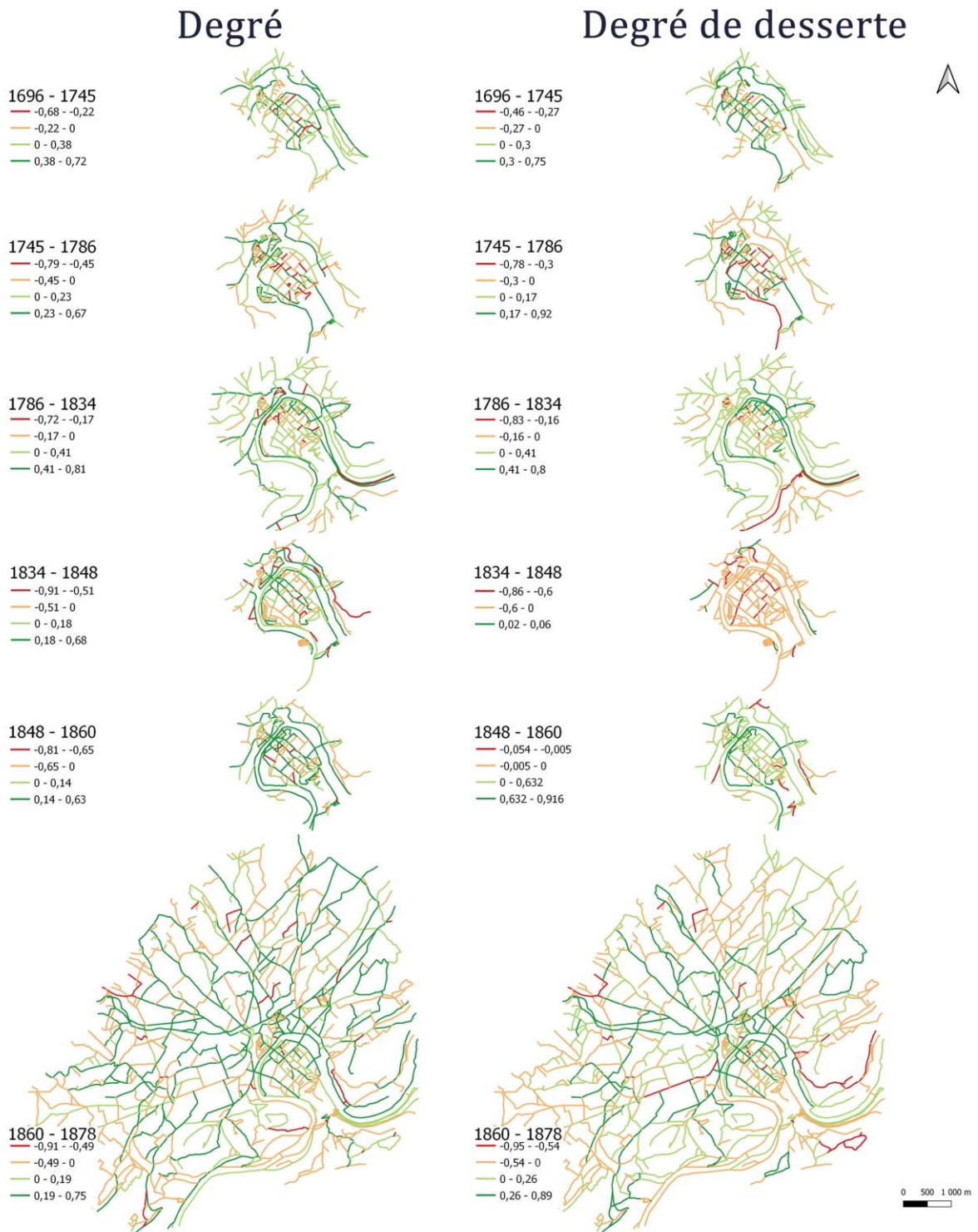


Figure 3.5. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard du degré et du degré de desserte entre 1696 et 1878.

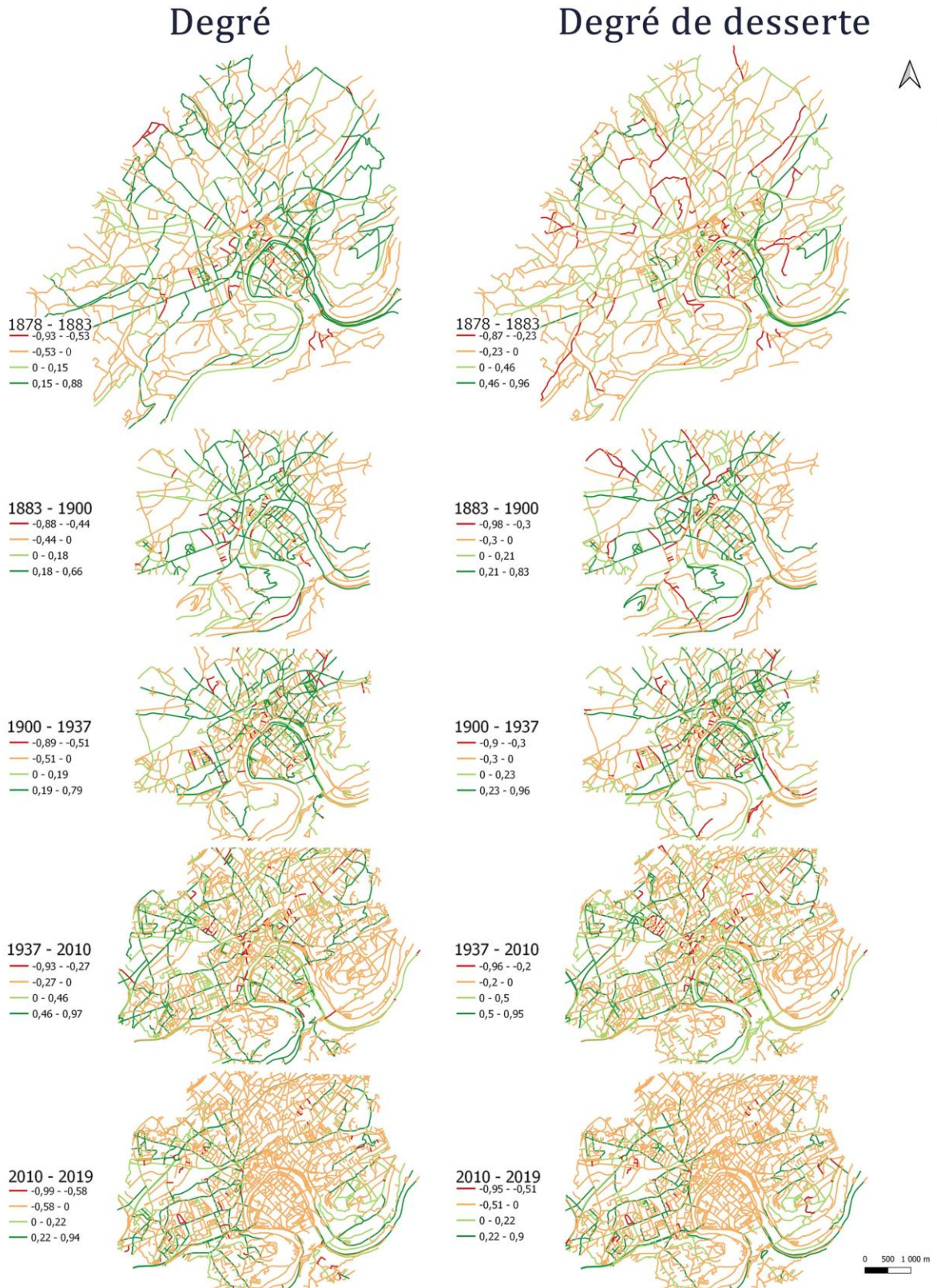


Figure 3.6. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard du degré et du degré de desserte entre 1878 et 2019.

En termes d'espacement, entre 1696 et 1860 (Figure 3.7), le réseau viaire de Besançon est caractérisé par un rang hiérarchique qui évolue positivement pour les voies en péricentre tandis que le rang hiérarchique des voies locales de remplissage interstitiel régresse. Entre 1860 et 1900 (Figure 3.7 et Figure 3.8), une évolution positive et continue du rang hiérarchique est globalement constatée pour les voies connectant la "Boucle" au péricentre, puis à la périphérie. Ces voies radiales perdent progressivement leur position hiérarchique à partir de 1937 à mesure que le réseau se densifie. Entre 1900 et 2019, le réseau subit principalement des changements morphologiques en périphérie de la "Boucle" (Figure 3.8).

En termes d'orthogonalité, entre 1696 et 1860 (Figure 3.7), certaines voies de la "Boucle" et du péricentre perdent leur position hiérarchique avec l'émergence de nouveaux segments qui s'y rattachent de manière ramifiée tandis qu'en péricentre, les voies sont principalement caractérisées par une progression de leur rang hiérarchique. Entre 1860 et 1937 (Figure 3.7 et Figure 3.8), certaines voies en périphérie perdent leur position hiérarchique à mesure que de nouveaux segments s'y rattachent de manière ramifiée. En revanche, les voies dont le rang hiérarchique progresse sont celles auxquelles de nouveaux segments se connectent de manière orthogonale. Entre 1937 et 2019, l'évolution morphologique du réseau au niveau de la "Boucle" et du péricentre immédiat se stabilise (Figure 3.8).

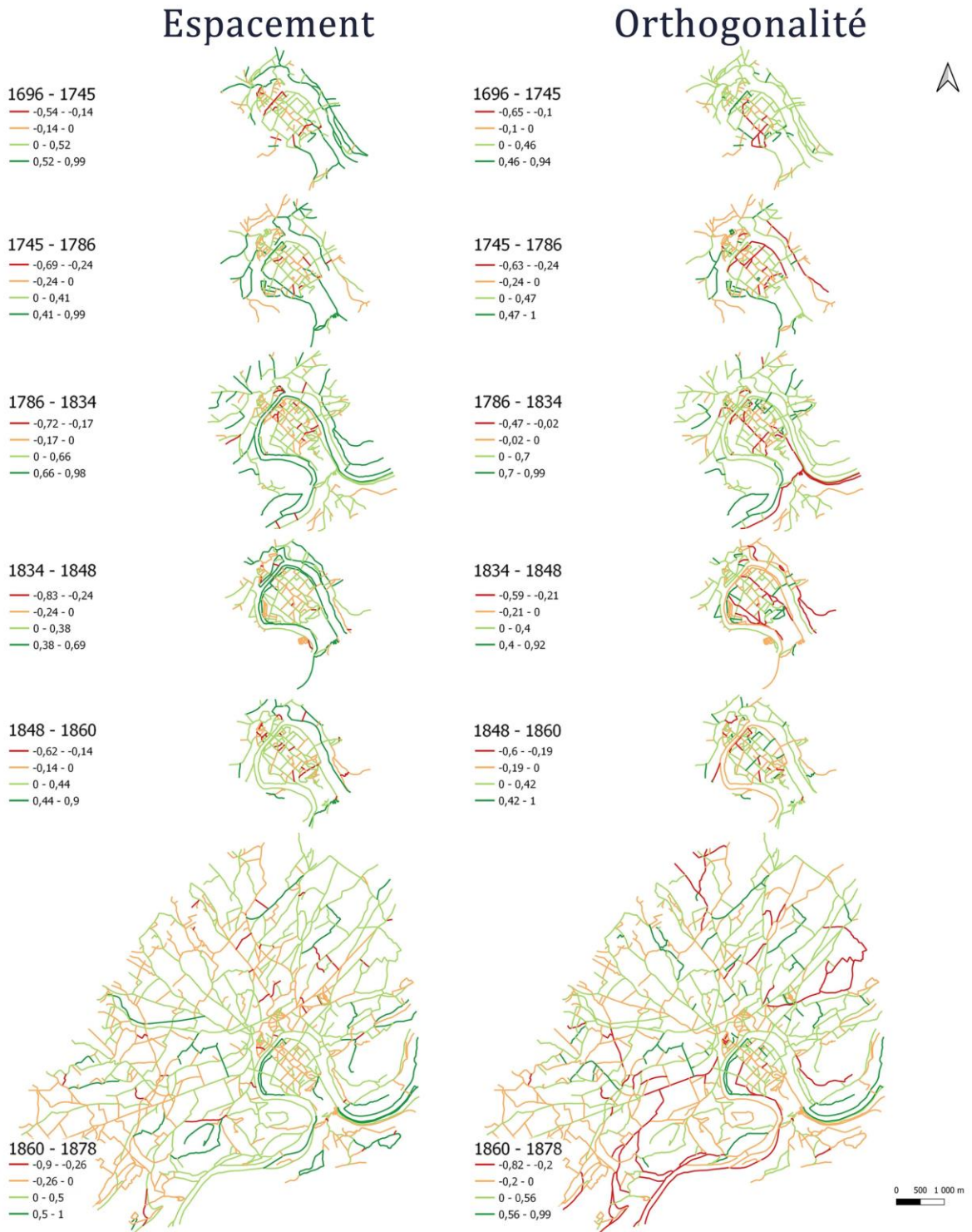


Figure 3.7. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1696 et 1878.

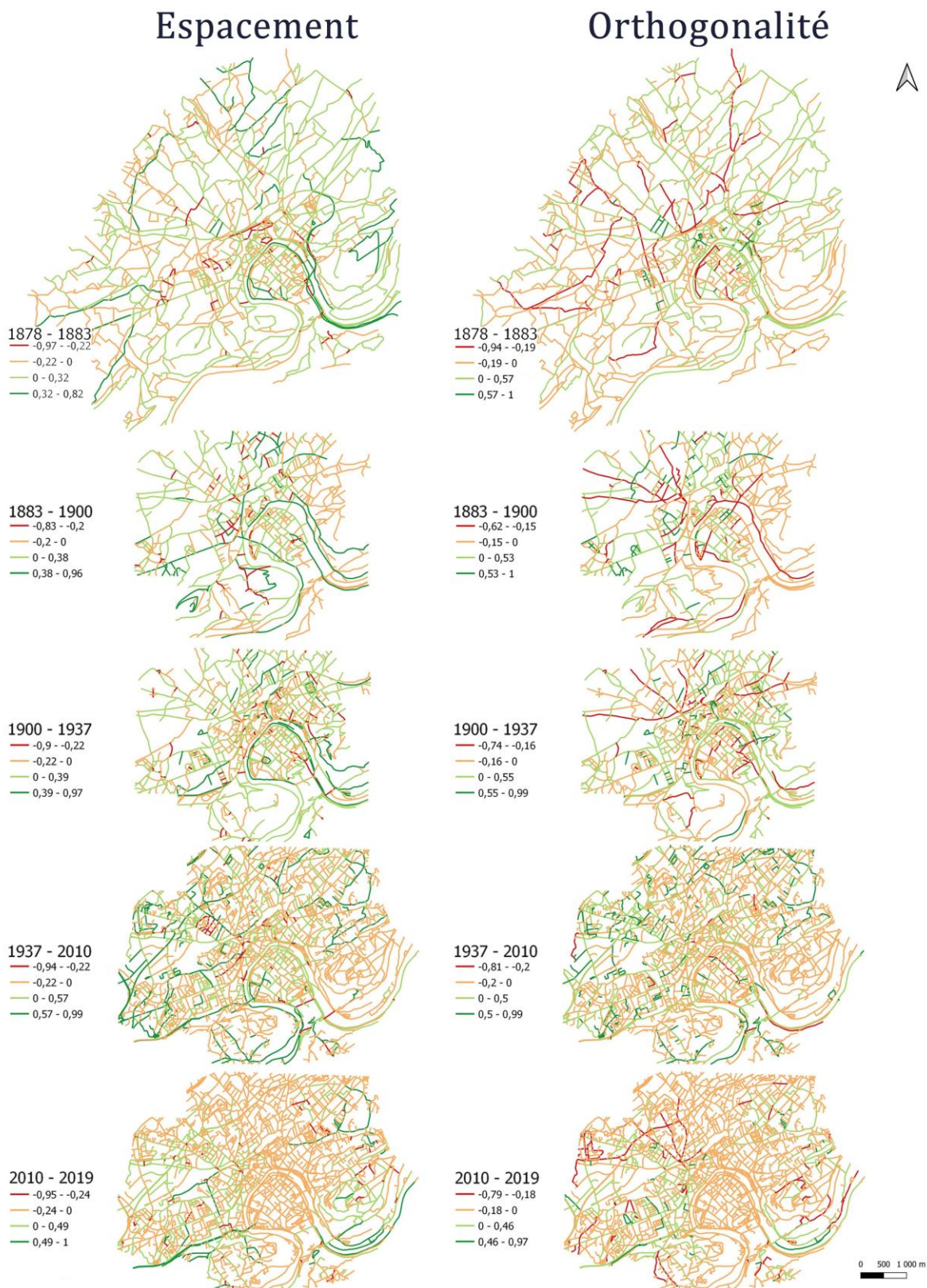


Figure 3.8. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1878 et 2019.

3.1.1.3 Le réseau viaire de Pontarlier (1692 - 2019)

L'analyse de l'évolution morphologique des voies du réseau viaire de Pontarlier met en évidence des logiques d'évolution morphologiques similaires à celles observées respectivement pour les réseaux de Dijon et Besançon, tout en tenant compte de la structure spécifique de chaque ville.

Entre 1692 et 1921 (Figure 3.9), une progression continue du rang hiérarchique en termes de degré est observée pour les voies principales du centre historique, en particulier celles qui traversent le réseau de manière linéaire. Cette observation est notamment valable pour l'évolution du degré de desserte sur cette période. Les voies qui convergent vers le centre-ville historique sont aussi caractérisées par une évolution positive de leur degré et leur degré de desserte.

Entre 1921 et 1931, le réseau viaire de Pontarlier est caractérisé par une évolution positive du rang hiérarchique des voies principales, les plus longues, au regard de leur degré et de leur degré de desserte (Figure 3.10). Tandis qu'entre 1931 et 2010, la position de ces voies principales en termes de degré régresse. Entre 2010 et 2019, le degré et le degré de desserte de certaines voies inter-quartiers sont renforcés.

En termes d'espacement et d'orthogonalité, entre 1692 et 1921 (Figure 3.11), une progression continue du rang hiérarchique est observée pour les voies principales traversantes du centre historique. Le rang des voies locales régresse en termes d'espacement et progresse en termes d'orthogonalité à mesure que le réseau évolue. Les voies qui convergent vers le centre-ville historique sont aussi caractérisées par une évolution positive de leur espacement. En revanche, l'évolution de leur orthogonalité alterne sur différentes périodes. Il y a une progression lors des phases de densification du réseau (1760-1830 et 1842-1912). Ensuite, des régressions surviennent pendant les périodes d'expansion du réseau (1736-1760, 1830-1842 et 1912-1921).

Entre 1921 et 1931, le réseau viaire de Pontarlier est caractérisé par une évolution positive du rang hiérarchique des voies principales, les plus longues, en termes d'espacement (Figure 3.12). Cela est dû à leur prolongement. Tandis qu'entre 1931 et 2010, le rang de ces voies principales régresse, en raison d'un développement du réseau dans les zones latérales (principalement au niveau des zones industrielles). Entre 2010 et 2019, le rang en termes d'espacement pour certaines voies inter-quartiers progresse par rapport aux voies principales,

et leur rang en termes d'orthogonalité régresse considérablement par rapport aux voies locales.

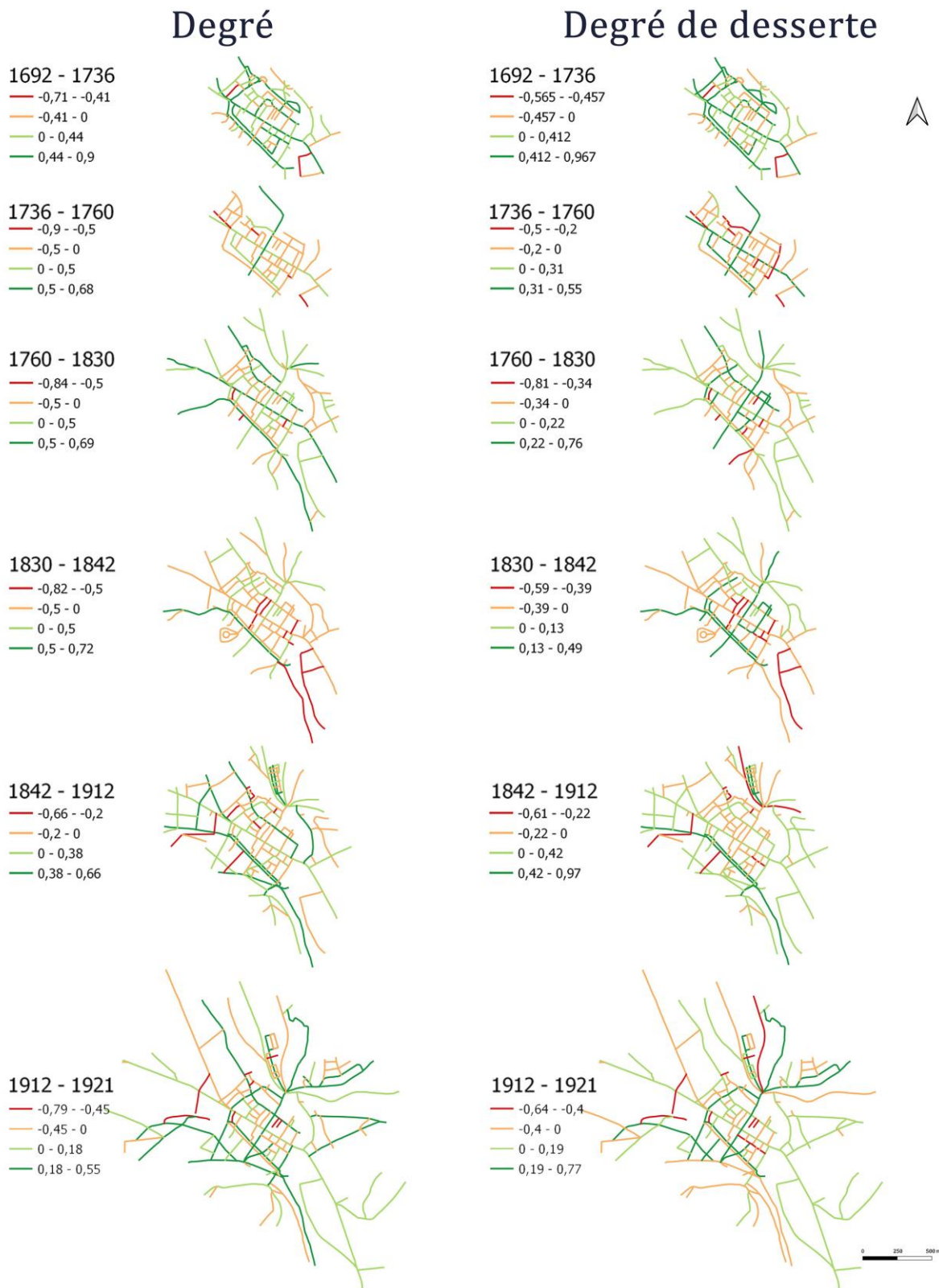


Figure 3.9. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard du degré, du degré de desserte entre 1692 et 1921.

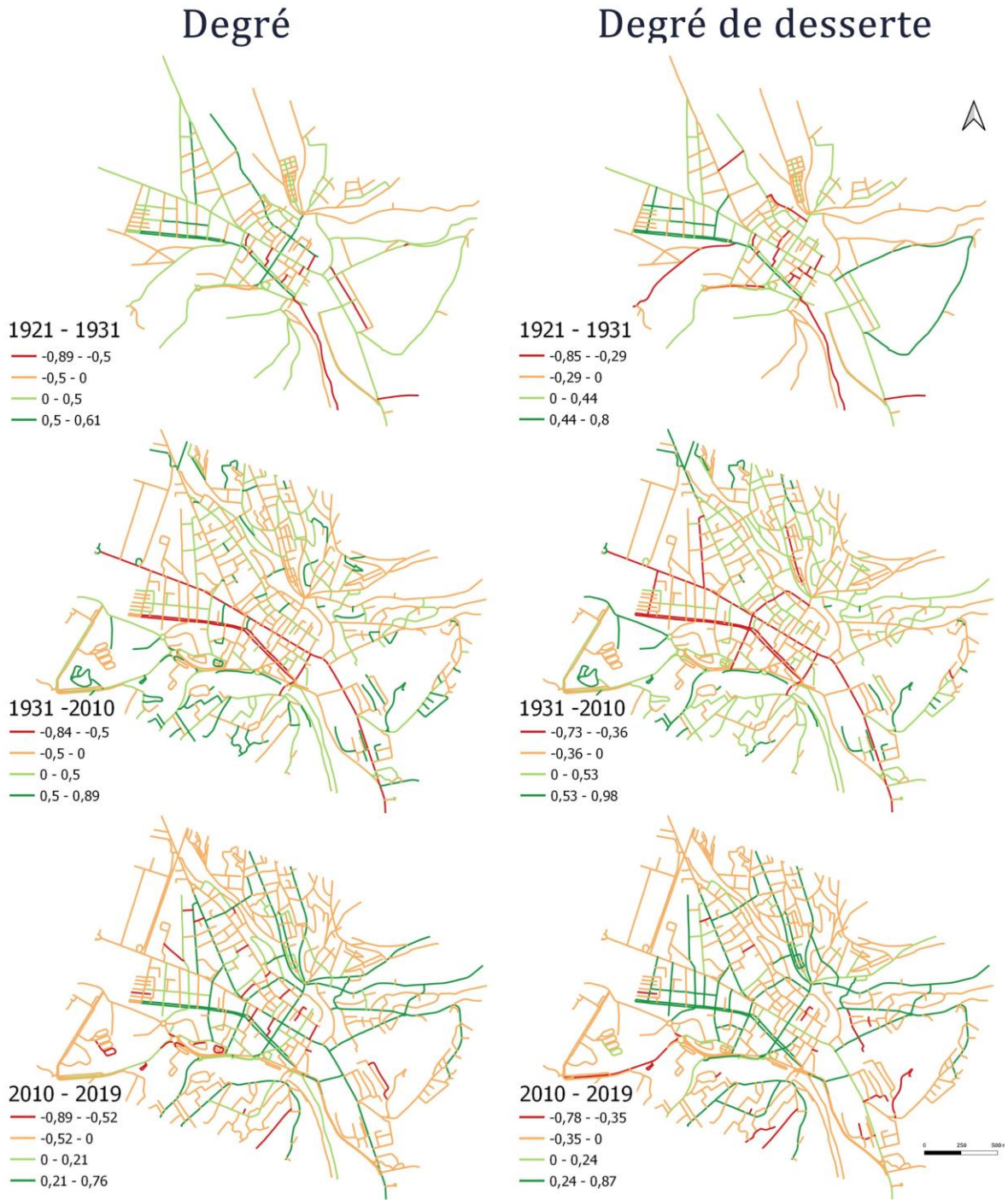


Figure 3.10. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard du degré, du degré de desserte entre 1921 et 2019.

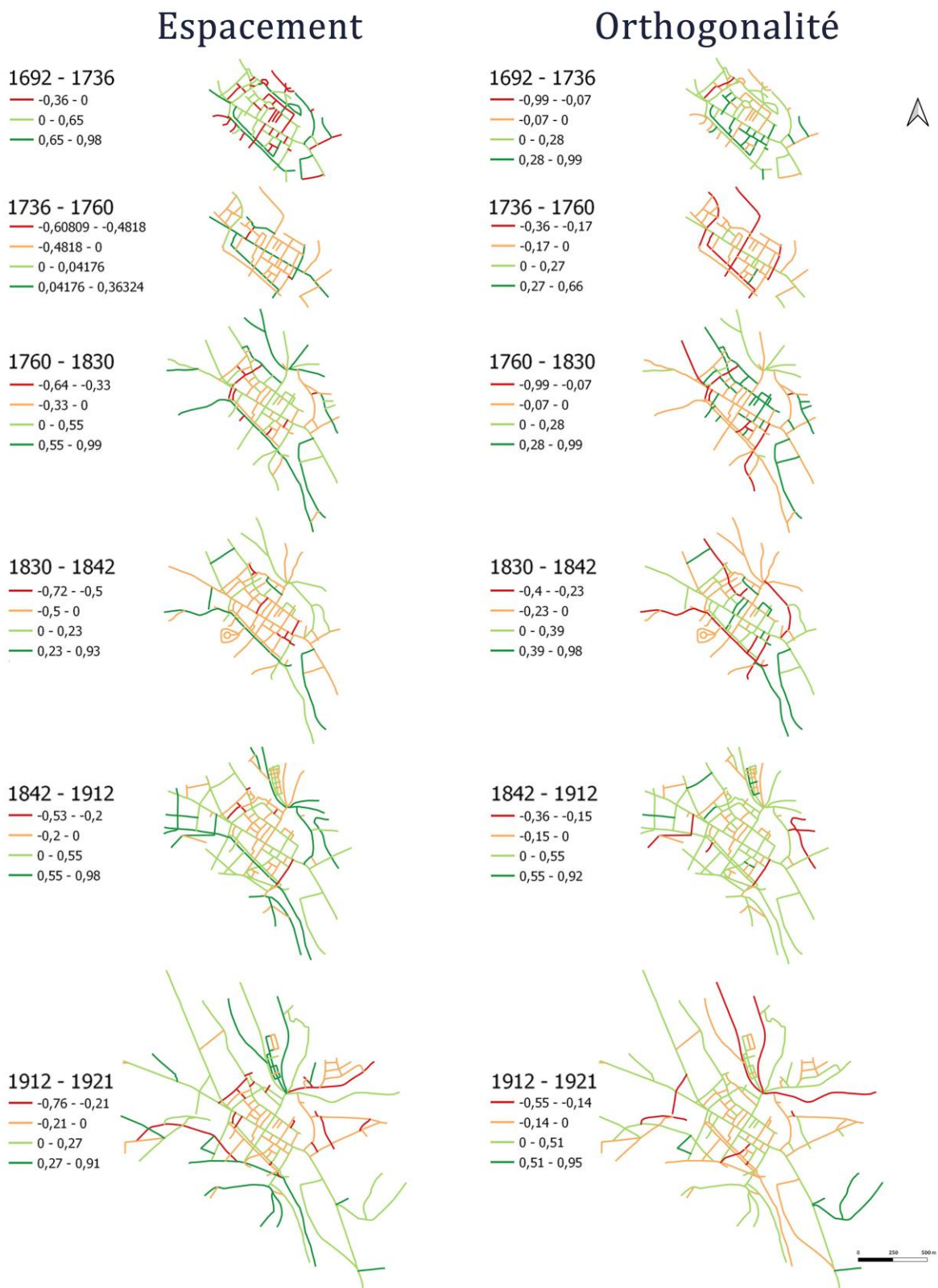


Figure 3.11. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1692 et 1921.

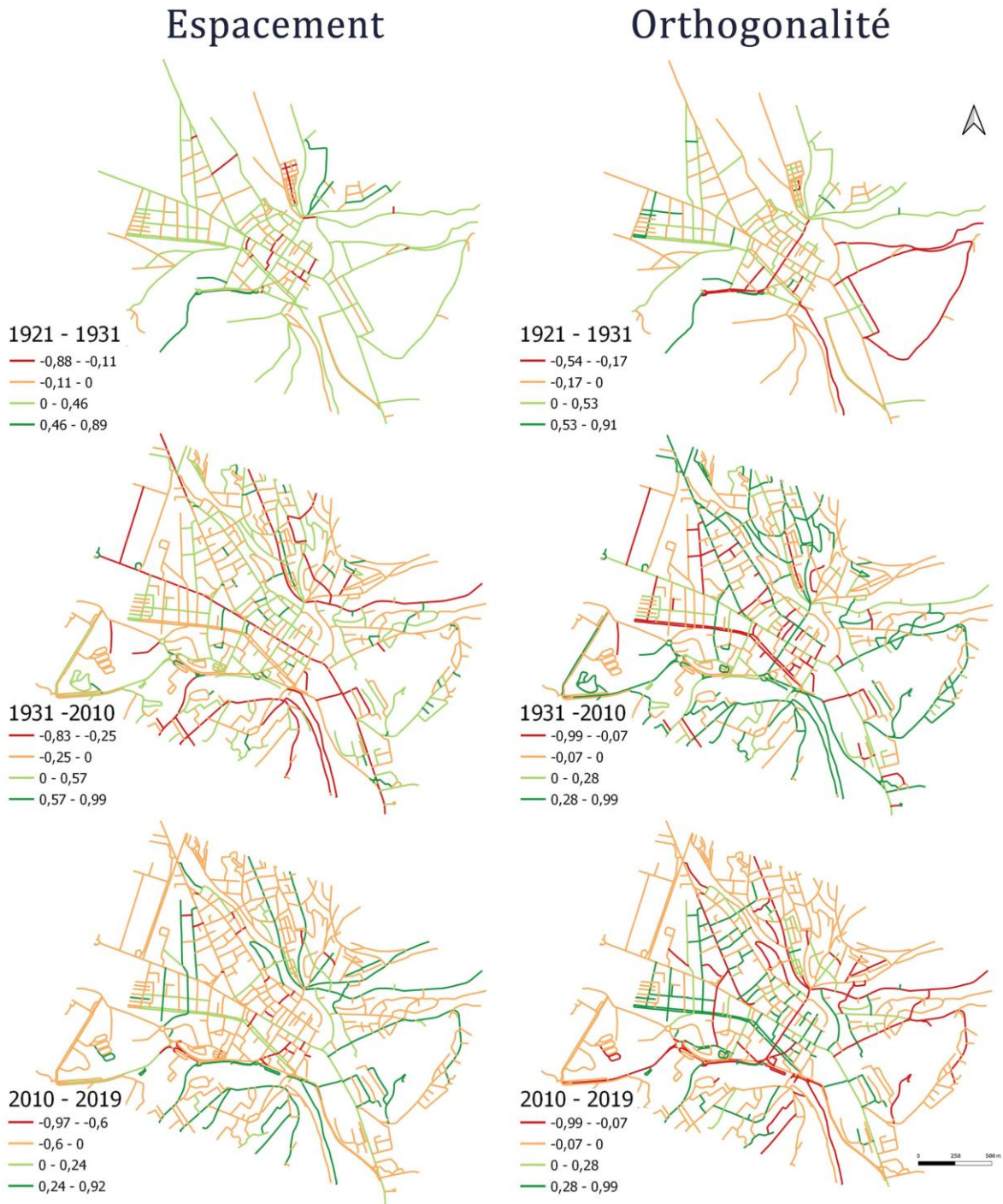


Figure 3.12. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard l'espacement et de l'orthogonalité entre 1921 et 2019.

3.1.2 Centralités des voies

Cette sous-section se focalise sur la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité. L'idée de la centralité de proximité est qu'une voie est centrale si elle est proche de toutes les autres voies du réseau. Tandis qu'en considérant la centralité d'intermédiarité, une voie est centrale si elle est très utilisée le long des chemins les plus courts entre toutes les paires de voies (nœuds du graphe dual).

3.1.2.1 Le réseau viaire de Dijon (1690 - 2019)

Entre 1690 et 1790, le réseau viaire du centre historique présente un renforcement du rang hiérarchique en termes de centralité de proximité et de centralité d'intermédiarité des voies les plus longues, qui sont les plus proches topologiquement et plus indispensables parmi toutes les voies du réseau. Entre 1790 et 1839, cette tendance s'inverse avec une régression de la position hiérarchique des voies du centre historique pour les deux centralités. Cela peut être expliqué par l'émergence des voies extra-muros, lesquelles sont sur les chemins les plus courts et les plus simples pour connecter les différentes voies du réseau, en contournant le centre historique.

Entre 1839 et 1883, le réseau viaire de Dijon est caractérisé par une évolution positive du rang hiérarchique en termes de centralités de proximité et d'intermédiarité pour les voies connectant le centre à la périphérie, en particulier celles connectées soit, aux deux voies croisées centralement au niveau du centre historique, soit, à la voie concentrique le délimitant. En revanche, les voies en périphérie connaissent une baisse continue de leur rang hiérarchique. Dans l'ensemble, entre 1690 et 1883, les tendances d'évolution de la centralité de proximité des voies présentent des similitudes avec celles de leur centralité d'intermédiarité (Figure 3.13).

Entre 1883 et 1944, la même tendance d'évolution positive, observée précédemment, se maintient pour les voies dont le rang hiérarchique avait déjà progressé pour les deux centralités (voir Figure 3.14). À partir de 2010, une différence significative est identifiée entre l'évolution de la centralité de proximité des voies et celle de leur centralité d'intermédiarité (voir Figure 3.14). Entre 1944 et 2019, le rang hiérarchique en termes de centralité de proximité a été renforcé de manière inégale, particulièrement pour les voies situées dans la zone Nord et la zone Ouest, en 2010, et ensuite dans la zone Sud-Ouest en 2019. Cela peut être expliqué par l'émergence de nouveaux quartiers au niveau de ces zones, permettant de connecter les voies du réseau à travers des chemins simples topologiquement. En outre,

durant cette période, la voie concentrique de la première couronne présente également une évolution positive significative, tandis que les voies du centre historique régressent considérablement. Parallèlement entre 1944 et 2019, la centralité d'intermédiarité s'est renforcée de manière uniforme à l'échelle du réseau, principalement pour les voies radiales et concentriques.

3.1.2.2 Le réseau viaire de Besançon (1696 - 2019)

Entre 1696 et 1860 (Figure 3.15), le suivi de l'évolution morphologique du réseau viaire de Besançon révèle un renforcement de la centralité de proximité et de la centralité d'intermédiarité des voies les plus longues du centre. Ces voies sont les plus proches topologiquement et plus indispensables que toutes les autres voies du réseau. Entre 1860 et 2010 (Figure 3.15 et Figure 3.16), les voies en périphérie se caractérisent particulièrement par une évolution positive de leur centralité d'intermédiarité. Ces voies sont davantage situées sur les chemins les plus courts et les plus simples pour connecter les différentes voies du réseau, en contournant le centre historique de la ville. Tandis qu'entre 2010 et 2019 (Figure 3.16), la centralité d'intermédiarité s'est renforcée particulièrement pour les voies situées dans la zone à l'Ouest.

3.1.2.3 Le réseau viaire de Pontarlier (1692 - 2019)

L'analyse de l'évolution du réseau viaire de Pontarlier, en considérant le rang hiérarchique normalisé des voies par rapport à leurs centralités, révèle plusieurs tendances identifiées précédemment. D'abord, entre 1692 et 1931 (Figure 3.17 et Figure 3.18), un renforcement de la centralité de proximité et centralité d'intermédiarité est identifiée pour les voies principales qui structurent progressivement le réseau. Ensuite, entre 1931 et 2010 (Figure 3.18), les centralités de ces voies principales diminuent à mesure que de nouvelles voies émergent pour contourner le centre historique de la ville. Enfin, entre 2010 et 2019 (Figure 3.18), certaines voies voient leur position en termes de centralité augmenter à nouveau en raison de la forte expansion du réseau, ce qui les rend plus indispensables en termes de proximité topologique et d'intermédiarité avec l'ensemble du réseau.

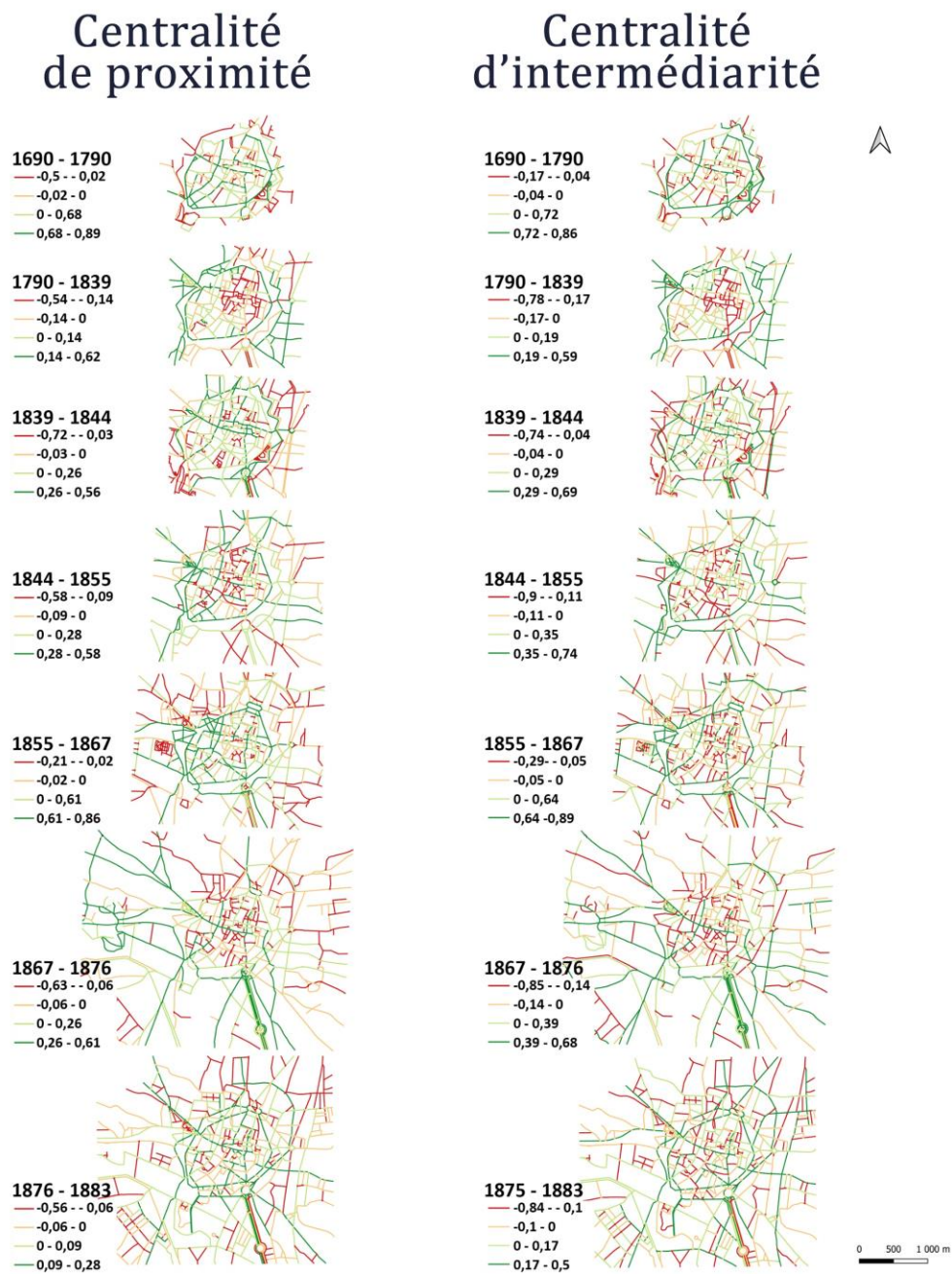


Figure 3.13. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiation entre 1690 et 1883.



Figure 3.14. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Dijon au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1883 et 2019.

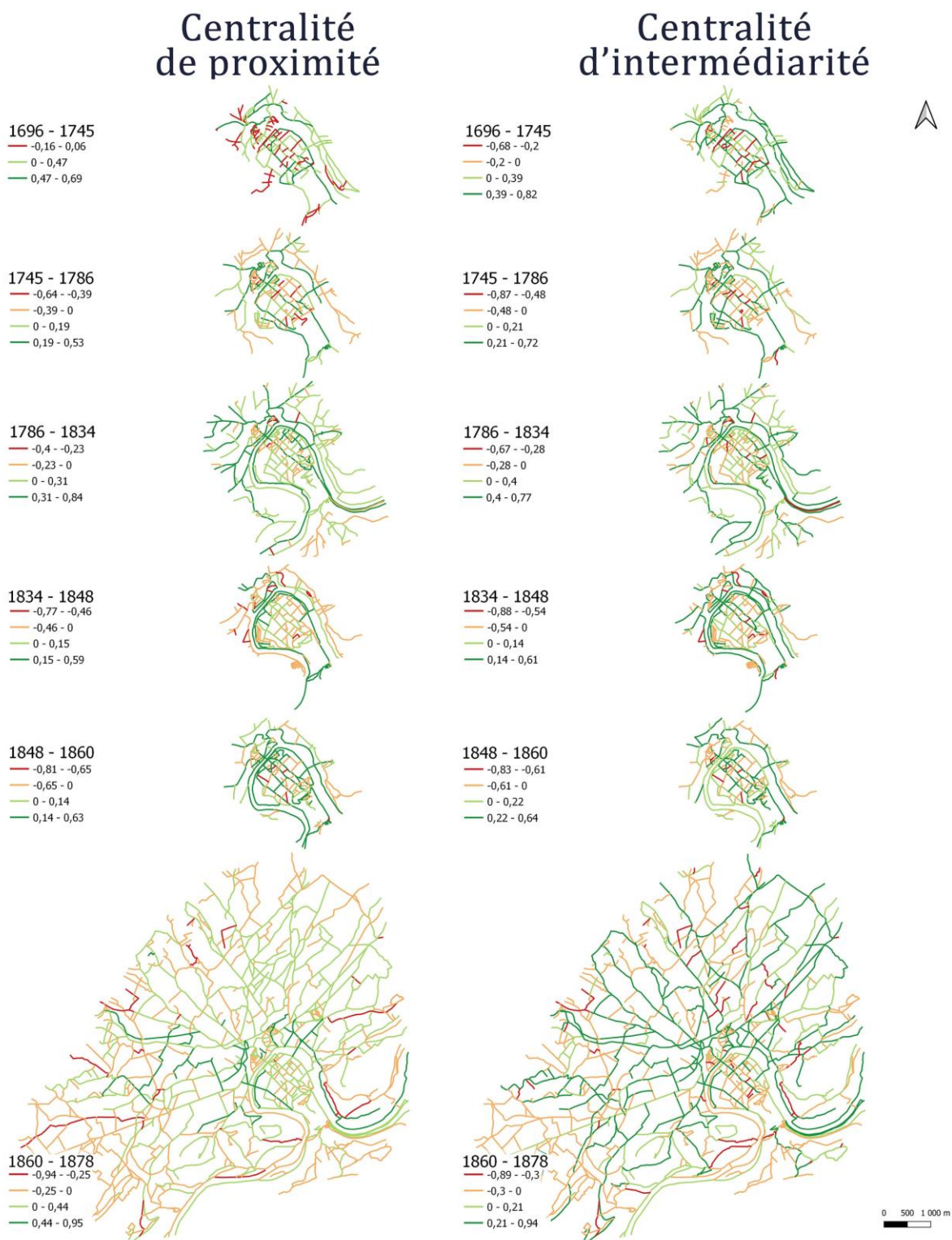


Figure 3.15. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité entre 1696 et 1878.

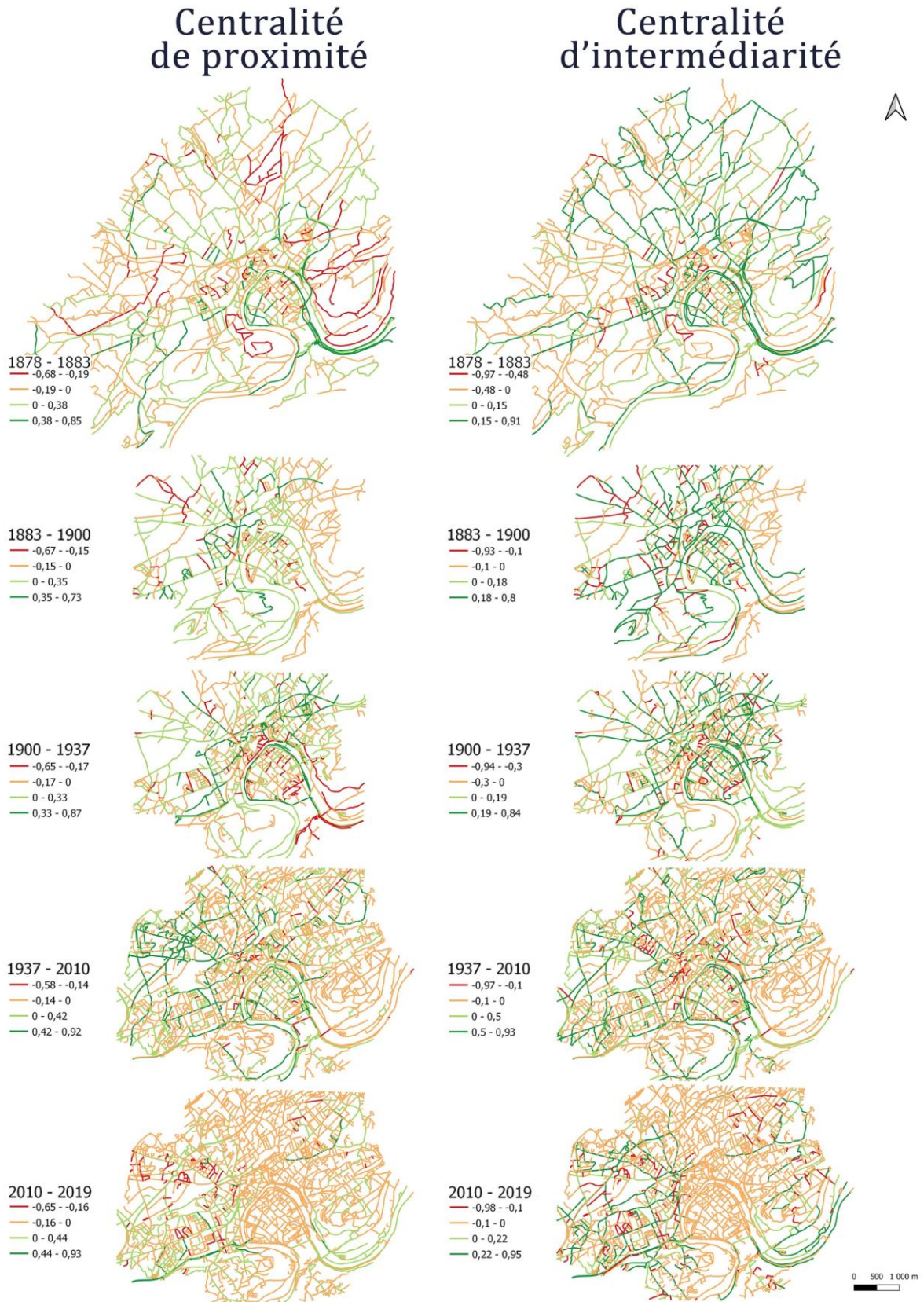


Figure 3.16. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Besançon au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1878 et 2019.

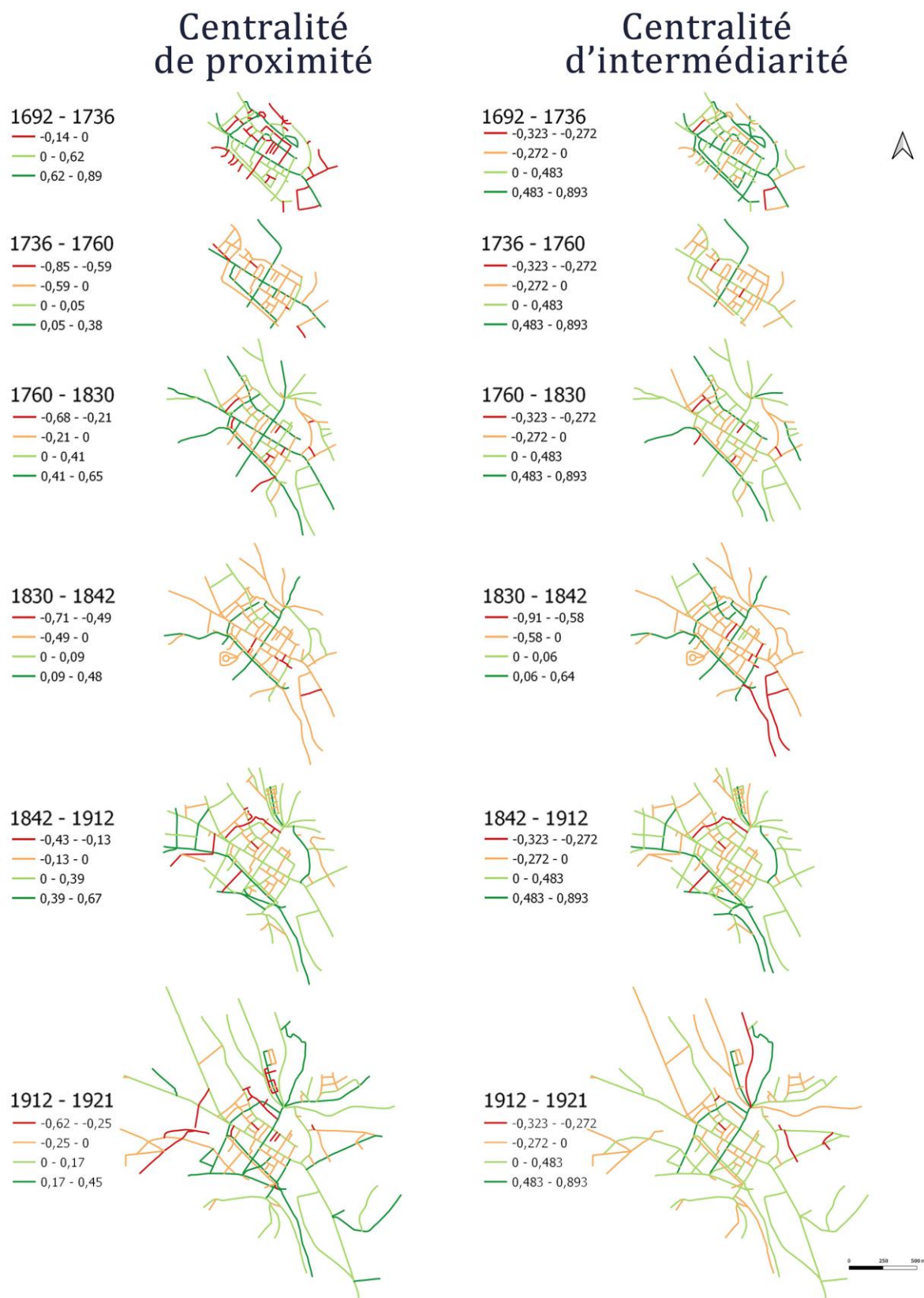


Figure 3.17. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité entre 1692 et 1921.

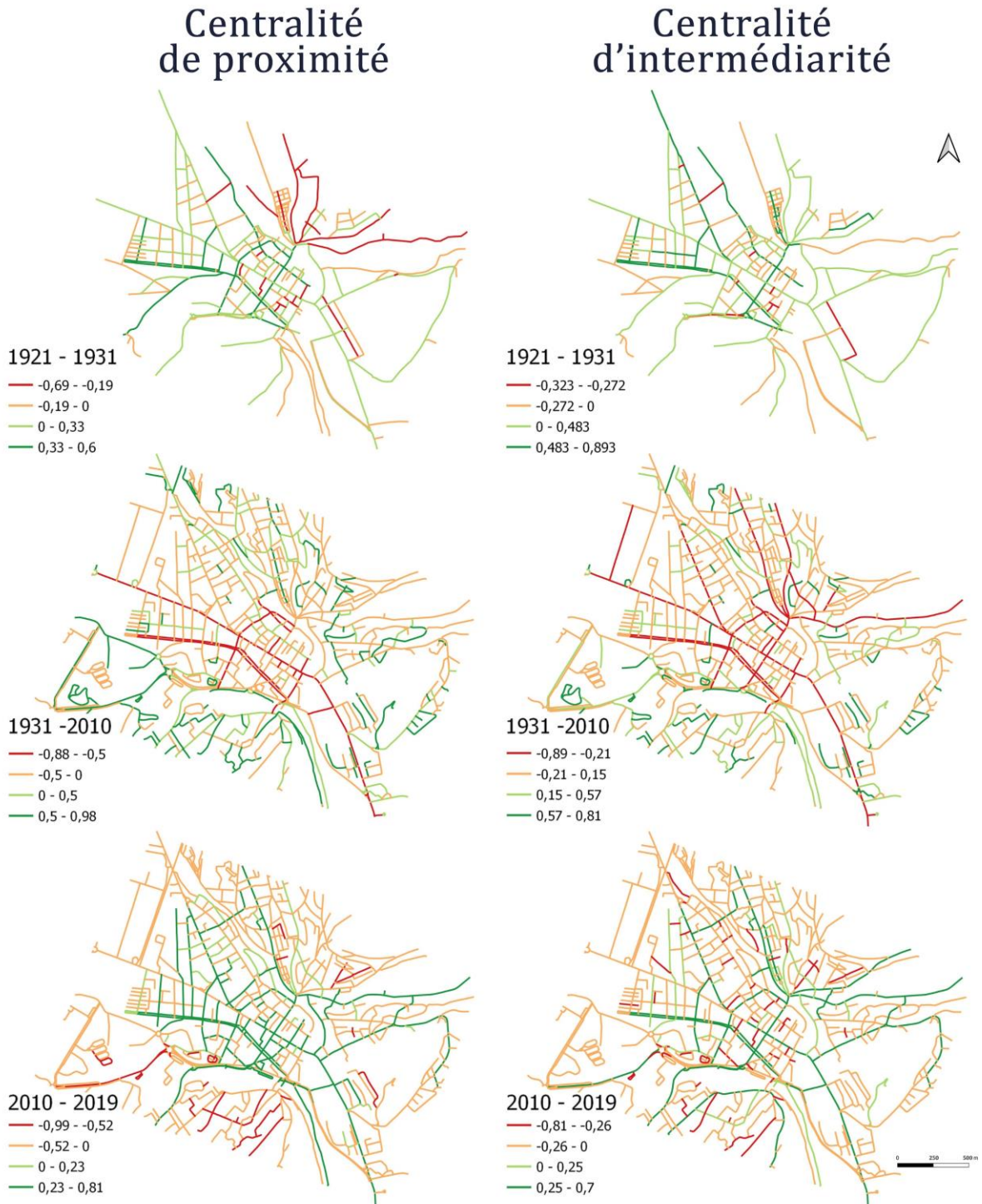


Figure 3.18. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1921 et 2019.

3.2 Suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau viaire

Cette section porte sur l'identification, la représentation cartographique et l'analyse des distributions statistiques des voies les plus centrales à chaque date, considérant trois indicateurs de centralité (le degré, la centralité d'intermédiarité et la centralité de proximité). Nous illustrons les résultats uniquement pour le réseau viaire de Dijon sachant que les conclusions qui peuvent en être tirées sont les mêmes pour Besançon et Pontarlier. Nous considérons le réseau à différentes dates en comparant successivement la distribution spatiale et l'évolution de chaque centralité.

Dans la première sous-section, nous commençons par comparer la distribution spatiale des voies les plus centrales pour une même date, en considérant chacune des trois centralités (comparaison horizontale des cartes (Figures 3.19, 3.20, 3.21 et 3.22)). Cette comparaison permet de mettre en évidence les différences et les similitudes entre ces structures centrales. L'objectif est d'étudier si elles obéissent à des distributions spatiales homogènes ou hétérogènes, et si un indicateur de centralité peut rendre compte de l'intégralité de l'organisation de la structure ou si chaque centralité traduit des caractéristiques différentes. Par la suite, nous examinons comment la distribution spatiale évolue au fil du temps pour les voies les plus centrales selon chaque indicateur de centralité (comparaison verticale des cartes (Figures 3.19, 3.20, 3.21 et 3.22)). Le suivi de l'évolution des voies les plus centrales du réseau dans le temps, peut être révélateur de la restructuration du réseau par la redistribution des centralités. Dans la deuxième sous-section, nous examinons comment la distribution statistique des voies les plus centrales évolue au fil du temps pour chaque indicateur de centralité.

Pour chaque mesure de centralité, nous établissons un seuil permettant d'identifier les voies les plus centrales. D'abord, nous considérons les voies dont le degré $D_{(i)}$ est supérieur à une valeur égale à la valeur maximale du degré divisée sur 3 ($D_{(i)} > \frac{D_{\max}}{3}$). Ensuite, en termes de centralité d'intermédiarité nous considérons les voies avec une centralité $B_{(i)}$ supérieure à une valeur égale à la valeur maximale de centralité d'intermédiarité divisée par 10 ($B_{(i)} > \frac{B_{\max}}{10}$). Enfin les voies les plus centrales en termes de centralité de proximité sont distinguées de telle sorte que leur centralité $C_{(i)}$ est supérieure à une valeur égale à 3 fois la valeur maximale de centralité de proximité divisée sur 4 ($C_{(i)} > \frac{3 \times C_{\max}}{4}$). Les critères de sélection des voies les plus

importantes en termes des différentes centralités du réseau ont fait l'objet de plusieurs tests pour vérifier l'effet de la valeur minimale considérée. Les valeurs seuils choisies apparaissent comme des valeurs significatives et interprétables pour les réseaux aux différentes dates.

Pour étudier l'évolution des centralités d'un réseau viaire au cours du temps, l'approche la plus courante est de considérer une même emprise spatiale pour tous les réseaux aux différentes dates (Barthelemy et al., 2013; Strano et al., 2012). Lorsque les données le permettent, l'emprise considérée doit être suffisamment large pour que les centralités calculées considèrent l'ensemble des routes importantes (Strano et al., 2012). Toutefois, quand on travaille sur l'évolution de réseaux urbains sur la longue durée, l'emprise spatiale des réseaux change considérablement, ce qui est le cas pour Dijon, Besançon et Pontarlier entre le 17^{ème} et le 21^{ème} siècle. Ce faisant, si on analyse les réseaux compte tenu de la plus petite emprise spatiale commune, certaines voies structurantes, notamment les rocades périphériques, sont exclues de l'analyse.

A l'aune de ces considérations, en préalable de nos analyses, nous avons souhaité étudier les effets du choix de différentes emprises spatiales sur les résultats des indicateurs. Nous avons testé deux possibilités : 1) le calcul des indicateurs est effectué pour chaque réseau à une date $t+1$ sur l'emprise spatiale du réseau à une date t ; 2) le calcul des indicateurs est effectué pour chaque réseau à chaque date sur l'emprise spatiale du réseau à la date en question (dans ce cas, l'emprise spatiale du réseau qui est considérée est en fait celle de la carte source qui a été numérisée). Nous souhaitons voir si ces deux types de découpage (même emprise spatiale en $t+1$ qu'en t , ou bien emprise spatiale différente en t et en $t+1$) influençait les résultats des analyses et devait donc être pris en considération. Les différents tests effectués ont montré que le découpage du réseau n'influencait pas les résultats des différents indicateurs de centralité, du moins quand ils sont représentés sous forme cartographique (voir Annexes 13, 14 et 15). Cela confirme la robustesse de l'objet voie. Nous ne présentons ci-après que les résultats d'analyse des réseaux anciens dans l'emprise spatiale de la carte source (Figure 3.19, figure 3.20 et figure 3.21). Pour les réseaux viaires de 2010 et 2019, dont l'emprise spatiale réelle est bien plus large que celle des réseaux anciens, les cartes présentent d'abord les indicateurs calculés dans l'emprise spatiale du réseau en 1944 (Figure 3.21 et Figure 3.20). Ensuite, les indicateurs sont calculés sur l'emprise spatiale plus large ($\approx 200 \text{ km}^2$ pour Dijon), considérée pour les réseaux contemporains (Figure 3.22).

3.2.1 Evolution de la distribution spatiale des centralités des voies

Pour le réseau historique de Dijon en 1690, 1790 et 1839, les voies les plus centrales en termes de degré (Figure 3.19 - a) sont aussi celles plus importantes en termes de centralité d'intermédiarité (Figure 3.19 - b). Les voies les plus centrales au niveau de ces réseaux (restreints en termes d'étendue spatiale) sont à la fois les mieux connectées et celles représentant les chemins les plus courts pour connecter les voies de l'ensemble du réseau. La grande majorité de ces voies correspondent également aux chemins topologiques les plus simples (Figure 3.19 - c). Notons que, durant cette période historique, les voies assurant un accès facile à l'ensemble du réseau (les plus importantes en termes de centralité de proximité) sont très peu nombreuses. En outre, le réseau de la ville en 1844 est plus dense (par rapport au réseau au 1839) au niveau du centre historique.

À partir de 1855, le réseau est de plus en plus étalé sur des rayons plus larges autour du centre. Au niveau des réseaux historiques de 1855, 1867 et 1876, les voies les plus centrales en termes de degré sont les voies radiales créées par prolongement des voies du centre-ville (Figure 3.20 - a). Les voies caractérisées par la centralité d'intermédiarité la plus importante sont à la fois les voies radiales et les voies concentriques connectant ces dernières (Figure 3.20 - b). Néanmoins les voies représentant les chemins topologiques les plus simples sont plus concentrées dans le périmètre du centre (Figure 3.20 - c).

Les réseaux de 1883, 1900 et 1944 représentent une évolution du réseau par densification et extension. Les voies les mieux connectées avec un fort degré représentent notamment les chemins les plus courts (centralité d'intermédiarité) entre les différentes voies du réseau (Figure 3.21 - a et b). Ces voies assurent à la fois le prolongement du réseau et la liaison entre les différents secteurs de la ville. De plus, les voies radiales les plus centrales assurent une accessibilité à l'ensemble de la ville par des chemins topologiques simples (centralité de proximité) (Figure 3.21 - c).

Pour les deux dates contemporaines (2010 et 2019), les voies les plus centrales du réseau en termes de degré le sont également en termes de centralité d'intermédiarité (Figure 3.22 - a et b). Elles correspondent principalement aux artères principales reliant le centre de la ville à sa périphérie et à la rocade périphérique. La centralité de proximité représente des similitudes avec les deux autres centralités, mais met également en évidence des voies plus locales

assurant un accès plus simple à l'échelle du réseau, plus particulièrement au niveau des zones Nord-Est et Ouest au péricentre du centre historique de la ville (Figure 3.22 - c).

Pour synthétiser, la comparaison de la distribution spatiale des différentes centralités illustre leur forte similitude sur les réseaux les plus anciens. En revanche, à partir de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, les centralités représentent des distributions spatiales plus hétérogènes. Pour les réseaux contemporains, les voies les plus centrales en termes de degré et de centralité d'intermédiarité le sont souvent en termes de centralité de proximité. Cependant, l'inverse n'est pas toujours vrai. Toutes les voies les plus centrales en termes de centralité de proximité ne sont pas forcément autant centrales en termes de degré et de centralité d'intermédiarité.

En termes d'évolution, les distributions spatiales du degré et de la centralité d'intermédiarité changent peu lors des premières dates historiques considérées (Figure 3.19). À partir de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, avec le déclenchement d'un processus d'expansion du réseau, une légère modification est observée dans la répartition spatiale des centralités, qui devient progressivement plus uniforme entre le centre et la périphérie du réseau (Figure 3.20, et Figure 3.21). Dès le début du 20^{ème} siècle, les voies au niveau du centre-ville perdent en centralité (Figure 3.21). Elles sont progressivement substituées par de nouvelles voies radiales partant du centre historique de la ville, ainsi que par des voies concentriques autour de celui-ci. Avant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, les centralités ne représentent pas de changements remarquables, ce qui suggère que l'extension du réseau n'a pas essentiellement modifié la structure de la ville.

Ultérieurement, l'évolution du réseau a influencé la répartition spatiale de la centralité d'intermédiarité et du degré, avec les voies les plus centrales qui s'éloignent du centre-ville entre 1944 et 2010 (Figure 3.21). Cette réorganisation de la centralité du centre vers la périphérie s'est produite au cours de cette période en raison de l'émergence d'une structure viaire fortement réticulée dans la zone périphérique autour du centre-ville. Toutefois certaines voies parmi les plus anciennes demeurent centrales malgré ces changements.

Quant aux réseaux contemporains, on observe sur la figure 3.22 pour laquelle l'emprise est plus large que celle des autres figures, que la forte extension et densification du réseau ont impliqué d'importantes variations. Les voies les plus centrales correspondent principalement à la rocade périphérique et aux voies de connexion centre-périphérie. En outre, les voies situées à l'est du centre-ville assurent des itinéraires topologiquement plus courts vers les

autres voies du réseau. Cela suggère que l'évolution du réseau crée une hétérogénéité en termes d'accessibilité à l'échelle de la ville, qui est discernable sur la distribution spatiale de la centralité de proximité. Cela traduit une inégalité spatiale en termes d'accessibilité entre le centre et la périphérie et entre les zones à l'Est et l'Ouest de la ville.

En outre, la construction de la rocade périphérique a réorganisé la structure du réseau en périphérie, et agit précisément à ce niveau en redistribuant les chemins les plus courts, ce qui a certainement eu un impact sur la congestion à l'intérieur de la ville. La zone Nord-Ouest de la première couronne autour du centre représente particulièrement une forte centralité de proximité sur le réseau en 2010. Après ce changement, nous observons une grande stabilité des centralités à l'échelle du réseau jusqu'en 2019.

En comparant les réseaux les plus anciens et les plus récents, nous observons de grandes variations dans la distribution spatiale des centralités. Nous constatons qu'il s'agit en général d'évolutions progressives du réseau sachant que, pour les trois indicateurs, les plus grands changements se produisent principalement à la même période qui correspond au début du 20^{ème} siècle.

Les routes centrales persistent généralement dans le temps sur les réseaux auto-organisés, à l'exception des réseaux qui ont subi des modifications majeures comme la réorganisation haussmannienne qui a eu un impact considérable sur la réorganisation spatiale des centralités à Paris (Barthelemy et al., 2013). Dans le cas de Dijon, nous observons pour la période la plus récente que les réorganisations de la distribution spatiale de la centralité les plus marquées correspondent à des interventions spécifiques, notamment la création de voies concentriques définissant une première couronne autour du centre, et la création de la grande rocade périphérique autour de la ville.

La distribution spatiale des trois mesures de centralité indique que l'évolution du réseau viaire suit des règles simples de densification et d'extension. L'inscription spatiale des voies les plus centrales, qui ont traversées les époques sans subir de modification majeure, nous apportent des renseignements sur l'organisation passée du réseau et son évolution.



Figure 3.19. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1690, 1790, 1839 et 1844, avec (a) un degré $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$.

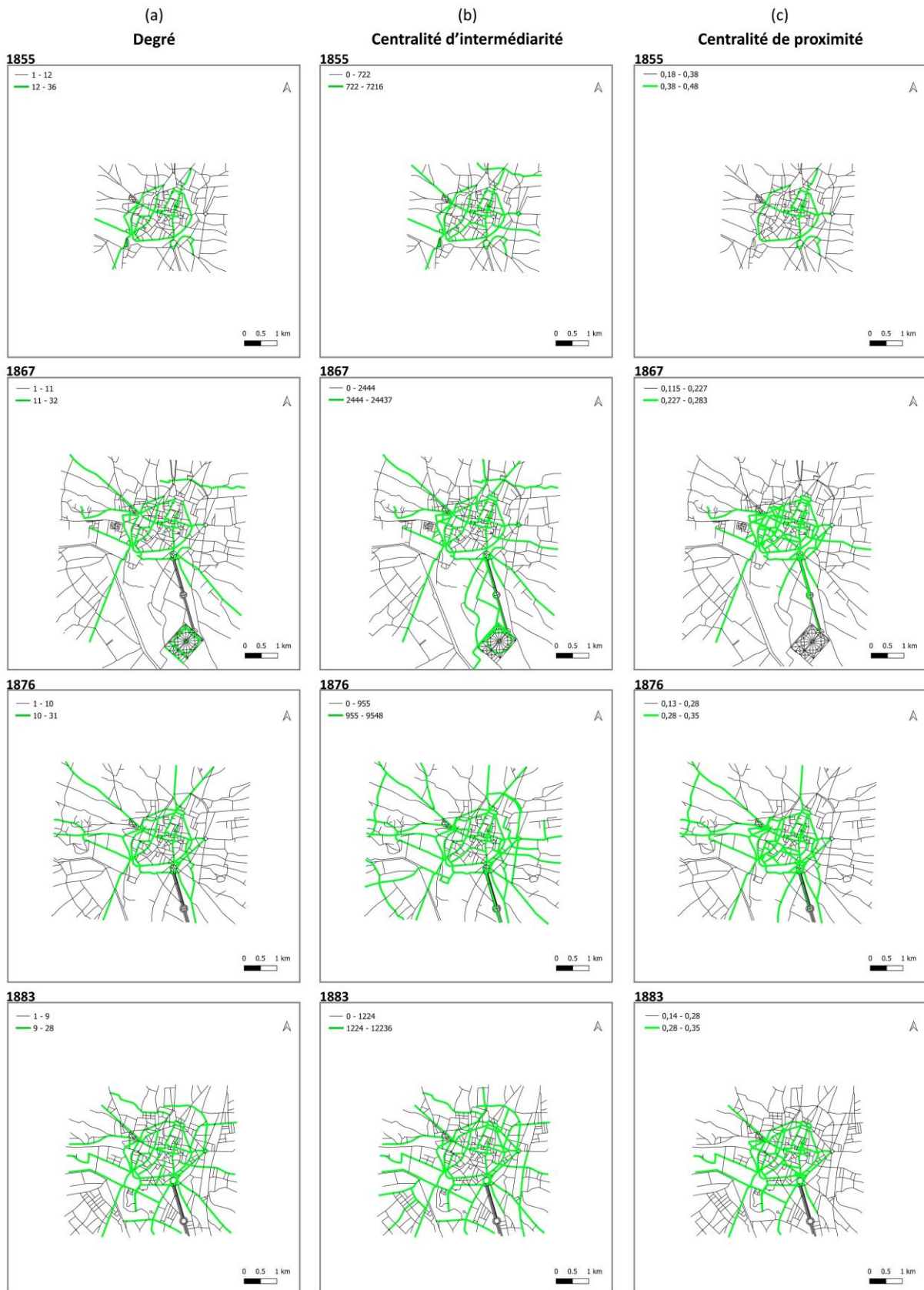


Figure 3.20. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1855, 1867, 1876 et 1883, avec (a) un degré $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$.

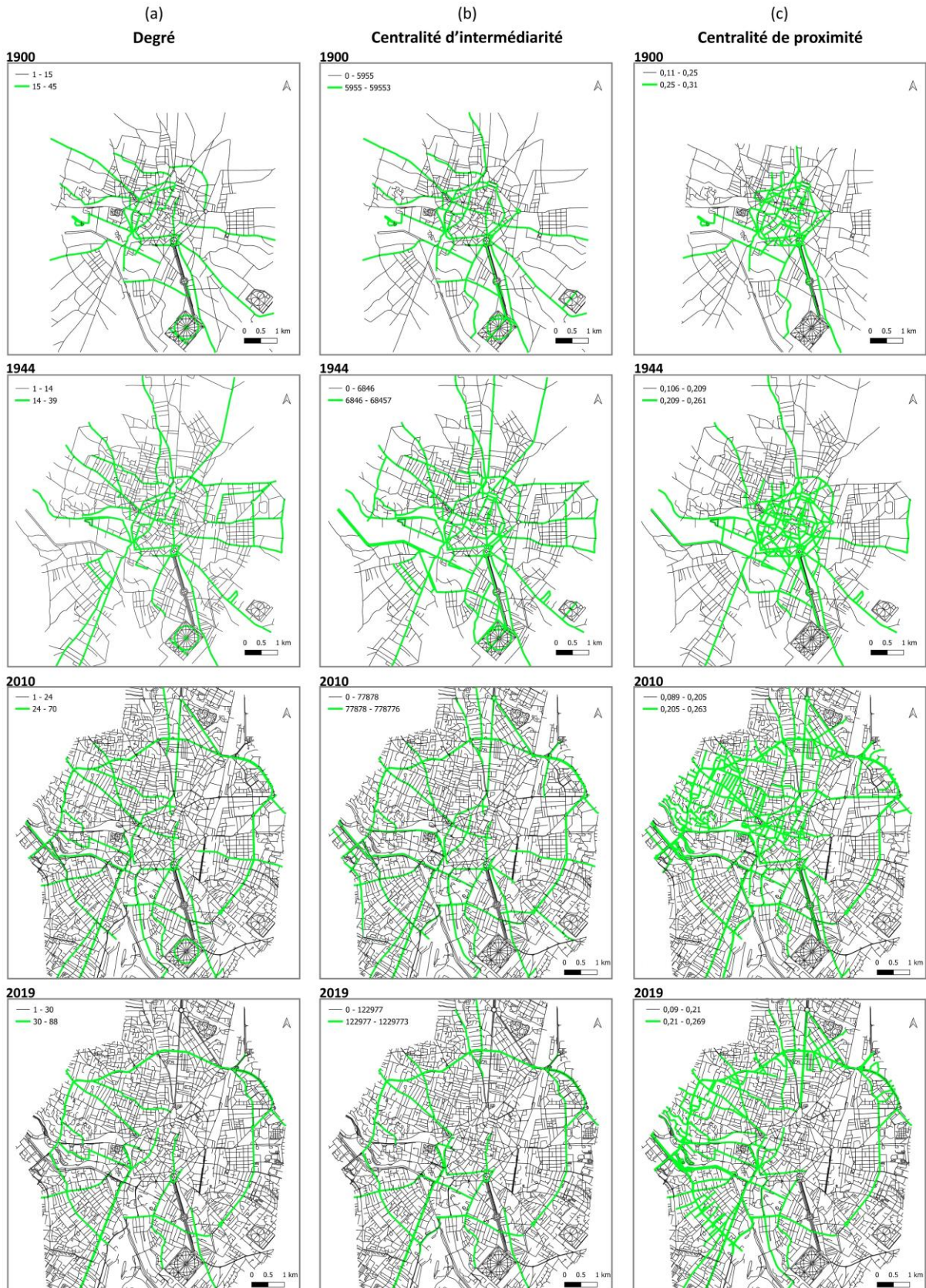


Figure 3.21. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1900, 1944, 2010 et 2019, avec (a) un degré $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$.

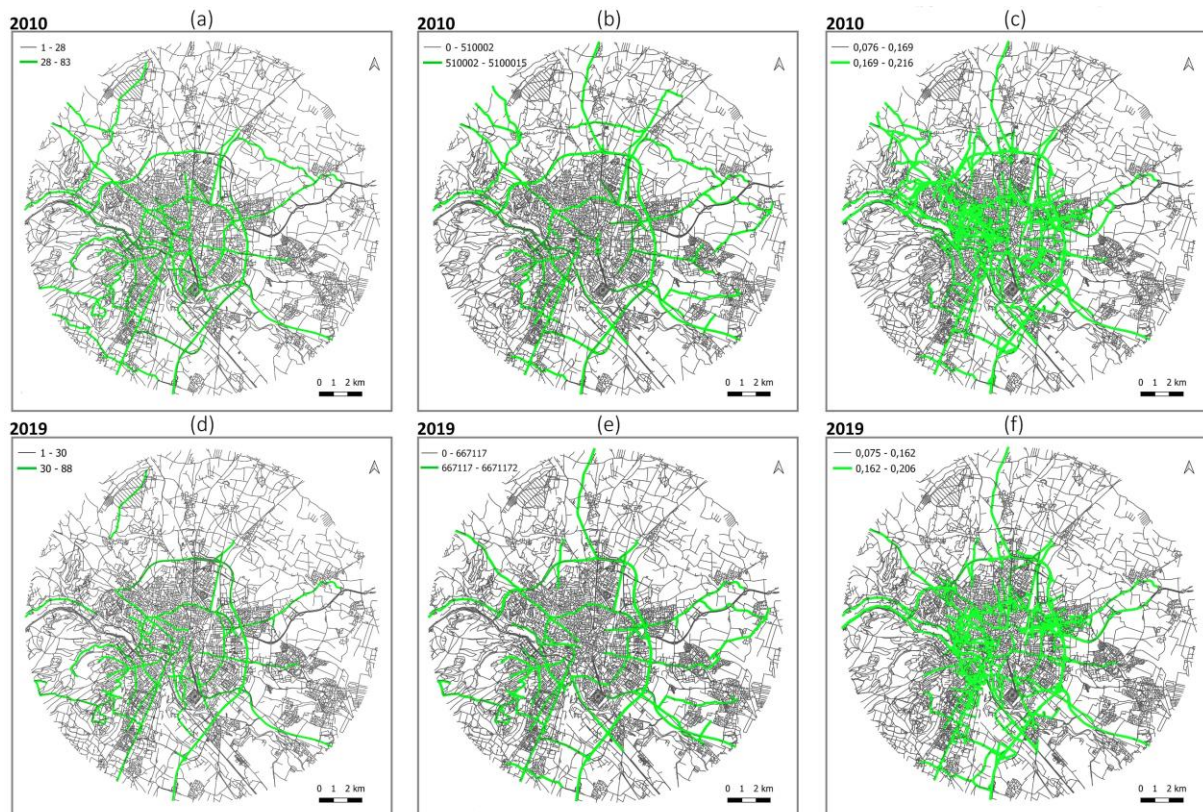


Figure 3.22. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 2010 et 2019, avec (a) un degré $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$.

3.2.2 Evolution de la distribution statistique des centralités des voies

L'analyse des distributions des valeurs des différentes centralités interroge les tendances globales de leur évolution dans le temps. D'abord les distributions des valeurs de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité des voies sont présentées pour le réseau viaire de Dijon à différentes dates. Ensuite, pour chaque centralité, le nombre de voies les plus centrales (selon les seuils considérés) est présenté par rapport au nombre total des voies du réseau.

Les histogrammes de distribution de la centralité de proximité et de la centralité d'intermédiarité présentent des similitudes. Toutefois, ces distributions présentent également des variations en termes de densité des valeurs moyennes et du nombre de voies correspondant aux deux pics respectifs pour chaque distribution.

En termes de centralité d'intermédiarité (Figure 3.23), la forme de la distribution correspond à une fonction gaussienne, mais elle présente un comportement bimodal marqué pour le réseau à des dates spécifiques (notamment 1839 et 1883). Ce comportement bimodal est également observé pour les distributions de la centralité de proximité pour les réseaux correspondant aux mêmes dates (Figure 3.23). Pour le réseau viaire en 2010 et 2019, la distribution des valeurs de la centralité d'intermédiarité des voies est plus asymétrique vers les fortes valeurs. En revanche, en termes de centralité de proximité, les courbes de densité correspondantes sont davantage centrés sur les valeurs faibles.

En effet, à mesure que le réseau évolue, le degré et la centralité d'intermédiarité se renforcent pour les voies principales du réseau au détriment des voies locales. Ces voies principales facilitent la connexion entre un plus grand nombre de voies (dans une logique origine-destination) en empruntant des chemins plus courts. Ainsi, le nombre de voies les plus centrales (dépassant la valeur seuil pour ces deux centralités) diminue avec le temps (Figure 3.25 - a et b). À l'inverse, la centralité de proximité des voies diminue globalement, car il devient de plus en plus difficile de parcourir l'ensemble du réseau en empruntant des chemins topologiquement simples. Cela induit l'augmentation au cours du temps du nombre de voies les plus centrales (dépassant la valeur seuil pour cette centralité) (Figure 3.25 - c).

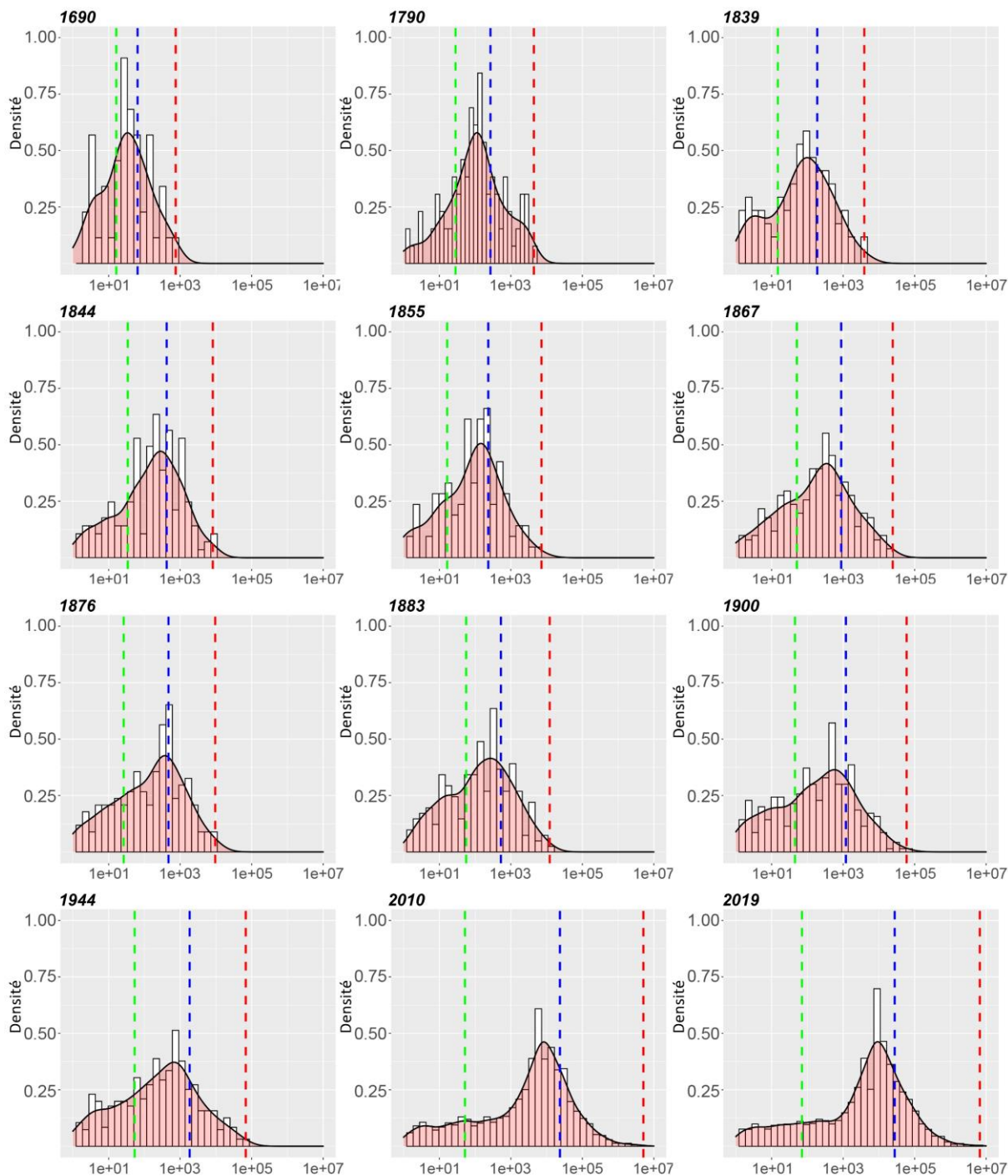


Figure 3.23. Histogrammes de distribution des valeurs de la centralité d’intermédiarité des voies du réseau viaire de Dijon de 1690 à 2019. La courbe en trait noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

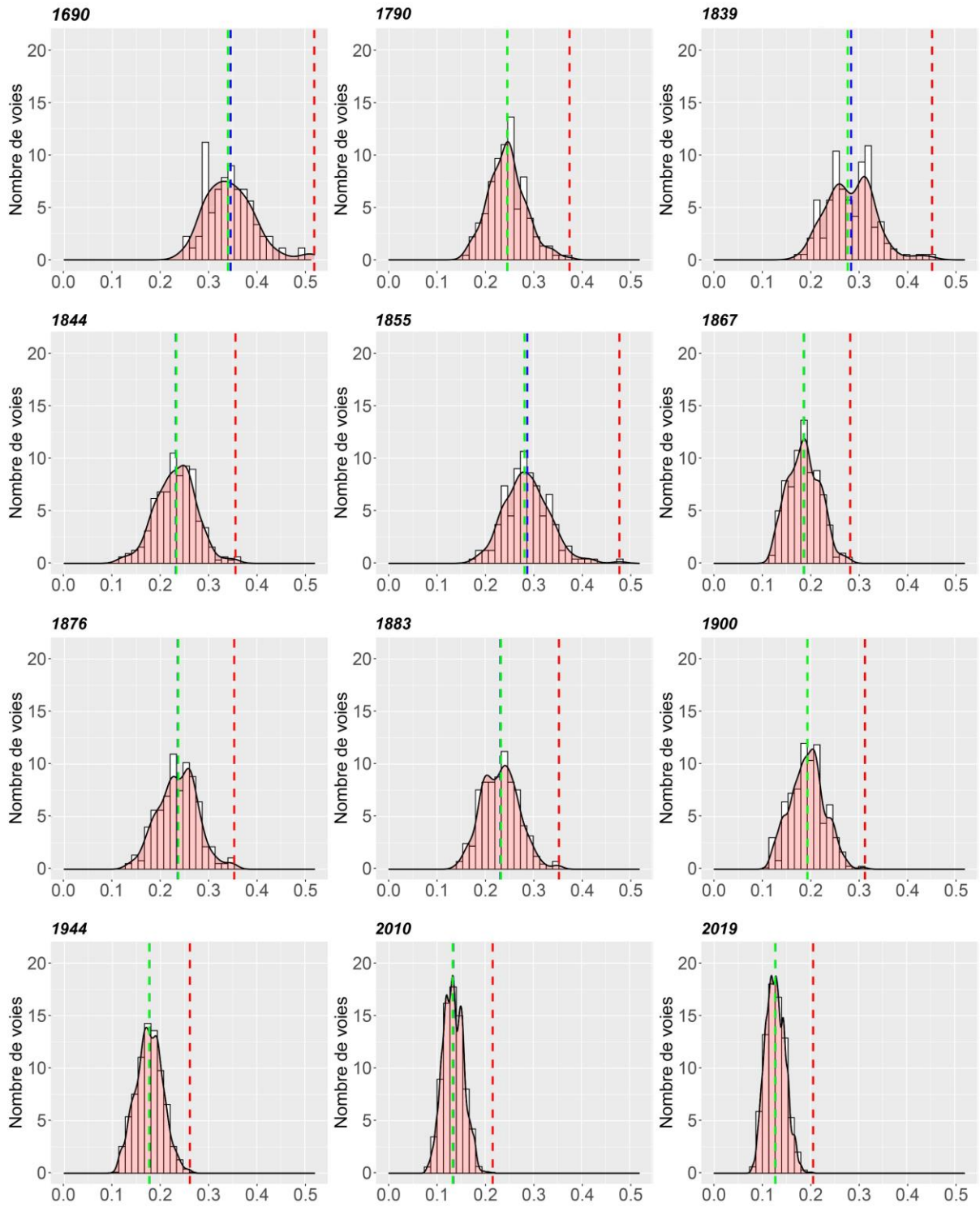


Figure 3.24. Histogrammes de distribution des valeurs de la centralité de proximité des voies du réseau viaire de Dijon de 1690 à 2019. La courbe en trait noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

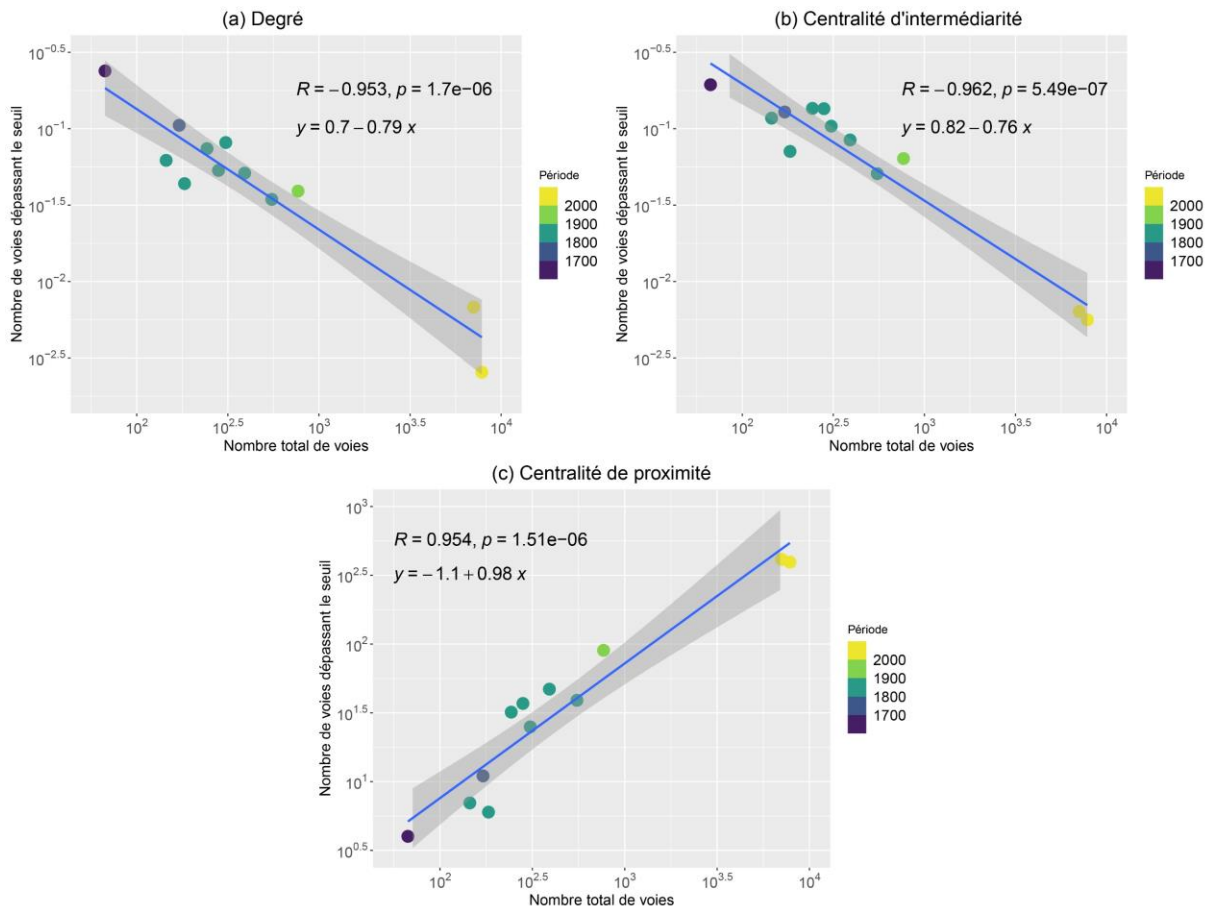


Figure 3.25. Nuages de points représentant le nombre de voies les plus centrales par rapport au nombre total des voies du réseau de Dijon de 1690 à 2019 (un point par date, coloré selon le siècle concerné) ; (a) selon le degré des voies, (b) selon la centralité d'intermédiarité, (c) selon la centralité de proximité. Note : les valeurs-seuils de centralité sont les mêmes que celles définies en section 3.2.1 (degré : $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$; centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$, et centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$).

3.3 Permanences et changements des structures viaires dans le temps

Cette section présente une analyse fine des évolutions survenues dans le réseau entre chaque paire de dates. L'analyse des permanences et changements dans les structures viaires est menée en considérant une emprise spatiale commune pour chaque paire de dates successives (calcul des indicateurs sur le réseau en $t+1$ dans son emprise spatiale en t). Lors de l'interprétation des résultats, il est important de prendre en compte le fait qu'ils ne concernent pas l'évolution de l'intégralité du réseau viaire de chaque ville, mais se limitent à une emprise spatiale spécifique.

La première sous-section met l'accent sur les éléments qui restent constants dans le temps, pour les trois villes étudiées. Les sous-sections suivantes présentent uniquement les résultats pour Dijon. La deuxième sous-section révèle l'évolution du réseau en termes l'apparition ou disparition de segments. La troisième sous-section identifie les voies persistantes qui subissent des modifications au cours du temps. La quatrième sous-section révèle l'impact de l'évolution structurelle sur l'accessibilité à l'échelle du réseau.

3.3.1 Identification du squelette initial du réseau (qui persiste au cours du temps)

Dans chaque réseau viaire, il existe généralement une structure initiale qui a persisté dans le temps et dont la géométrie et la topologie restent inchangées. Dans le but d'identifier le squelette initial du réseau viaire de chaque ville au fil du temps, nous avons d'abord extrait les principales voies de chaque réseau aux différentes dates. Cette extraction se base sur les degrés les plus élevés, en considérant les valeurs appartenant au quatrième quartile de la discrétisation (Figure 3.26, figure 3.27 et figure 3.28). Ensuite, nous avons superposé ces différentes cartes pour identifier les voies du squelette qui persistent dans le temps. Nous illustrons les résultats pour le réseau de chaque ville à 5 dates uniquement.

La Figure 3.29 met en évidence (en rouge) sur chaque carte, le squelette initial et permanent du réseau viaire de Dijon au cours le temps. Ce squelette est radioconcentrique, ce qui est une caractéristique du réseau de Dijon. La Figure 3.30 montre le squelette initial du réseau viaire de Besançon, correspondant à la structure de la Boucle avec ses trois voies parallèles et la voie concentrique qui les relie. Enfin, dans le cas de Pontarlier, la Figure 3.31 montre que le squelette initial et pérenne du réseau routier se conforme aux voies radiales les plus anciennes

qui traversent la ville et la connectent au réseau régional. Les formes initiales respectives des squelettes des trois villes sont très différentes en raison de contextes géographiques également très différents. En revanche, les évolutions autour du squelette initial sont similaires et correspondent principalement à des processus d'extension des voies radiales et de densification de la structure viaire en se rattachant au squelette (Figure 3.29, figure 3.30 et figure 3.31).

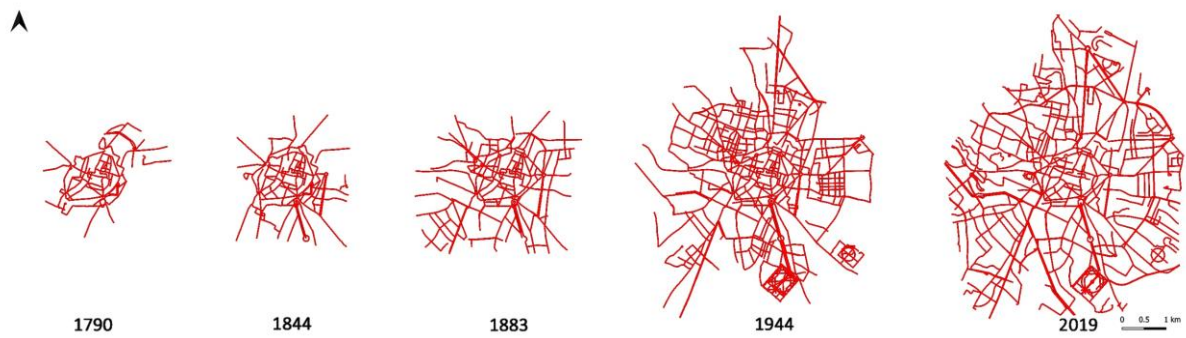


Figure 3.26. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Dijon en 1790, 1844, 1883, 1944 et 2019.

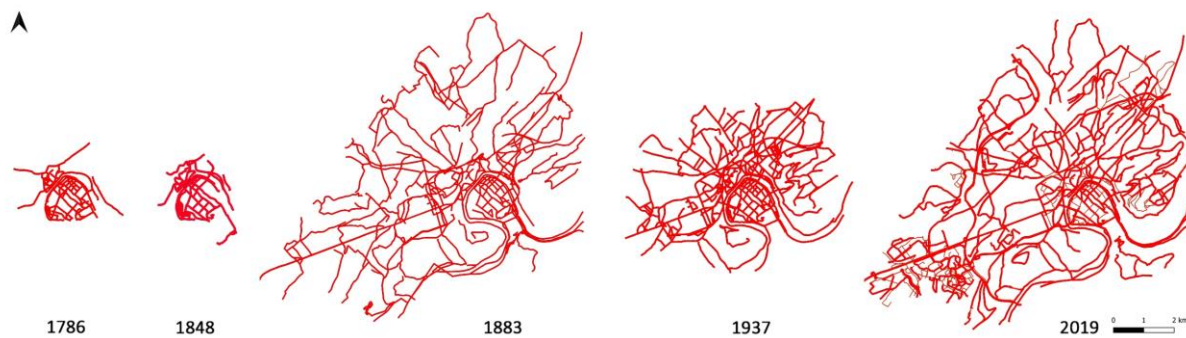


Figure 3.27. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Besançon en 1786, 1848, 1883, 1937 et 2019.

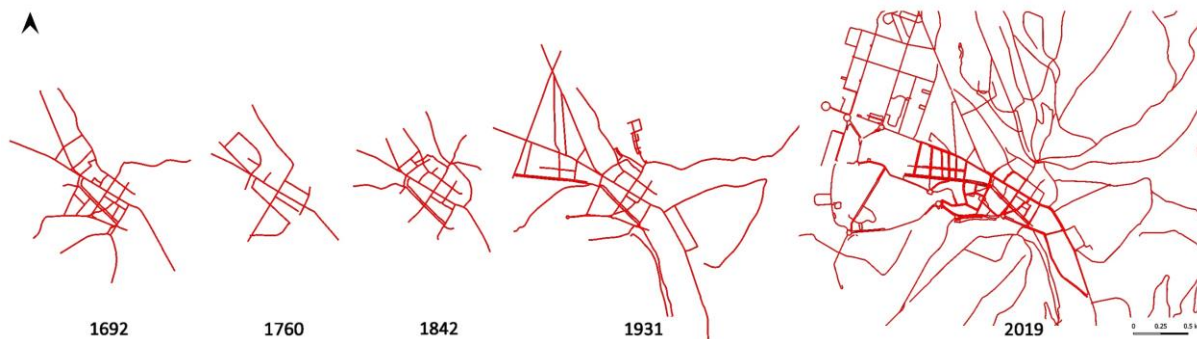


Figure 3.28. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Pontarlier en 1692, 1760, 1842, 1931 et 2019.

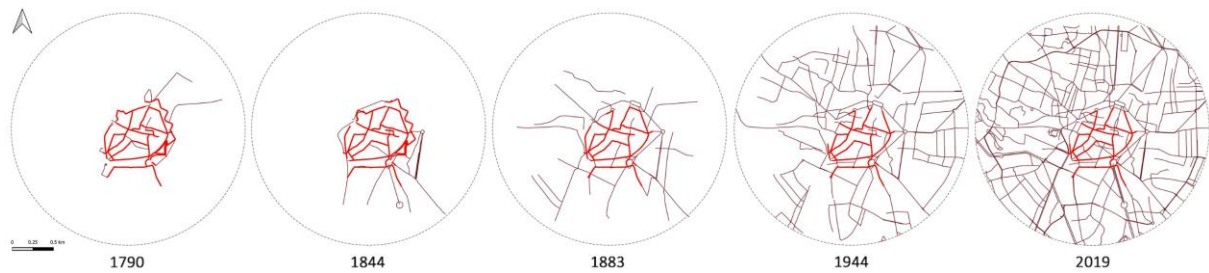


Figure 3.29. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Dijon entre 1790 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).

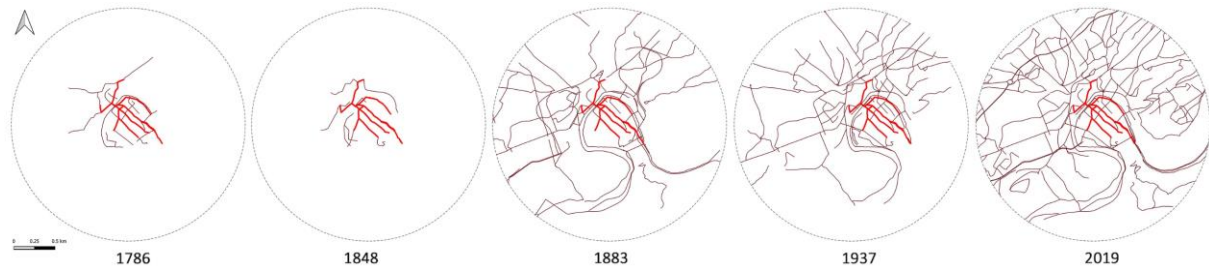


Figure 3.30. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Besançon entre 1786 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).

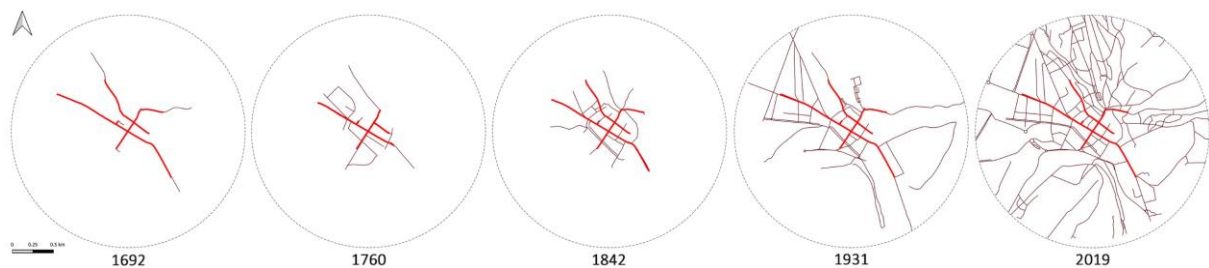


Figure 3.31. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Pontarlier entre 1692 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).

3.3.2 Apparition ou disparition de segments ou de voies

L'analyse consiste ici à identifier les nouveaux segments et voies qui sont apparues entre chaque paire de dates (chaque temps t et $t+1$), puis de déterminer leur nombre et leurs caractéristiques (valeurs de chaque indicateur). Nous illustrons ici les résultats uniquement pour le réseau viaire de Dijon, étant donné que les réseaux des trois villes (Dijon, Besançon et Pontarlier) présentent des évolutions globalement semblables. En effet, l'évolution du réseau n'est pas directement impactée par la taille ou la configuration topographique de la ville. Les contraintes géographiques déterminent particulièrement les directions du développement du réseau.

Les résultats concernant l'évolution du nombre de nouveaux nœuds, arcs et voies révèlent une fluctuation à mesure que le réseau se développe, même en considérant la même emprise spatiale entre chaque paire de dates (Figure 3.32). Certaines périodes sont marquées par des changements significatifs, en particulier la période entre 1900 et 2010. En revanche, d'autres périodes se caractérisent par davantage de stabilité, notamment entre 1790 et 1839, ainsi qu'entre 2010 et 2019, où peu d'entités (segments ou voies) émergent. En outre, les résultats mettent en évidence que le réseau viaire préserve sa structure car peu de segments disparaissent au fil du temps.

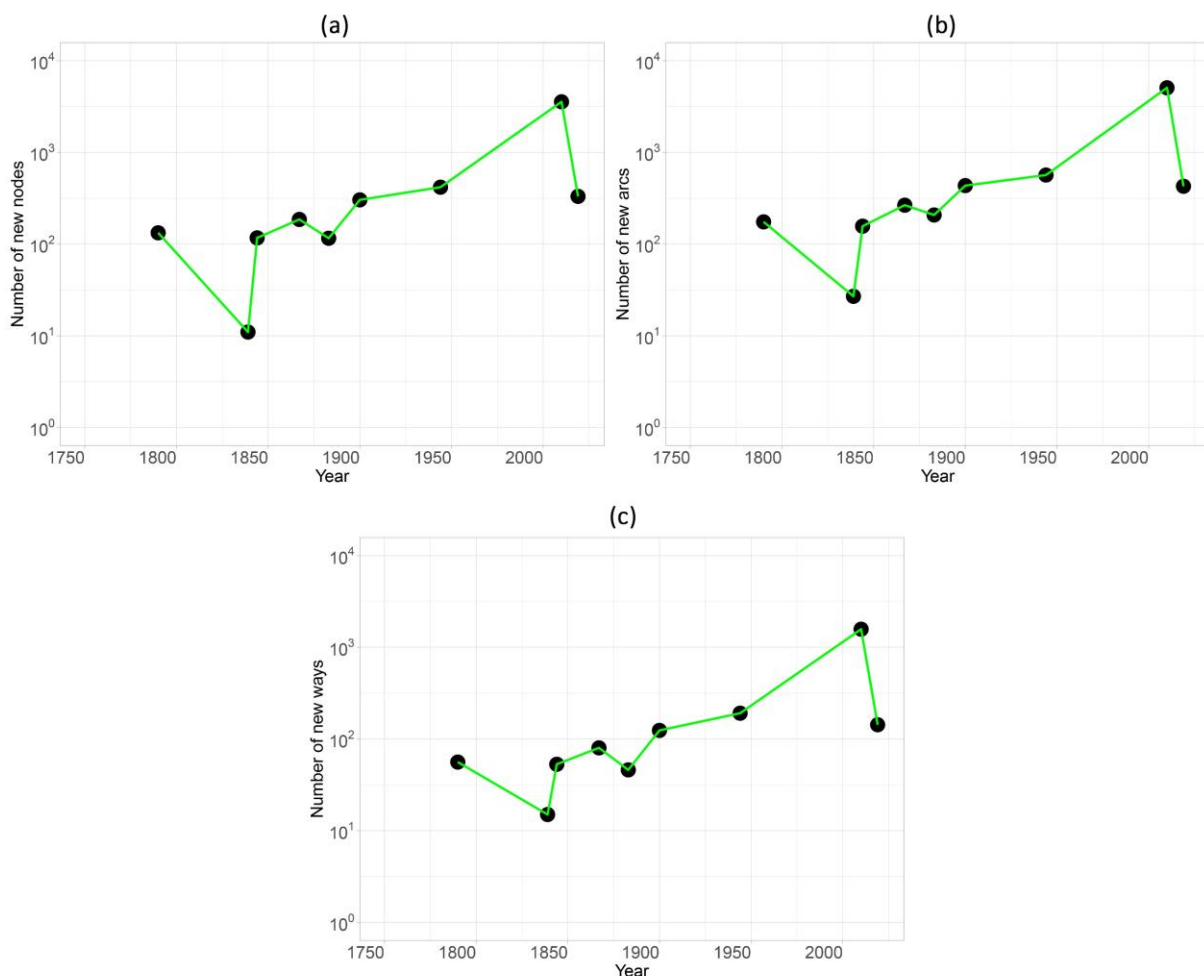


Figure 3.32. Evolution du nombre (a) de nouveaux nœuds, (b) de nouveaux arcs, (c) de nouvelles voies dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.

En ce qui concerne les dynamiques spatiales (Figure 3.33), nous observons que le réseau a connu une évolution initiale marquée par l'apparition de nouveaux segments en périphérie du réseau existant, entre 1690 et 1855. Ensuite, de 1855 à 1900, les nouveaux segments densifient le réseau (à une échelle locale), ou prolongent la structure principale préexistante (à une échelle globale). Entre les années 1900 et 2010, les nouveaux segments apparaissent

principalement au niveau des zones périphériques, densifiant ainsi le réseau à l'échelle locale. Cette période est marquée par la création de voies de lotissement souvent rectilignes, facilitant le morcellement des terrains pour la division ou délimitation d'îlots ou de parcelles.

En termes d'inscription spatiale, le réseau a globalement évolué de manière concentrique dans des rayons de plus en plus étendus autour du centre puisque le territoire de l'agglomération de Dijon n'est pas soumis à des contraintes géographiques qui peuvent dicter une direction préférentielle. Toutefois, il est à noter que la création de la rocade périphérique contournant le territoire en partant de l'Ouest pour atteindre le Sud en passant par le Nord et l'Est de la ville, a induit une expansion du réseau davantage orientée vers le Sud-Ouest.

Afin de caractériser la morphologie des structures viaires émergentes, nous avons choisi d'examiner visuellement la corrélation entre les valeurs des indicateurs caractérisant les nouvelles voies. Les résultats obtenus mettent en particulier en évidence une forte corrélation inverse, persistante dans le temps, entre les valeurs de centralité de proximité et du degré de desserte de ces nouvelles voies (Figure 3.34) (voir Annexe 20, pour les résultats de corrélation entre l'ensemble des indicateurs). Ces résultats peuvent s'expliquer par deux patrons de rattachement des nouvelles voies au réseau existant, qui influent sur leur centralité. Une nouvelle voie qui se rattache aux voies existantes au niveau de leurs extrémités, créant principalement des intersections en T (donc avec un faible degré de desserte), présentera une forte centralité de proximité. En effet, elle constitue souvent le chemin topologique le plus simple entre plusieurs autres voies du réseau. En revanche, une nouvelle voie traversante qui se connecte aux voies existantes par des croisements en X (présentant ainsi un fort degré de desserte) renforcera la connectivité du réseau. Elle ne sera pas nécessairement située sur le chemin topologique le plus simple entre plusieurs autres voies car la connectivité accrue du réseau offre plusieurs autres chemins alternatifs en raison de la création de nombreuses voies traversantes.

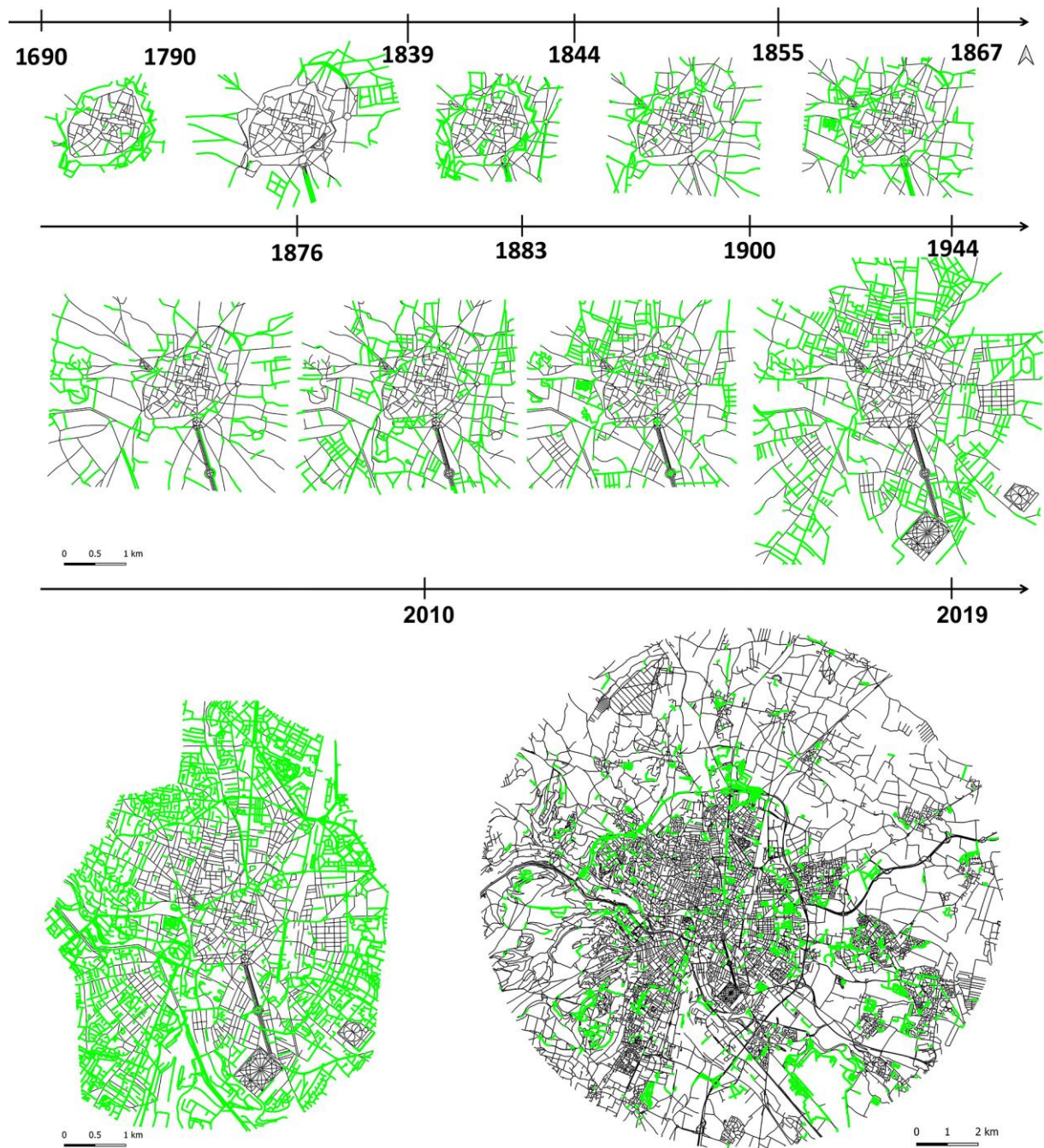


Figure 3.33. Nouveaux segments apparus dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps (entre 1690 et 2019).

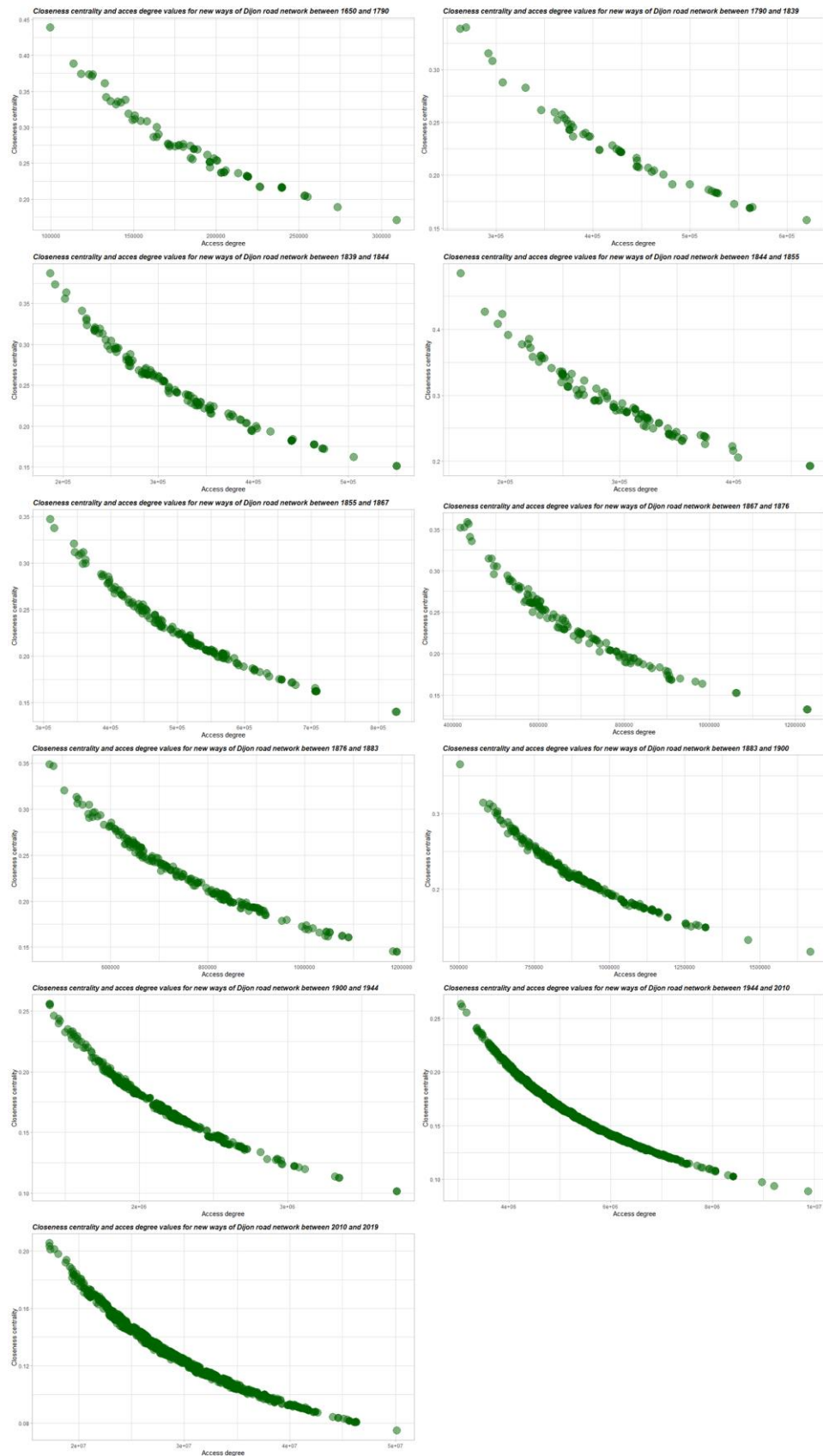


Figure 3.34. Corrélation entre la centralité de proximité et le degré de desserte des nouvelles voies apparues dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.

3.3.3 Identification de voies persistantes

Certaines structures du réseau viaire conservent leur géométrie globale pendant plusieurs années et sont donc extrêmement résilientes. Ces structures subissent néanmoins des évolutions morphologiques à mesure que le réseau évolue. La résilience de ces structures permet d'étudier les permanences et les changements de leur morphologie après leur apparition dans le réseau.

Les propriétés locales d'une voie persistante dans le temps peuvent changer lorsque cette voie est reconfigurée ou que son voisinage immédiat est modifié. Il existe deux principaux mécanismes de reconfiguration des voies. Le premier implique le découpage de la voie, où l'un des segments qui la composent se retrouve en meilleur alignement, avec un angle d'intersection plus faible, par rapport à un nouveau segment créé. Le deuxième mécanisme de reconfiguration consiste en un prolongement de la voie à la suite de la création d'un segment aligné (respectant l'angle seuil de 60°) avec l'un des segments qui la compose. En ce qui concerne les centralités globales (centralité d'intermédiarité et centralité de proximité) d'une voie persistante au fil du temps, elles sont plus susceptibles de changer car elles dépendent de la topologie de l'ensemble du réseau à une échelle globale. Cette topologie est sujette à de nombreuses modifications au fur et à mesure que le réseau évolue.

Pour identifier ces changements, nous avons d'abord identifié les voies qui ont persisté entre chaque paire de dates. Une analyse quantitative de l'évolution du rang hiérarchique de chaque voie en termes de degré par rapport à l'évolution hiérarchique dans les autres indicateurs est considérée. Le choix du degré en tant qu'indicateur de référence s'explique par le fait qu'il nous renseigne sur le nombre de nouvelles voies qui se rattachent aux voies persistantes. Ces nouvelles voies jouent un rôle direct dans l'évolution morphologique des voies persistantes. Nous illustrons ici les résultats uniquement pour le réseau viaire de Dijon, étant donné que les résultats pour les réseaux de Besançon et Pontarlier sont similaires.

La Figure 3.35 révèle des corrélations positives entre l'évolution de la position hiérarchique (rang) des voies persistantes considérant leur degré et la plupart des autres indicateurs à savoir le degré de desserte, l'espacement, la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité. Seule leur position hiérarchique par rapport à l'orthogonalité est corrélée négativement avec celle basée sur le degré. Ces résultats participent à la validation des mécanismes de reconfiguration des voies persistantes mentionnés précédemment. En effet, l'augmentation de l'espacement à mesure que le degré de la voie augmente découle du fait

que, même si la voie se connecte à d'autres voies (et par conséquent son degré augmente), elle s'étend en même temps et la distance moyenne entre les intersections de cette voie augmente en conséquence. Le renforcement de la centralité des voies persistantes à mesure qu'elles se connectent à d'autres voies fait qu'elles en deviennent davantage positionnées sur les chemins les plus simples et les plus courts du réseau, étant support de développement du réseau. En termes de degré de desserte, à mesure que le réseau évolue, les nouvelles voies se rattachent aux voies persistantes en les traversant et formant des croisements en X. Enfin, la corrélation globalement négative entre l'évolution de l'orthogonalité des voies persistantes et leur degré peut être expliquée par l'émergence de nouvelles voies qui se rattachent aux voies persistantes par ramification, ce qui implique souvent des angles faibles d'intersection. Le nuage de points est toutefois épars ce qui montre des variations de cette corrélation entre les différentes dates.

L'évolution morphologique des voies persistantes au cours du temps nous renseigne ainsi sur les mécanismes de morphogénèse viaire et les patrons de rattachement des nouvelles voies à celles préexistantes.



Figure 3.35. Relation entre l'évolution entre deux dates de la position hiérarchique (rang normalisé) en termes de degré (sur l'axe des abscisses) et l'évolution de la position hiérarchique pour d'autres indicateurs (sur l'axe des ordonnées) des voies persistantes au cours du temps du réseau viaire de Dijon.

3.3.4 Evolution de la centralité de proximité résultant de l'apparition ou de la disparition de segments de rue

La cartographie du différentiel d'accessibilité relatif du réseau viaire entre deux dates, résultant de l'ajout ou de la suppression de segments, permet de visualiser comment chaque voie du réseau est impactée négativement (en orange) ou positivement (en vert) en termes d'accessibilité, ainsi que la répartition spatiale des modifications. Les cartes incluent également les nouveaux arcs apparus (en gris) et ceux supprimés (en pointillés noirs) entre chaque paire de dates considérées. Nous pouvons constater que peu de segments disparaissent au fil du temps.

Nous illustrons ces résultats uniquement pour le réseau viaire de Dijon et ce, pour trois dates spécifiques, afin de présenter un exemple de lecture possible de l'impact des changements structurels sur l'accessibilité à l'échelle du réseau. La procédure de calcul détaillé de cette évolution est présentée dans Lagesse (2015).

Entre 1790 et 1883, nous observons une amélioration globale de l'accessibilité au sein du centre-ville historique due à l'évolution du réseau viaire (Figure 3.36 – a). Pendant cette période, les changements structurels du réseau ont eu un impact positif en facilitant l'accès aux rues du centre-ville. Entre 1883 et 1944, en revanche, l'accessibilité a connu une nette amélioration surtout dans les zones périphériques au centre-ville (Figure 3.36 – b). Cette période a été marquée par une expansion significative du réseau viaire dans un rayon très large autour du centre-ville, ce qui a considérablement renforcé la connectivité et facilité les déplacements vers et depuis les zones extérieures. Enfin entre 1944 et 2019, les fortes expansion et densification du réseau ont engendré une diminution de l'accessibilité au niveau des voies situées en péricentre (Figure 3.36 – c). Certaines voies dans le Nord-Est du centre-ville ont toutefois vu leur accessibilité s'améliorer.

En résumé, au cours de cette période allant de 1790 à 2019, l'impact de l'ajout ou de la suppression de segments de rue sur l'accessibilité varie en fonction des évolutions du réseau viaire. Des périodes d'amélioration générale, suivies de phases de croissance périphérique et de densification du réseau, entraînent des effets variables sur l'accessibilité à l'échelle du réseau.

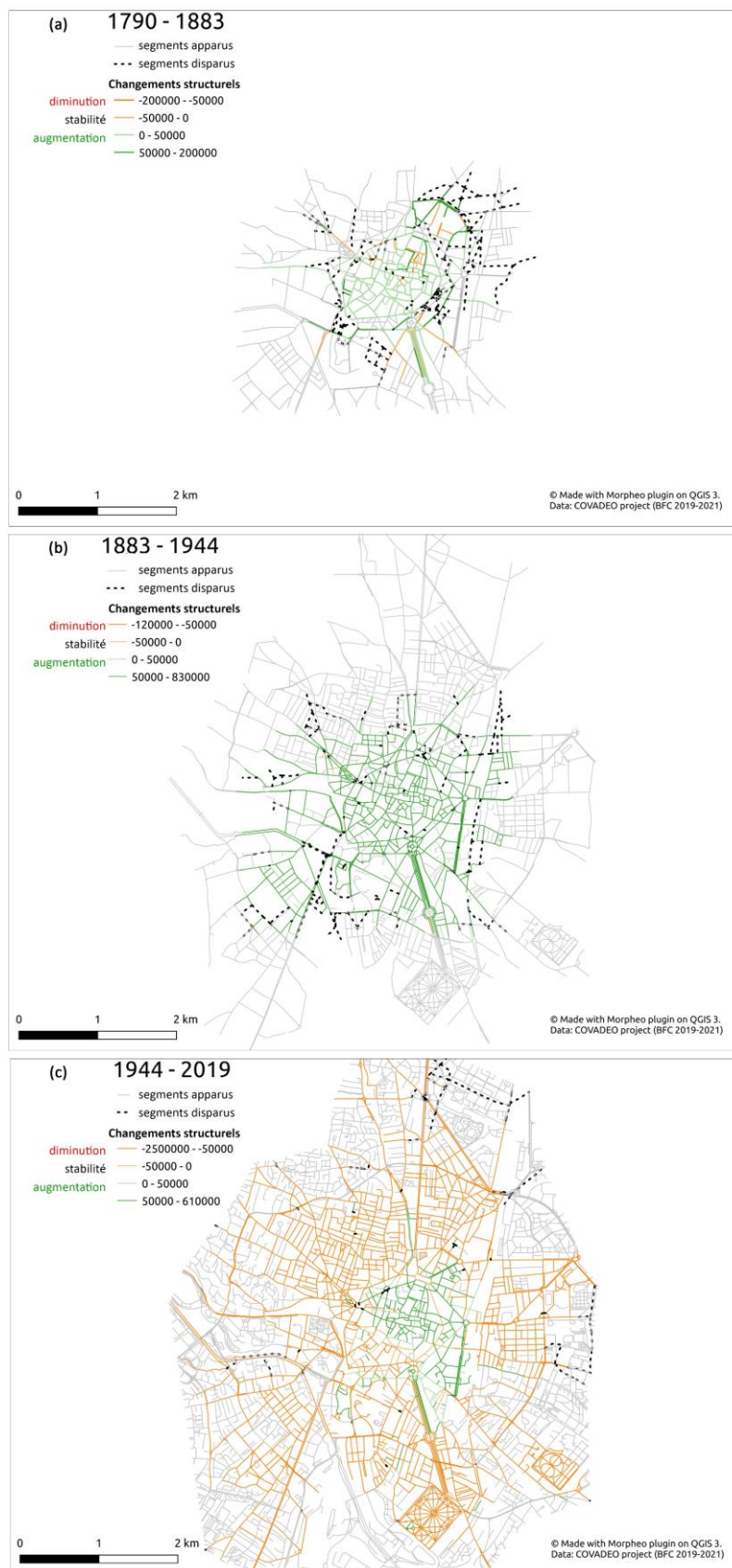


Figure 3.36. Cartographie du différentiel de la centralité de proximité relatif aux changements structurels du réseau viaire de Dijon (a) entre 1790 et 1883, (b) entre 1883 et 1944, (c) entre 1944 et 2019.

3.4 Synthèse du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons examiné en profondeur l'évolution des indicateurs dans le temps à l'échelle des voies, révélant plus d'informations sur les processus d'évolution des réseaux viaires étudiés. Les indicateurs de centralité (degré, centralité d'intermédiarité et centralité de proximité) évoluent positivement à mesure que le réseau se transforme pour certaines voies principales au détriment des voies locales. L'espacement de ces voies augmente également à mesure que le réseau évolue. En revanche, globalement l'orthogonalité régresse pour ces voies principales et évolue positivement pour les voies à une échelle intermédiaire ou locale. Le degré de desserte présente plus de variabilité pour les voies à différentes échelles.

En outre, la structure du réseau viaire se caractérise par une combinaison de permanences et de changements. Le réseau préserve son squelette initial dans le temps, tout en évoluant grâce à l'émergence de nouvelles structures qui se rattachent progressivement à ce squelette. Peu de segments disparaissent au fil du temps. Cette évolution reflète la croissance urbaine du territoire et se produit principalement à travers des mécanismes simples de densification et d'expansion. L'interprétation des indicateurs caractérisant les voies apparues ou persistantes permet de déduire des patrons de formation et de rattachement des nouvelles voies, liés aux différentes phases de l'évolution du réseau. L'évolution de ces indicateurs peut être également interprétée en corrélation avec les différentes phases d'évolution du réseau.

L'apport et l'intérêt de la double échelle (locale et globale) des indicateurs considérés est de capturer la dualité inhérente des processus d'évolution du réseau. Selon l'échelle d'analyse choisie, différentes structures et processus sont révélés.

Chapitre 4

Propriétés structurelles des réseaux viaires invariants dans l'espace et le temps

Les deux précédents chapitres ont porté sur les analyses structurelles et diachroniques de réseaux viaires historiques et contemporains. Ces analyses mettent en évidence les similitudes et les différences entre les réseaux à différentes dates, ainsi que les similitudes et différences de leur évolution au cours du temps. Dans la continuité, ce quatrième chapitre approfondit l'examen de la deuxième hypothèse de cette recherche et vise à déterminer si certaines propriétés structurelles sont identifiables pour les différents réseaux viaires analysés, indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction.

La section 4.1 introduit le cadre théorique pour l'étude des propriétés universelles des graphes, en précisant certaines définitions fondamentales. Ensuite, des études de propriétés structurelles invariants spécifiques aux réseaux viaires sont présentées.

Dans la section 4.2, les propriétés structurelles invariants des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier sont identifiées. Tout d'abord, les propriétés relatives à l'hypergraphe viaire associé au réseau viaire de chaque territoire sont analysées. Ensuite, une comparaison des distributions des degrés des voies est effectuée, ainsi qu'une analyse fine des degrés des nœuds correspondants aux mêmes réseaux. Enfin, les distributions respectives de la longueur et de l'espacement des voies sont comparées.

4.1 Propriétés structurelles étudiées

Au cours de la dernière décennie, plusieurs travaux de recherche ont été menés dans le domaine de la science des réseaux, qui se sont particulièrement concentrés sur l'exploration de la dynamique des réseaux. L'objectif principal de ces recherches était d'identifier des propriétés universelles pour tous les réseaux ou communes à certains types de réseaux seulement.

Selon cette perspective, les villes sont considérées comme des réseaux complexes d'interactions sociales, économiques et spatiales. L'étude de la structure et la croissance de ces réseaux vise à comprendre et à expliquer les tendances régulières et les relations qui existent entre différentes caractéristiques des villes, à différentes échelles. Plusieurs théories et explications ont été avancées pour les décrypter, mais il est important de noter que ce domaine est sujet à controverses et qu'il est toujours en cours de développement.

Les propriétés des réseaux les plus fréquemment étudiées sont généralement regroupées en deux principales catégories : les lois d'échelle (*scaling laws*) et les propriétés de "petit monde" (*small world properties*).

Concernant les réseaux viaires, plusieurs travaux de recherche ont suggéré que leur structure révèle certaines propriétés communes, notamment l'invariance d'échelle de la longueur des arcs (Cardillo et al., 2006; Kalapala et al., 2006; Lämmer et al., 2006; Levinson, 2012; Strano et al., 2013), et que leur évolution suit des lois générales (Al Sayed, 2013; Jang et al., 2020; Lämmer et al., 2006; Porta et al., 2014; Shpuza, 2009). D'autres recherches ont également été menées pour identifier des caractéristiques géométriques universelles des réseaux viaires (Chan et al., 2011), notamment celles relatives à l'orientation et l'entropie (Boeing, 2019; Gudmundsson & Mohajeri, 2013), ainsi que la sinuosité et la longueur des rues (Langton, 2021).

Dans le cadre de ce chapitre, notre attention est exclusivement portée sur les propriétés structurelles des réseaux viaires. Cette approche nous permettra de mieux appréhender les logiques fondamentales qui gouvernent la structure d'un graphe et plus particulièrement du graphe viaire, et de décrypter les mécanismes qui sous-tendent l'évolution de ces réseaux.

4.1.1 Lois d'échelle

Une loi d'échelle (*scaling law*) est une relation mathématique qui décrit comment une variable varie en fonction d'une autre variable, généralement sous la forme d'une loi de puissance ou d'une loi exponentielle. Les lois d'échelle sont couramment utilisées pour décrire des phénomènes complexes dans divers domaines scientifiques, de la physique à la biologie en passant par la sociologie.

L'observation de l'existence d'un comportement de type loi de puissance semble se vérifier pour de nombreux ensembles de données sur des villes à travers le monde, et semble également être assez constant dans le temps (Andersson et al., 2003; Bettencourt, 2013, 2020; Bettencourt & West, 2010; Clauset et al., 2009; Dong et al., 2020; Gan et al., 2006; Molinero & Thurner, 2021; Samaniego & Moses, 2008; P. Wang et al., 2022). L'idée fondamentale est que, à mesure que les villes se développent et que leur population augmente, diverses variables associées à des aspects économiques, sociaux et infrastructurels évoluent proportionnellement à cette croissance. Les propriétés liées à la croissance des villes qui correspondent à une loi d'échelle sont principalement regroupées en trois types différents (Bettencourt et al., 2007) : (1) des variables qui évoluent de façon supra-linéaire, qui croissent plus vite que l'évolution de la population des villes, comme les nouveaux brevets, le PIB, et les salaires ; (2) des variables dont la croissance est proportionnelle à la taille de la population par exemple, le nombre total de logements, le nombre total d'emplois, etc. ; (3) des variables qui sont liées sub-linéairement à la taille de la ville, et ont donc tendance à croître moins vite, comme la longueur des routes, la longueur des câbles électriques, le nombre de stations-service, etc.

En ce qui concerne les réseaux viaires, les lois d'échelle sont utilisées pour décrire comment certaines caractéristiques des réseaux, telles que le nombre de nœuds, la connectivité ou la distribution des degrés des nœuds, évoluent en fonction de la taille du réseau. Les réseaux peuvent être de différentes natures : réseaux sociaux, réseaux de communication, réseaux de transport, etc. Les lois d'échelle aident à comprendre les propriétés émergentes de ces réseaux considérant un grand nombre de réseaux.

Pour ce qui est des lois d'échelle concernant les réseaux, l'une des caractéristiques les plus fréquemment analysées est la distribution du degré des nœuds, c'est-à-dire le nombre de connexions que chaque nœud possède. Les résultats peuvent révéler des caractéristiques émergentes, telles que la présence de hubs (nœuds très connectés) ainsi que la hiérarchie des

nœuds. Cette hiérarchie se manifeste lorsque la plupart des nœuds ont un petit nombre de connexions, tandis que seuls quelques-uns en ont un grand nombre. Une autre caractéristique également souvent examinée est la longueur des chemins reliant les nœuds. Cette longueur peut correspondre à une dimension topologique, au sens du chemin le plus court, ou à une distance métrique pour les réseaux spatialisés. Les métriques du graphe, telles que le nombre de nœuds et le nombre de d'arcs, font également l'objet d'analyses approfondies dans le but d'identifier des lois d'échelle. L'analyse de ces métriques peut révéler des tendances d'évolution, notamment la manière dont le nombre de nœuds et d'arcs évolue à mesure que le graphe s'agrandit. En résumé, les lois d'échelle sont fréquemment utilisées dans l'analyse de réseau pour identifier des similitudes structurelles entre différents réseaux, et pour repérer des régularités et des tendances dans l'évolution de ces réseaux.

Les études portant sur les réseaux viaires ont identifié des lois d'échelle concernant les propriétés structurelles et topologiques. L'une des premières études est celle de Kalapala et al. (2006), qui ont identifié une loi d'échelle dans la distribution des degrés calculés à partir des représentations duales des réseaux routiers interurbains (routes nationales) des États-Unis, de l'Angleterre et du Danemark, bien que des analyses antérieures de réseaux viaires intra-urbains n'aient pas révélé de lois de puissance dans les distributions de la connectivité (Jiang & Claramunt, 2004; Rosvall et al., 2005). Toutefois, certaines recherches ont remis en question l'affirmation selon laquelle la distribution des degrés suit une loi de puissance (Clauset et al., 2009). Ces divergences relatives à l'identification de lois d'échelle dans les distributions de la connectivité des graphes duaux peuvent être expliquées par l'échelle considérée (interurbaine ou intra-urbaine) (Chan et al., 2011). Cardillo et al. (2006) suggèrent en outre qu'il est plus facile d'identifier des lois d'échelle pour des ensembles de villes dont la forme résulte d'un processus d'auto-organisation au regard de villes dont la forme résulte surtout d'un processus de planification.

Lämmer et al., (2006) ont identifiés des lois d'échelle pour différentes propriétés des réseaux viaires de 20 grandes villes en Allemagne, notamment la distribution de la taille des îlots (délimité par les segments du réseau) et le nombre de nœuds atteignables dans le cadre d'un coût du temps de déplacement. Toutefois cette deuxième propriété ne repose pas exclusivement sur la structure du réseau car elle dépend également de la variable considérée, à savoir le trafic routier. En continuité de cette recherche, Chan et al. (2011) ont observé que la géométrie à petite échelle des réseaux routiers de ces mêmes villes est extrêmement similaire, et que la taille des segments du réseau et les structures cellulaires qui en résultent

sont caractérisées par des distributions à longue queue. Les résultats ont également démontré que les distributions des angles d'intersection entre les segments de chaque réseau sont approximativement décrites par des fonctions exponentielles étirées.

En considérant une représentation du réseau par un graphe dual (voir 1.1.2.1), Porta et al. (2006b) ont démontré que la distribution des degrés du réseau routier de la ville d'Ahmedabad (Iran) suit une loi de puissance, tandis que d'autres réseaux étudiés ne présentent pas de lois d'échelle ou comportent un nombre d'intersections insuffisant pour tirer des conclusions significatives quant à la présence d'une loi de puissance. Avec une même approche, Wagner (2007) a constaté que la distribution des distances dans les graphes duaux est décrite par une loi d'échelle (loi de poisson), dont les paramètres sont étroitement liés à l'échelonnement de la distribution des longueurs de rues ordonnées par rang. Porta et al. (2014) ont également identifié une loi d'échelle pour la longueur des segments de rues principales à partir d'une étude morphologique de 100 réseaux de rues dans des zones urbaines du monde entier.

Des lois d'échelle sont aussi identifiées pour l'évolution des métriques du graphe viaire dans différents travaux basés sur des données empiriques (Barthelemy et al., 2013; Masucci et al., 2009, 2014; Strano et al., 2012, 2013), notamment pour le nombre de nœuds, le nombre d'arcs, le degré moyen, la densité linéaire et radiale, entre autres. Barthelemy et al. (2013) ont ainsi révélé que l'évolution du réseau de la ville de Paris entre 1789 et 2010 a conduit à une augmentation proportionnelle du nombre de nœuds et de la longueur des arcs. La proportion entre les deux varie selon s'il s'agit d'une période de densification ou d'étalement. Strano et al. (2012) ont révélé que le développement d'une zone urbaine au Nord de la ville de Milan entre 1833 et 2007 a provoqué une expansion et un renforcement des structures préexistantes dans le réseau, avec une croissance presque linéaire du nombre d'arcs par rapport au nombre de nœuds. Masucci et al. (2014) ont également montré l'existence de lois d'échelle entre le nombre d'arcs et le nombre de nœuds, ainsi qu'entre le degré moyen et le nombre de nœuds.

Kalapala et al. (2006) suggèrent que les réseaux viaires interurbains, de grands pays tels que les États-Unis, exhibent une invariance d'échelle à la fois topologique et géographique. En d'autres termes, la distribution des degrés dans la représentation duale suit une loi de puissance. La distribution de la longueur des arcs est aussi invariante d'échelle, indépendamment de la taille du réseau. En considérant la représentation du réseau viaire par une carte axiale (voir 1.1.2.1), Carvalho et Penn (2004) ont démontré que la longueur des lignes axiales présente des caractéristiques universelles qui ne dépendent que peu de la taille

de la ville, et qu'elle manifeste une autosimilarité à des échelles morphologiquement pertinentes. En considérant l'hypergraphe de rues, Jiang (2007) démontre également une invariance d'échelle pour la longueur des rues. Avec une différente approche, Chan et al. (2011) évoquent une invariance d'échelle du degré topologique des cellules du réseau, en considérant une représentation sous forme d'un graphe adjoint basé sur des objets bidimensionnels. Dans ce graphe, les nœuds représentent les cellules des réseaux routiers, tandis que les arcs représentent les frontières communes entre ces cellules.

4.1.2 Propriétés de "petit monde"

Les propriétés de "petit monde" font référence à un concept issu de la théorie des réseaux complexes. Ce terme a été popularisé par Milgram (1967), qui a montré que, en moyenne, n'importe quel individu sur terre pouvait être relié à un autre par une chaîne de personnes se connaissant en passant par seulement six intermédiaires.

Les propriétés de "petit monde" sont généralement définies par deux aspects principaux : une faible distance moyenne entre les nœuds et un fort "*clustering*" (existence de fortes concentrations locales de nœuds). Ces propriétés se manifestent dans divers types de réseaux (Crucitti et al., 2006), tels que les réseaux sociaux, les réseaux de communication, les réseaux de transport, etc.

En ce qui concerne la faible distance moyenne entre les nœuds, cela se traduit par la présence de chemins relativement courts ou de liaisons directes entre les nœuds dans un réseau de "petit monde", même lorsque ce réseau est étendu. Cette distance moyenne entre les nœuds n'augmente qu'en proportion du logarithme de la taille des réseaux (Porta et al., 2006a). Le fort "*clustering*" fait référence à la tendance des nœuds dans un réseau à être fortement interconnectés les uns avec les autres au sein de groupes ou de clusters. Autrement dit, dans un réseau de "petit monde", les nœuds ont une forte propension à être liés à d'autres nœuds qui sont également connectés entre eux. Cette combinaison de courtes distances entre les nœuds et de clusters de nœuds densément connectés contribue à l'effet global de "petit monde" dans le réseau, qui suppose que chaque entité dans le graphe peut être reliée à n'importe quelle autre entité à travers une courte chaîne de relations.

Les réseaux de petit monde sont caractérisés par une distribution statistique du degré de nœuds dite à longue queue (*heavy-tailed*), dont la forme est fortement étirée sur l'axe des abscisses (de très rares observations atteignant des valeurs extrêmement élevées) et sur l'axe des ordonnées (nombre élevé d'observations avec des petites valeurs de la variable étudiée).

Cette forme suppose une distribution qui correspond à une loi de puissance en échelle logarithmique. Dans les réseaux aléatoires, en revanche, la distribution du degré des nœuds suit une distribution normale (gaussienne). Il convient de noter que les réseaux invariants d'échelle présentent également des propriétés de "petit monde" (Barabási & Albert, 1999).

De nombreux réseaux réels présentent des distributions statistiques de longue queue des degrés des nœuds. Les observations empiriques montrent que cette tendance est générale, bien que des variations significatives existent autour de cette tendance. La tentative de modélisation mathématique de cette distribution à l'aide d'une loi de puissance suscite encore des débats et des controverses.

Les propriétés de "petit monde" ont été montrées pour les réseaux viaires par plusieurs études (Cardillo et al., 2006; Chan et al., 2011; Jang et al., 2020; Jiang, 2007; Jiang & Claramunt, 2004; Kalapala et al., 2006; Rosvall et al., 2005), en se concentrant plus particulièrement sur les nœuds du réseau. Les résultats confirment que les distributions du degré des nœuds ne peuvent pas être invariantes d'échelle (*scale-free*) dans les réseaux planaires en raison de la contrainte exercée par l'inscription spatiale du réseau. En revanche, quand un réseau viaire est représenté par un graphe dual, Kalapala et al. (2006) ainsi que Rosvall et al. (2005) ont constaté que la distribution des degrés des nœuds est caractérisée par une longue queue. En outre, en adoptant une représentation du réseau par un hypergraphe des rues (créé suivant la méthode SN, cf. sous-section 1.1.2.3), Jiang et Claramunt (2004) ont montré que les réseaux de rues urbains peuvent être catégorisés comme des réseaux de "petit monde", avec une faible longueur moyenne de chemin et un fort "clustering". Jiang (2007) a confirmé l'identification de cette propriété à partir d'un large échantillon des réseaux de rues de 40 villes américaines et de quelques autres villes d'ailleurs de tailles différentes. Lagesse (2015) a étudié les propriétés de "petit monde" pour 40 réseaux spatiaux, incluant les réseaux viaires contemporains de 4 villes (Amsterdam, Avignon, Paris et Manhattan).

4.2 Propriétés structurelles des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier

Les analyses sont menées pour les réseaux viaires historiques et contemporains autour des trois agglomérations étudiées, Dijon, Besançon et Pontarlier. En termes d'emprise spatiale, nous considérons la couverture spatiale de la carte source pour les réseaux historiques et le périmètre choisi initialement pour les réseaux contemporains (voir 1.3.2.3). Les résultats

calculés en considérant la même emprise spatiale par paires de deux dates ne présentent pas de différences avec les résultats présentés dans cette section (voir Annexe 21 et Annexe 22).

Les recherches présentées dans la section précédente, portant sur les réseaux viaires se sont souvent limitées aux propriétés des nœuds, notamment les distributions de leur degré, ou à la longueur des arcs. Dans notre étude, nous nous intéressons à la fois aux nœuds et aux voies en considérant la représentation du réseau viaire par un hypergraphe. L'objectif est d'examiner les propriétés structurelles des réseaux viaires qui sont valables dans le temps et entre les différents réseaux étudiés.

4.2.1 Lois d'échelle sur l'hypergraphe viaire

Les hypergraphes des réseaux viaires considérés sont décrits par leurs métriques : le nombre d'arcs, le nombre de voies, le nombre de nœuds, ainsi que par la longueur totale des segments du réseau. Ensuite, l'emprise spatiale de chaque réseau est considérée. L'évolution des métriques de l'hypergraphe et de la longueur totale du réseau sont analysées en relation avec cette emprise.

4.2.1.1 Propriétés deux à deux de l'hypergraphe viaire

En échelle logarithmique, la relation statistique entre paires de métriques (Figure 4.1, figure 4.3 et figure 4.5) correspond à un modèle de régression linéaire $Y = a + \beta X$. Cette observation est également valable pour la relation scalante respectives entre le nombre d'arcs, de nœuds et de voies, et la longueur totale du réseau (Figure 4.2, figure 4.4 et figure 4.6). Les tests de corrélation révèlent un coefficient de détermination R élevé et une p -valeur inférieure au seuil de significativité $\alpha = 0,05$. Ce qui permet de conclure que les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale du réseau sont significativement corrélées.

À la suite de ces analyses, six lois d'échelle sont identifiées pour la coévolution des propriétés considérées et ce, pour les trois réseaux. Etant donné que l'ajustement de la relation entre les données correspond à un modèle de régression linéaire en échelle logarithmique, cela indique la présence d'une loi de puissance, $p(x) \sim x^{-\beta}$, avec un exposant β équivalent à la pente de la droite de régression. En général, $\beta \approx 1$, sauf pour la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Pontarlier qui montre exceptionnellement une relation supra-linéaire des métriques de l'hypergraphe, avec $\beta > 1$ (Figure 4.6). Ces relations s'expliquent par une évolution incrémentale des réseaux étudiés, par l'ajout de nœuds et de segments, avec des processus de densification et d'étalement simultanés.

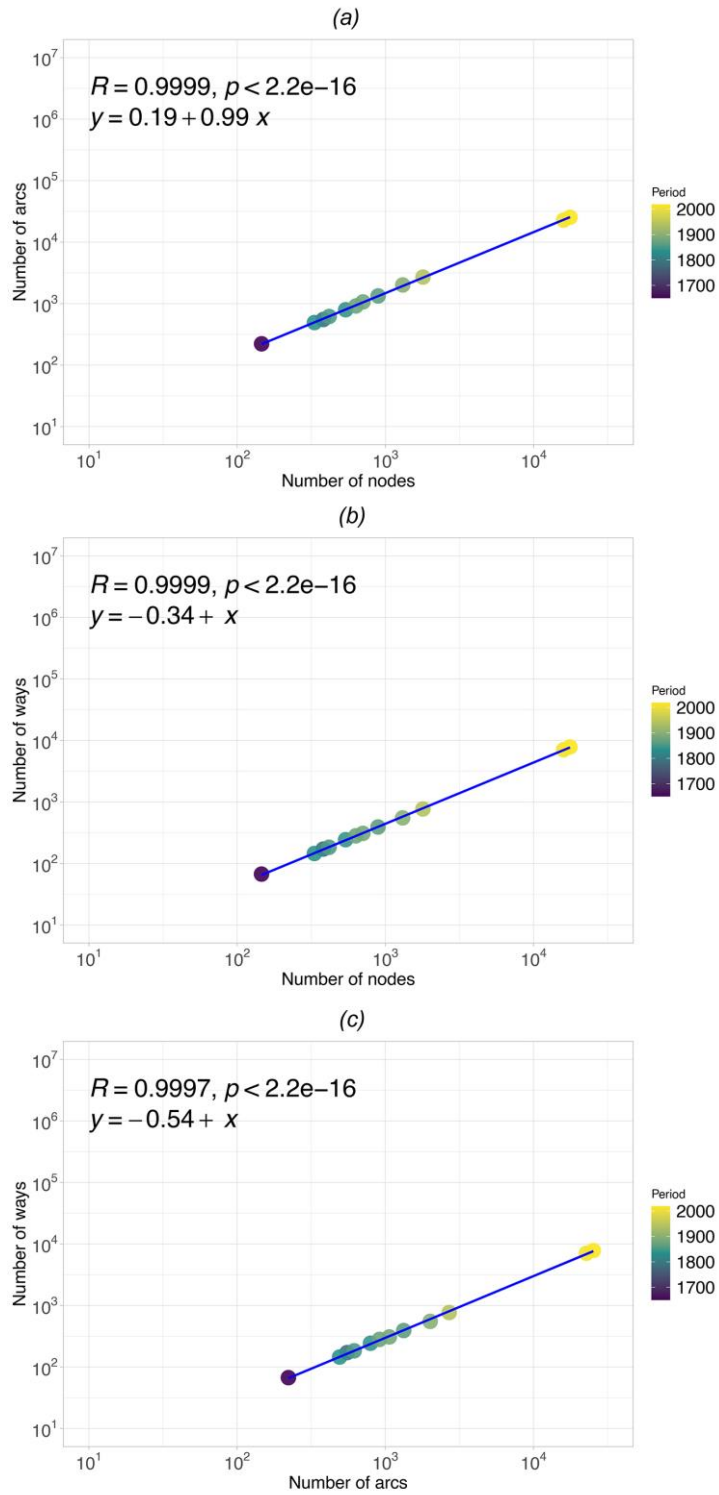


Figure 4.1. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N . (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N . (c) Nombre de voies V en fonction du nombre d'arcs A .

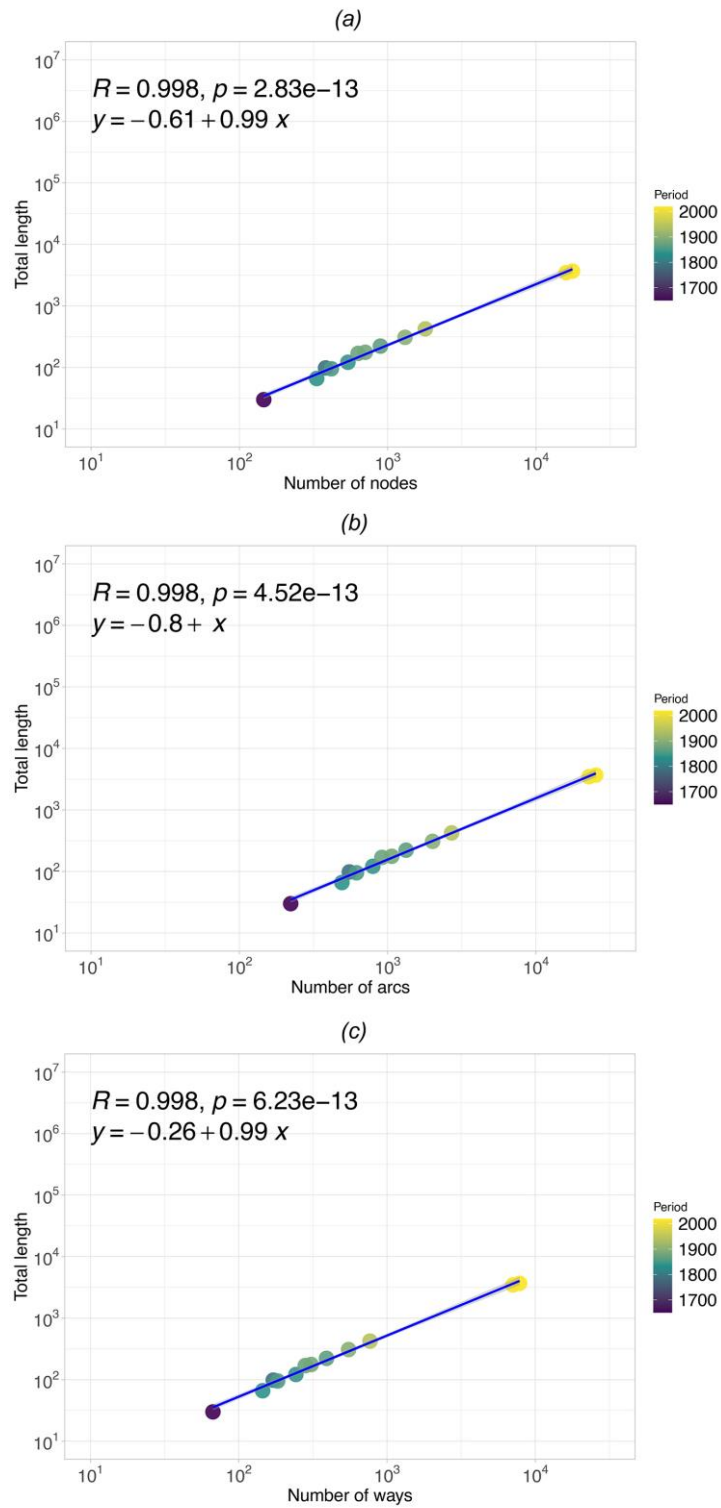


Figure 4.2. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N . (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A . (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V .

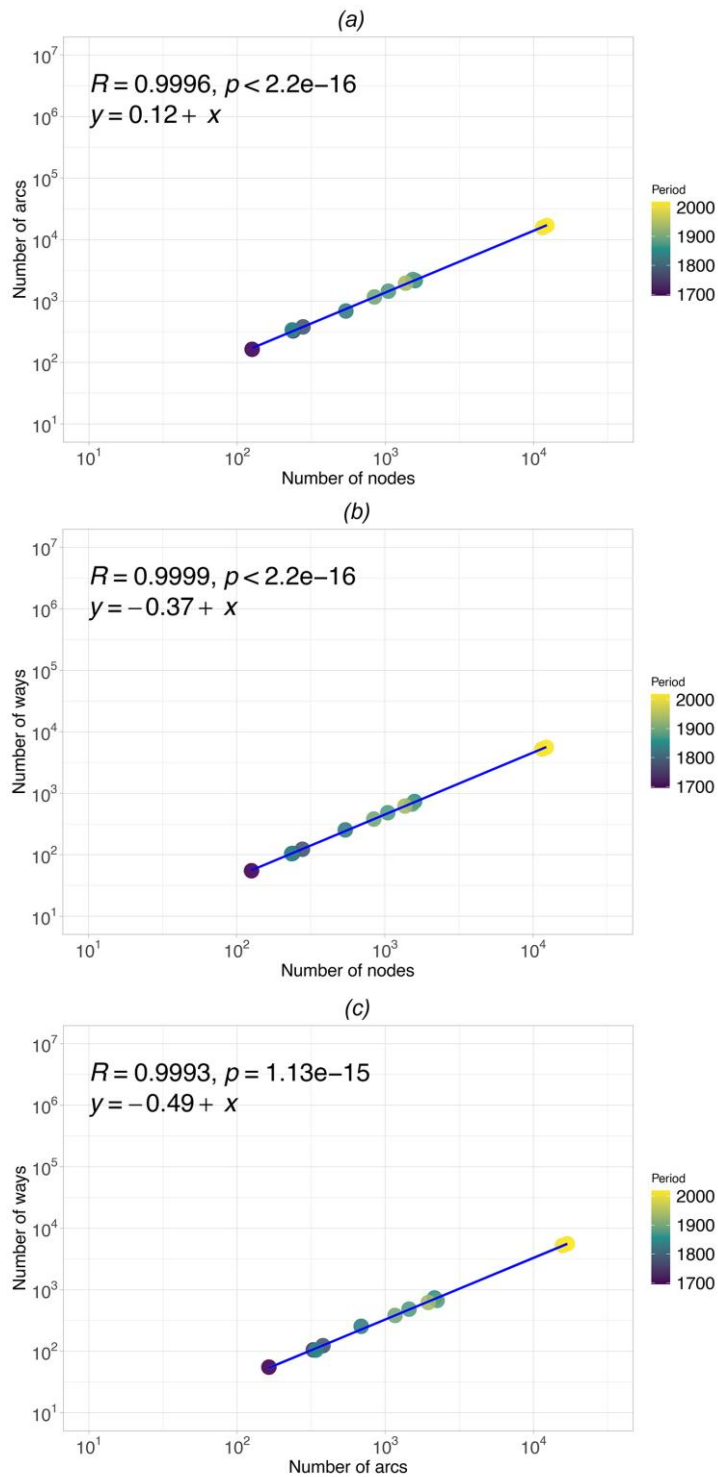


Figure 4.3. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N . (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N . (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A .

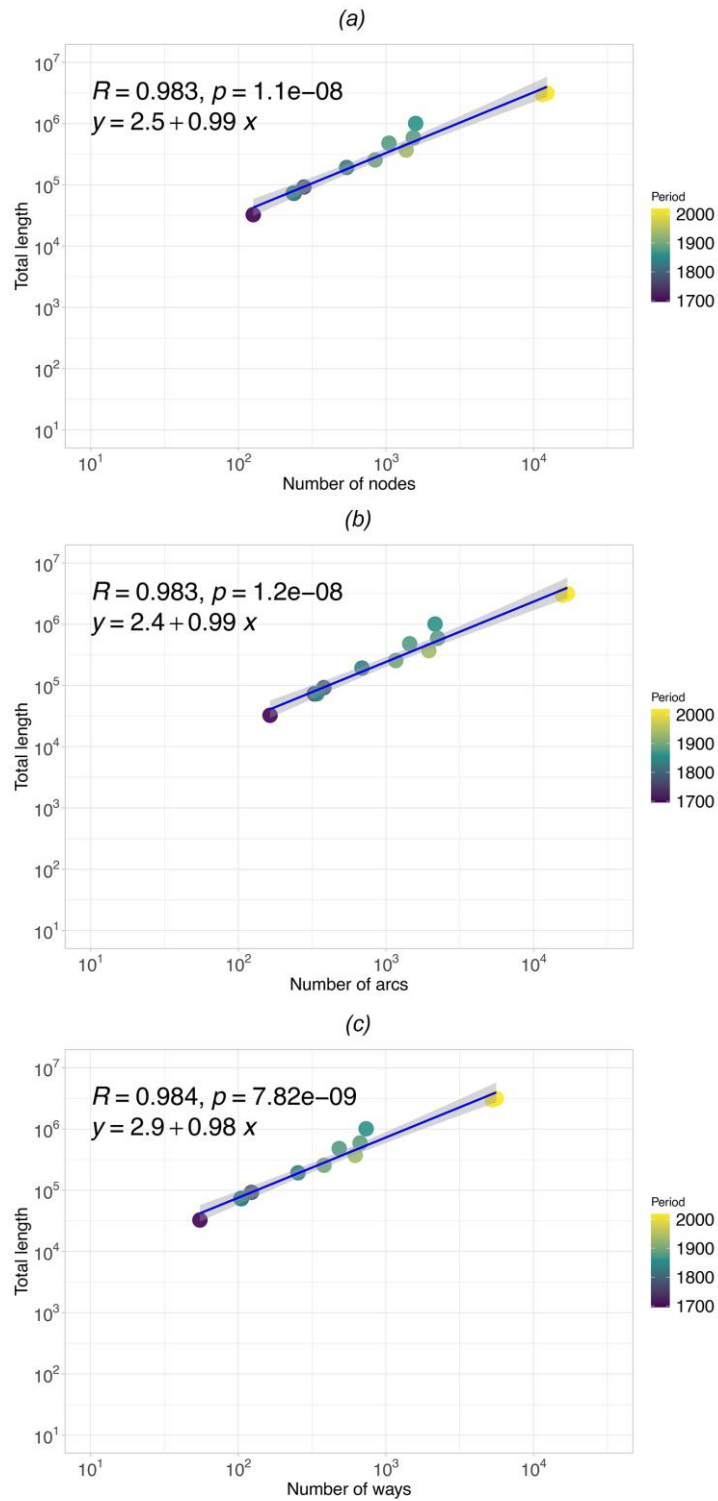


Figure 4.4. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N . (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A . (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V .

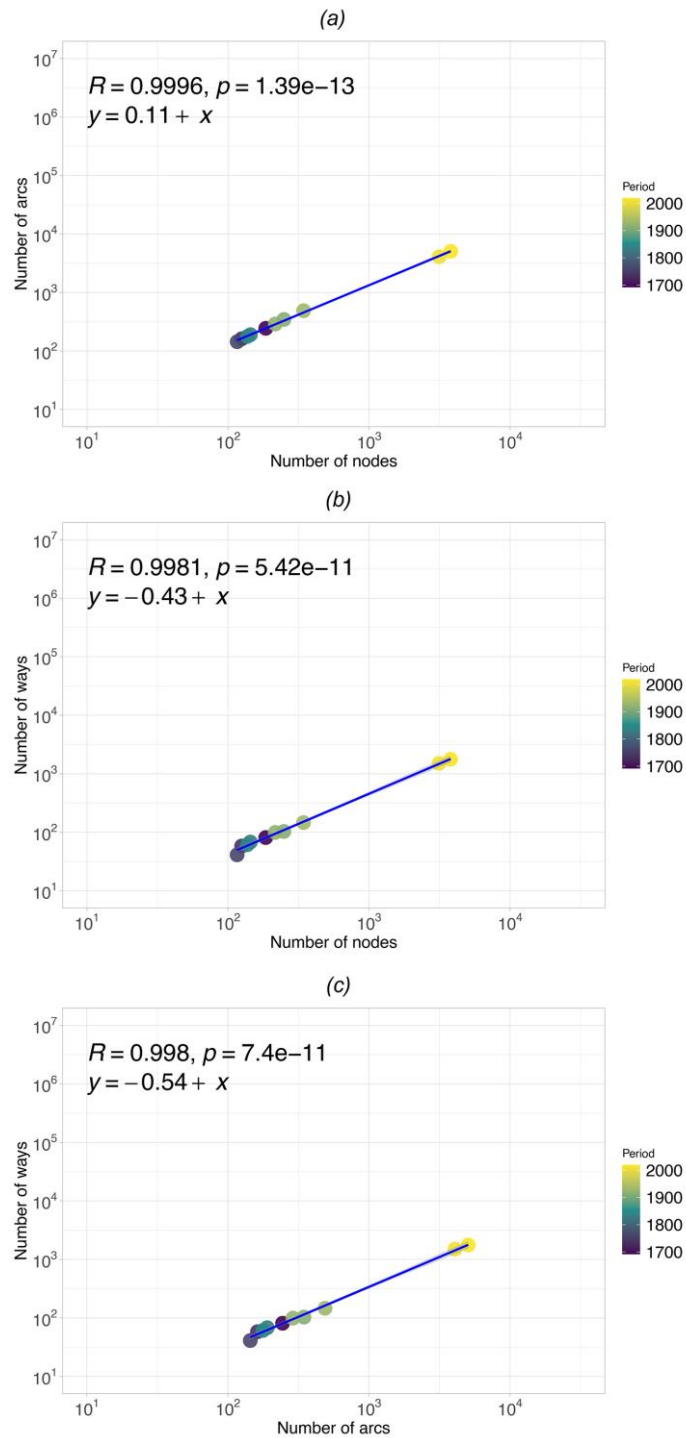


Figure 4.5. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N . (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N . (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A .

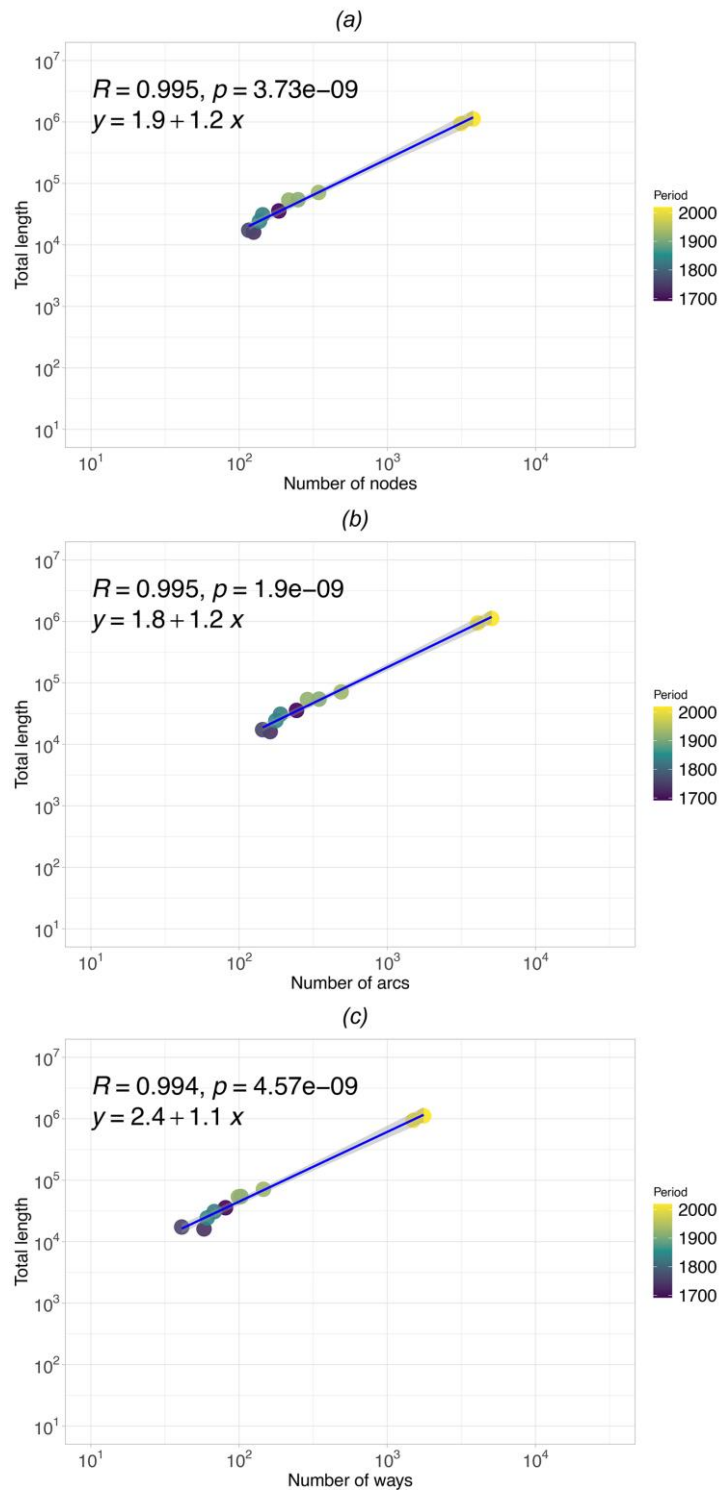


Figure 4.6. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N . (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A . (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V .

4.2.1.2 Propriétés de l'hypergraphe par rapport à l'emprise spatiale du réseau viaire

L'évolution des propriétés de l'hypergraphe viaire par rapport à l'emprise spatiale du réseau (sa superficie) sont aussi décrites par une loi de puissance $p(x) \sim x^{-\beta}$. Pour le réseau de Dijon, ces propriétés évoluent de manière très linéaire par rapport à l'emprise spatiale du réseau, avec un exposant $\beta \approx 1$ (Figure 4.7). En ce qui concerne le réseau de Besançon, cette évolution est également quasiment linéaire, avec $0.94 \leq \beta \leq 0.96$ (Figure 4.8). En revanche, pour le réseau de Pontarlier, une évolution sublinéaire est constatée avec $0.7 \leq \beta \leq 0.83$ (Figure 4.9). Les relations scalantes entre les propriétés de l'hypergraphe et l'emprise spatiale du réseau sont moins linéaires pour les réseaux de Besançon et Pontarlier, en comparaison à celui de Dijon. Ceci peut s'expliquer par le contexte géographique de ces agglomérations : les deux réseaux sont contraints par la topographie et, dans le cas de Besançon, par la présence d'une rivière.

À la suite de ces analyses, quatre lois d'échelle décrivent la relation entre chaque propriété de l'hypergraphe et l'emprise spatiale du réseau, pour les trois villes étudiées. Ces résultats sont intuitifs dans la mesure où ils confirment que plus l'étendue géographique est large, moins le réseau est soumis à des contraintes, ce qui se traduit par une croissance du réseau proportionnelle à l'expansion spatiale de la ville.

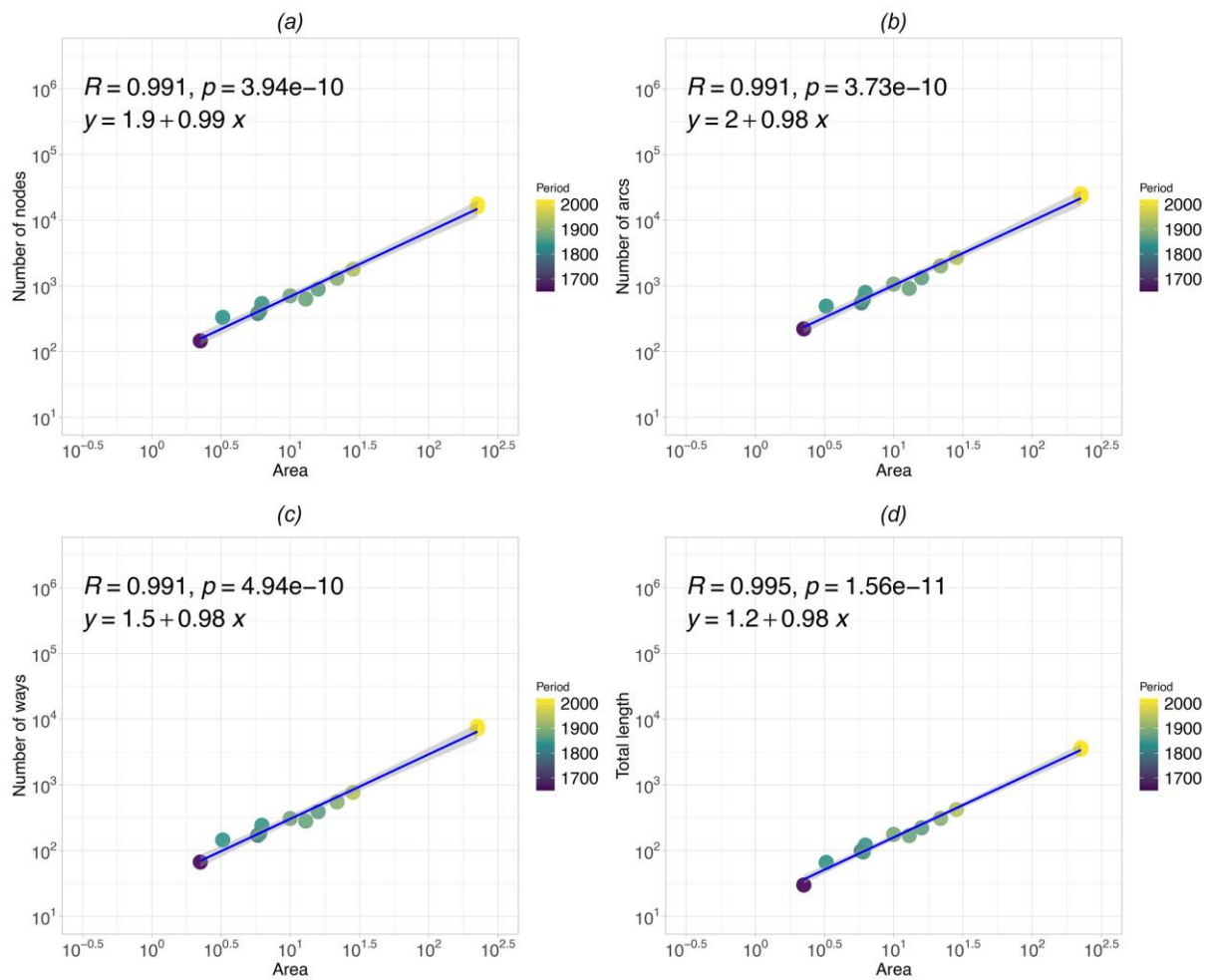


Figure 4.7. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire.

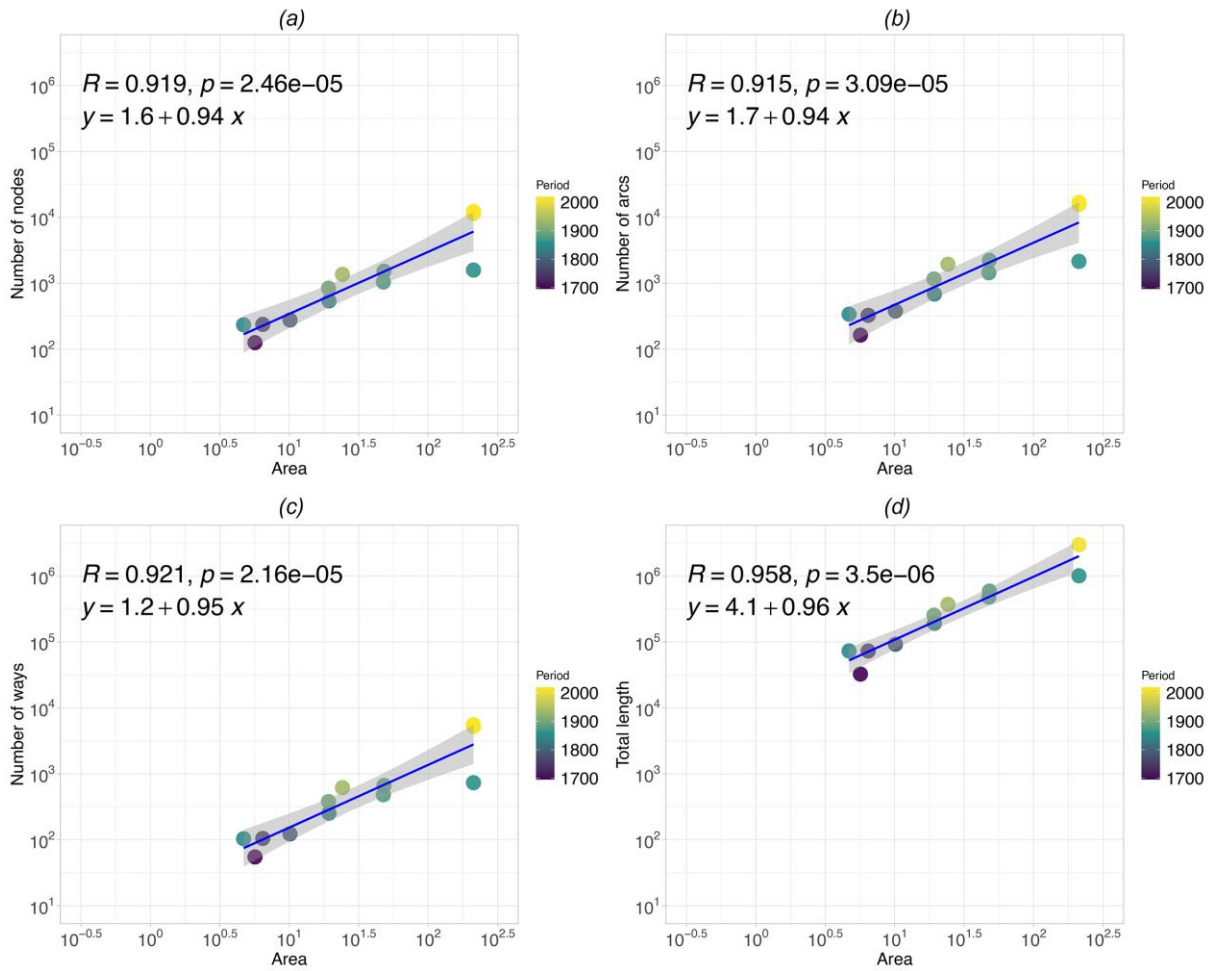


Figure 4.8. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire.

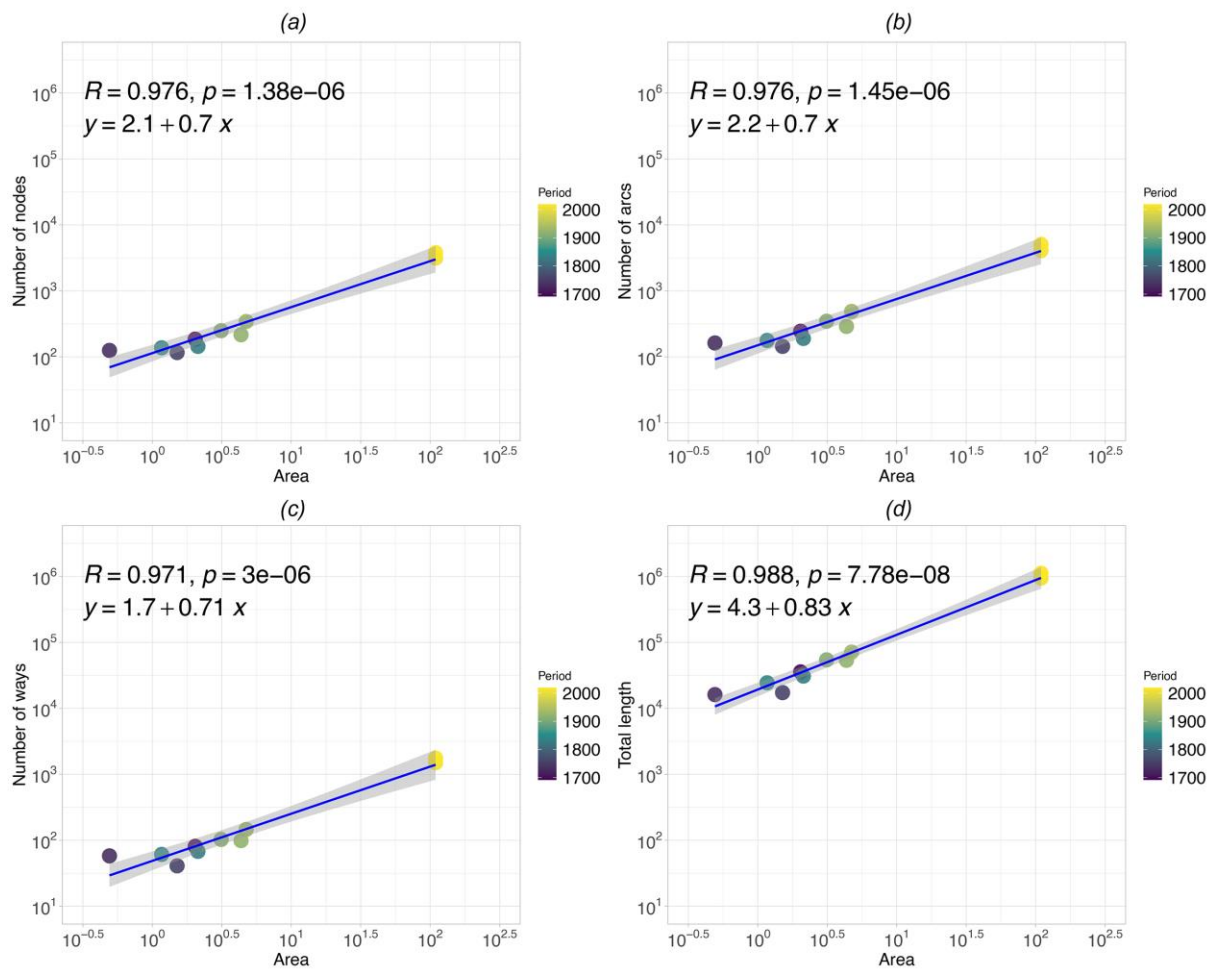


Figure 4.9. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire.

4.2.2 Propriétés de "petit-monde" des degrés des voies et des nœuds

À partir de l'analyse des degrés des voies et des nœuds de l'hypergraphe viaire de chaque réseau à différentes dates, nous cherchons à identifier des propriétés de "petit monde", qui sont valables dans le temps et indépendantes de l'espace dans lequel le réseau est inscrit. Plus spécifiquement, nous examinons les distributions des degrés des voies et le ratio du nombre de nœuds de degré 1 et 3 par rapport au nombre total de nœuds. Ce ratio est indicatif des types d'intersections entre les voies du réseau. Les résultats sont présentés pour les réseaux respectifs des trois villes.

4.2.2.1 Degré des voies

Les histogrammes de distribution des valeurs du degré des voies pour les trois réseaux étudiés révèlent des formes de distributions similaires (Figure 4.10, figure 4.11 et figure 4.12). Ces formes de distribution indiquent la présence d'un nombre important de voies ayant un faible degré, tandis que celles avec un degré élevé sont rares. Cette propriété peut être rapportée au mécanisme d'attachement préférentiel aux voies déjà bien connectées. La notion d'attachement préférentiel se réfère au principe selon lequel les riches deviennent plus riches (*The rich get richer*).

Sur une échelle logarithmique, la forme des distributions suggère que les degrés des voies s'échelonnent suivant une loi de puissance. Nous avons testé l'ajustement des distributions à trois types de lois avec la méthode du maximum de vraisemblance (*maximum likelihood method*) (Clauset et al., 2009). Les résultats des tests suggèrent en général que les distributions correspondent davantage à des lois log-normales (Figure 4.13). Pour certaines distributions cependant, il est difficile d'affirmer avec certitude si elles correspondent vraiment à une loi log-Normale ou une loi de puissance (voir Annexe 26, pour les résultats de Besançon et Pontarlier).

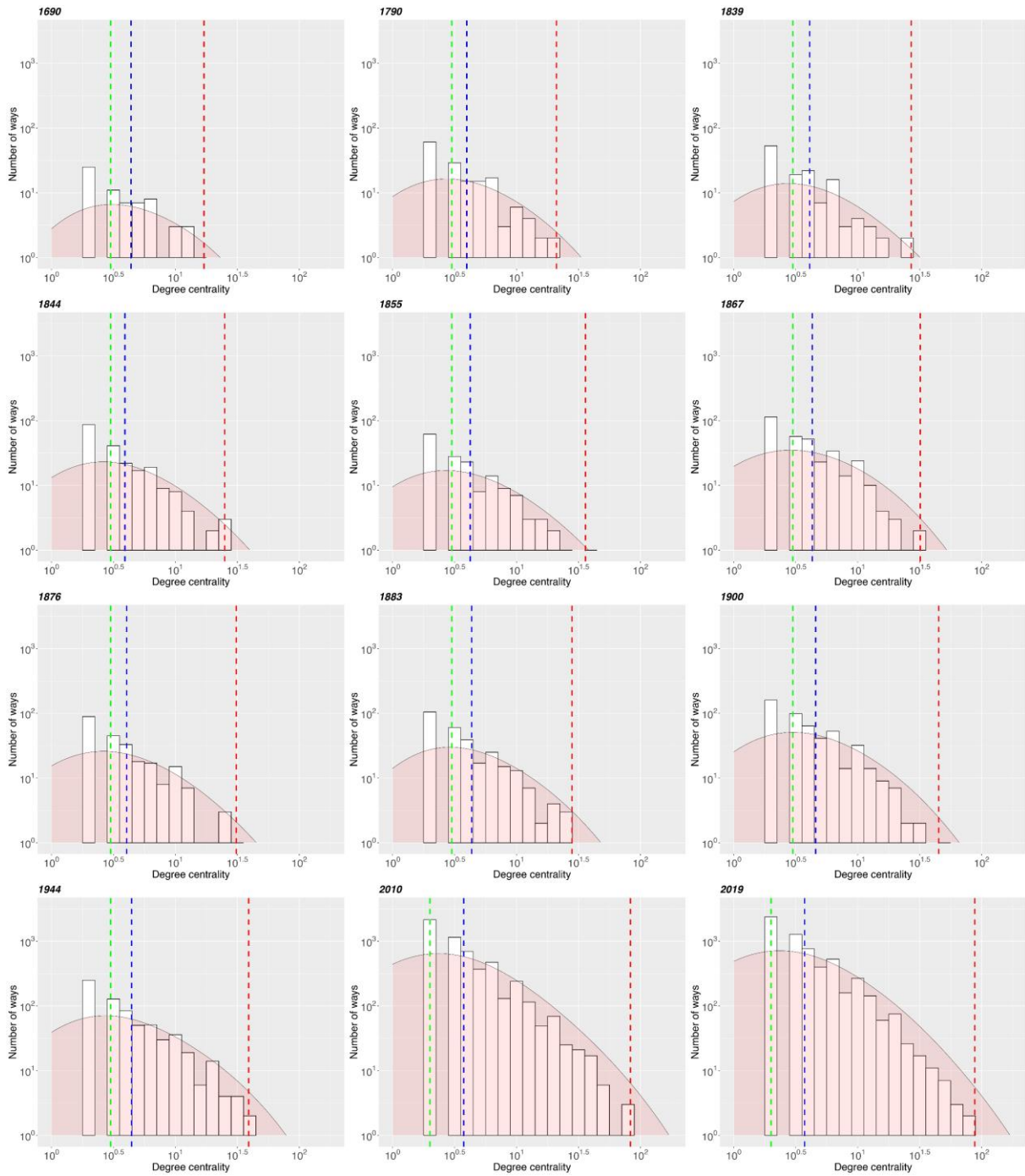


Figure 4.10. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

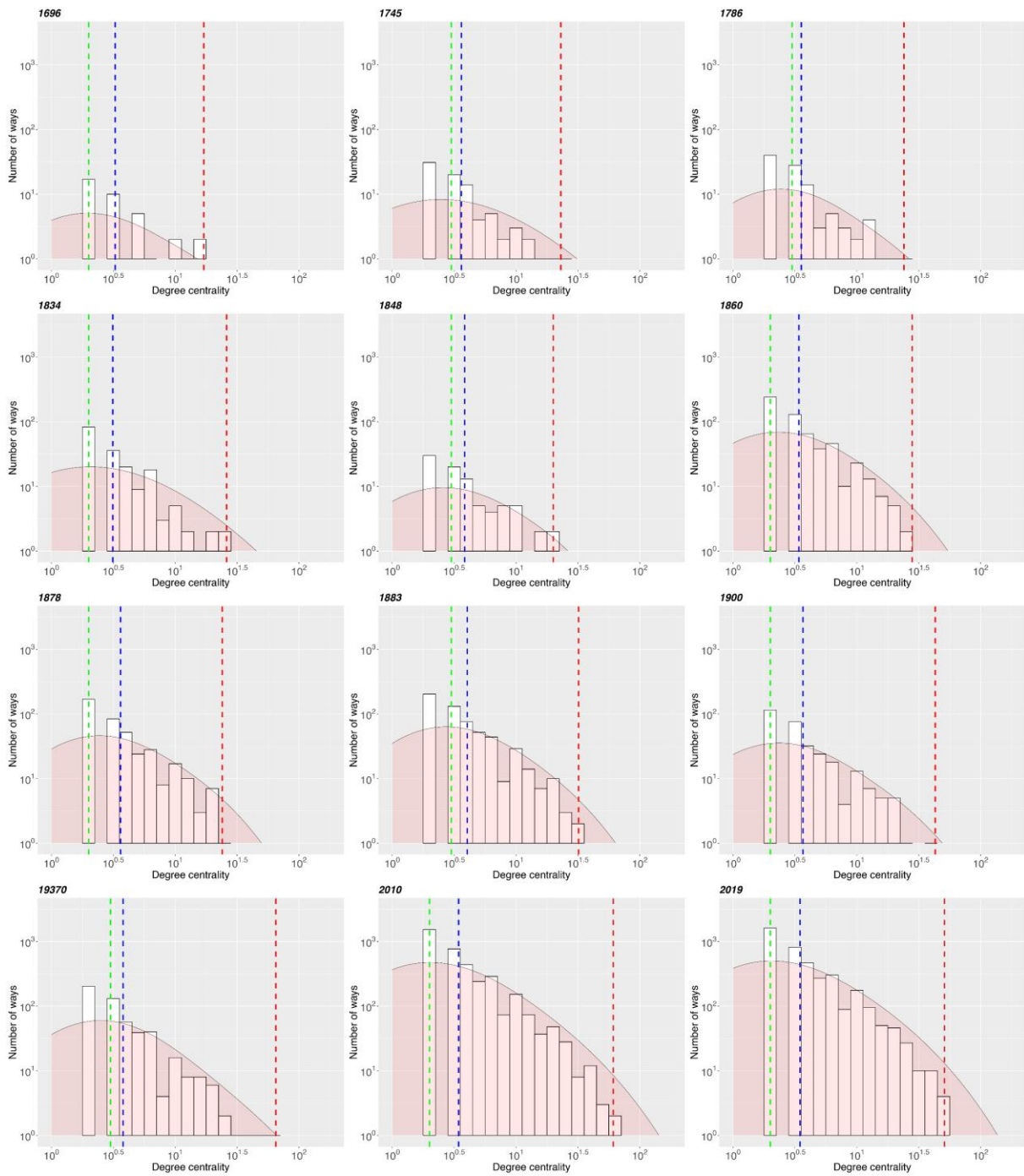


Figure 4.11. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon à 12 dates (entre 1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

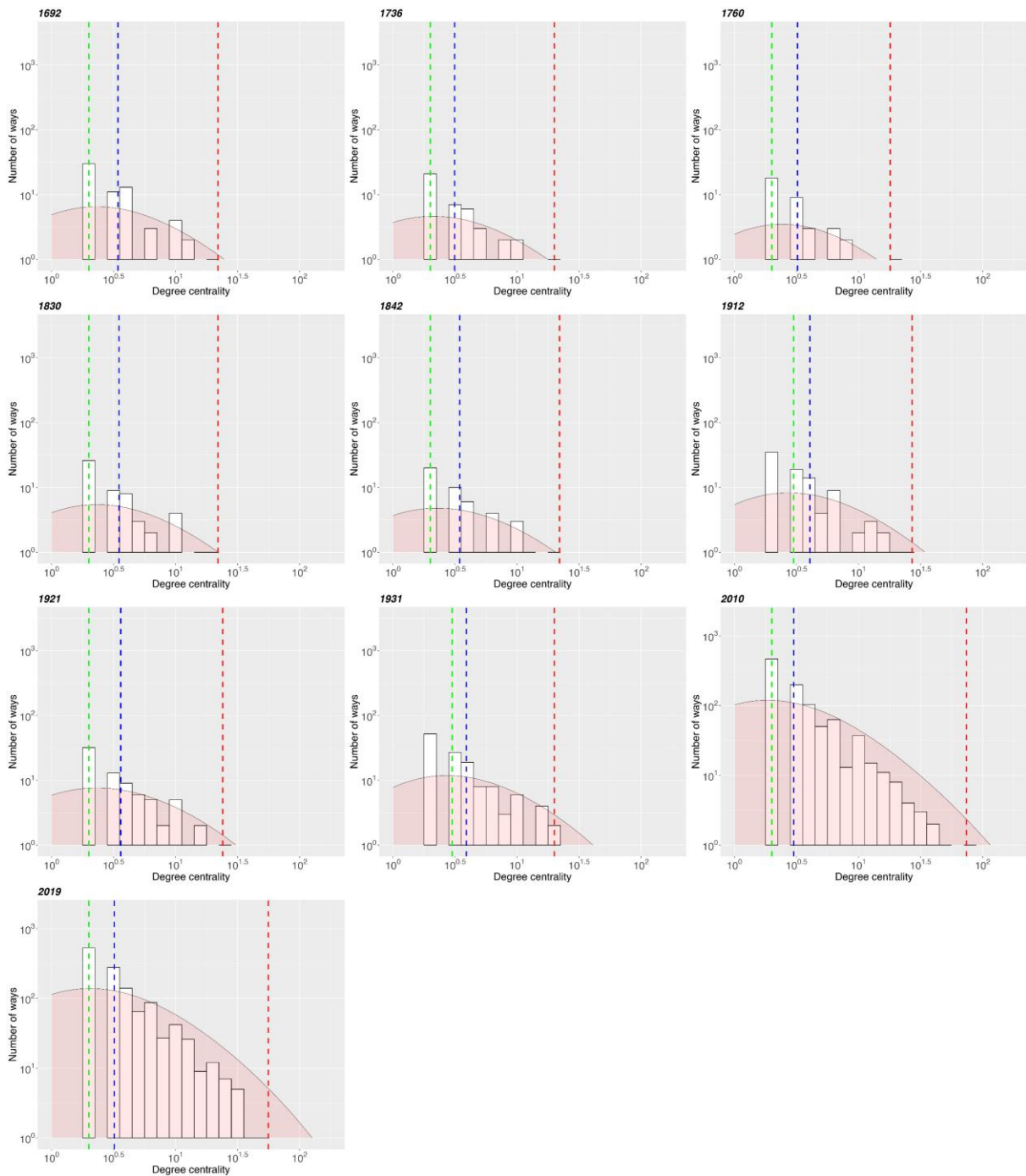


Figure 4.12. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier à 10 dates (entre 1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

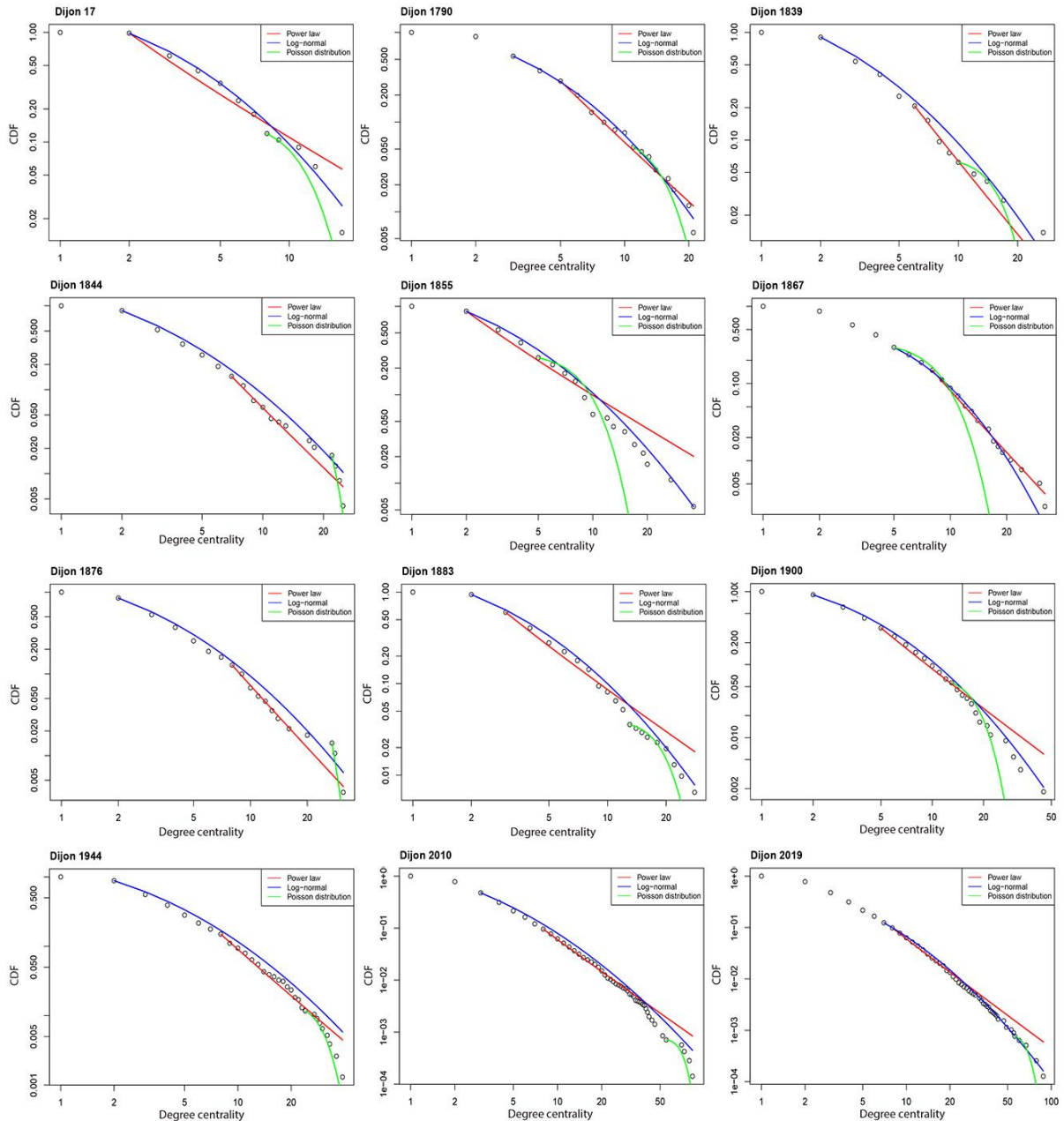


Figure 4.13. Ajustement des distributions de degré des voies du réseau viaire de Dijon avec des lois de puissance, log-normales et de Poisson en appliquant la méthode du maximum de vraisemblance.

4.2.2.2 Degré des nœuds

Pour les trois réseaux analysés, la relation scalante entre le nombre des nœuds de degré $k=1$ et le nombre total de nœuds N correspond à un modèle linéaire, sur une échelle logarithmique (Figure 4.14, figure 4.15 et figure 4.16 – a). La relation entre le nombre des nœuds de degré $k=3$ et le nombre total de nœuds N est également scalante (Figure 4.14, figure 4.15 et figure 4.16 – b).

Ces résultats confirment que les réseaux viars analysés présentent des propriétés de "petit-monde", qui les distinguent des réseaux aléatoires. En effet, dans un réseau aléatoire, la plupart des nœuds connectent le même nombre d'arcs. En revanche, comme mentionné précédemment, la distribution des degrés des nœuds ne peut pas être sans échelle dans les réseaux planaires car le degré d'un nœud est limité par l'inscription spatiale du réseau.

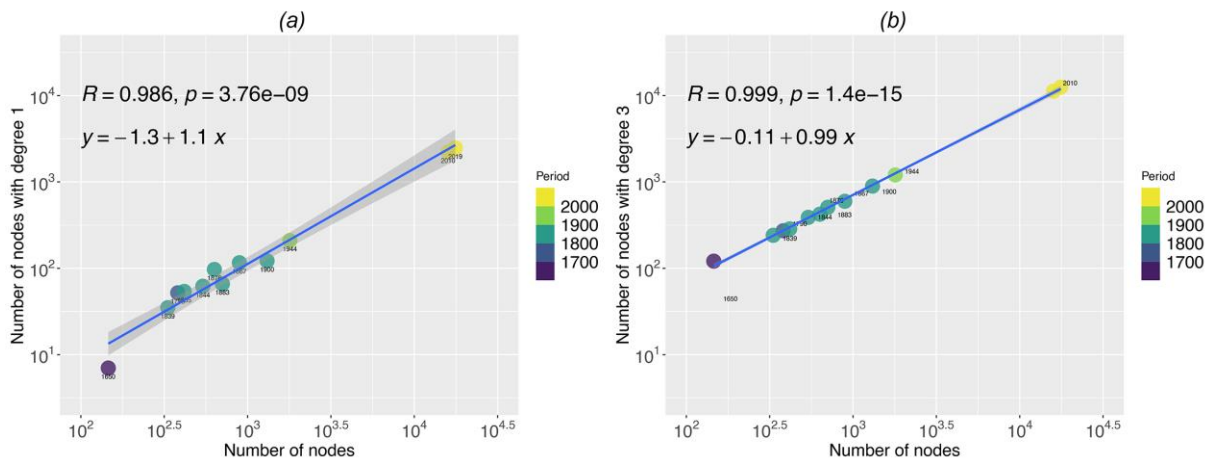


Figure 4.14. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viar de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

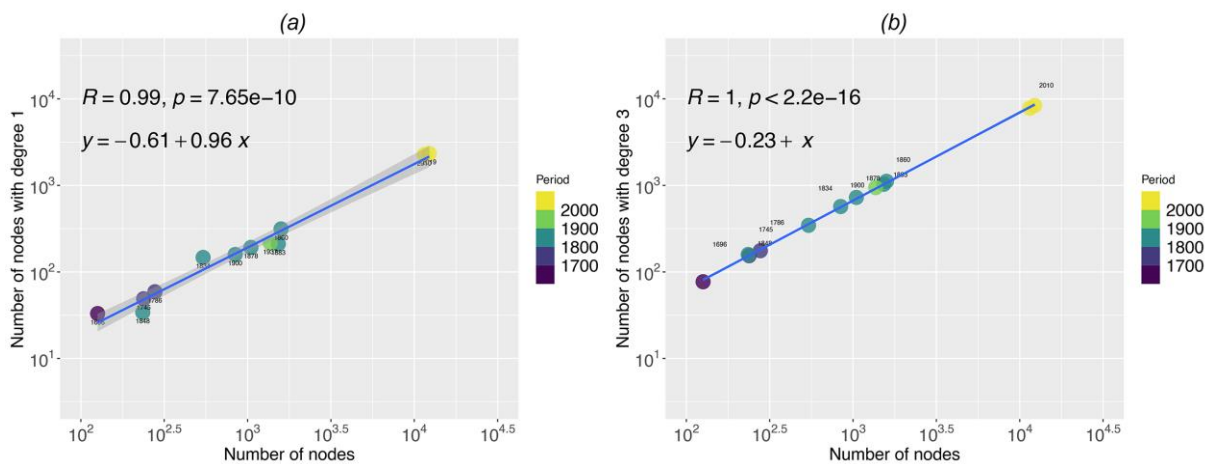


Figure 4.15. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viar de Besançon à 12 dates (entre 1696 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

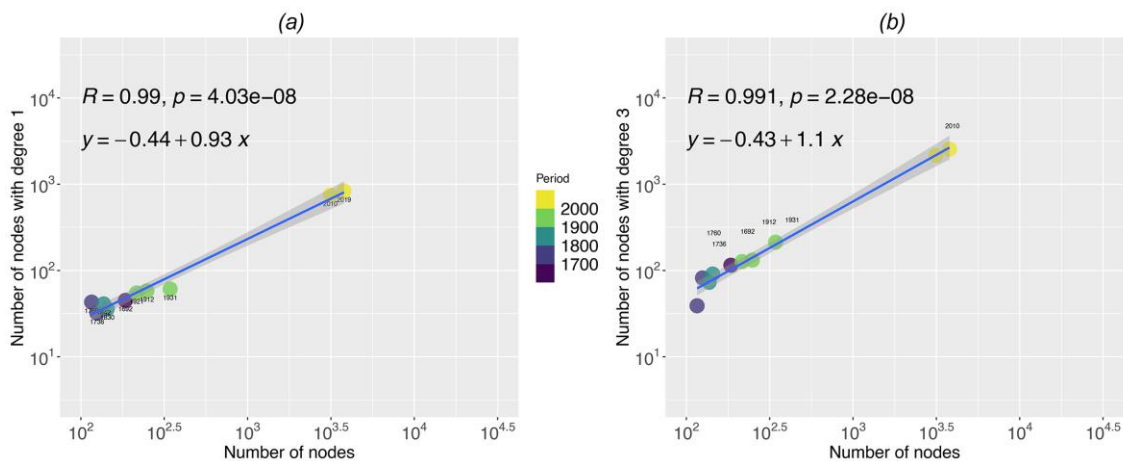


Figure 4.16. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viaire de Dijon à 10 dates (entre 1692 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

Une information complémentaire peut être obtenue à partir du suivi du ratio du nombre r_N de nœuds de un degré $k=1$ et $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds N (Courtat et al., 2011c). La valeur r_N apporte une indication sur la présence relative des impasses au niveau du réseau (correspondant à $k=1$), ou des intersections en forme de T (correspondant à $k=3$) (Équation 4.1). Les nœuds ayant un degré $k=2$ ne sont pas pris en compte dans le calcul de la somme du nombre des nœuds car ils sont généralement considérés comme des points annexes (voir Figure 1.5 et Figure 1.12). La valeur de r_N est proche de 1 si le réseau présente de nombreux croisements en forme de T et des impasses. Un faible ratio r_N indique une dominance des intersections en forme de X (correspondant à $k=4$), et révèle la présence de structures viaires maillées (en grille).

$$\text{Équation 4.1 : } r_N = \frac{N_1 + N_3}{\sum_{k \neq 2} N}$$

Il a été démontré par Cardillo et al. (2006) que l'abondance de croisements en forme de T est typique des réseaux urbains auto-organisés ou "organiques" (comme ceux de Venise ou du Caire). Inversement, une structure en grille dense est particulière aux villes dont les formes sont le résultat d'une planification à grande échelle (comme Barcelone ou New York) (Courtat et al., 2011c).

Pour le réseau de Dijon, la représentation du ratio de r_N en fonction de N montre globalement une diminution au cours du temps, avec $r_N \approx 0,88$ en ≈ 1690 , puis $r_N \approx 0,80$ en 1867, ce qui correspond à une augmentation du nombre relatif de croisements en X (entre quatre arcs). À partir de l'année 1900, le ratio augmente fortement, passant de $r_N \approx 0,775$ à $r_N \approx 0,85$ en

2019. Ainsi, l'observation de l'évolution de ce ratio au niveau du réseau de Dijon révèle une évolution en deux phases, avant et après le début du 20^{ème} siècle (Figure 4.17). Le réseau en 1690 présente une structure arborescente auto-organisée, qui évolue vers une structure dense davantage planifiée jusqu'au début du 20^{ème} siècle. Ensuite, une deuxième phase de l'évolution se manifeste, montrant une dynamique d'auto-organisation du réseau qui persiste jusqu'au 21^{ème} siècle.

Le réseau viaire de Dijon a fait objet d'opérations de planification urbaine durant le 19^{ème} siècle, quoique pas à grande échelle comme ce fut le cas pour les percées Haussmanniennes à Paris. Les résultats peuvent donc être interprétés en relation avec ces opérations, ainsi qu'avec l'avènement de l'automobile et la nécessité d'adaptation de la structure du réseau à ce nouveau mode de transport.

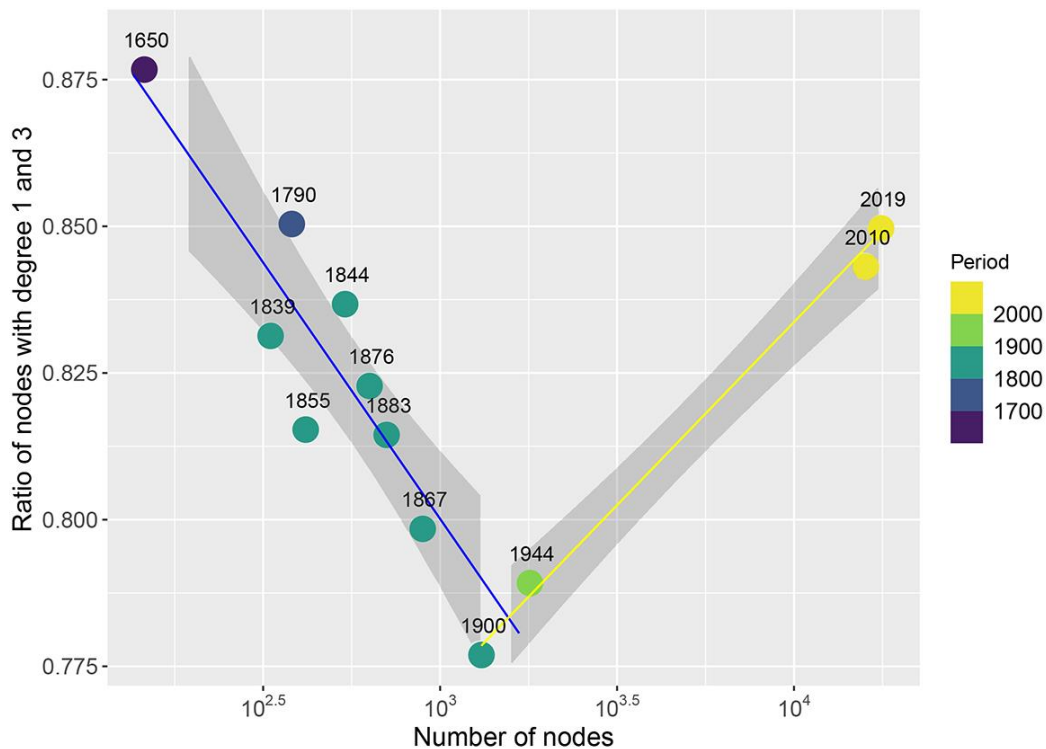


Figure 4.17. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Dijon entre 1690 et 2019.

Le réseau de Besançon ne révèle pas de tendances particulièrement nettes, bien que l'on puisse discerner trois phases distinctes (Figure 4.18). Une première phase de diminution du ratio entre le 17^{ème} siècle et la fin du 18^{ème} (avec un ratio $r_N \approx 0,875$ en 1696 et $r_N \approx 0,845$ en 1786), qui traduit l'émergence des intersections en forme de X et révèle la présence de structures maillées (en grille). Lors d'une deuxième phase, durant le 19^{ème} siècle, le réseau

présente de fortes modifications irrégulières du ratio. Enfin, une troisième phase, de légère augmentation plus régulière du ratio (avec un ratio $r_N \approx 0,865$ en 1900 et $r_N \approx 0,875$ en 2019) témoigne de l'émergence de structures arborescentes avec des intersections en T et des impasses. Ces variations du ratio peuvent s'expliquer par une alternance de phases au cours desquelles le réseau s'est densifié ou bien s'est étalé.

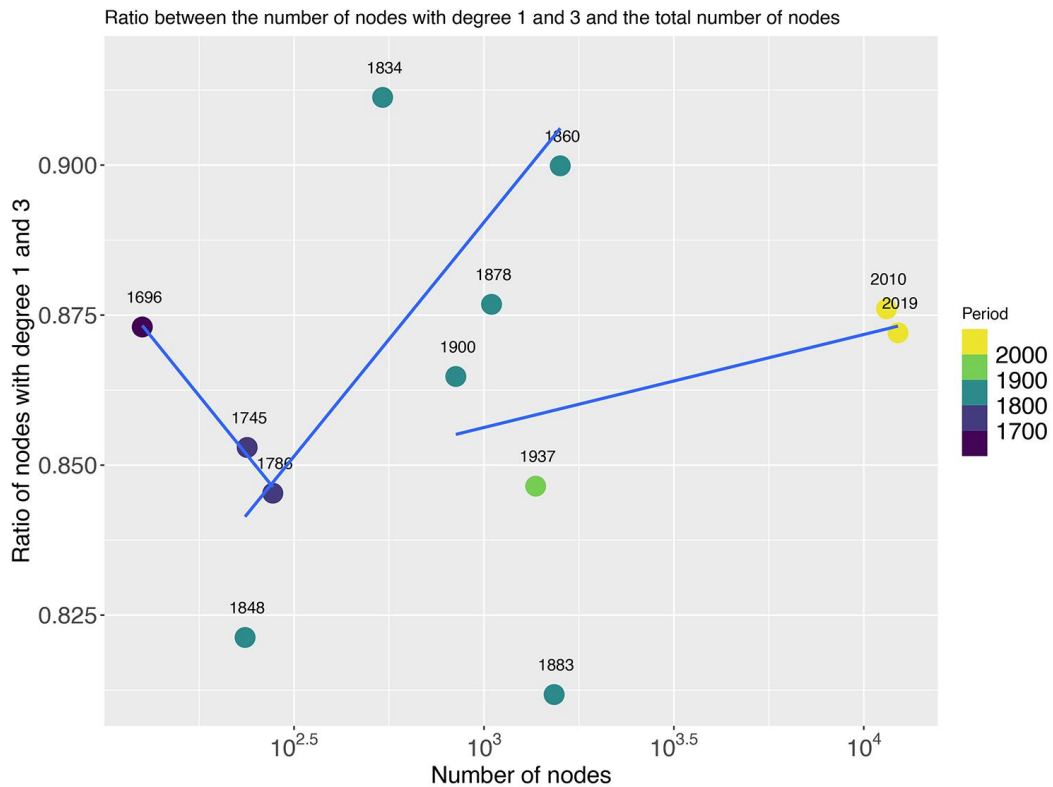


Figure 4.18. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Besançon entre 1696 et 2019.

En ce qui concerne le réseau de Pontarlier, les résultats révèlent une première phase d'évolution irrégulière du ratio r_N jusqu'au 20^{ème} siècle. La présence d'un réseau fortement maillé au début du 20^{ème} siècle avec une dominance d'intersections en X (avec un ratio $r_N \approx 0,755$ en 1912 et $r_N \approx 0,80$ en 1931), est principalement le résultat d'une forte urbanisation au sein des quartiers existants. Ensuite, une deuxième phase d'évolution est marquée par une tendance claire d'augmentation du ratio (avec un ratio $r_N \approx 0,755$ en 1912 et $r_N \approx 0,925$ en 2019), qui correspond au développement d'impasses et d'intersections en T.

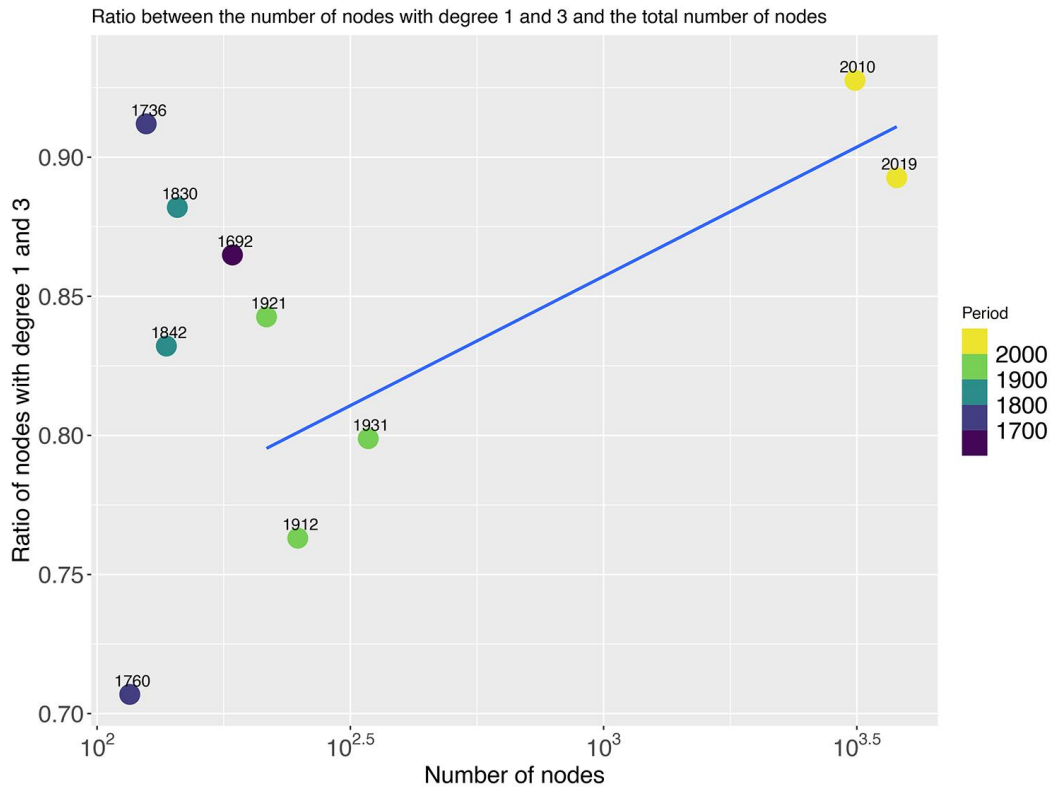


Figure 4.19. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Dijon entre 1692 et 2019.

4.2.3 Lois d'échelle relatives à la longueur et à l'espacement des voies

En analysant la longueur et l'espacement des voies de l'hypergraphe viaire de chaque réseau à différentes dates, nous cherchons à identifier l'existence éventuelle d'une propriété d'invariance d'échelle qui serait constante dans le temps et indépendante de la localisation géographique des réseaux. Plus précisément, notre objectif est d'examiner si les distributions de longueur et d'espacement des voies présentent des caractéristiques globalement similaires et suivent des lois mathématiques identiques. Il convient de noter que la distribution de l'espacement des voies est en fait équivalente à la distribution des longueurs des segments. En effet, par définition, l'espacement correspond à la distance moyenne entre les intersections à l'échelle de chaque voie. Les résultats de cette analyse sont présentés pour les réseaux respectifs des trois villes.

4.2.3.1 Longueur des voies

Les distributions de la longueur des voies montrent une stabilité de la forme globale (en cloche) pour le réseau viaire respectif des trois villes aux différentes dates considérées. En échelle normale, les distributions sont caractérisées par une longue queue. Cela indique qu'il existe relativement peu de voies très courtes, peu de voies extrêmement longues, et la majorité des voies ont une longueur moyenne. En échelle logarithmique, l'ajustement des données à une courbe de densité présente une forme qui suggère une loi log-normale. Pour vérifier ceci, nous avons appliqué la méthode du maximum de vraisemblance (*maximum likelihood method*) (Clauset et al., 2009) pour comparer les courbes lissant les histogrammes de distribution à des courbes mathématiques, à savoir une loi de puissance et une loi log-normale. Les résultats des tests montrent que les distributions suivent des lois log-normales. Cependant, ils suggèrent également que les distributions présentent une similitude, quoique moins marquée, avec une loi de puissance (Figure 4.23).

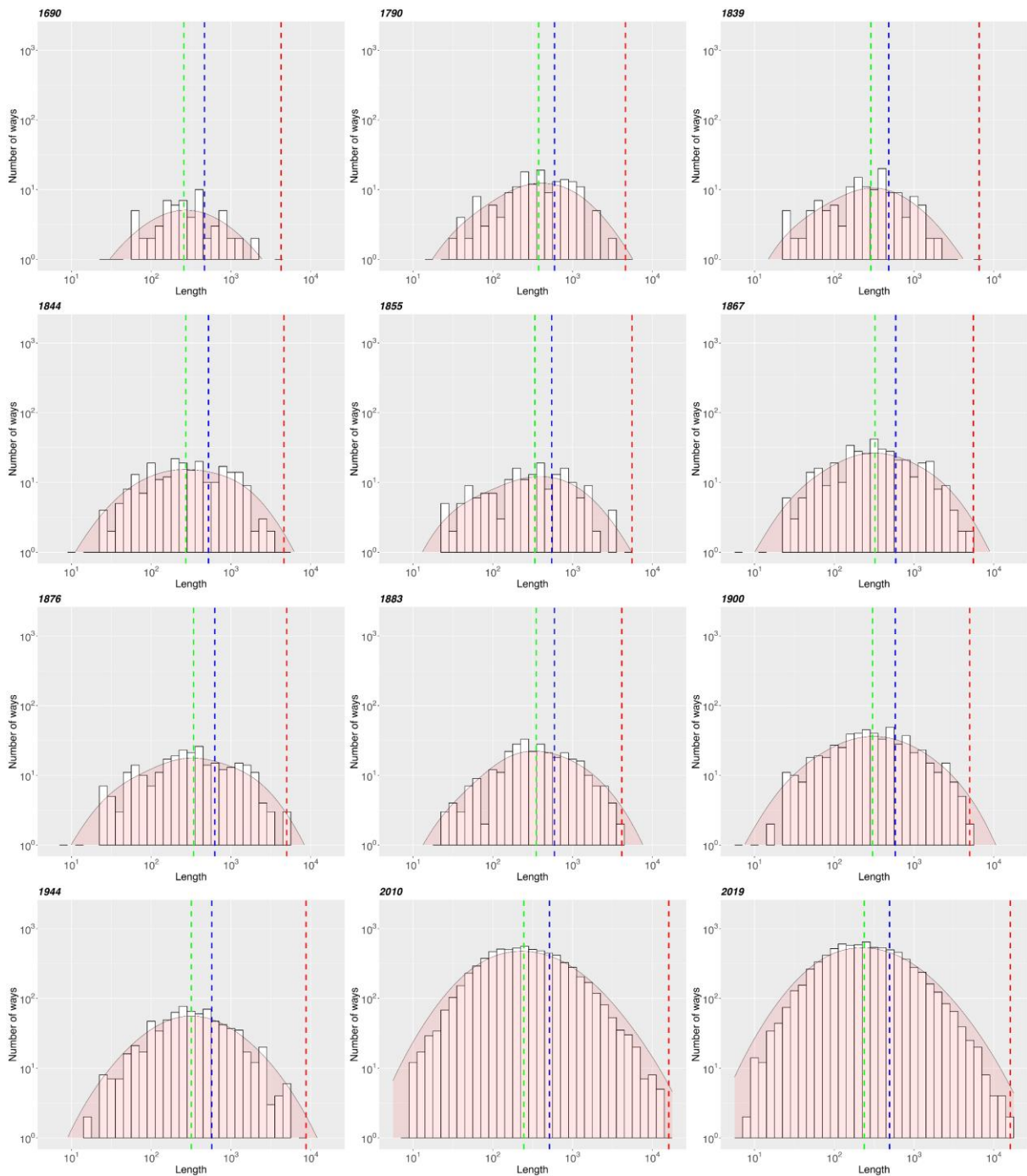


Figure 4.20. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

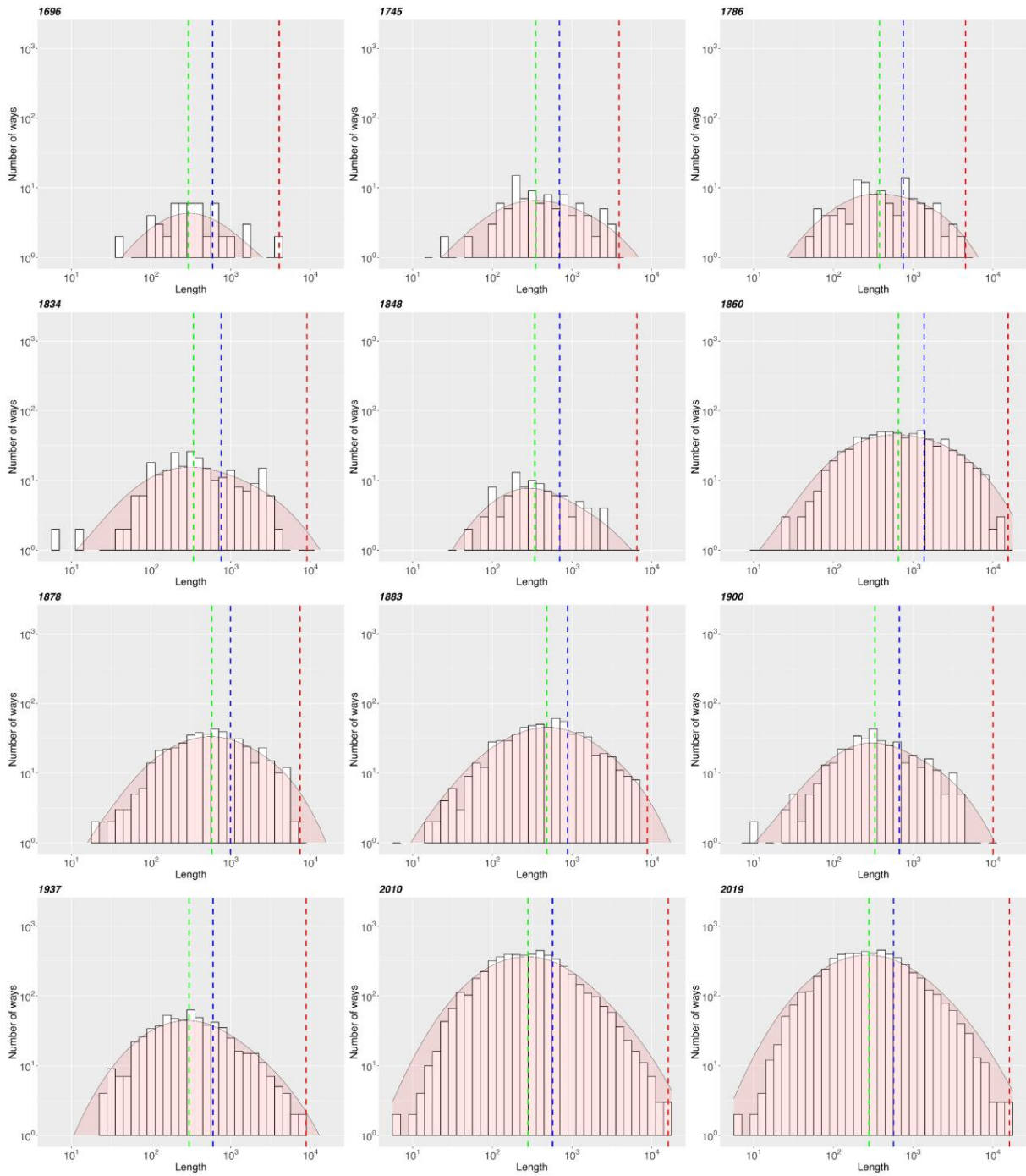


Figure 4.21. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Besançon à 12 dates (1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

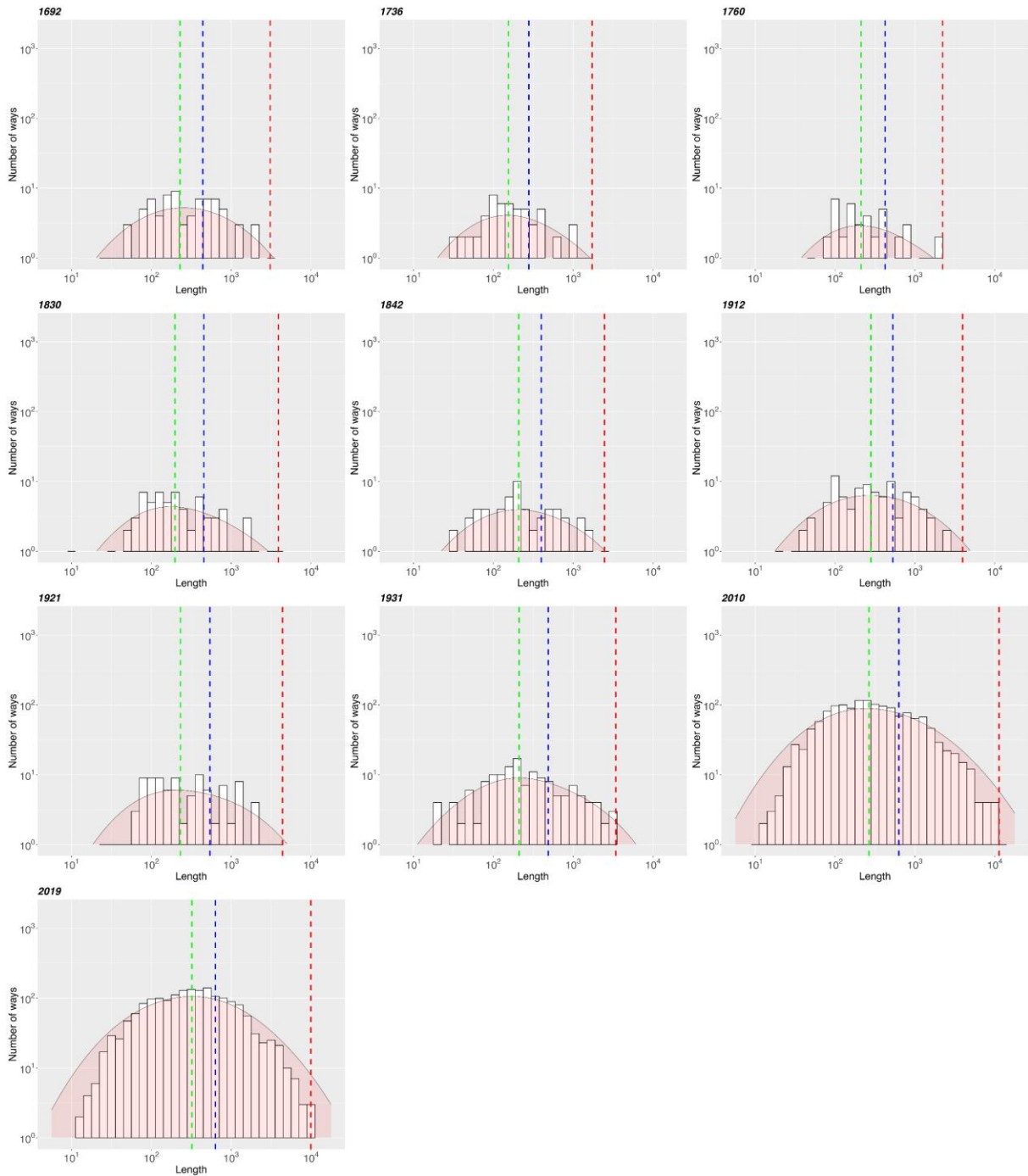


Figure 4.22. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Pontarlier à 10 dates (1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

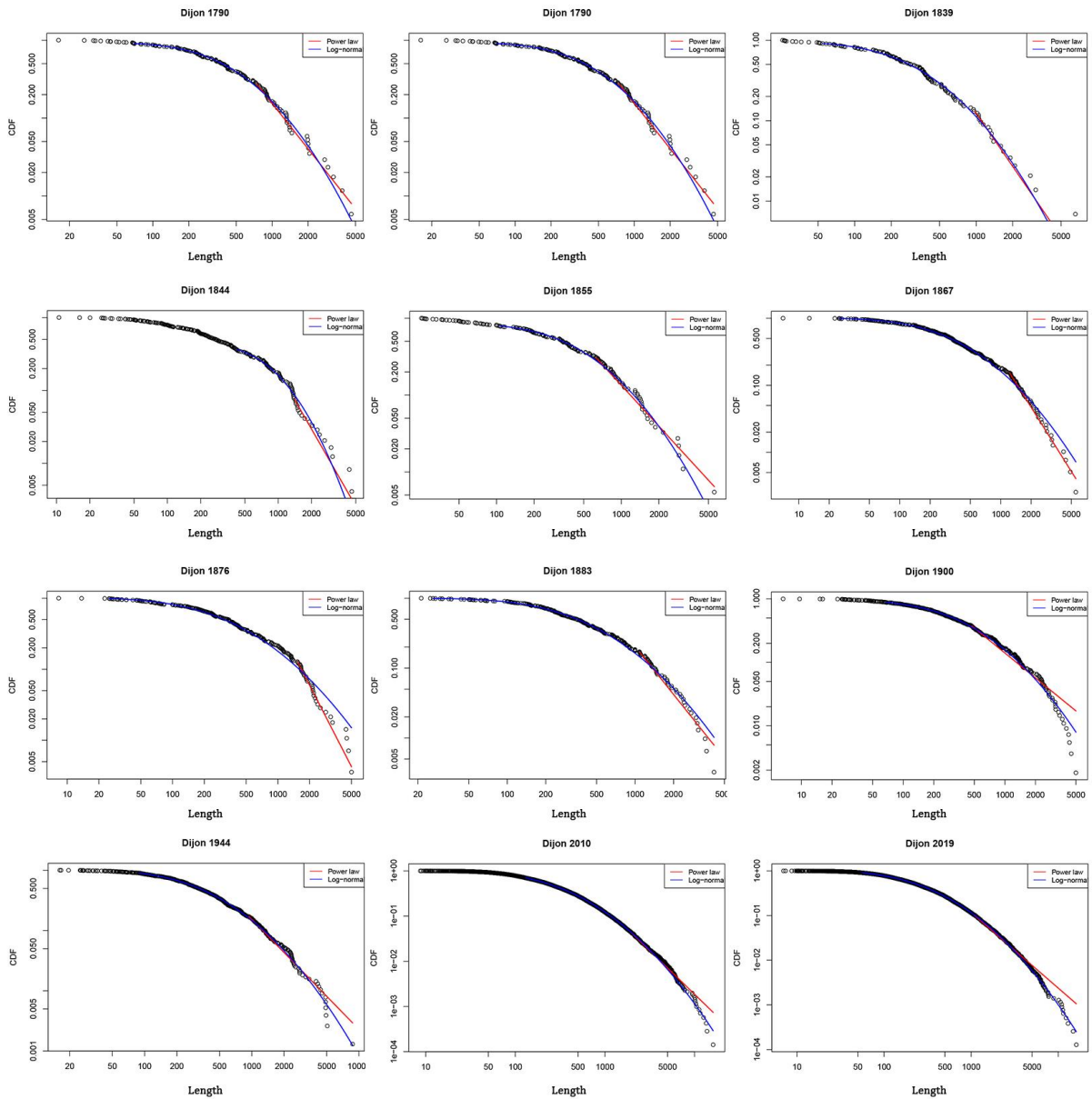


Figure 4.23. Ajustement des distributions de la longueur des voies du réseau de Dijon à des lois de puissance et log-normales en appliquant la méthode du maximum de vraisemblance.

4.2.3.2 Espacement des voies

Les distributions de l'espacement des voies présentent les mêmes propriétés que celles de leur longueur, ce constat étant valable pour les réseaux viaires des trois villes aux différentes dates. Une invariance d'échelle est donc identifiable pour l'espacement des voies qui correspond, par définition, à la longueur moyenne des arcs.

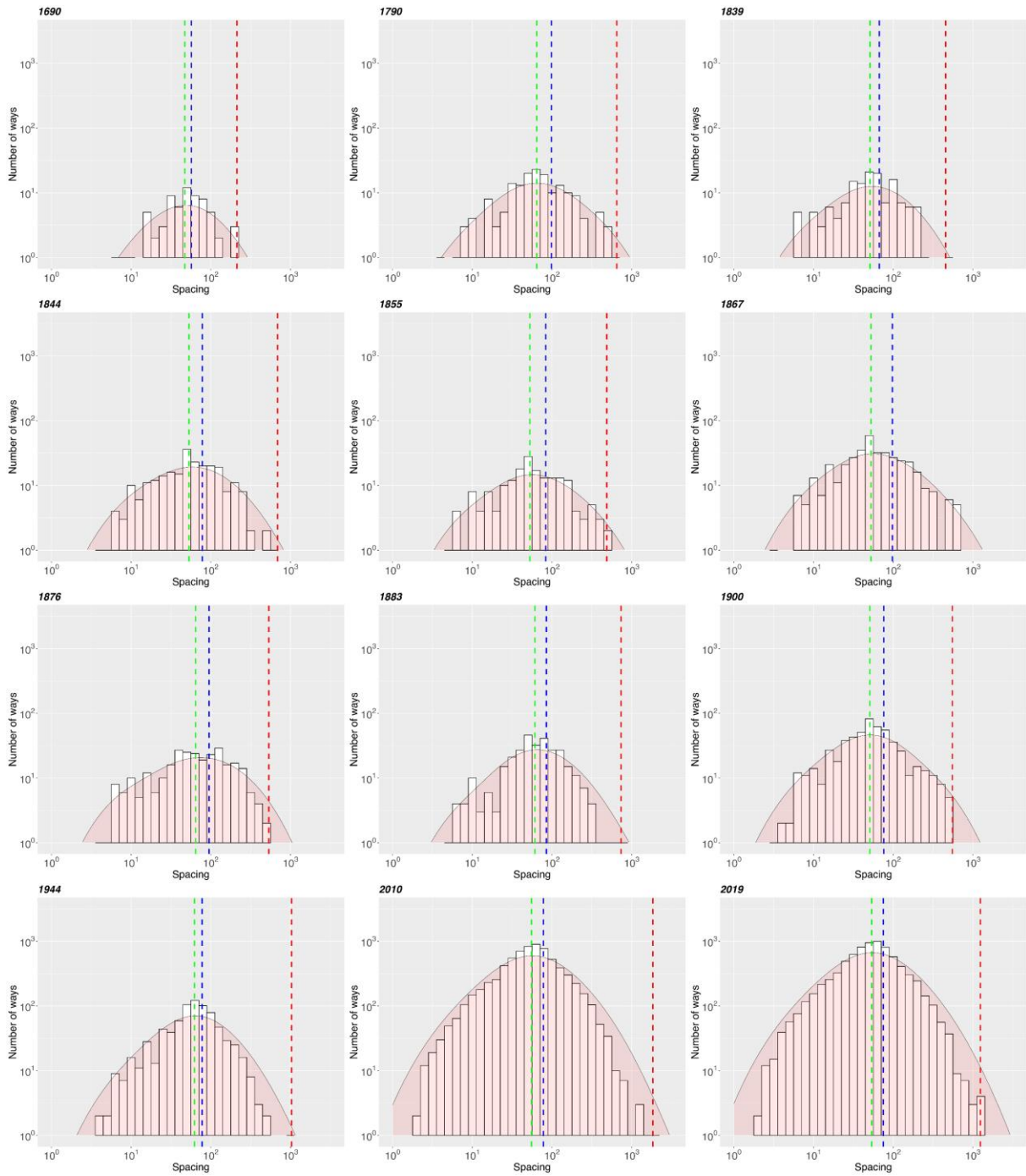


Figure 4.24. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

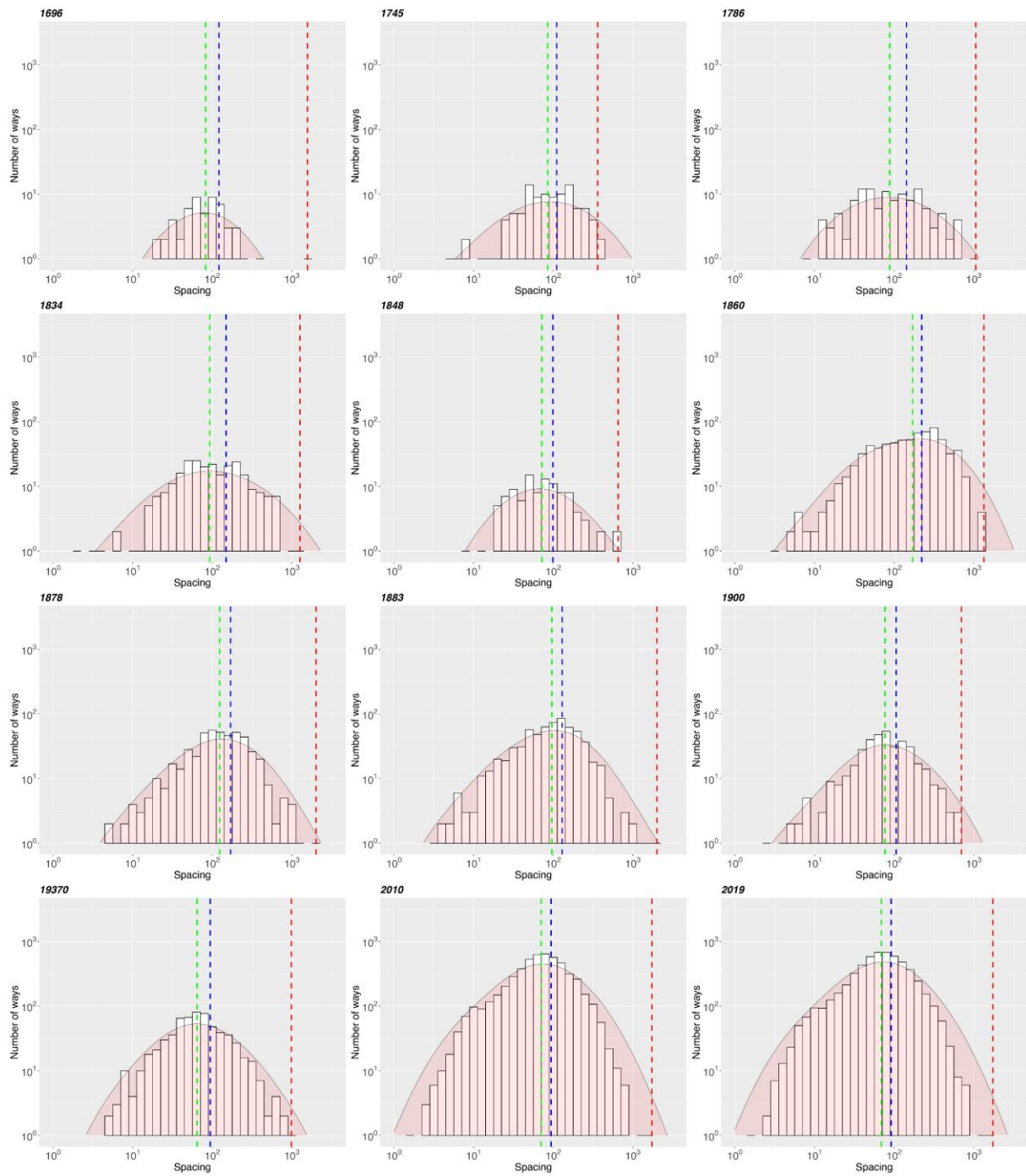


Figure 4.25. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Besançon à 12 dates (1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

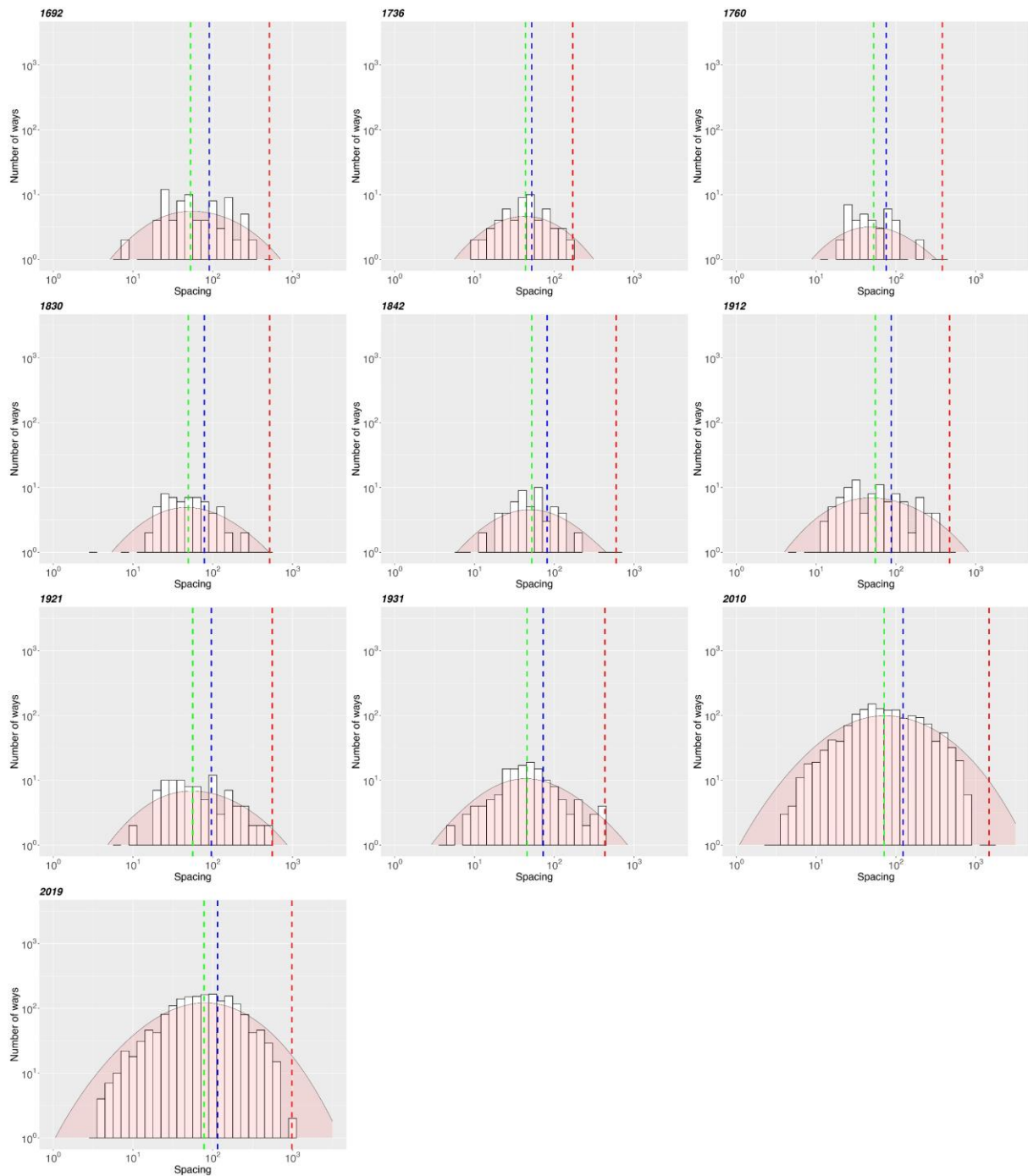


Figure 4.26. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Pontarlier à 10 dates (1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

4.3 Synthèse du chapitre 4

L'existence de dix lois d'échelle relatives à l'évolution des propriétés de l'hypergraphe, identifiées pour les réseaux viaires étudiés, s'explique par le fait que ces réseaux se sont développés de manière incrémentale par l'ajout de nœuds et de segments, suivant une logique de prolongement et de connexion des voies. Les réseaux viaires connaissent en effet une densification et un étalement simultanés. Par exemple, si un bâtiment ou une parcelle est créé(e), il ou elle doit être desservi(e) par le réseau viaire. Pour ce faire, le réseau se ramifie en créant une nouvelle route (branche) pour assurer la connectivité entre toutes les entités spatiales (bâtiments, parcelles, etc.). Ensuite, d'autres bâtiments sont créés et le réseau à l'échelle locale se densifie et s'interconnecte. Ainsi, les réseaux n'évoluent pas uniquement d'une manière arborescente, par prolongement, mais se densifient aussi progressivement.

L'alternance de ces deux mécanismes de base, qui régissent l'évolution des réseaux viaires, est également confirmée par l'observation de l'évolution du ratio du nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$ par rapport au nombre total de nœuds. La relation scalante entre chacun de ces nombres et le nombre total de nœuds est la première propriété de "petit-monde" identifiée. Par ailleurs, les résultats du ratio associant les deux révèlent des phases distinctes dans l'évolution des réseaux pour chaque ville étudiée. Ces phases correspondent soit à une densification caractérisée par la prédominance de structures viaires denses avec un grand nombre d'intersections en forme de X, soit à un étalement avec des structures arborescentes marquées par un grand nombre d'impasses et d'intersections en forme de T. Il est important de noter que, à certaines périodes et pour certains réseaux viaires, les processus d'évolution changent entre chaque paire de dates.

La deuxième propriété de "petit-monde", celle relative aux degrés des voies des réseaux, se manifeste par un nombre important de voies ayant un faible degré, tandis que celles avec un degré élevé sont rares. Cette propriété peut être rapportée au mécanisme d'attachement préférentiel aux voies déjà bien connectées. En effet, afin de garantir l'accès à une parcelle ou à un îlot, il est nécessaire de la ou le connecter au réseau existant en la ou le reliant à une route principale. Cette dernière est donc davantage connectée à l'ensemble du réseau (avec de nombreux liens). La création de la nouvelle route ajoute un lien supplémentaire, et de manière similaire, les futures routes se rattachent également à cette voie, renforçant ainsi davantage son degré.

Enfin, les analyses ont permis d'identifier deux invariances d'échelle en termes de longueur des voies et de leur espacement. Ces deux propriétés dépendent l'une de l'autre car l'indicateur d'espacement se rapporte à la longueur et à la connectivité des voies. Ces propriétés indiquent que l'évolution du réseau viaire suit une logique hiérarchique, par la création de segments qui subdivisent ou prolongent les voies existantes. Ce processus induit une invariance d'échelle dans la structure du réseau viaire : il existe relativement peu de voies très courtes, peu de voies extrêmement longues, et la majorité des voies ont une longueur moyenne.

Les propriétés structurelles identifiées permettent ainsi de décrire, au moyen de lois simples et cohérentes, certains mécanismes présidant à l'évolution des réseaux viaires.

Conclusion de la partie 1

En conclusion de cette première partie, nous pouvons affirmer que notre approche interdisciplinaire, combinant la géohistoire, la géographie urbaine et la science dite "des systèmes complexes", a permis une analyse fine de la morphologie des réseaux viaires ainsi que de leurs évolutions.

En ce qui concerne la méthodologie, à travers la représentation du réseau viaire par un graphe en considérant l'objet "voie", nous a permis d'explorer l'évolution historique des réseaux viaires de trois villes. Les résultats ne sont pas influencés par l'emprise spatiale des réseaux qui varie selon la couverture de chaque carte historique. L'analyse topologique s'est avérée complémentaire de l'analyse de la géométrie métrique des réseaux, nous permettant ainsi de caractériser la structure des réseaux selon une grille de lecture interprétable et compréhensible par les urbanistes et les aménageurs.

En termes de résultats, les analyses morphologiques synchroniques ont permis de décrypter les caractéristiques morphologiques des tissus urbains à partir de celles de leurs réseaux viaires. Partant d'une représentation du réseau viaire par un hypergraphe, représentation totalement dépourvue (a priori) d'information sémantique, nous sommes parvenus à caractériser la hiérarchie et l'ancienneté des voies, les centralités, les motifs viaires, la densité locale des réseaux et leur desserte. Ces résultats valident notre première hypothèse selon laquelle la forme du réseau viaire, qui traverse les époques sans subir de modification majeure dans sa structure, peut être révélatrice de l'organisation et la de croissance passée d'un territoire.

Les analyses diachroniques ont permis une lecture plus fine de l'évolution morphologique des réseaux. Les résultats ont révélé la présence de différents types de structures viaires selon l'échelle d'analyse (globale ou locale). Ces résultats fournissent une première idée des processus d'évolution de ces réseaux ainsi que sur des patrons de formation et de rattachement des nouvelles voies aux structures préexistantes. Ces résultats renforcent la confirmation de notre première hypothèse de recherche.

En termes d'identification des propriétés structurelles des réseaux, les résultats mettent en évidence dix lois d'échelle relatives aux métriques des hypergraphes viaires et à l'emprise spatiale des réseaux. Une propriété de "petit monde" a également été mise en évidence à

l'échelle des réseaux viaires en examinant respectivement le degré des nœuds et des voies. Une troisième propriété concerne l'identification de deux invariances d'échelle en termes de longueurs et d'espacement des voies. Ces résultats contribuent à valider notre deuxième hypothèse de recherche qui stipule qu'il est possible d'identifier certaines propriétés structurelles universelles des réseaux viaires (indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction). Ces résultats apportent les preuves empiriques de ces propriétés, et leur interprétation nous renseigne sur les mécanismes simples sous-jacents à l'évolution morphologique des réseaux viaires au fil du temps.

Les analyses morpho-historiques menées dans cette partie de la thèse nous ont ainsi permis d'investiguer comment des réseaux complexes tels que les réseaux viaires, composés d'entités simples qui évoluent en interaction, en suivant des règles simples, produisent un comportement émergent, collectif et complexe.

Deuxième partie
Approche-typo-morphologique
des réseaux viaires urbains

Introduction de la partie 2

Cette deuxième partie porte sur une approche typo-morphologique des réseaux viaires urbains, en vue de l'identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution de réseau viaire associés.

Dans le chapitre 5, nous présentons les fondements conceptuels et méthodologiques de l'approche typo-morphologique de la forme urbaine et des réseaux viaires urbains.

Dans le chapitre 6, nous commençons par proposer une méthodologie d'identification de motifs viaires à partir du croisement de certains indicateurs parmi ceux mobilisés dans la partie 1 de la thèse. Ensuite, nous proposons une typo-morphologie de voies. L'objectif est de décomposer le réseau viaire en différentes classes (morphotypes) de voies, qui présentent des caractéristiques spécifiques en termes de forme et d'évolution. Les différents morphotypes de voies sont également associés aux processus d'évolution des réseaux viaires et aux patrons de formation ou de rattachement des voies à la trame viaire préexistante, qui ont été identifiés dans la partie 1 de la thèse. Enfin, nous confrontons cette typo-morphologie aux résultats d'une classification statistique, à savoir la classification ascendante hiérarchique, afin de valider les morphotypes de voies identifiés au regard des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier.

Chapitre 5

Typo-morphologies urbaines : aperçu des méthodes et principaux résultats

Dans ce chapitre, nous présentons différentes approches typo-morphologiques de la forme urbaine, des tissus urbains et de réseaux viaires.

La typo-morphologie, fondée sur la notion de "type", est une approche fondamentale en architecture et en urbanisme, ainsi que dans le champ de la morphologie urbaine (Caniggia, 1963; Muratori, 1967; Rossi, 1966; Rossi & Brun, 1981). L'approche typo-morphologique est mise en œuvre à différents niveaux, à savoir celui des infrastructures (comme la voirie et le parcellaire) ainsi que celui des superstructures (comme les bâtiments et les espaces publics). L'approche consiste en une analyse géométrique des formes et des orientations des entités les unes par rapport aux autres, ainsi qu'une analyse des dimensions des formes urbaines et leurs proportions relatives (Badeche, 2014). Ainsi, la typo-morphologie se définit théoriquement comme la fusion de la morphologie urbaine et de la typologie architecturale.

Les typo-morphologies peuvent concerner différents niveaux d'analyse (ou d'organisation) : le niveau global, qui englobe la structure de la ville dans son ensemble (son ossature, sa configuration générale), le niveau intermédiaire, qui concerne le tissu urbain et où l'on étudie l'arrangement spatial des éléments physiques de la ville, notamment le réseau de routes, les zones bâties et les espaces non bâtis, et le niveau local, qui se rapporte aux îlots et aux bâtiments.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales approches typo-morphologiques relevant des deux premiers niveaux d'analyse : la forme urbaine globale (section 5.1) et les trames viaires associées aux tissus urbains (section 5.2).

Encadré 1 : Définition de la notion "type"

La notion "type" en architecture et en urbanisme est associée à la notion de "modèle", les deux étant basées sur des définitions du théoricien Quatremère de Quincy. « *Le mot type présente moins l'image d'une chose à copier ou à imiter parfaitement, que l'idée d'un élément qui doit lui-même servir de règle au modèle [...]. Le modèle, entendu dans l'exécution pratique de l'art, est un objet qu'on doit répéter tel qu'il est ; le type est au contraire un objet d'après lequel chacun peut concevoir les ouvrages qui ne se ressembleraient pas entre eux. Tout est précis et donné dans le modèle ; tout est plus ou moins vague dans le type* » (Rossi, 2001). Ainsi, la notion de "type" dans le cadre d'une approche typo-morphologique fait référence à des modèles ou à des formes urbaines caractéristiques qui se retrouvent dans différentes villes. « *Le type est l'ensemble des caractères organisés en un tout constituant un instrument de connaissance par abstraction rationnelle et permettant de distinguer des catégories d'objets ou de faits. Autrement dit, un type est un objet abstrait, construit par l'analyse, qui rassemble les propriétés essentielles d'une catégorie d'objets réels et permet d'en rendre compte avec économie* » (Panerai, 1980). Les types peuvent être des arrangements spatiaux, des motifs architecturaux, ou des configurations de rues qui se sont développés au fil de l'histoire en réponse à divers besoins et contraintes.

5.1 Typo-morphologies de formes de villes

Encadré 2 : Définition de "forme urbaine"

Le terme "forme", est défini par le CNRTL* comme « *la qualité d'un objet, résultant de son organisation interne, de sa structure, concrétisée par les lignes et les surfaces qui le délimitent* ». La définition de la forme urbaine varie selon les domaines qui l'étudient, la géographie, l'urbanisme, l'architecture, et la physique entre autres. Elle est initialement définie dans les années 60 comme l'organisation spatiale des composantes physiques (tangibles) qui composent la ville (Alexander, 1965). Elle a été également caractérisée par des aspects intangibles qui découlent de l'histoire et de la mémoire des habitants (Rossi, 1966). Levy (2005) a souligné que « *La forme urbaine n'est jamais une donnée a priori, elle est toujours un objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition, d'une représentation, d'un point de vue sur la forme* ». Il met également en évidence l'échelle considérée comme une distinction importante qui se manifeste fréquemment dans les diverses définitions de la forme urbaine.

La forme urbaine englobe donc la configuration des rues, des bâtiments, des espaces publics, des infrastructures, et de tout ce qui façonne la structure physique de la ville.

En géographie, les chorèmes définis par Brunet (1986) constituent une des premières tentatives de définition de typo-morphologies de villes. Les chorèmes sont « *des structures élémentaires de l'espace qui se représentent par des modèles graphiques* » (Brunet, 1986). Ces modèles graphiques associent des formes simplifiées d'objets géographiques à des dynamiques spatiales et territoriales (Figure 5.1)²⁸. Ils sont principalement utilisés pour créer des représentations graphiques simples des structures urbaines (Capitaine et al., 2001). Baro

²⁸ Quatre formes de bases de la cartographie (le point, la ligne, l'aire et le réseau) permettent de traduire les "lois de l'espace" qui se présentent comme suit : Le **maillage** : appropriation et partition du territoire. Le **quadrillage** : mise en relation des espaces. L'**attraction** ou gravitation : force des relations entre les espaces. Le **contact**, : interface ou frontière. Le **tropisme** : attraction suivant une direction. La **dynamique territoriale** : chorème représentant le temps. Et la **hiérarchie** : importance d'un élément par rapport à d'autres.

* Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. <https://www.cnrtl.fr/definition/academie8/forme>

(2015) les a utilisées et développées pour décrire les caractéristiques communes des structures urbaines en France (Figure 5.2).

Certains chercheurs définissent des typo-morphologies de la forme des villes de manière statique, tandis que d'autres les conçoivent comme des représentations de processus évolutifs et dynamiques. L'approche statique consiste à identifier l'objet "forme urbaine" et sa structure à un moment précis, appelé une "période morphologique" (Whitehand, 2001). Certains chercheurs s'efforcent d'abstraire la forme urbaine en la décomposant en plusieurs entités statiques qui, une fois assemblées, forment un ensemble (Borsdorf, 2004) (Figure 5.3). L'approche évolutive se penche, elle, sur les règles de formation et de transformation des formes urbaines ainsi que sur les différents états morphologiques qu'elles peuvent prendre à travers le temps (Caniggia & Maffei, 1979), en identifiant les processus d'évolution sous-jacents (Allain, 2004) (Figure 5.4).

D'autres chercheurs considèrent que, pour comprendre pleinement les diverses manifestations historiques de la forme urbaine, il est nécessaire d'adopter une approche qui exclut toute dimension temporelle. Elle envisage la notion de type comme une forme transhistorique, un archétype formel atemporel, tout en soulignant que le nouveau est conditionné par l'ancien et que l'évolution est déterminée par la permanence (Levy, 2005).

Les chercheurs et praticiens de l'aménagement se basent aussi sur des archétypes de formes de villes soit, pour étudier l'impact de la forme urbaine sur divers aspects tels que l'environnement (Steemers & Nikolopoulou, 2014), l'efficacité énergétique (March & Martin, 1972; Steemers, 2003), la mobilité des personnes (Aguilera & Mignot, 2010; Le Néchet & Aguilera, 2012), soit pour mener une analyse comparative systématique des formes urbaines (Ratti et al., 2003).

De manière générale, certains archétypes sont considérés comme génériques ou simplistes, tandis que d'autres sont jugés très complexes. Par ailleurs, les différentes méthodes de définition de ces formes de villes archétypales n'intègrent pas forcément les réseaux viaires (Stead & Marshall, 2001).

	POINT	LIGNE	AIRE	RESEAU
maillage				
	chef-lieu	limite administrative	Etat, région ...	centres, limites et polygones
quadrillage				
	tête de réseau carrefour	voies de communication	aire d desserte irrigation, drainage	réseau
attraction				
	points attirés satellites	lignes d'isotropie orbites	aire d'attraction	liaisons préférentielles
contact				
	point de passage	rupture, interface	aire en contact	base tête de pont
tropisme				
	flux directionnel	ligne de partage	surfaces de tendances	dissymétries
dynamique territoriale				
	évolutions ponctuelles	axes de propagation	aires d' extension	tissu du changement
hiérarchie				
	semis urbain	relation de dépendance limites administratives	sous-ensemble	réseau maillé

Figure 5.1. Table chorématique. Source : Brunet, (1986)

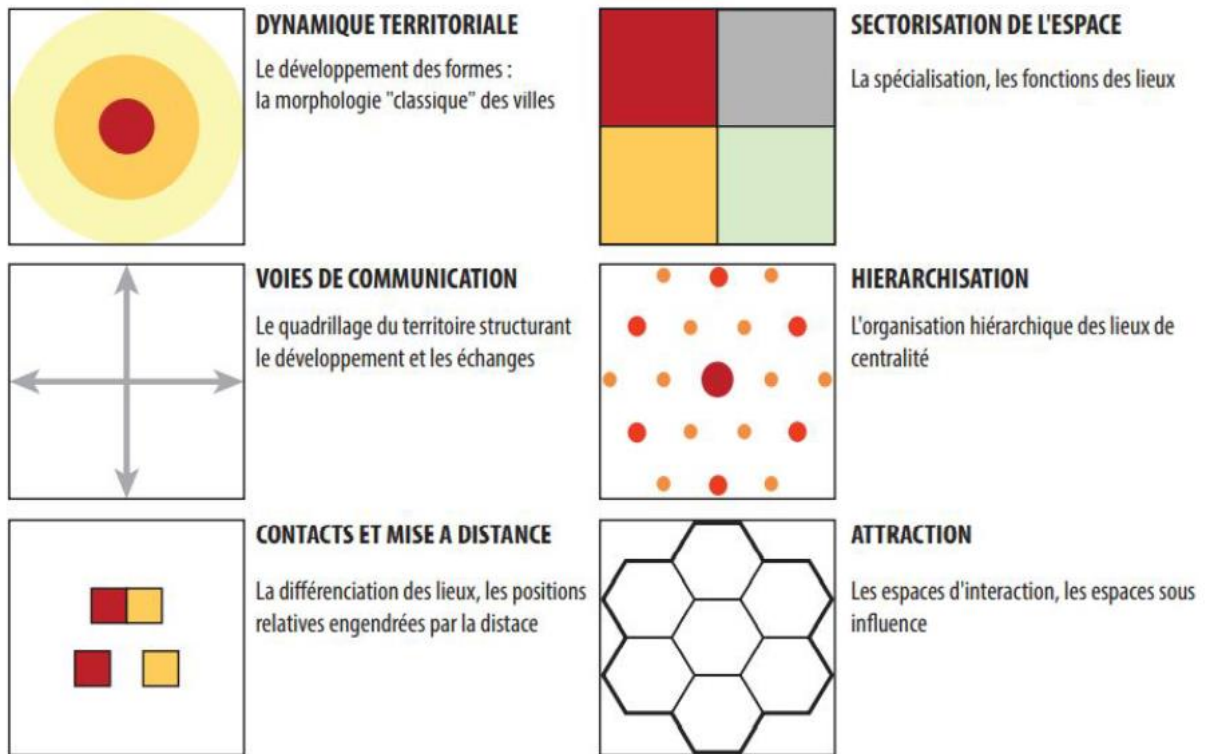


Figure 5.2. Les chorèmes urbains. Source : Baro (2015).

	Type	Structure of living	Transport system	Green structure	Commerce and mall location
BAB/San Sebastian	Polynuclear				
Belfast	container				
Berlin	patchwork				
Cergy Pontoise/ Paris	centre & subcentres				
Copenhagen	fingers				
Florence	polynuclear				
Helsinki	fingers				
Innsbruck	fingers				
Nikosia/ Lefkosia	patchwork				
Zürich	patchwork				

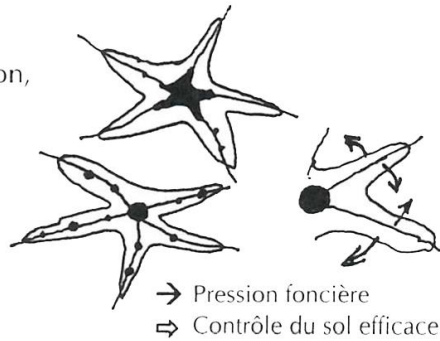
Figure 5.3. Représentation schématique de dix villes européennes.

Source : Borsdorf (2004).

1. Modèle en étoile

1A. Avec grandes radiales (Copenhague, Lyon, Nantes)

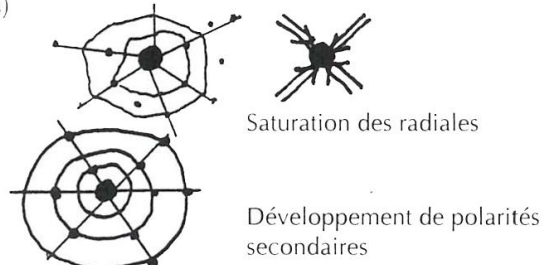
1B. Polycentrique (Washington, Stockholm)



2. Radio-concentrique (toile d'araignée avec fortes radiales et liaisons tangentielles variables)

2A. Connexions concentriques faibles (Paris, Vienne)

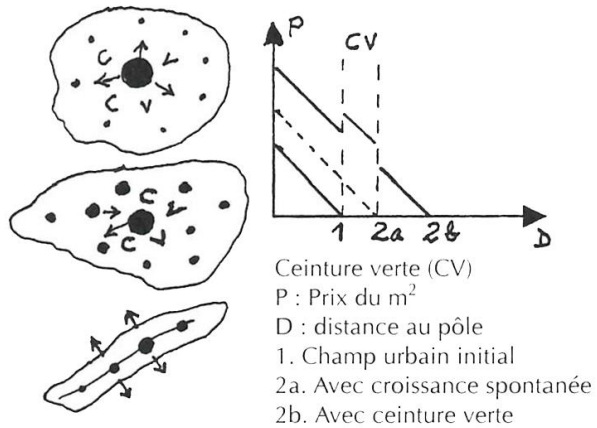
2B. Connexions concentriques fortes (Atlanta, Baltimore)



3. Polycentrique discontinu

3A. Faibles polarités périphériques (Rennes, Pékin plan de 1992)

3B. Fortes polarités périphériques (Londres, Moscou, Stuttgart)



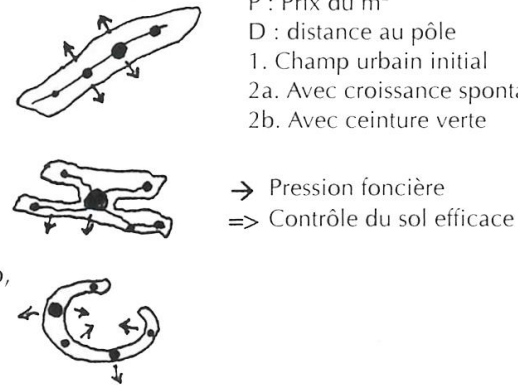
4. Linéaire

Plus ou moins polycentrique

4A. Corridor (Le Caire, Seattle)

4B. Axe double avec villes nouvelles SDRIF (Paris)

4C. Circulaire (aire urbaine de San Francisco, Randstad Holland)



5. Réticulaire polycentrique

5A. En nappe plus ou moins dense (Detroit, Los Angeles)

5B. Galactique avec noyaux urbains forts (Ruhr, Rhin-Neckar)

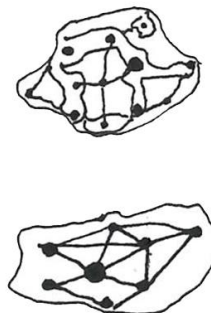


Figure 5.4. Quelques formes archétypales de villes et leurs possibles évolutions.
Source : Allain (2004).

5.2 Typo-morphologies de trames viaries

La morphologie urbaine représente le fondement de méthodes qualitatives ou quantitatives visant à extraire les identités spatiales distinctes des zones urbaines, appelées **motifs (patterns)** ou **morphotypes** pour définir une **typo-morphologie** de trames viaries. Les applications de l'approche typo-morphologique aux réseaux viaries ont été conditionnées par la disponibilité des données cartographiques ou vectorielles, ce sont donc les approches qualitatives qui ont été développées en premier. Ensuite, lorsque l'accès aux données s'est démocratisé, les études quantitatives pour la classification des trames viaries ont connu un essor significatif.

5.2.1 Trames viaries archétypales

Les premiers modèles de forme urbaine basés sur le réseau viaire ont été proposés par (Lavedan, 1926, 1959). Ces modèles renvoient à la forme géométrique du plan de la ville et correspondent à une catégorisation des tracés des rues (Laterrasse, 2018; Levy, 2005). Dès l'Antiquité, l'une des catégorisations les plus fondamentales est celle du plan hippodamien (dit en damier, quadrillé, ou orthogonal) (Figure 5.5). Ce modèle est caractérisé par des rues qui se croisent à angles droits et par deux rues principales qui se croisent centralement : le *Cardo*, l'axe Nord-Sud et le *Decumanus*, l'axe Est-Ouest (Desmarais, 1993). Le deuxième modèle est le plan radial, qui se développe à partir d'un point d'intérêt majeur avec des rues qui rayonnent depuis ce point central (Figure 5.6), créant une disposition en soleil ou en éventail (Pawlowski, 1992). Le plan radioconcentrique est une évolution de ce modèle radial (Chouquer, 1995). Il a été largement adopté en Europe médiévale à mesure que les villes se développaient, avec des voies de circulation qui émergent en cercles concentriques et connectent les voies radiales. Un troisième modèle moins fréquemment discuté est le plan linéaire (Figure 5.7), qui se caractérise par des rues qui suivent généralement les contraintes naturelles du terrain, tel qu'un cours d'eau ou une ligne côtière. L'urbanisation s'articule autour de cet axe central, avec une organisation en îlots orthogonaux de taille régulière. Certains modèles combinent plusieurs de ces modèles, parfois à différentes échelles, à l'image du plan radio-quadrillé (Watteaux, 2003) (Figure 5.8).

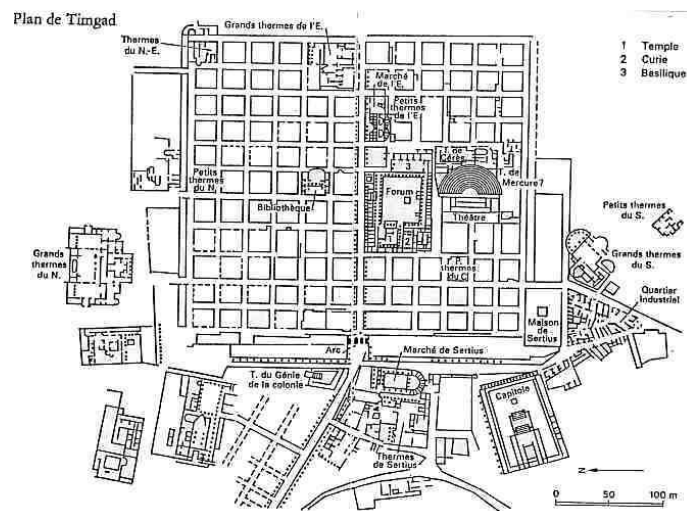


Figure 5.5. Plan hippodaméen de Timgad (Algérie). Source : Mattingly & Salmon (2002).

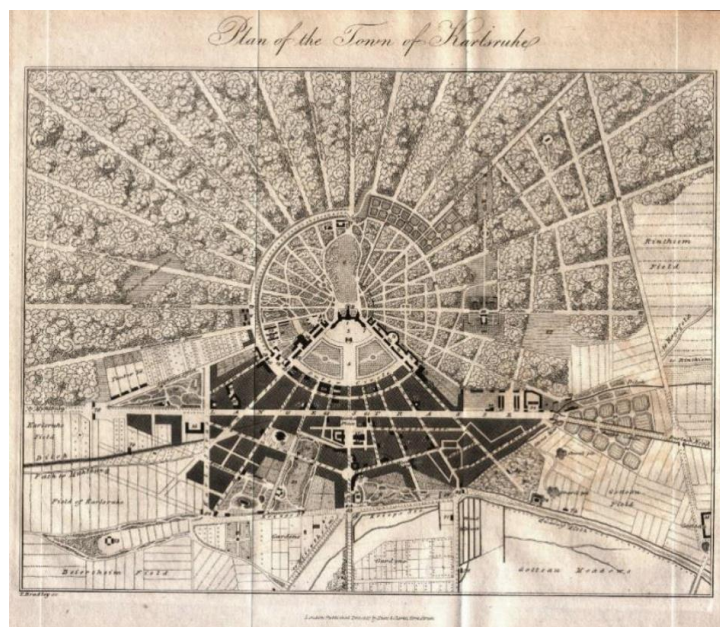


Figure 5.6. Plan de la ville de Karlsruhe (Allemagne) en 1827 réalisé par T. Bradley²⁹.

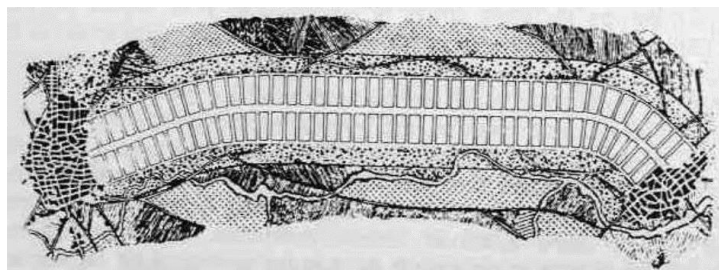


Figure 5.7. Plan du projet de la cité linéaire (1913) d'Arturo Soria.
Source : Larraga & Ramirez (2018).

²⁹ Source : http://www.karlsruhe-antiquarisch.de/Plane/_Plan_of_the_Town_of_Karlsruhe_/plan_of_the_town_of_karlsruhe_.html

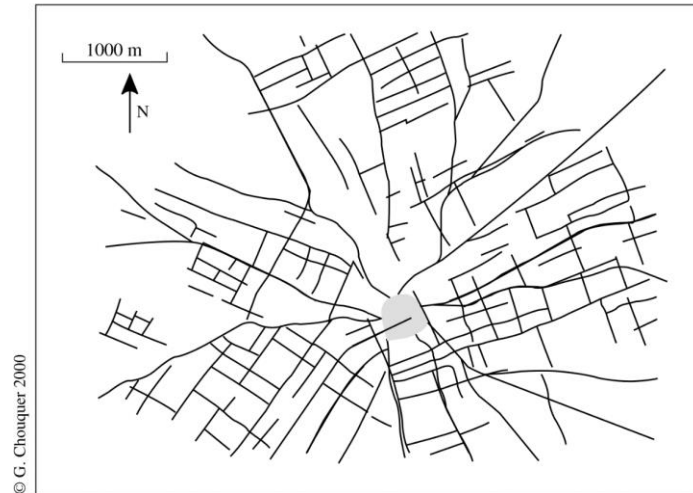


Figure 5.8. Plan radio-quadrillé des réseaux viaires et parcellaires de Brie-Comte-Robert (Seine-et-Marne), d'après un cliché IGN de 1956. Source: Watteaux, 2003.

5.2.2 Classifications qualitatives de trames viaires

Les premiers travaux de classification qualitative des types de réseaux viaires remontent à la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (Abrams & Kolodny, 1971; Bell & Lida, 1997; Crowther & Echenique, 1972; Keeble, 1969; Lynch, 1981; Southworth & Owens, 1993; Spreiregen, 1965). S. Marshall, (2005) présente une revue de littérature détaillée sur ces premiers travaux dans son livre "Steets and patterns". Ces travaux partaient du postulat que l'analyse de la structure des villes ne doit pas se limiter à l'analyse de la forme globale mais doit aussi tenir compte de l'organisation du réseau de transport, en particulier le réseau viaire (Stead & Marshall, 2001).

Dans son livre "Great Streets", A. Jacobs (1993) a comparé la conception et l'aménagement des rues de plusieurs villes du monde à partir d'une représentation simplifiée de leur réseau viaire (en ne considérant que l'axe des rues), et en les affichant à la même échelle sur une fenêtre carrée de dimension identique (1km²) (Figure 5.9). L'identification de différents types de réseaux, de manière qualitative, a contribué à une caractérisation typo-morphologique de villes et de tissus urbains à partir des propriétés de leur réseau viaire, notamment par l'analyse visuelle de sa géométrie, de la taille des blocs qu'il délimite, et des angles d'intersection entre les rues.

L'identification de motifs viaires élémentaires sur la base des rues représentées par leur axe a aussi été réalisée par Bretagnolle et Delisle (2010). Ces deux auteurs ont étudié une sélection d'une quinzaine de villes européennes et états-uniennes et ont abouti à la distinction de deux familles de villes : celles caractérisées par des trames viaires plutôt orthogonales aux Etats-

Unis, et celles présentant des trames viaires radioconcentriques en Europe (Figure 5.10). L'objectif était d'élaborer une forme type pour chacun des continents en vue d'applications dans des travaux de modélisation urbaine.

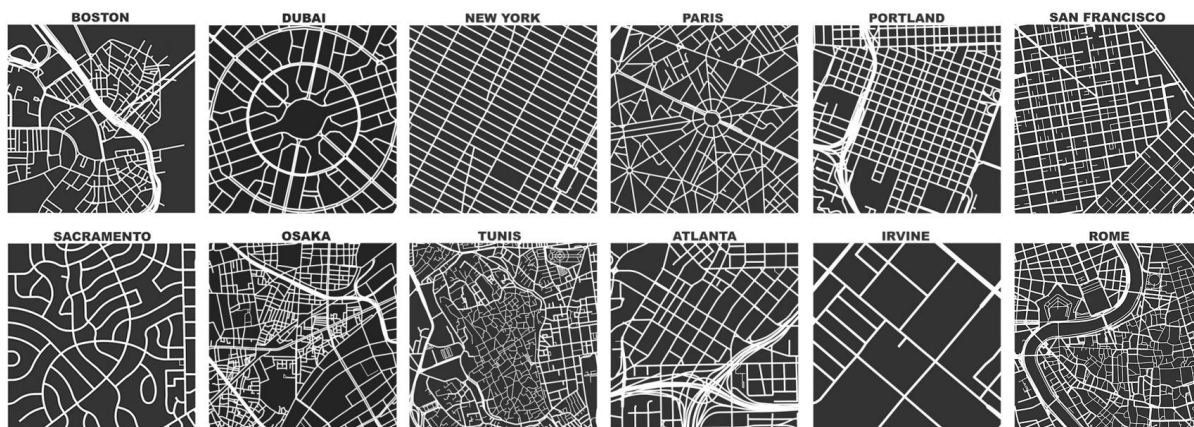
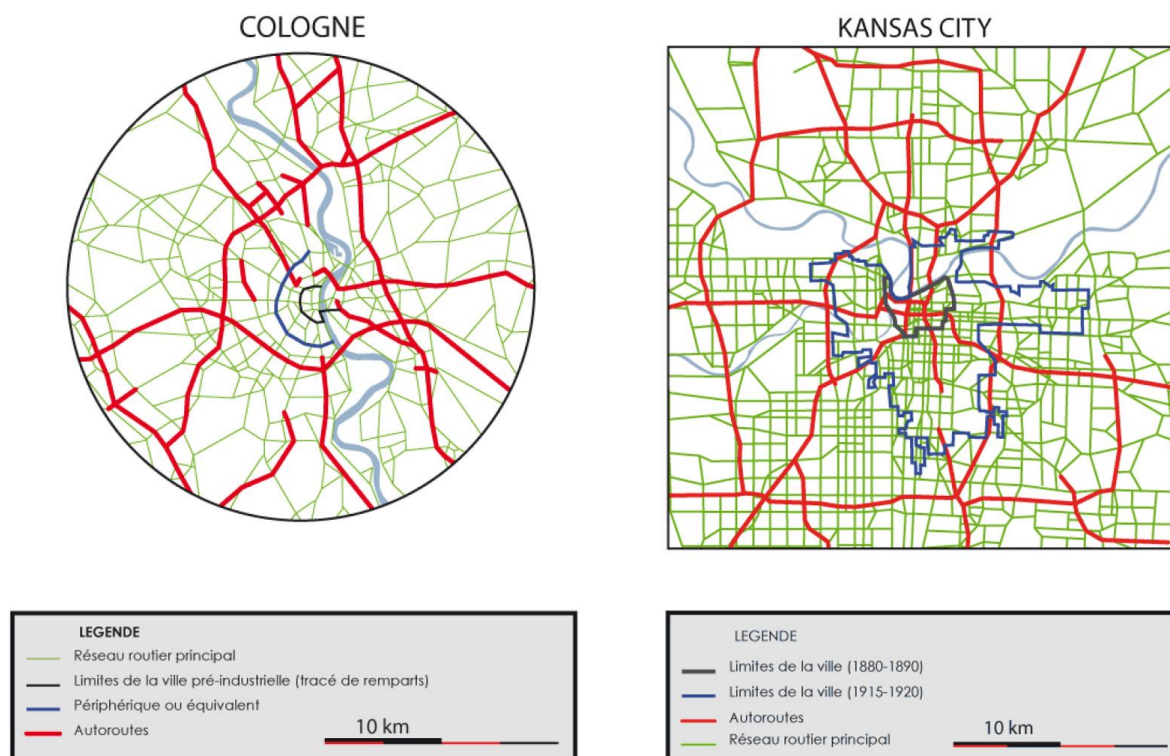


Figure 5.9. Réseaux viaires de différentes villes à la même échelle sur une fenêtre carrée de taille identique (1km²) réalisé par Geoff Boeing, inspiré par Great Streets d'Allan Jacobs (Jacobs, 1993). Source : (Boeing, 2017).



Sources : Geopolis, Maps.google, cartes historiques, sites officiels de villes

Figure 5.10. Exemples de trames viaires simplifiées en Europe et aux Etats-Unis (sélection d'agglomérations comprises entre 1 et 3 millions d'habitants).

Source : Bretagnolle et Delisle (2010)

5.2.3 Classifications quantitatives de trames viaires

Les critères de classification quantitative des trames viaires dans la littérature scientifique sont variés et souvent propres au contexte particulier de chaque étude (Domingo, 2016 ; Qi & Li, 2015). Certains chercheurs considèrent le nombre de croisements présents dans un réseau tandis que d'autres se concentrent sur la géométrie des segments de rues, les distinguant selon leur caractère rectiligne ou sinueux. La forme globale du réseau, qu'elle soit radiale, concentrique ou autre, peut également servir de base à une classification. Les motifs viaires sont en général associés à des tissus urbains spécifiques (Araldi & Fusco, 2019).

Encadré 3 : Définition de "tissus urbain"

Lynch (1964), dans son travail pionnier où il identifie cinq éléments clés qui façonnent la ville, évoque le terme "quartier" en faisant référence à la notion de tissu urbain. Il définit un "quartier", comme un secteur relativement vaste de la ville, perçu comme une unité par ses habitants et qui possède des caractéristiques spécifiques leur permettant de l'identifier. Il peut s'agir d'une région géographique délimitée par des frontières physiques telles que des voies de circulation ou des barrières naturelles, mais ce peut également être une unité perçue de manière subjective. Dans les années 80, un tissu urbain est défini dans le dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement comme : « *l'ensemble des éléments du cadre urbain qui constituent un tout homogène* » (Choay & Merlin, 1988). Pour (Levy, 1988, 2005), le tissu urbain est un agencement d'éléments divers, notamment les bâtiments, les infrastructures, les rues et les espaces publics, constituant une structure homogène. Hamaina et al. (2012) définissent le tissu urbain comme : « *un fragment spatial d'une zone urbaine qui se caractérise par son homogénéité morphologique (en termes de bâti, d'espace ouvert et de composition entre les deux) et qui est souvent délimité par des éléments structurants introduisant un effet de coupure ou de discontinuité avec les tissus adjacents. Cette homogénéité morphologique confère souvent au tissu une logique de fonctionnement à son tour homogène pour correspondre finalement à une unité urbaine pertinente dans l'aménagement et la gestion de la ville* ».

5.2.3.1 Des typo-morphologies basées sur des indicateurs quantitatifs

En considérant une large variété de réseaux viaires (Figure 5.11), S. Marshall (2005) a proposé une méthodologie de classification quantitative des motifs viaires à partir de leurs relations topologiques. Sa méthodologie prend en compte la présence ou l'absence de boucles (*cells*) et d'embranchements (*branchings*). Elle est basée sur la mesure de la connectivité des liens du graphe viaire construits à partir de la carte axiale (méthode de syntaxe spatiale). Cinq morphotypes de réseaux viaires sont distingués (linéaire, arborescent, radial, cellulaire et hybride), qui varient des motifs arborescents faiblement connectés aux motifs cellulaires fortement connectés (Figure 5.12). Cette classification, que Marshall qualifie de "taxonomie systématique", est applicable à des réseaux comportant des tronçons rectilignes ou sinueux.

Marshall (2005) a proposé une deuxième classification des réseaux viaires en quatre types (A, B, C et D) en associant les configurations de base en grille ou arborescentes à une échelle (microscopique ou macroscopique) (Figure 5.13), ce qui lui permet de prendre en compte des caractéristiques à la fois locales et globales des réseaux. Marshall (2005) rapporte cette deuxième classification des motifs viaires à un gradient centre-périphérie (Figure 5.14).

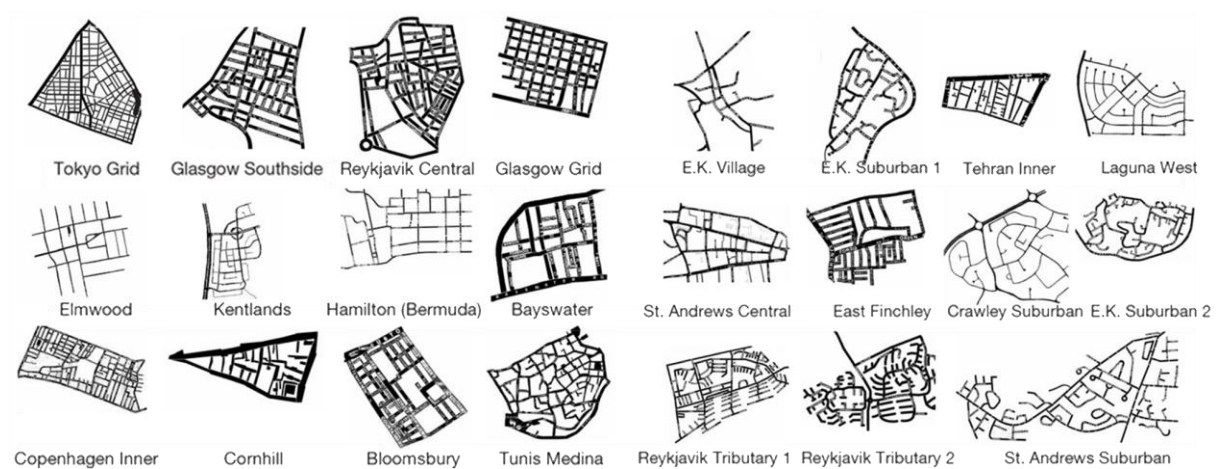


Figure 5.11. Exemples de motifs de réseaux viaires. Source : Marshall (2005).

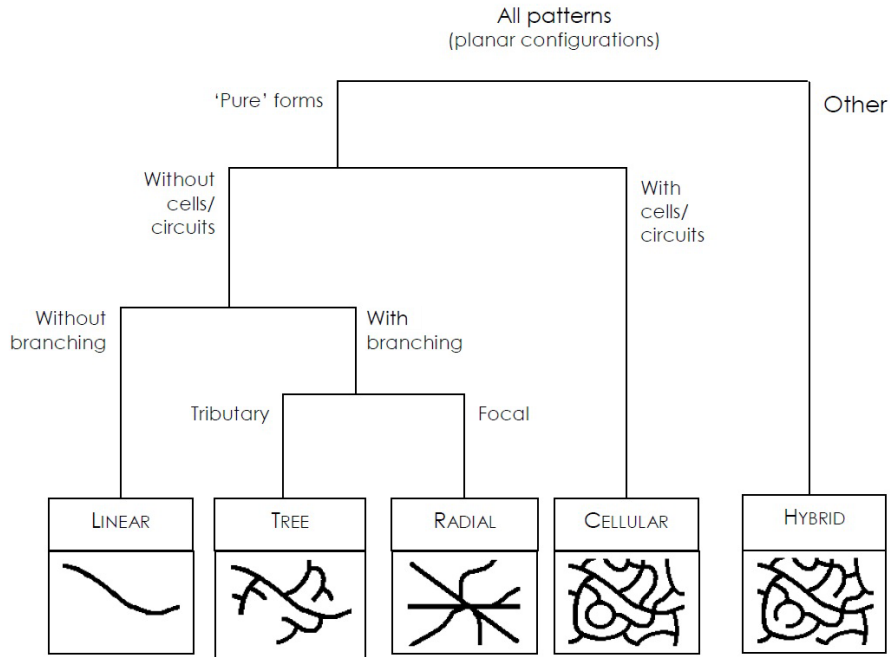


Figure 5.12. Taxonomie des motifs de réseaux viaires. Source : Marshall (2005).

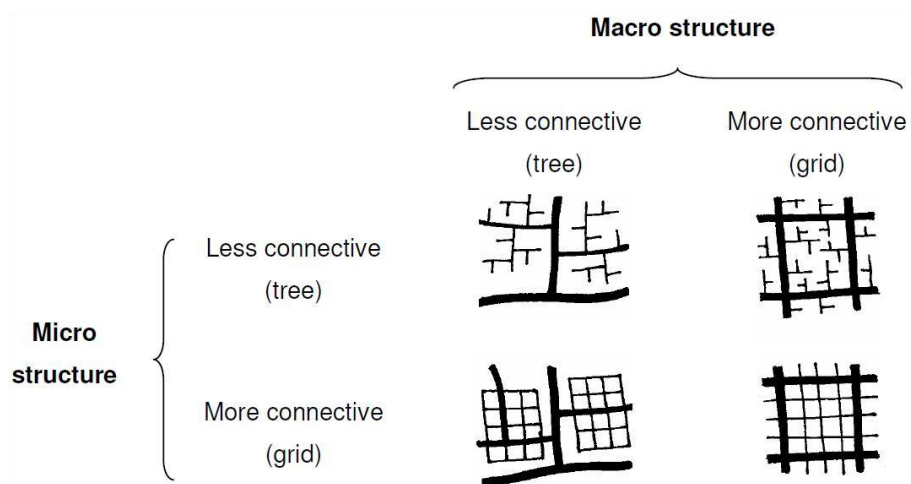


Figure 5.13. Exemple de deux structures, l'une arborescente (*tree*) et l'autre en grille (*grid*), à deux échelles (micro et macro). Source : Marshall (2005).

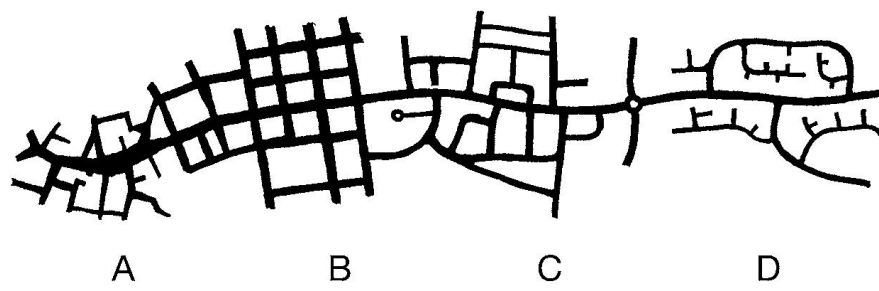


Figure 5.14. Les quatre types de réseaux viaires A, B, C et D de la Figure 5.13 présentés comme s'ils s'étendaient du centre de la ville (à gauche) à la périphérie (à droite).

Source : Marshall (2005).

Zhang (2005) a, lui, distingué trois types de motifs viaires : les motifs étoilés, les motifs quadrillés et les motifs irréguliers. Cette classification se base sur le nombre de connexions à chaque intersection, en combinant également la longueur et les attributs des routes (lorsqu'ils sont disponibles). Cette classification en trois classes a été adoptée également dans le cadre de travaux de modélisation urbaine (Parish & Müller, 2001; Perret, 2006). Ces typomorphologies sont définies principalement en fonction du motif dominant ou de la combinaison de motifs, en se fondant sur des critères tels que les angles d'intersection et les longueurs des segments. Perret (2006) considère ainsi trois motifs, en se basant sur des règles géométriques (Figure 5.15). Le premier correspond à réseau en damier, où les routes se croisent à angle droit et forment des blocs rectangulaires avec des longueurs et des largeurs maximales. Le deuxième est radial ou radioconcentrique, avec des routes principales qui suivent un tracé circulaire et connectent des routes radiales depuis le centre vers la périphérie. Le troisième concerne les branchements de routes associés à la topographie du terrain : les rues de dénivelé faible sont rectilignes tandis que celles de dénivelé fort sont sinueuses.

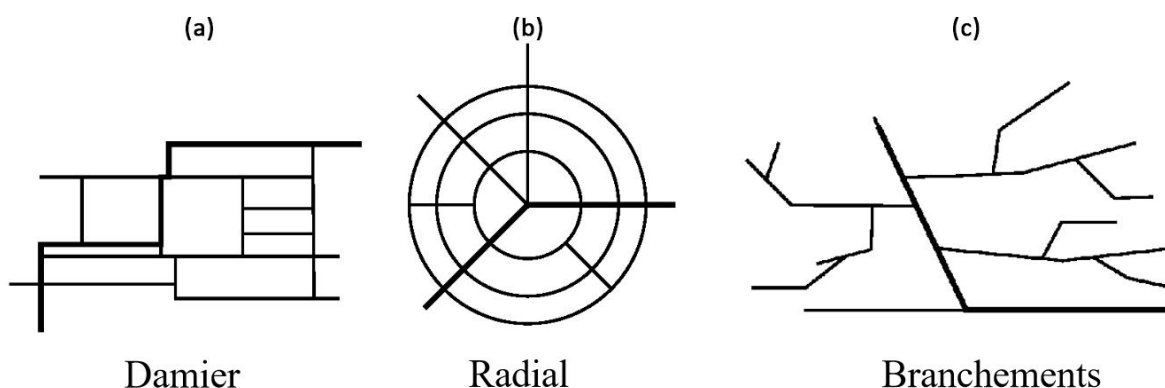


Figure 5.15. Sélection de motifs fréquents de rues. Source : Perret (2006).

L'application de la théorie des graphes pour l'analyse des réseaux viaires a également donné lieu à plusieurs travaux de classification typo-morphologique. Au cours de la dernière

décennie, ces travaux ont porté sur les relations topologiques et les similitudes géométriques entre les différentes entités (nœuds, liens, voies) du réseau viaire (Bettencourt, 2021). Les motifs géométriques (*patterns*) que tracent les réseaux de rues sont souvent associés à différents types de tissus urbains ou de formes de villes (villes quadrillées, villes radioconcentriques, villes organiques, etc.) (Buhl et al., 2006; Cardillo et al., 2006; Crucitti et al., 2006)).

Pour Xie et Levinson (2007), les motifs viaires peuvent être identifiés et classifiés à partir de cinq indicateurs topologiques et géométriques ("*ringness*", "*webness*", "*beltness*", "*circuitness*" et "*treeness*"). Ces indicateurs ont été appliqués pour étudier 16 réseaux théoriques, dérivés de quatre réseaux théoriques de base. Ces réseaux de base se distinguent par les diverses directions possibles pour se déplacer à partir de n'importe quel point du réseau vers un autre, et sont respectivement désignés sous les noms de réseaux à angle 90°, 45°, 30° et réseau complètement connecté. Heinzle et Anders (2007) ont, eux, identifié quatre types de réseaux : linéaires, en grille, en étoile et en anneaux. Strano et al. (2013) ont proposé une classification des réseaux viaires de dix villes européennes en se basant sur les mesures d'accessibilité (introduite par Travençolo et Costa, (2008)), et de rectitude (*straightness centrality*) (introduite par Latora et Marchiori, (2001)). Louf et Barthelemy (2014) ont proposé une méthode quantitative qui leur a servi à classer 131 villes dans le monde en quatre grandes familles. Pour chaque famille de villes, des motifs de réseaux viaires ont été identifiés en se basant sur un facteur de forme des îlots urbains (Figure 5.16).

Une même ville peut être caractérisée par différents motifs de trames viaires. Qi et Li (2015) ont distingué six motifs de réseaux viaires typiques (Figure 5.17) à partir de l'analyse de réseaux viaires de plusieurs villes en Nouvelle-Zélande et dans la région de Hong Kong. Boeing (2019) a proposé une méthodologie de classification basée sur l'analyse de l'entropie³⁰ et de l'orientation des réseaux viaires de 100 villes du monde entier. Cette méthodologie inclut également d'autres indicateurs tels que la longueur moyenne des segments, le degré moyen des nœuds, la proportion d'intersections à quatre voies et le nombre d'impasses dans le réseau. De plus, il introduit un nouvel indicateur d'*ordre d'orientation* qui quantifie dans quelle mesure le réseau de rues suit la logique d'ordonnement géométrique d'une grille unique (Figure 5.18).

³⁰ L'entropie est un concept scientifique ainsi qu'une propriété physique mesurable le plus couramment associée à un état de désordre, de hasard ou d'incertitude. Elle est souvent utilisée comme une mesure qui quantifie l'hétérogénéité d'une propriété physique.

D'autres travaux très récents ont proposé différentes typo-morphologies en se basant sur des indicateurs de la théorie des graphes. À partir l'analyse de la centralité de réseaux viaires historiques, Altaweel et al. (2021) propose trois morphotypes, orthogonal, organique et hybride. Badhrudeen et al. (2022) analysent un grand ensemble de villes selon les propriétés géométriques de leur réseau viaire et définissent 5 classes de villes ("*Gridiron Cities*", "*Long Link Cities*" "*Organic Cities*", "*Hybrid Cities*" et "*Mixed Cities*"). Xue et al. (2022) classifient un large échantillon de réseaux viaires avec méthode de classification automatique de graphes (*graph-based machine-learning*). La méthode se base sur des propriétés des graphes viaires, notamment leur irrégularité et leur homogénéité. Nguyen et al. (2023) comparent les réseaux viaires de différents quartiers en considérant deux motifs élémentaires, à savoir "la grille" et "l'arbre". Leur méthodologie s'inspire de celle proposée par Jacobs (1993), et ils ont employé des indicateurs similaires à ceux utilisés par Boeing (2019) pour l'analyse les réseaux.

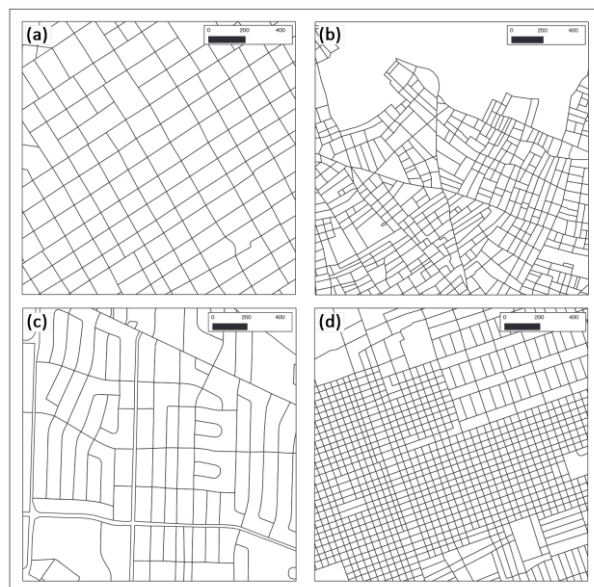


Figure 5.16. Quatre motifs de trames viaires (à la même échelle) identifiés en comparant le facteur de formes des îlots : (a) Buenos Aires, (b) Athènes, (c) Nouvelle-Orléans, (d) Mogadiscio. Source : Louf et Barthelemy (2014).

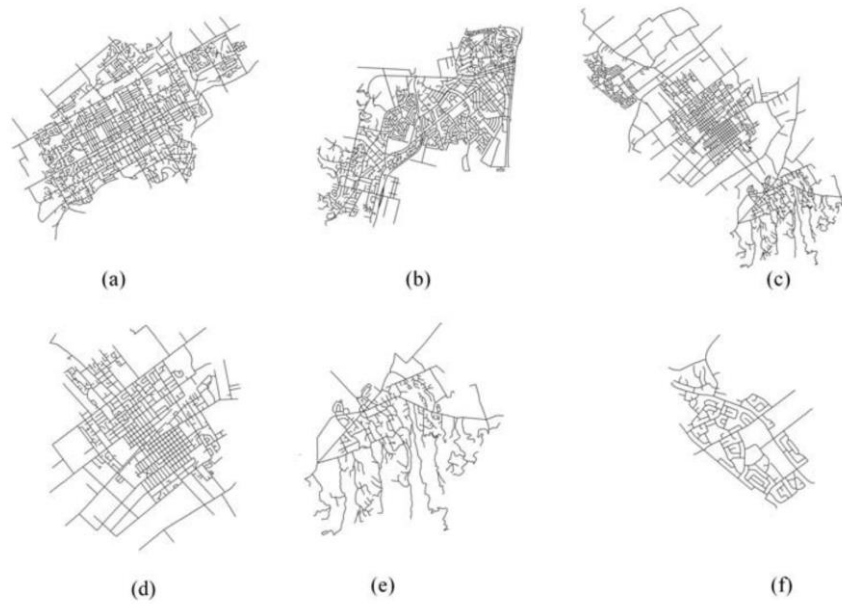


Figure 5.17. Six motifs de réseaux viaires. (a) motif régulier, (b) motif irrégulier, (c) motif hybride, (d) motif basé sur une grille, (e) motif basé sur un arbre ou une étoile, et (f) motif cellulaire. Source : Qi et Li (2015).

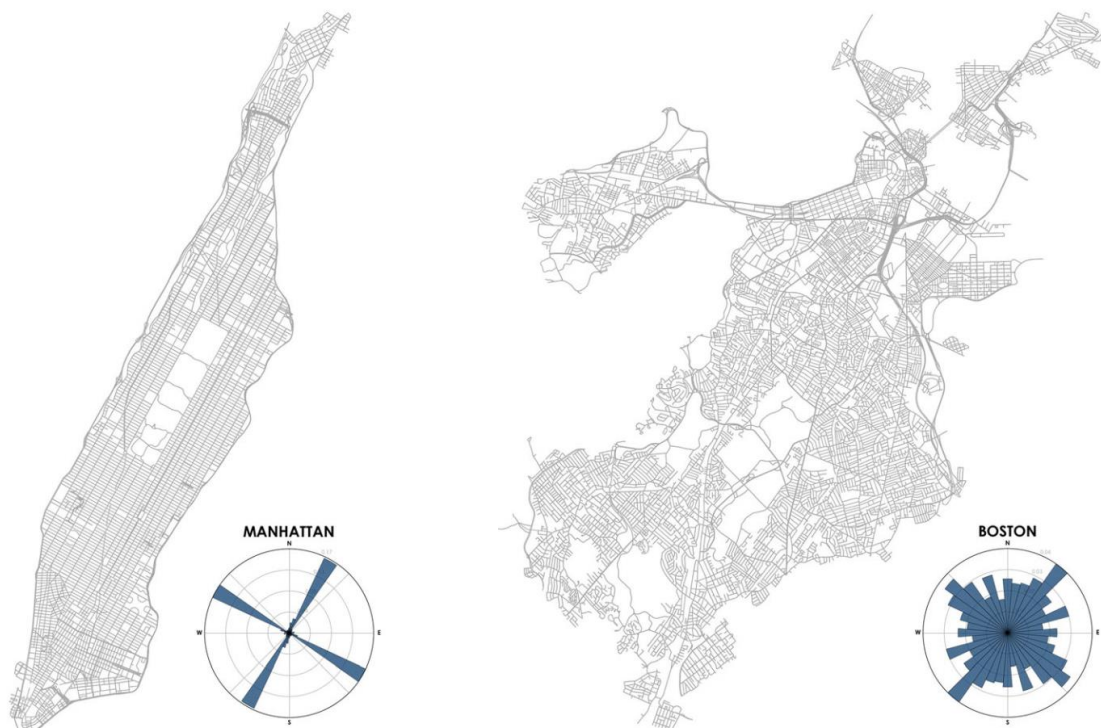


Figure 5.18. Réseaux de rues et histogrammes polaires correspondants mettant en évidence l'ordre d'orientation des rues des villes de Manhattan (à gauche) et Boston (à droite). Source : Boeing (2019).

5.2.3.2 Des typo-morphologies associées à des processus d'évolution

L'exploration de l'évolution et des changements dans les trames viaires occupe une place centrale dans les recherches en morphologie urbaine. Les études mettent en lumière la persistance et l'évolution des structures et des tracés viaires, tout en examinant leur contribution et leur impact dans la création de nouvelles configurations urbaines (Levy, 2005). Ce processus de création de nouvelles configurations urbaines est soit vu comme l'apparition discontinue de nouveaux morphotypes (Caniggia & Maffei, 1979), soit, comme un processus de densification continue des îlots urbains (Conzen, 2004). Dans cette perspective, Shpuza (2009) définit cinq morphotypes de trames viaires ("*mediaeval organic*", "*non-hierarchical grid*", "*biased grid*", "*deformed grid*", "*distributory*", "*serpentine*") qu'il associe à trois étapes d'évolution des réseaux viaires de 23 villes (réparties entre l'Italie, La Croatie, L'Albanie et la Grèce), en identifiant les morphotypes présents à l'étape la plus ancienne et ceux apparus ou transformés au cours des deux étapes suivantes.

Gudmundsson et Mohajeri (2013) ont étudié la variation de l'entropie, de l'orientation et de la longueur des rues de 41 villes britanniques. Par la suite, ils ont établi un lien entre l'évolution géométrique du réseau viaire et un gradient centre-périphérie. Leurs résultats révèlent que les parties centrales et historiques des villes ont des réseaux de rues plus denses et des entropies d'orientation et de longueur plus faibles, tandis que les zones extérieures et récentes présentent les caractéristiques inverses. Ceci suggère que différents morphotypes viaires sont localisés dans les villes selon un gradient centre-périphérie.

Serra et al. (2017) ont utilisé une combinaison des indicateurs de syntaxe spatiale et des techniques SIG pour identifier les nouvelles rues apparues au cours de 60 ans de croissance historique dans la région métropolitaine de Porto. Ensuite, ils ont défini un ensemble de morphotypes de rues basés sur la taille (petite/grande), la cyclicité (linéaire/cellulaire) et la connectivité (conjonctive/disjonctive), à l'aide de techniques de "*clustering*" (méthode des *k-means*) (Figure 5.19). La classification par taille permet de distinguer deux configurations de rues, l'une en structures planifiées dites "larges" (comme les autoroutes) et l'autre en structures non planifiées dites "petites" (comme les voies d'accès local). Ces deux configurations ont ensuite été classées selon la cyclicité qui permet de distinguer les morphotypes linéaires (rues qui n'encadrent pas un bloc urbain) des morphotypes cellulaires (rues qui encadrent un bloc urbain). Un troisième niveau de classification des réseaux de rues ajoute la distinction des réseaux selon leur connectivité, à savoir les morphotypes conjonctifs (nouvelles rues ayant un haut niveau de connectivité avec leurs structures voisines) et les

morphotypes disjonctifs (grappes isolées de nouvelles rues ayant une faible connectivité aux structures existantes). L'étude de la répartition de ces morphotypes de réseaux viaires dans le temps et dans l'espace permet une lecture dynamique de l'évolution du réseau de rues étudié, constituant ainsi une approche unique dans la recherche sur les typo-morphologies urbaines. En effet, à notre connaissance ce travail de Serra et al. (2017) est le seul à proposer une typomorphologie diachronique de réseaux viaires.

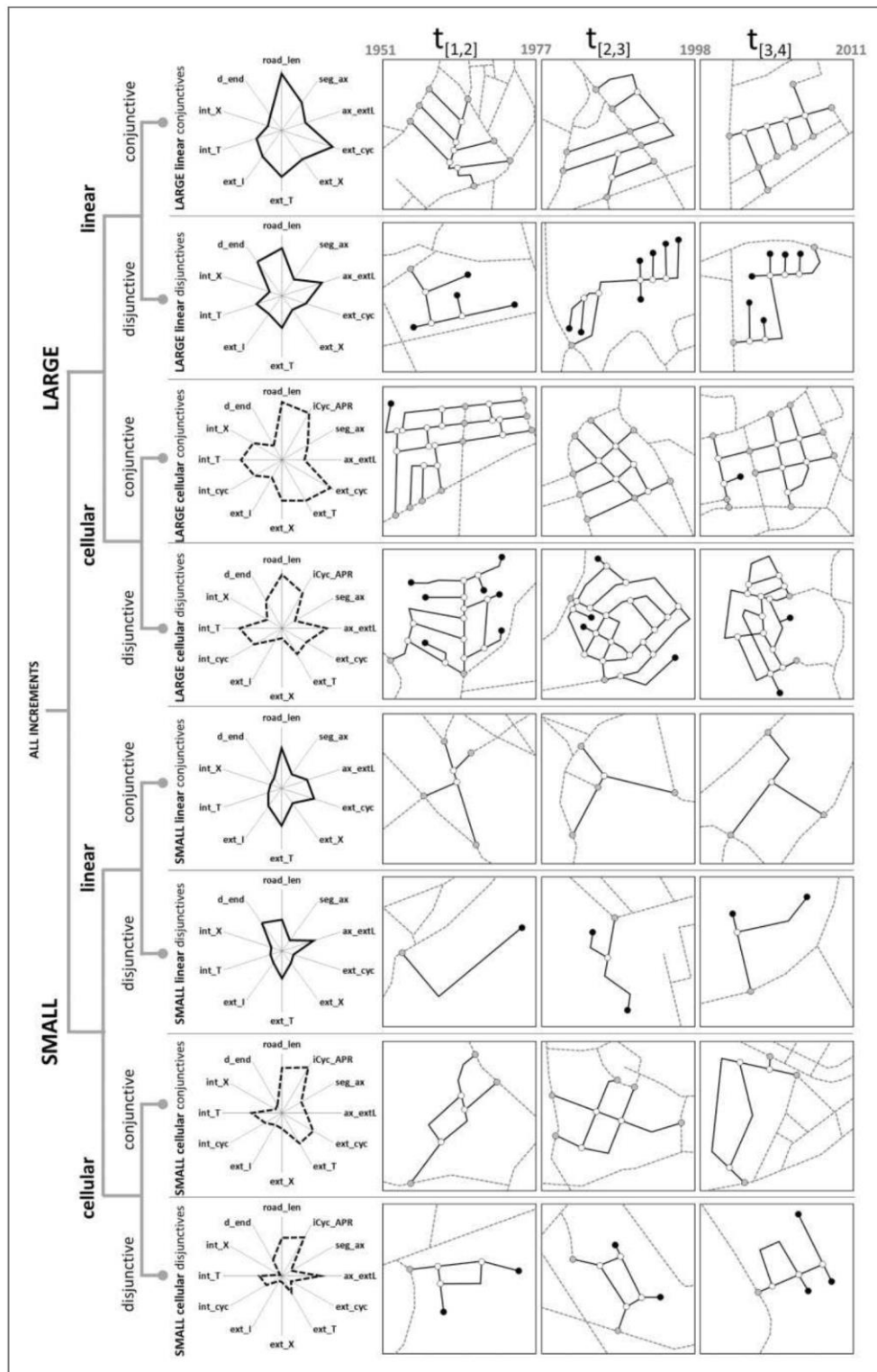


Figure 5.19. Taxonomie des segments de rues ajoutés pas à pas au réseau viaire (à gauche) et les morphotypes correspondants à différentes étapes d'évolution (non incrémentale) (à droite). Sur les images de droite, les lignes grises en pointillé représentent le réseau existant, les lignes noires épaisses sont les nouvelles rues, les cercles noirs sont les culs-de-sac, les cercles blancs les jonctions internes (nœuds d'intersection) et les cercles gris les jonctions externes (nœuds d'extrémité). Source : Serra et al. (2017).

5.3 Synthèse du chapitre 5

L'approche typo-morphologique a suscité souvent des critiques et est parfois perçue comme obsolète, renvoyant à une conception ancienne de la ville. Certains estiment également que son intérêt se limite à la description des formes urbaines et ne peut être l'instrument de leur réalisation, c'est-à-dire qu'elle s'inscrit dans une étude de contexte et non dans un projet urbain. Cependant, l'association de l'approche typo-morphologique à l'étude de l'évolution urbaine, en particulier l'évolution du réseau viaire, est apparue particulièrement pertinente pour les travaux de modélisation et de simulation, ravivant ainsi son intérêt.

La plupart des recherches s'inscrivant dans une approche typo-morphologique se focalisent sur la classification des trames viaires, en distinguant notamment les trames en grille et celles arborescentes. Les premières sont en général associées à un développement urbain planifié et les secondes, à un développement urbain auto-organisé (i. e. organique). Dans certains cas, ces deux catégories sont fusionnées permettant ainsi d'identifier des trames en grille irrégulière organique (par exemple au niveau des centres historiques), en grille régulière planifiée (typiques des nouveaux quartiers), ou encore des trames arborescentes planifiées (à l'image des quartiers à accès restreint) ou des trames arborescentes organiques (contraintes par la topographie du terrain).

Cette revue de la littérature nous a donc permis d'identifier les critères couramment utilisés pour la classification qualitative et quantitative de trames viaires, en vue de développer une méthodologie de classification des voies qui permet d'aller au-delà des connaissances actuelles.

Un constat important est celui de la rareté des travaux qui ont tenté d'associer les dynamiques d'évolution aux typo-morphologies, dans le but de mieux comprendre les relations entre les différentes composantes du réseau et son évolution. La plupart de ces travaux n'ont pas réussi à définir des typo-morphologies diachroniques, à l'exception d'un seul travail de recherche, celui de Serra et al. (2017), qui propose une classification diachronique liant les processus d'évolution locaux, aux caractéristiques géométriques des segments de rue.

À l'aune de ce constat, notre travail de recherche se poursuit dans le chapitre suivant, en vue de définir une typo-morphologie de réseaux viaires qui associe chaque morphotype aux processus d'évolution du réseau.

Chapitre 6

Identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution associés

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différentes approches typo-morphologiques de la forme des villes et des réseaux viaries. Dans ce chapitre, nous proposons une typo-morphologie permettant de classer les voies d'une ville en huit morphotypes. **Un morphotype est défini comme un ensemble plus ou moins vaste de voies formant un tout identifiable.** Un morphotype doit présenter des caractéristiques (notamment topologiques et géométriques) et des modes d'évolution spécifiques, qui le différencient clairement des autres morphotypes appartenant à la même typo-morphologie.

Pour les trois villes de Dijon, Besançon et Pontarlier, la démarche adoptée pour concevoir notre typo-morphologie a consisté en trois volets.

- Volet 1 : **identification** de morphotypes par confrontation visuelle de cartes représentant le croisement deux à deux des indicateurs de degré, d'orthogonalité et d'espacement pour les trois villes de Dijon, Besançon et Pontarlier aux différentes dates (section 6.1).
- Volet 2 : **caractérisation** des morphotypes par le degré, l'orthogonalité et l'espacement des voies concernées (cartes présentées dans le chapitre 2 de la thèse), ainsi que l'évolution de leur rang pour chaque indicateur (cartes présentées dans le chapitre 3).
- Volet 3 : **spécification** de leur dynamique par les processus/modes d'évolution et patrons de formation ou de rattachement des nouvelles voies aux voies existantes (section 6.2).

Il a été nécessaire d'effectuer plusieurs allers-retours entre ces trois volets jusqu'à ce que les différents morphotypes aient été clairement identifiés et bien définis.

Dans la section 6.1 de ce chapitre, nous identifions des motifs viaries à partir du croisement d'indicateurs deux à deux, qui permettent de distinguer les motifs selon qu'ils sont maillés ou arborescents, selon leur taille (étendue) et leur localisation préférentielle.

Dans la section 6.2, nous présentons une typo-morphologie des voies conçue suivant une approche semi-quantitative (association d'approches qualitative et quantitative). Huit morphotypes de voies sont identifiés, qui sont associés à des processus d'évolution et à des patrons de formation ou de rattachement des nouvelles voies aux voies existantes.

Dans la section 6.3, nous confrontons la typo-morphologie aux résultats d'une classification ascendante hiérarchique appliquée aux voies des réseaux viaires contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier. Cette confrontation a pour but d'évaluer la validité des huit morphotypes de voies que nous avons précédemment identifiés.

6.1 Identification de motifs viaires à partir du croisement d'indicateurs deux à deux

En vue de l'identification des motifs viaires, nous avons d'abord testé les croisements d'indicateurs deux à deux entre les six indicateurs considérés dans la partie 1 de la thèse, à savoir le degré, l'espacement, l'orthogonalité, le degré de desserte, la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité, pour les trois villes de Dijon, Besançon et Pontarlier aux différentes dates. Ensuite, nous avons comparé visuellement les cartes résultant de ces croisements. Seuls les croisements deux à deux de trois indicateurs, à savoir **le degré l'espacement et l'orthogonalité**, se sont avérés intéressants, stables entre les différentes dates et directement interprétables. Ces trois indicateurs sont de nature locale, ce qui signifie qu'ils sont uniquement liés à la voie et à son voisinage direct.

Dans cette section, nous présentons comment le croisement de ces trois indicateurs locaux permet d'identifier des motifs élémentaires de réseau viaire. Deux indicateurs relèvent de la géométrie métrique : l'orthogonalité (qui caractérise les angles formés par les intersections de la voie) et l'espacement (qui quantifie la distance moyenne entre les intersections). Le troisième indicateur est d'ordre topologique, à savoir le degré (qui représente le nombre de connexions de la voie avec les autres voies du réseau).

- L'**orthogonalité** permet de distinguer les motifs arborescents des motifs maillés (en grille).
- Le **degré** permet de distinguer les motifs selon leur taille (étendue) : motifs larges (très étendus) ou étroits/petits (moyennement ou peu étendus).
- L'**espacement** renseigne sur la localisation préférentielle des motifs (en centre, en péricentre, en périphérie ou dispersés dans la ville).

La méthode adoptée consiste à d'abord classer en quartiles les valeurs de chaque paire d'indicateurs caractérisant les voies du réseau considéré à chaque date (voir un exemple sur la figure 6.1). Cela signifie que les valeurs de chaque indicateur sont réparties en quatre groupes égaux, chacun représentant 25 % des données. Les classes sont définies comme suit : Premier quartile (min - Q1) - Deuxième quartile (Q1 - Q2), Troisième quartile (Q2 - Q3) - Quatrième quartile (Q3 - Q4). Ensuite le croisement entre les différentes classes est représenté cartographiquement en utilisant une double sémiologie. Les classes du premier indicateur sont représentées par l'épaisseur des voies, tandis que les classes du deuxième indicateur sont représentées par un dégradé de couleur.

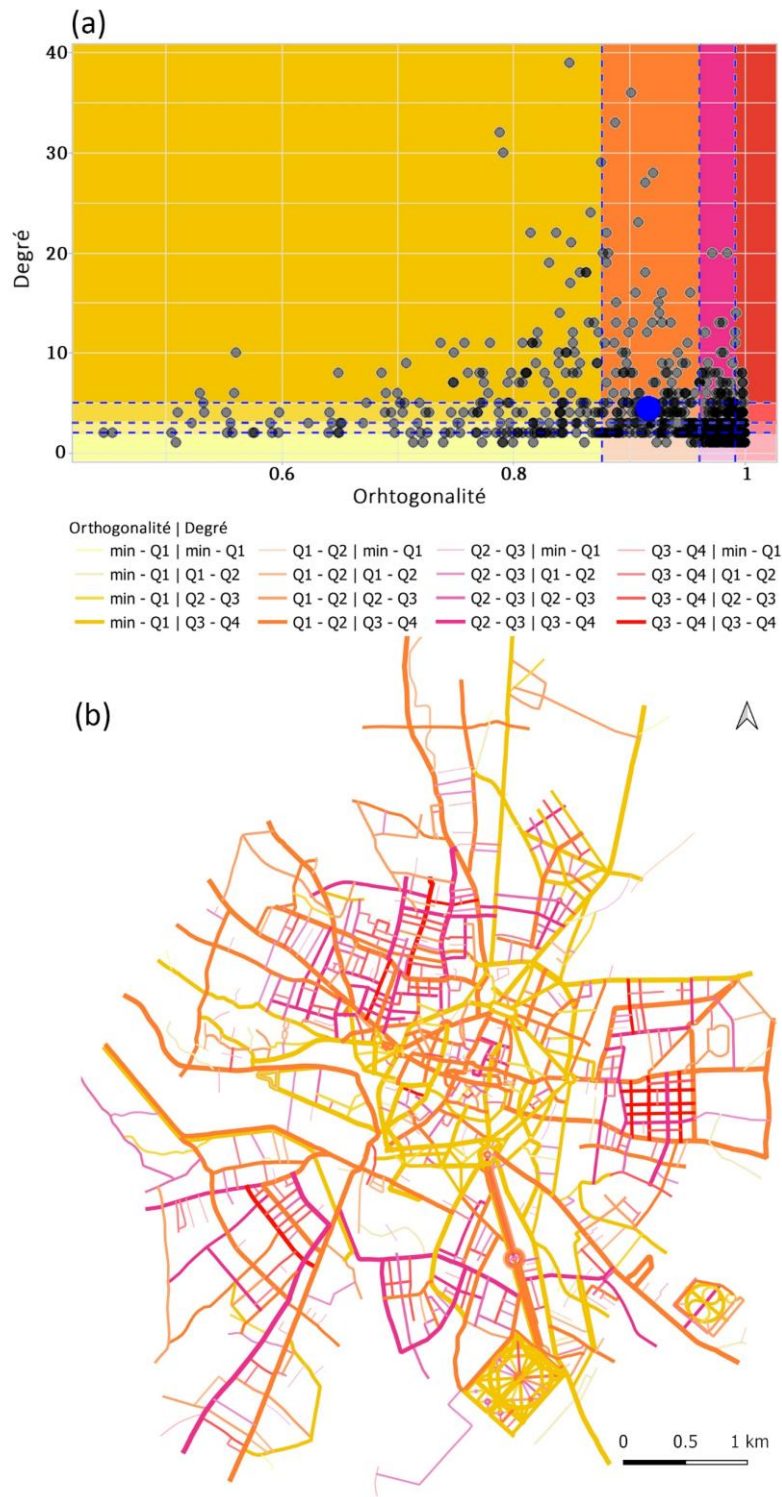


Figure 6.1. (a) Distribution statistique (en nuage de points) des valeurs selon le croisement des quartiles. Le point bleu représente la médiane des valeurs. (b) Carte représentant le croisement deux à deux des indicateurs de degré et d'orthogonalité. Réseau viaire de Dijon en 1944. Les différentes couleurs se rapportent aux quartiles en termes d'orthogonalité. L'épaisseur sur la carte et l'intensité des couleurs sur le graphique se rapportent au degré.

6.1.1 Espacement et orthogonalité

Les deux catégories principales de réseaux (identifiées dans la littérature scientifique) se conforment soit à une structure maillée, caractérisée par une disposition plus ou moins régulière et rectangulaire des voies, soit à une structure arborescente, où les voies se ramifient à partir d'un axe initial. Cependant, une grande variété de configurations peut découler de multiples variations de ces deux motifs élémentaires.

Une structure maillée correspond à des intersections de rues avec des angles proches de 90°, ce qui implique une forte orthogonalité. À l'inverse, une structure arborescente est généralement caractérisée par des segments de rues qui se ramifient à partir de voies principales, formant des angles d'intersection plus faibles, ce qui implique une faible orthogonalité. Dans certains cas, cependant, les structures arborescentes peuvent aussi présenter des angles d'intersection relativement droits, ce qui introduit davantage de variabilité. Par ailleurs, une structure maillée est généralement associée à un réseau viaire dense, ce qui implique un faible espacement des voies. À l'inverse, une structure arborescente est généralement associée à un réseau peu dense, ce qui implique un espacement des voies plus important. Sur le réseau viaire de Dijon à différentes dates (voir Annexe 27)³¹, les voies des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'orthogonalité et d'espacement correspondent nettement à des motifs maillés majoritairement en périphérie de la ville (Figure 6.2 - c). Les voies des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'orthogonalité et des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'espacement correspondent majoritairement à des motifs arborescents également localisés en périphérie (Figure 6.2 - f). Les voies des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'orthogonalité et du premier quartile (min - Q1) en termes d'espacement sont caractéristiques de motifs arborescents majoritairement au centre (Figure 6.2 - d). Celles des premiers et deuxièmes quartiles en termes d'orthogonalité et du deuxième quartile (Q1 - Q2) en termes d'espacement sont caractéristiques de motifs arborescents majoritairement en péricentre (Figure 6.2 - e). Les voies des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'orthogonalité et du premier quartile (min - Q1) en termes d'espacement, correspondent à des motifs maillés majoritairement au centre (Figure 6.2 - a). Enfin, celles des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'orthogonalité et du

³¹ Seuls les résultats pour Dijon en 1944 sont présentés ici. Les résultats pour Dijon aux autres dates sont présentés en annexe 27.

deuxième quartile en termes d'espacement correspondent à des motifs maillés majoritairement en péricentre (Figure 6.2 - b).

Il est donc possible de distinguer différentes configurations découlant des deux principales catégories (motifs maillés et motifs arborescents) selon différentes localisations préférentielles (centre, péricentre ou périphérie) à partir du croisement des valeurs de l'orthogonalité et l'espacement des voies.

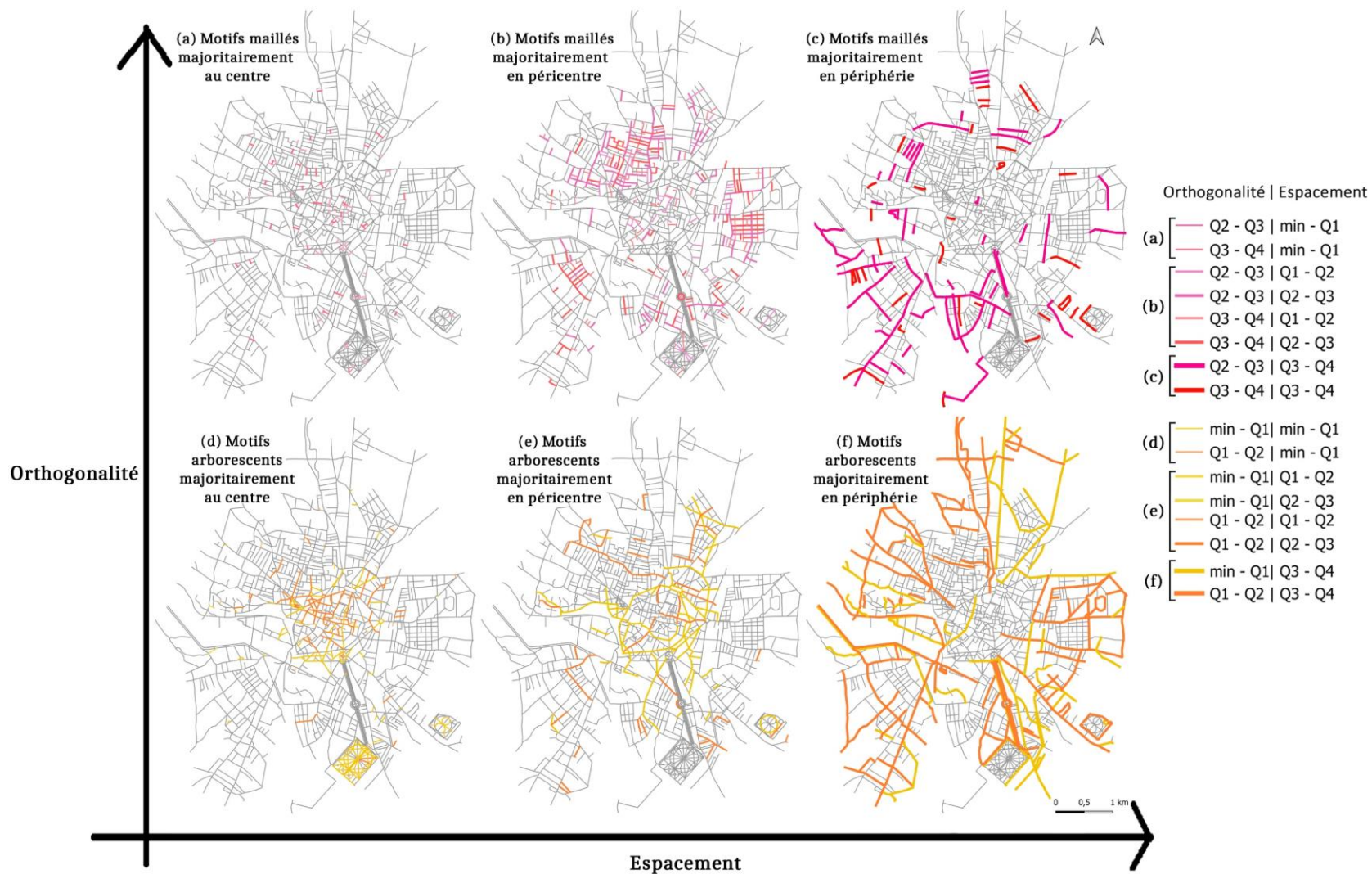


Figure 6.2. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'orthogonalité et l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon en 1944.

6.1.2 Degré et espacement

Comme le montrent les analyses morpho-historiques de la partie 1 de la thèse, la caractérisation des voies au moyen du degré met en évidence leur hiérarchie, avec des valeurs élevées pour les structures principales et des valeurs plus faibles pour les voies d'accès local. L'espacement des voies met en évidence la distinction entre le réseau des zones urbaines périphériques, caractérisé par des valeurs élevées, et les zones denses du réseau correspondant aux centres urbains avec des valeurs d'espacement plutôt faibles. Le croisement de ces indicateurs pour le réseau viaire de Dijon à différentes dates montre une différenciation de motifs qui est stable dans le temps et indépendante de l'emprise spatiale du réseau considérée.

Les voies du quatrième (Q3 - Q4) quartile en termes d'espacement et de degré correspondent à des motifs larges en péricentre et en périphérie (Figure 6.3- c). Celles du troisième quartile (Q2 - Q3) en termes d'espacement et des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes de degré représentent des motifs larges au centre et en péricentre (Figure 6.3 - b). Celles des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'espacement et des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes de degré représentent des motifs larges majoritairement au centre (Figure 6.3 - a). À noter que les voies particulièrement denses au niveau des parcs ou des cimetières sont aussi mises en évidence, même si elles se localisent en périphérie. Les valeurs des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'espacement et de degré sont associées à des motifs étroits au sein des îlots (Figure 6.3 - d). Les voies du troisième quartile (Q2 - Q3) en termes d'espacement et des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes de degré correspondent à des motifs étroits localisés majoritairement au centre et péricentre (Figure 6.3 - e). Enfin, les voies du quatrième quartile (Q3 - Q4) en termes d'espacement et des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes de degré correspondent à des motifs étroits majoritairement en périphérie (Figure 6.3 - f).

Il est ainsi possible d'identifier des motifs selon leur taille (étendue) et de les classer en motifs larges et étroits, chacun correspondant à des localisations préférentielles dans la ville, au centre, péricentre ou périphérie. Notons que lorsque l'on effectue un croisement avec une discrétisation plus fine du degré, les deuxième et troisième quartiles du degré peuvent révéler des motifs de taille intermédiaire.

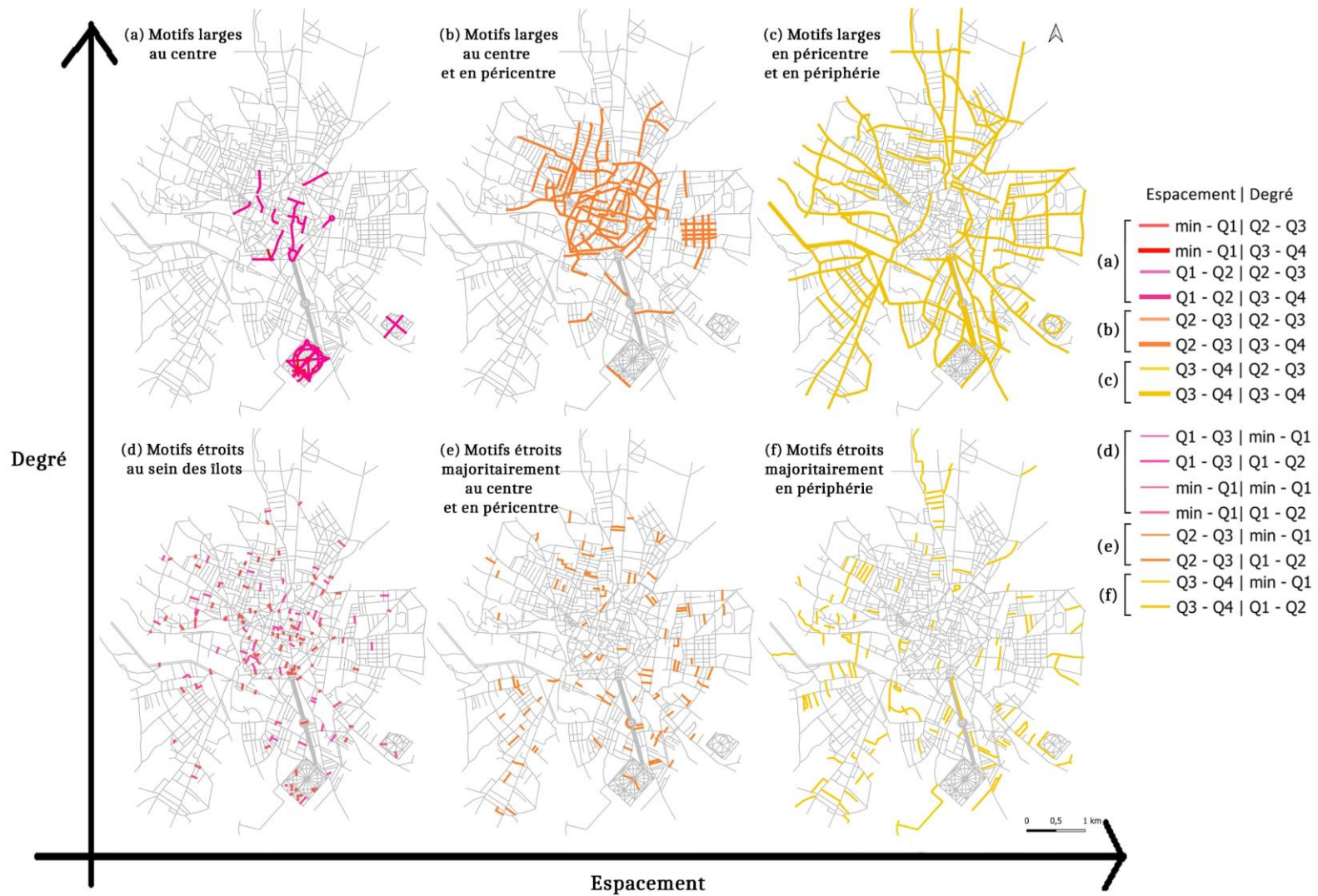


Figure 6.3. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'espacement et du degré des voies du réseau viaire de Dijon en 1944.

6.1.3 Orthogonalité et degré

En suivant la même méthode, le croisement entre le degré et l'orthogonalité permet d'identifier des motifs maillés et arborescents de différentes tailles (larges ou étroits). Les voies des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'orthogonalité et des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes de degré sont représentatives de motifs arborescents de large étendue (Figure 6.4 - a). Les voies des (Q2 - Q3) troisième et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'orthogonalité et de degré correspondent à de larges motifs maillés (Figure 6.4 - b). En outre, les valeurs des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes d'orthogonalité et de degré correspondent à des motifs arborescents étroits (Figure 6.4 - c) tandis que les voies des troisième (Q2 - Q3) et quatrième (Q3 - Q4) quartiles en termes d'orthogonalité et des premier (min - Q1) et deuxième (Q1 - Q2) quartiles en termes de degré correspondent à des motifs maillés étroits (Figure 6.4 - d).

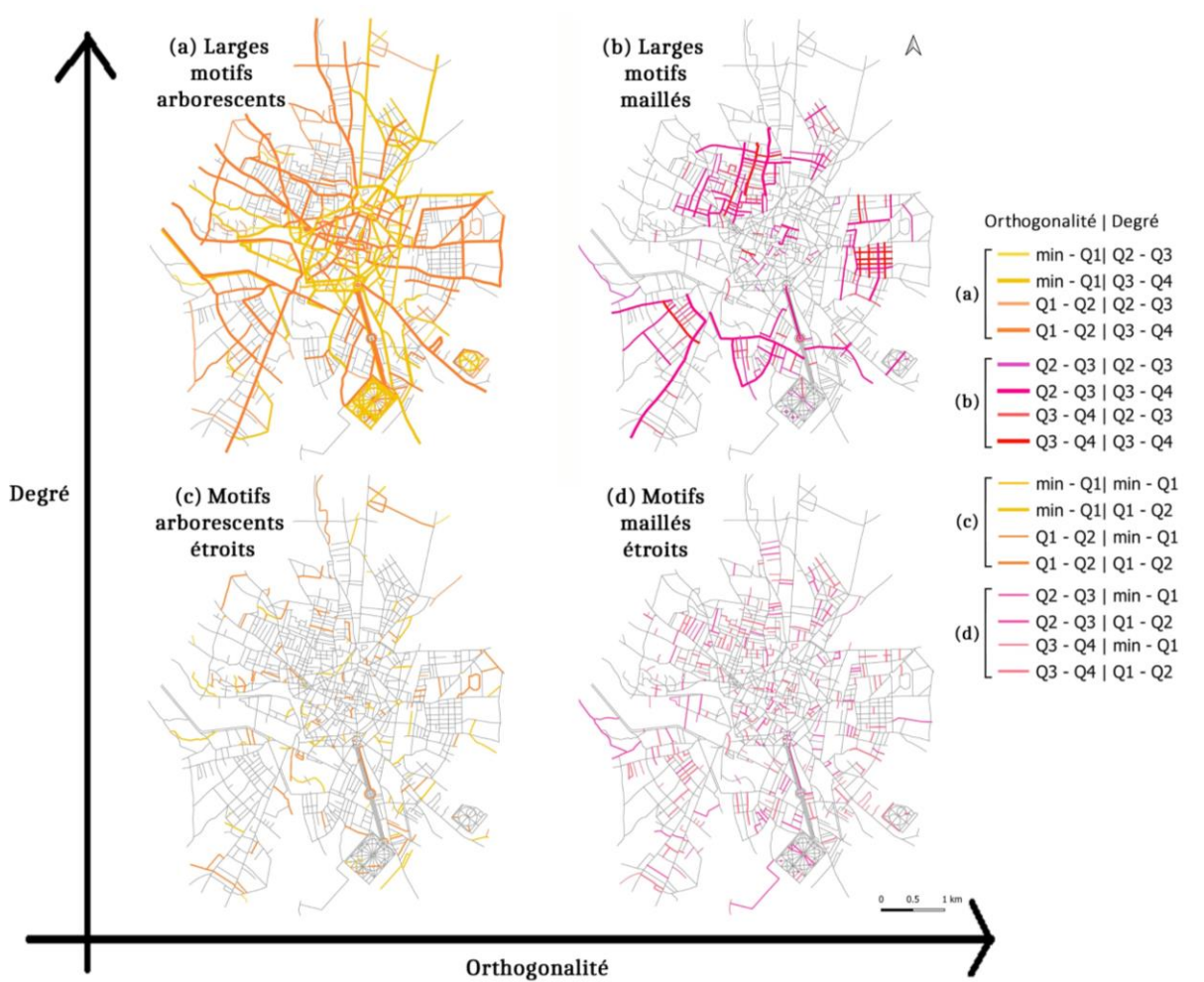


Figure 6.4. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'orthogonalité et du degré des voies du réseau viaire de Dijon en 1944

6.2 Une typo-morphologie des voies en huit classes

Dans la section précédente, nous avons établi que le croisement deux à deux de trois indicateurs locaux permet d'identifier des motifs élémentaires en prenant en compte trois critères : leur taille, leur localisation préférentielle et le fait qu'ils soient maillés ou arborescents.

Dans cette section, nous adoptons une approche typo-morphologique intégrant une dimension évolutive des voies dans le temps, dans l'objectif d'étendre la classification du réseau viaire au-delà des motifs élémentaires synchrones précédemment identifiés. L'approche est semi-quantitative.

Les critères qualitatifs de la typo-morphologie se rapportent à deux aspects, à savoir la description et la schématisation de la forme de chaque morphotype de voies. Nous représentons chaque morphotype par un schéma archétypal et le décrivons selon :

- 1) Le motif élémentaire (arborescent ou maillé).
- 2) La localisation préférentielle (centre, péricentre et périphérie). Cette localisation peut être interprétée qualitativement par rapport au rôle de la voie dans le contexte urbain, en particulier les types de connexion origines-destinations qu'elle permet d'assurer (par exemple : centre-périphérie, péricentre-périphérie, périphérie-périphérie, quartier - quartier voisin, quartier - quartier éloigné, îlot-îlot).
- 3) La taille, en considérant trois étendues : motifs larges, motifs de taille intermédiaire et motifs étroits.

Chaque morphotype est caractérisé par deux critères relatifs aux trois indicateurs considérés : d'une part, le(s) quartile(s) au(x)quel(s) il appartient à un temps t , et d'une autre part, les changements et permanences de ces indicateurs au fil temps. En effet, en considérant le suivi de l'évolution morphologique du réseau à l'échelle des voies (voir chapitre 3, section 3.1), il est possible d'introduire des critères de classification supplémentaires qui sont d'ordre diachronique (Figure 6.5).

Chaque morphotype est associé également à des processus d'évolution et à des patrons de formation/rattachement des nouvelles voies aux voies existantes, en se basant sur les interprétations des évolutions des indicateurs expliquées en détail dans le chapitre 3 (sous-section 3.1.1).

Sur cette base, nous avons pu identifier huit morphotypes de voies (Tableau 6.1 et Tableau 6.2) : (1) les voies radiales/linéaires, (2) les voies concentriques, (3) les voies convergentes/divergentes, (4) les voies ramifiées, (5) les voies orthogonales/diagonales, (6) les voies transversales, (7) les voies intercalaires, (8) les voies cellulaires.

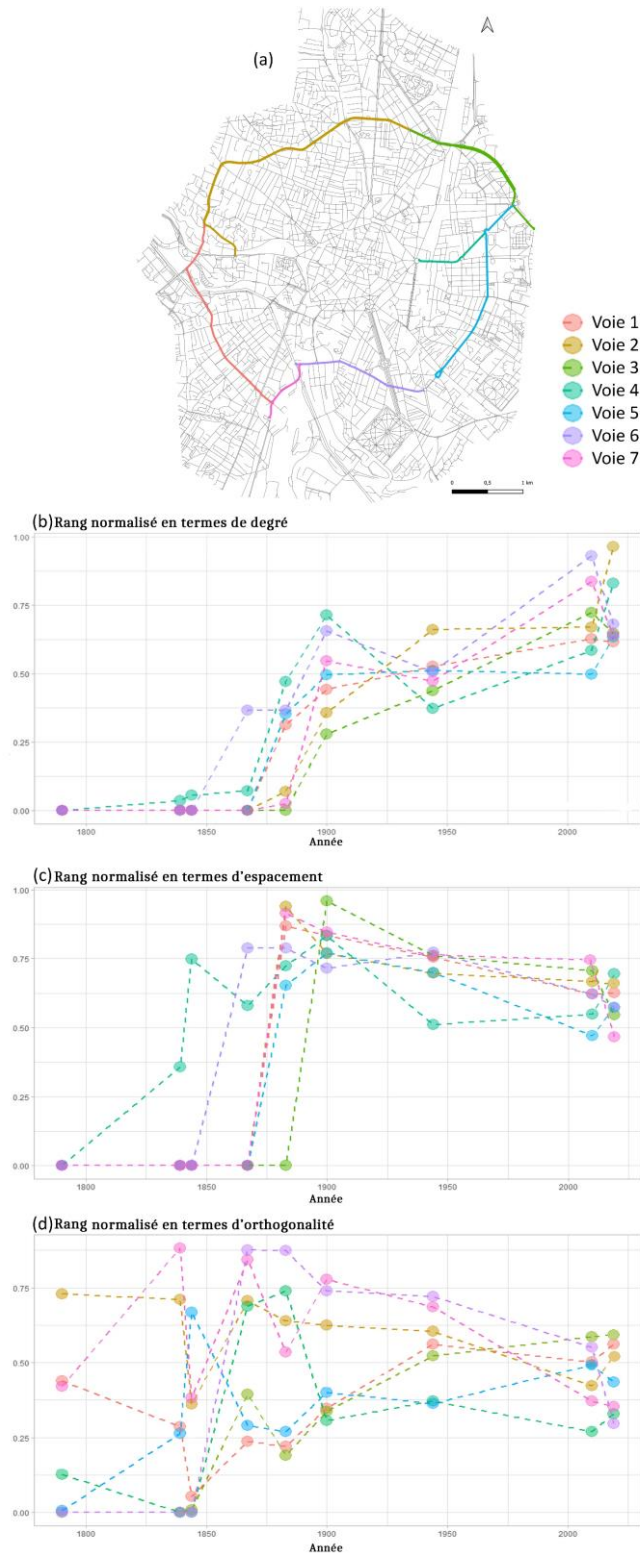


Figure 6.5. Exemple de l'évolution du rang normalisé de voies concentriques par rapport à chacun des trois indicateurs considérés.

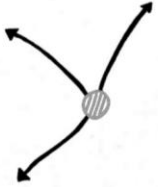
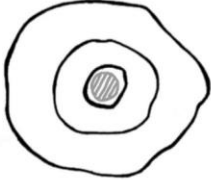
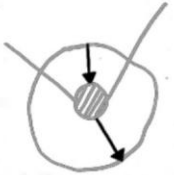

Morphotype	Schéma*	Motif élémentaire	Localisation préférentielle	Taille (étendue)	Processus (mode) d'évolution	Patrons de formation / rattachement	Indicateurs synchroniques			Evolution des indicateurs (rang)		
							O	E	D	O	E	D
(1) Radial/ Linéaire		Arborescent	Péricentre et périphérie	Large	Extension	Création ex nihilo Prolongement	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	Q ₃ - Q ₄	Ch ou	P	Ch ↗
(2) Concentrique		Maillé	Péricentre ou périphérie	Large	Réticulation	Délimitation (contournement) Connexion	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	Q ₃ - Q ₄	P	Ch ↘	Ch ↗
(3) Convergent / Divergent		Maillé	Centre	Intermédiaire ou large	Réticulation	Connexion Subdivision	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	Ch ↗	Ch ↘	P
(4) Ramifié		Arborescent	Centre	Intermédiaire ou large	Densification	Ramification	Q ₁ - Q ₂	min-Q ₁	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	P	P	P
			Périphérie	Etroite	Extension	Ramification	min-Q ₁	Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁	P	Ch ↘	Ch ↗

Tableau 6.1. Huit morphotypes de voies. O : orthogonalité ; E : espacement ; D : degré. P : permanence ; Ch : changement.

Min - Q₁ : premier quartile ; Q₁ - Q₂ : deuxième quartile ; Q₂ - Q₃ : troisième quartile ; Q₃ - Q₄ : quatrième quartile.

* : le morphotype (en noir) et son intégration dans le réseau existant (en gris).





Morphotype	Schéma*	Motif élémentaire	Localisation préférentielle	Taille (étendue)	Processus (mode) d'évolution	Patrons de formation / rattachement	Indicateurs synchroniques			Evolution des indicateurs (rang)		
							O	E	D	O	E	D
(5) Orthogonal/ Diagonal		Maillé	Centre ou péricentre	Intermédiaire	Réticulation	Subdivision	Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂	Q ₁ - Q ₂ ou Q ₂ - Q ₃	P	Ch ↘	P
(6) Transversal		Maillé	Périphérie	Etroite ou intermédiaire	Densification	Intersection (en X)	Q ₃ - Q ₄	Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂	Ch ↗	Ch ↘	Ch ↗
(7) Intercalaire		Arborescent ou maillé	Centre ou péricentre ou périphérie	Etroite	Densification	Juxtaposition Intersection (en T)	Q ₁ - Q ₂ ou Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂ ou Q ₂ - Q ₃	min-Q ₁	P	P	P
(8) Cellulaire		Maillé	Centre ou péricentre ou périphérie	Etroite	Densification Réticulation	Remplissage interstitiel Subdivision	Q ₂ - Q ₃ ou Q ₃ - Q ₄	min-Q ₁ ou Q ₁ - Q ₂ ou Q ₂ - Q ₃	min-Q ₁	P	Ch ↘	P

Tableau 6.2. Huit morphotypes de voies (suite). O : orthogonalité ; E : espacement ; D : degré. P : permanence ; Ch : changement.

Min - Q₁ : premier quartile ; Q₁ - Q₂ : deuxième quartile ; Q₂ - Q₃ : troisième quartile ; Q₃ - Q₄ : quatrième quartile.

* : le morphotype (en noir) et son intégration dans le réseau existant (en gris).

6.2.1 Voies radiales / linéaires

À l'origine, le réseau viaire se développe de manière radiale ou linéaire suivant les tracés des anciens chemins permettant de connecter différentes localités, et d'assurer l'accès à la ville. Les voies radiales/linéaires sont des voies de liaison anciennes, stratégiques (d'origine militaire par exemple) ou prestigieuses (des voies royales par exemple), qui partent du centre urbain historique. Ces voies étaient généralement associées aux routes menant aux portes des fortifications de la ville. De nos jours, elles assurent la liaison entre la ville et les agglomérations avoisinantes, et sont souvent issues d'une expansion tentaculaire du réseau routier. Dans un contexte interurbain, elles peuvent correspondre à des routes principales nationales ou départementales, tandis que dans un contexte intra-urbain elles peuvent correspondre à des boulevards ou des avenues.

Ces voies radiales/linéaires (Tableau 6.1 - (1)) se distinguent par un degré élevé ($Q_3 - Q_4$), une faible orthogonalité (min - Q_1 ou $Q_1 - Q_2$), et un espacement intermédiaire ($Q_2 - Q_3$), ou élevé ($Q_3 - Q_4$). Ces attributs sont caractéristiques de larges motifs arborescents, assurant des connexions entre le péricentre et la périphérie. Le rang hiérarchique de ces voies montre des changements au cours du temps dans le cas des indicateurs de degré et d'orthogonalité. À mesure que le réseau se développe, plusieurs voies se greffent aux voies radiales/linéaires renforçant leur rang hiérarchique en termes de degré. Ces nouvelles voies s'y rattachent de manière orthogonale (avec un angle droit) ou ramifiée (avec un faible angle), ce qui induit des changements en termes d'orthogonalité. En revanche, ces voies maintiennent leur rang hiérarchique en termes d'espacement, ce qui est explicable par le fait qu'elles se prolongent à mesure que de nouvelles voies du réseau s'y rattachent. De ce fait, elles maintiennent un rang élevé en termes d'espacement. Les voies radiales/linéaires sont donc associées à un mode d'évolution par extension et à des patrons de formation/rattachement des nouvelles voies aux structurantes existantes par création ex nihilo et prolongement.

6.2.2 Voies concentriques

La disparition des fortifications marque le début d'une transformation significative dans l'évolution des villes et des réseaux viaires. Cette transformation se manifeste fréquemment par une expansion urbaine le long des voies radiales/linéaires décrites juste avant, en raison de leur importance en tant que corridors de circulation. Simultanément, une urbanisation se déploie autour du centre historique de la ville, générant un développement concentrique qui dans un premier temps, tend à être proche du centre pour ensuite s'en éloigner

progressivement. Ce processus d'urbanisation peut engendrer l'apparition des voies concentriques qui relient les voies radiales/linéaires. Ces voies peuvent être le produit de décisions de planification urbaine. Elles sont alors construites de manière non progressive, c'est-à-dire qu'elles sont réalisées en une seule étape, contrairement à une évolution du réseau de type organique.

Les voies concentriques peuvent être positionnées selon différents rayons par rapport au centre de la ville. Au rayon le plus proche du centre, elles se présentent sous la forme de boulevards péricentriques. À un rayon plus éloigné, elles correspondent à des boulevards périphériques permettant les déplacements inter-quartiers. Enfin, au rayon le plus éloigné, elles correspondent à des voies de contournement qui permettent une connexion au réseau routier régional. La création de voies concentriques est souvent un résultat de l'usage croissant de l'automobile. D'un point de vue fonctionnel, elles s'inscrivent dans une logique de liaison et de connexion pour faciliter les déplacements d'un lieu à un autre, en contournant les zones urbanisées.

D'un point de vue morphologique, les voies concentriques sont caractérisées par un degré élevé ($Q_3 - Q_4$), une forte orthogonalité ($Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$) et un espacement intermédiaire ($Q_2 - Q_3$), ou élevé ($Q_3 - Q_4$) (Tableau 6.1 - (2)). Ces caractéristiques topologiques et géométriques correspondent à celles de motifs maillés larges localisés en péricentre ou en périphérie. Le rang hiérarchique de ces voies change au cours du temps en termes de degré et d'espacement puisque qu'en contournant le réseau à mesure que ce dernier évolue, elles intersectent et connectent davantage de voies à leur extrémité, ce qui renforce leur degré et diminue leur espacement. Ces voies sont associées à un processus de réticulation puisque leur évolution implique une meilleure connexion du réseau. En termes de formation/rattachement des nouvelles voies aux voies existantes, ces voies correspondent d'une part dans le cadre d'une planification urbaine, à des patrons de création et de délimitation (contournement). Et d'autre part, elles correspondent à un patron de connexion, lorsqu'elles émergent de manière organique, par exemple en suivant les anciens tracés des fortifications.

6.2.3 Voie convergentes/divergentes

À mesure que la ville se développe, l'attrait du centre historique persiste car il est souvent le cœur culturel, politique et économique de la ville. Cela conduit à un développement urbain autour de ce noyau ancien, créant une dynamique où la ville s'étend à la fois vers l'extérieur et se densifie à l'intérieur. Les voies convergentes/divergentes sont des voies qui divergent

à partir du centre historique ou convergent vers ce dernier permettant de délimiter et de connecter de nouveaux quartiers urbains. Elles sont souvent connectées aux voies principales existantes, notamment radiales ou concentriques, assurant ainsi une meilleure connectivité du réseau viaire. Il s'agit de voies de connexion permettant l'accès au centre-ville et l'accès d'un quartier au reste de la ville.

Morphologiquement, les voies convergentes/divergentes sont caractérisées par un degré plutôt élevé ($Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$), une forte orthogonalité ($Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$), et un faible espacement ($min - Q_1$ ou $Q_1 - Q_2$). Ces propriétés topo-géométriques se rapportent à des motifs maillés de taille intermédiaire ou large qui se déploient principalement autour du centre (Tableau 6.1 - (3)).

Le rang hiérarchique de ces voies reste stable dans le temps en termes de degré. En effet, bien qu'elles se connectent à un plus grand nombre de voies au fur et à mesure du temps, impliquant un degré plus élevé, leur rang hiérarchique demeure constant car les voies radiales/linéaires et concentriques sont aussi de plus en plus connectées à mesure que le réseau évolue. En revanche, leur rang en termes d'orthogonalité et d'espacement subit des changements. En effet, les nouvelles voies qui s'y rattachent entraînent une diminution de leur espacement et le fait que les nouvelles voies s'y connectent de manière orthogonale, implique une augmentation de leur orthogonalité.

Les voies convergentes/divergentes sont associées à un mode d'évolution par réticulation et à des patrons de formation/rattachement par connexion aux voies existantes, ou par subdivision au sein de secteurs en cours d'urbanisation. Elles permettent ainsi de délimiter de nouvelles zones urbaines (quartiers). Leur émergence est en générale le résultat d'un développement urbain organique de la ville. Toutefois, elles peuvent également résulter d'une planification urbaine.

6.2.4 Voies ramifiées

Le long de voies principales ou secondaires, des rues ou des chemins se ramifient dans différentes directions sous forme de branches ou d'embranchements. Les voies ramifiées peuvent assurer un accès à trois échelles différentes : celle d'une zone urbaine, celle d'un quartier et celle d'un îlot. Ces voies peuvent être situées aussi bien au centre de la ville qu'à sa périphérie (Tableau 6.1 - (4)).

Au niveau du centre, ces voies se caractérisent par un degré relativement élevé ($Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$), une orthogonalité plutôt intermédiaire ($Q_1 - Q_2$) et un très faible espacement ($\text{min} - Q_1$), car elles se rattachent à plusieurs autres voies présentant des intersections peu espacées et des angles peu perpendiculaires. Ces caractéristiques se rapportent à des motifs arborescents d'une étendue intermédiaire ou large, localisés préférentiellement au centre. Leur rang hiérarchique demeure constant au cours du temps, pour l'ensemble des indicateurs, au fur et à mesure que le réseau se développe.

En périphérie, ces voies ramifiées se distinguent par un faible degré ($\text{min} - Q_1$), une faible orthogonalité ($\text{min} - Q_1$) et un fort espacement ($Q_3 - Q_4$). Cela s'explique par leur faible connexion au réseau dans son ensemble, ainsi que des intersections distantes et peu orthogonales. Ces caractéristiques se rapportent à des motifs arborescents étroits (peu étendus) en périphérie. Le rang hiérarchique des voies évolue positivement dans le temps en termes de degré et négativement en termes d'espacement à mesure que les voies ramifiées se greffent les unes aux autres. Leur faible orthogonalité est constante au cours du temps.

Les voies ramifiées sont donc associées à deux modes d'évolution par densification au centre et par extension en périphérie, ainsi qu'au patron de formation/rattachement aux voies existantes par ramification.

6.2.5 Voies orthogonales/ diagonales

L'urbanisme du 18^{ème} siècle et 19^{ème} siècle donne naissance à de nouvelles configurations à la fois dans les centres-villes existants et dans les quartiers en développement. Cette phase d'urbanisation a remis en valeur le plan orthogonal, caractérisé par des rues droites se croisant à angles droits pour former une grille. En parallèle, de nouvelles rues et avenues ont été percées en diagonale à travers cette grille. Cette configuration urbaine est reconnaissable dans de nombreuses villes françaises et est le fruit de l'application ou de l'influence de l'urbanisme haussmannien, qui était principalement axé sur l'embellissement, l'amélioration de la salubrité et la facilitation de la circulation. Ainsi, ces voies tracent le squelette des quartiers urbains. Elles permettent un déplacement plus rapide et plus direct entre différents points du réseau. Elles permettent également d'assurer la desserte de quartiers.

Les voies orthogonales/diagonales sont caractérisées par des valeurs intermédiaires de degré ($Q_1 - Q_2$ ou $Q_2 - Q_3$), une orthogonalité élevée ($Q_3 - Q_4$) et un espacement relativement faible ($\text{min} - Q_1$ ou $Q_1 - Q_2$). Ces caractéristiques se rapportent à de larges motifs maillés, identifiables au centre ou en péricentre. Leur rang hiérarchique demeure stable au cours du temps en

termes de degré et d'orthogonalité, mais il diminue en ce qui concerne l'espacement au fur et à mesure que le réseau se développe.

Les voies orthogonales/diagonales sont donc associées à un mode d'évolution par réticulation et à des patrons de formation/rattachement par subdivision au sein de secteurs délimités par des voies convergentes/divergentes (Tableau 6.2 - (5)).

6.2.6 Voies transversales

Les voies transversales font référence habituellement à des itinéraires, des rues ou des sentiers qui traversent des zones initialement non urbanisées en se dirigeant perpendiculairement ou en diagonale par rapport à un axe principal. Au cours du développement urbain, ces voies peuvent assurer un rôle d'accès local, pour desservir les nouvelles zones résidentielles, ou raccorder de nouveaux lotissements au reste du réseau.

Les voies transversales se caractérisent par un degré relativement faible (min - Q_1 ou $Q_1 - Q_2$) ainsi qu'une orthogonalité et un espacement élevés ($Q_3 - Q_4$) (Tableau 6.2 - (6)). Cette caractéristique est commune aux motifs maillés de taille étroite ou intermédiaire, observables principalement en périphérie. Leur rang hiérarchique concernant les trois indicateurs change au fur et à mesure que le réseau se développe car ces voies représentent souvent une étape intermédiaire dans le processus d'évolution. Elles sont support de rattachement et d'émergence de nouvelles structures, principalement orthogonales, ce qui entraîne une progression de leur hiérarchie en termes de degré et d'orthogonalité, ainsi qu'une régression en termes d'espacement.

Les voies transversales sont donc associées à un mode d'évolution par densification et à des patrons de formation/rattachement aux voies existantes par intersection en X.

6.2.7 Voies intercalaires

Les voies intercalaires sont des voies locales qui servent à accéder à des terrains spécifiques, et qui se rattachent à la structure viaire existante de manière intercalaire (entre les autres voies). Ces voies sont souvent situées dans les zones résidentielles, industrielles et commerciales.

Elles sont caractérisées par un faible degré (min - Q_1), une orthogonalité variable ($Q_1 - Q_2$ ou $Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$) et un espacement qui est également variable (min - Q_1 ou $Q_1 - Q_2$ ou $Q_2 - Q_3$). Cela correspond à des caractéristiques qui se rapportent à des motifs étroits, identifiables en

différentes localisations, et qui peuvent être arborescents ou maillés. Leur rang hiérarchique demeure stable au cours du temps pour les trois indicateurs à mesure que le réseau se développe car, une fois créées, elles subissent généralement peu de changements.

Ces voies transversales sont donc associées à un mode d'évolution par densification et à des patrons de formation/rattachement par intersection en T ou par juxtaposition à des voies existantes (Tableau 6.2 - (7)).

6.2.8 Voies cellulaires

Les voies cellulaires sont des voies de remplissage interstitiel qui délimitent des îlots. Leur principal rôle est d'assurer la desserte locale à l'intérieur des îlots, bien qu'elles permettent également un raccordement entre les voies préexistantes.

Ces voies sont caractérisées par un degré faible (min - Q_1), un espacement variable (min - Q_1 ou $Q_1 - Q_2$ ou $Q_2 - Q_3$) et une orthogonalité relativement élevée ($Q_2 - Q_3$ ou $Q_3 - Q_4$) qui se rapportent à des motifs maillés étroits, identifiables en différentes localisations. Leur rang hiérarchique est stable dans le temps en termes de degré et d'orthogonalité mais diminue en termes d'espacement à mesure que le réseau se développe.

Ces voies transversales sont donc associées à un mode d'évolution par réticulation et à des patrons de formation/rattachement par remplissage interstitiel du réseau préexistant (Tableau 6.2 - 8)).

6.2.9 Essai d'application pour décrire l'évolution des réseaux viaires des trois villes étudiées

L'identification des morphotypes de voies en les associant aux processus d'évolution des réseaux viaires peut être appliquée pour décrire l'évolution des réseaux viaires. Elle permet également d'explorer la possibilité de "reconstruire" la structure de ces réseaux en combinant ces morphotypes, selon un ordre d'apparition. La schématisation de l'évolution des réseaux viaires des trois villes étudiées à partir des morphotypes associés a permis d'illustrer (a) le schéma radioconcentrique représentatif de Dijon (b) schéma en éventail représentatif de Besançon (c) schéma mixte entre linéaire et axe double représentatif de Pontarlier.

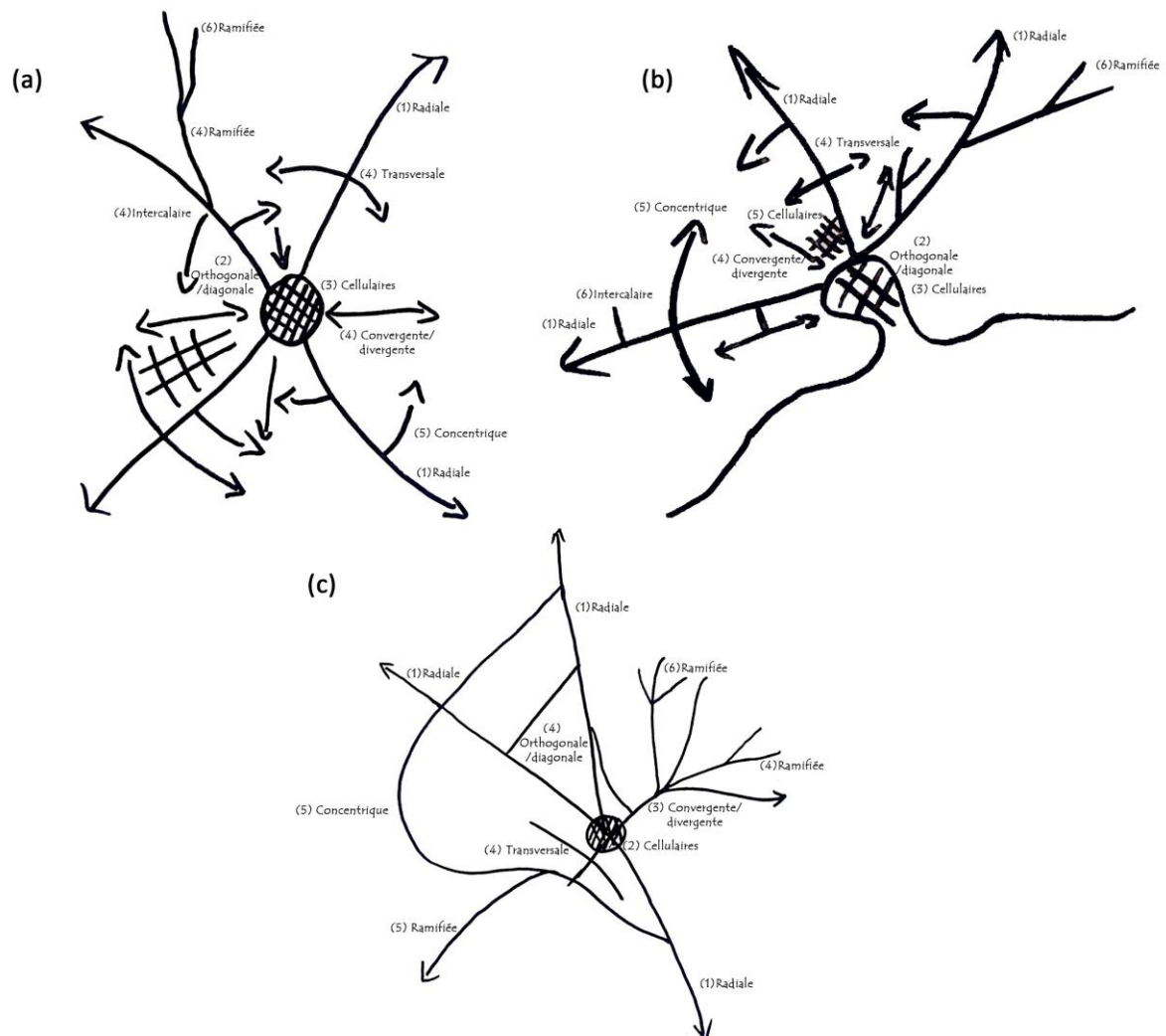


Figure 6.6. Illustration des schémas d'évolution des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier à partir des morphotypes associés et de leur ordre d'apparition.

6.3 Confrontation de la typo-morphologie aux résultats d'une classification ascendante hiérarchique

Dans cette section, nous proposons une confrontation de la typo-morphologie aux résultats d'une classification ascendante hiérarchique. L'objectif est de vérifier si nous pouvons valider la typo-morphologie que nous avons présentée précédemment, en comparant les classes résultant de la classification statistique aux morphotypes de voies définis préalablement.

Les classifications statistiques ont pour but de regrouper des individus qui partagent des caractéristiques statistiques similaires au sein de groupes (classes) distinct(e)s. Ces groupes sont considérés comme homogènes lorsque les individus qui les composent sont le plus semblables possible les uns aux autres. En parallèle, les groupes doivent être différenciés, ce qui signifie que les individus appartenant à des groupes différents doivent être le plus dissemblables possible les uns par rapport aux autres.

La classification hiérarchique est une approche de classification non supervisée (Michener & Sokal, 1957; Sokal & Rohlf, 1962), ce qui signifie qu'elle ne nécessite pas de catégories préalablement définies pour classer les données.

Dans le cadre d'une approche ascendante, également connue sous le nom de clustering agglomératif, chaque point est d'abord considéré comme formant un cluster à lui tout seul, créant ainsi autant de clusters que de points. Ensuite, elle recherche les deux clusters les plus proches et les fusionne en un seul cluster. Cette étape est répétée jusqu'à ce que tous les points soient regroupés en un seul grand cluster.

L'intérêt pour notre étude d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) est qu'il est possible d'ajuster la profondeur de l'arbre de classification, et ainsi de choisir le nombre de classes qui correspond le mieux à l'objectif de l'analyse.

Pour effectuer cette classification, nous considérons les voies des réseaux contemporains de chaque ville (Dijon, Besançon, Pontarlier) à la date la plus récente (2019), caractérisées par l'ensemble des indicateurs considérés dans les analyses morfo-historiques : le degré, l'orthogonalité et l'espacement ainsi que le degré de desserte, la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité. Nous tenons à préciser que les indicateurs considérés dans cette classification apportent des informations non corrélées (Lagesse, 2015).

La première étape de la CAH a consisté au centrage et à la réduction des données. Cela signifie que chaque indicateur est centré sur sa moyenne et mis à l'échelle pour avoir une variance

de 1. Cette étape permet d'éviter que les indicateurs présentant une forte variance n'affectent trop les résultats de la CAH. À la deuxième étape, une matrice des distances entre les voies (individus statistiques) est calculée à partir des données centrées et réduites. À la troisième étape, une classification ascendante hiérarchique est appliquée sur cette matrice des distances en utilisant le critère classique de Ward (1963). Le critère de Ward indique la perte d'inertie lors la fusion de deux classes. En d'autres termes, il permet de créer des regroupements de manière à ce que la somme des carrés des distances entre les individus d'un même cluster soit minimale après chaque fusion de cluster. Le critère de Ward a l'avantage de former des clusters relativement compacts, homogènes et équilibrés en termes de taille et de forme (Lerman & Bachar, 2008).

Le dendrogramme résultant de la CAH permet de visualiser la hiérarchie des clusters pour chacun des trois réseaux viaires étudiés (Figure 6.7). L'analyse de la forme du dendrogramme sert généralement à déterminer le nombre optimal de classes à retenir. Dans notre cas, nous l'utilisons plutôt pour comparer les classifications des voies des trois réseaux viaires (Figure 6.8).

La forme des dendrogrammes montre qu'en haut de l'arborescence, toutes les voies pour chacun des trois réseaux sont regroupées dans deux grandes classes distinctes que nous pouvons associer aux motifs élémentaires en arbre ou en grille. En outre, nous observons que l'une de ces deux classes principales rassemble de manière prédominante la grande majorité des sous-classes (Figure 6.7). Ce constat demeure quel que soit le nombre de classes considéré. Les différentes partitions obtenues en 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 classes sont visualisées sur le dendrogramme. Ceci est parfaitement cohérent avec la typo-morphologie des voies, dont la majorité des morphotypes correspondent au motif élémentaire maillé (six morphotypes sur les huit) (voir Tableau 6.1 et Tableau 6.2).

Les sauts d'inertie des classes indiquent des similitudes et des variations significatives pour les trois réseaux. Pour le réseau viaire de Dijon (Figure 6.8 - a), les sauts d'inertie les plus marqués sont repérés à 2, 3, et 7 classes. Les sauts d'inertie à 5, 6, et 8 classes sont moyennement importants, tandis qu'au-delà de 8 classes, les sauts d'inertie sont faibles à l'exception d'un saut à 14 classes. Pour le réseau viaire de Besançon (Figure 6.8 - b), les sauts d'inertie les plus nets sont repérés à 2, 3 et 7 classes. Il est à noter que le saut d'inertie entre 7 et 8 classes est particulièrement insignifiant. Au-delà de 8 classes, le seul saut notable se produit à 12 classes. Pour le réseau viaire de Pontarlier (Figure 6.8 - c), les sauts d'inertie les plus prononcés sont repérés à 2, 3 et 6 classes. Au-delà de 8 classes, le seul saut notable se produit à 13 classes.

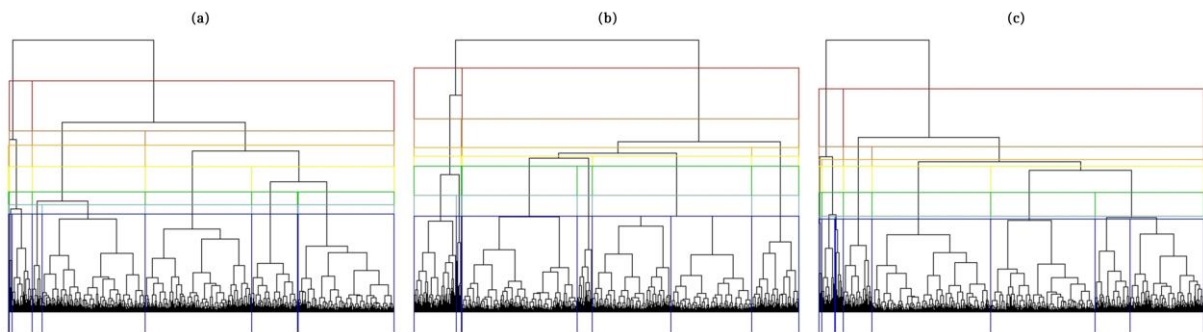


Figure 6.7. Dendrogramme représentant les résultats de la classification ascendante hiérarchique des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier, en 2019, avec des partitions entre 2 et 8 classes.

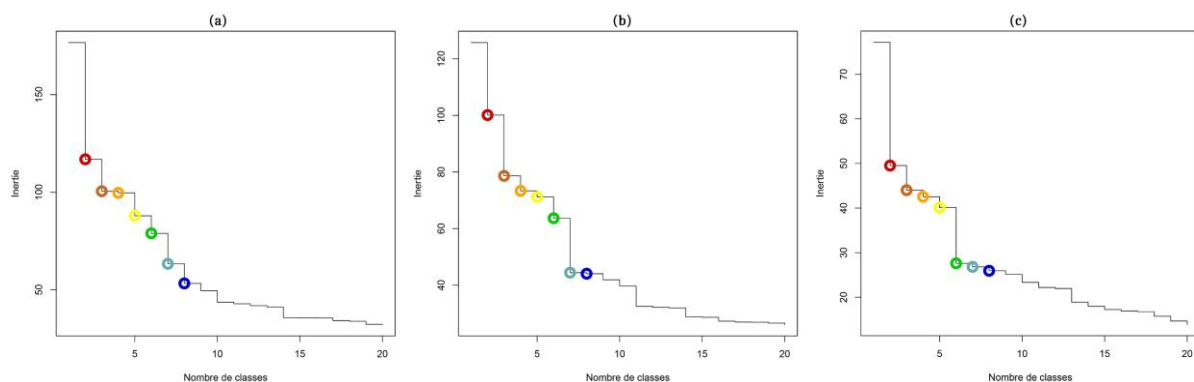


Figure 6.8. Diagrammes représentant l'inertie entre les classes résultant de la classification ascendante hiérarchique des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier, en 2019, avec des partitions entre 2 et 8 classes.

En fonction de notre objectif qui est de comparer les voies correspondant à chaque classe résultant de la CAH et les morphotypes précédemment définis, nous considérons un découpage du dendrogramme pour obtenir 8 classes. Ensuite, les données originales (les voies de chaque réseau) sont combinées avec les classes obtenues. Celles-ci sont représentées cartographiquement sur les réseaux viaires contemporains respectifs des trois villes.

Nous pouvons observer des similitudes marquées entre les huit classes et les morphotypes identifiés précédemment. La classe 8, dans les trois réseaux, rassemble principalement des voies concentriques (Figure 6.9), avec quelques exceptions de voies radiales. La classe 7 englobe principalement des voies radiales/linéaires reliant le centre à la périphérie (Figure 6.10), ainsi que quelques voies sinueuses en périphérie, pour les trois réseaux. La classe 6 met en évidence des voies présentant des similarités avec les voies convergentes/divergentes, assurant une connexion d'étendue intermédiaire à large entre les différentes zones du réseau (Figure 6.11). La classe 5 correspond en général à des voies orthogonales/diagonales,

permettant d'assurer la desserte de quartiers. Certaines voies de cette classe présentent une géométrie moins marquée que celle du morphotype correspondant (Figure 6.12).

Les voies de la classe 4 présentent des caractéristiques similaires à celles des voies ramifiées (Figure 6.13). Les voies de la classe 3 correspondent parfaitement au morphotype de voies intercalaires, caractérisé par une faible étendue (Figure 6.14). La classe 2 regroupe des voies correspondant aux voies cellulaires (Figure 6.15). En revanche, la classe 1 correspond à des voies qui n'avaient pas été identifiées précédemment dans les morphotypes de voies. Il s'agit de voies *articulaires* de très courtes longueurs, permettant de relier d'autres voies à une échelle très locale, par exemple, au niveau des intersections, des ronds-points ou des bretelles de raccordement (Figure 6.16).

En outre, la classification ne permet pas d'identifier distinctement les voies transversales. Celles-ci sont en effets incluses dans la classe 6, qui contient les voies convergentes/divergentes, ou bien dans la classe 5, qui contient les orthogonales/diagonales. Cela peut s'expliquer par le fait que les voies transversales représentent souvent une étape intermédiaire dans l'évolution d'un réseau viaire et qu'elles sont par conséquent peu présentes dans des réseaux bien développés, tels que ceux de Dijon, Besançon et Pontarlier en 2019.

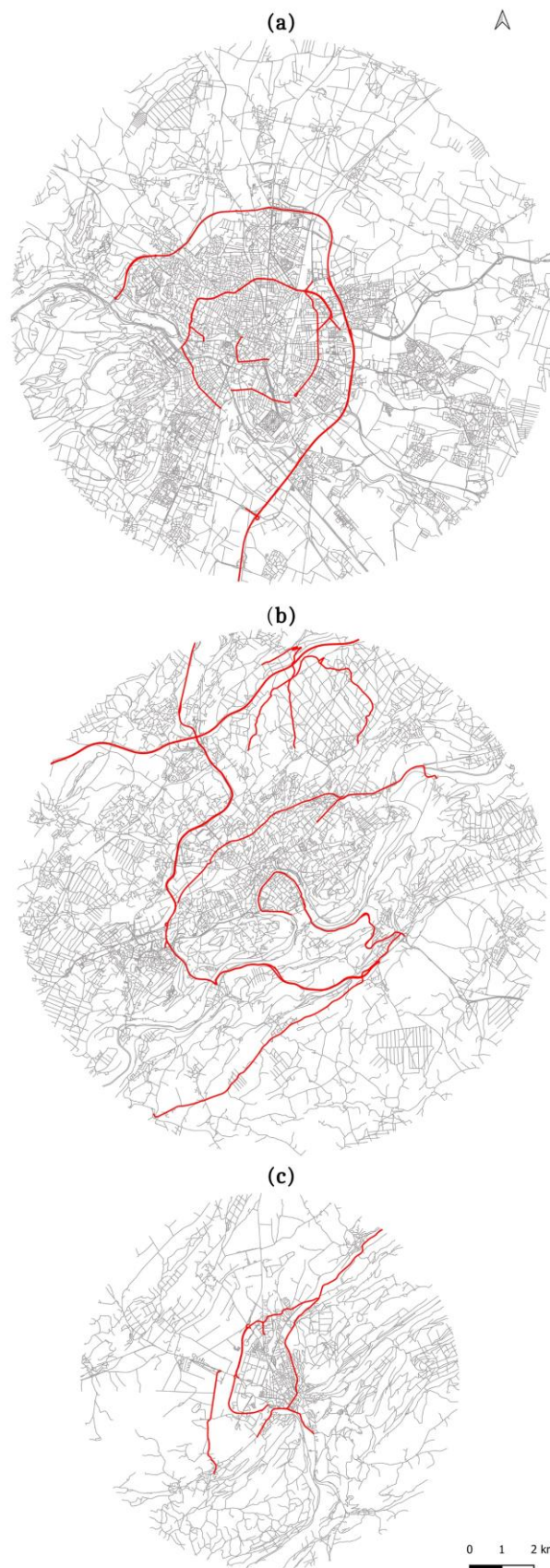


Figure 6.9. Voies de la classe 8 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies concentriques. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

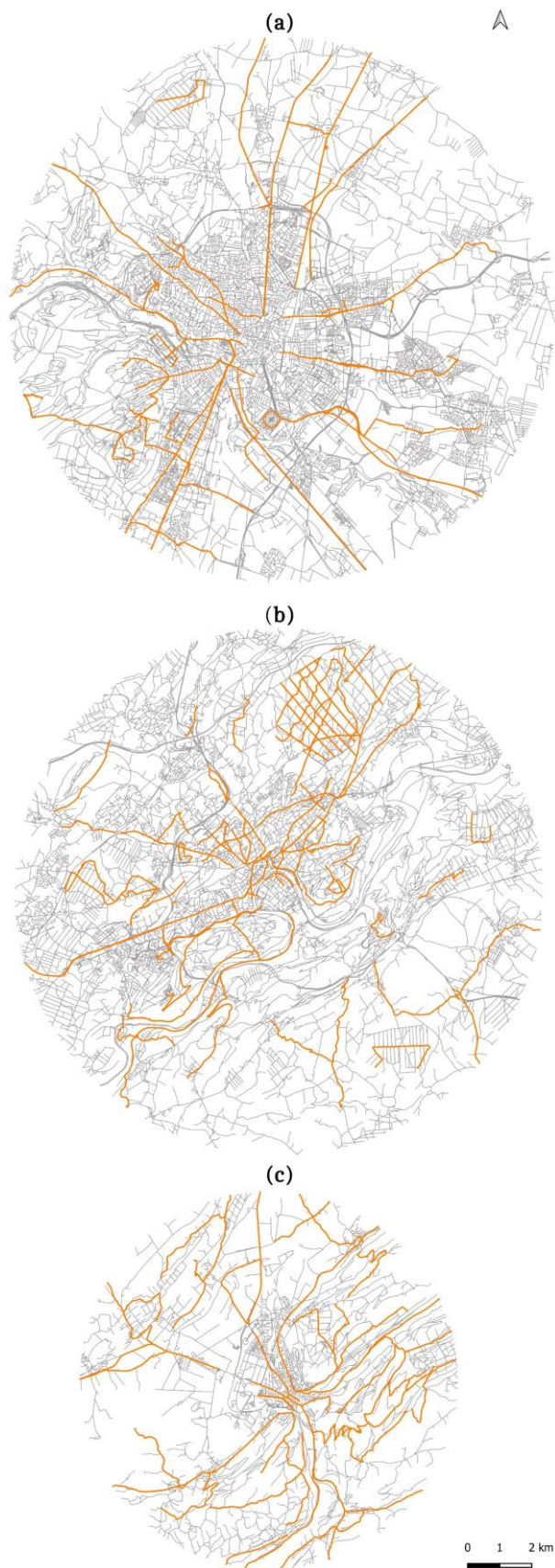


Figure 6.10. Voies de la classe 7 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies radiales. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

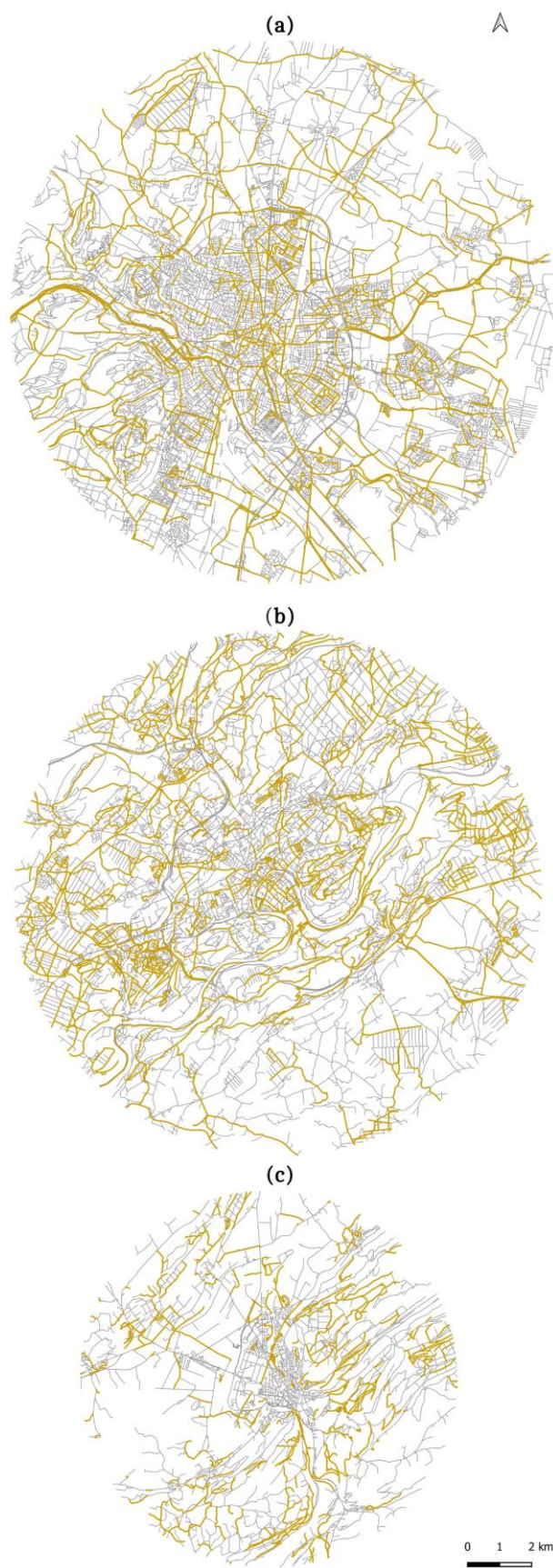


Figure 6.11. Voies de la classe 6 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies convergentes/divergentes. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

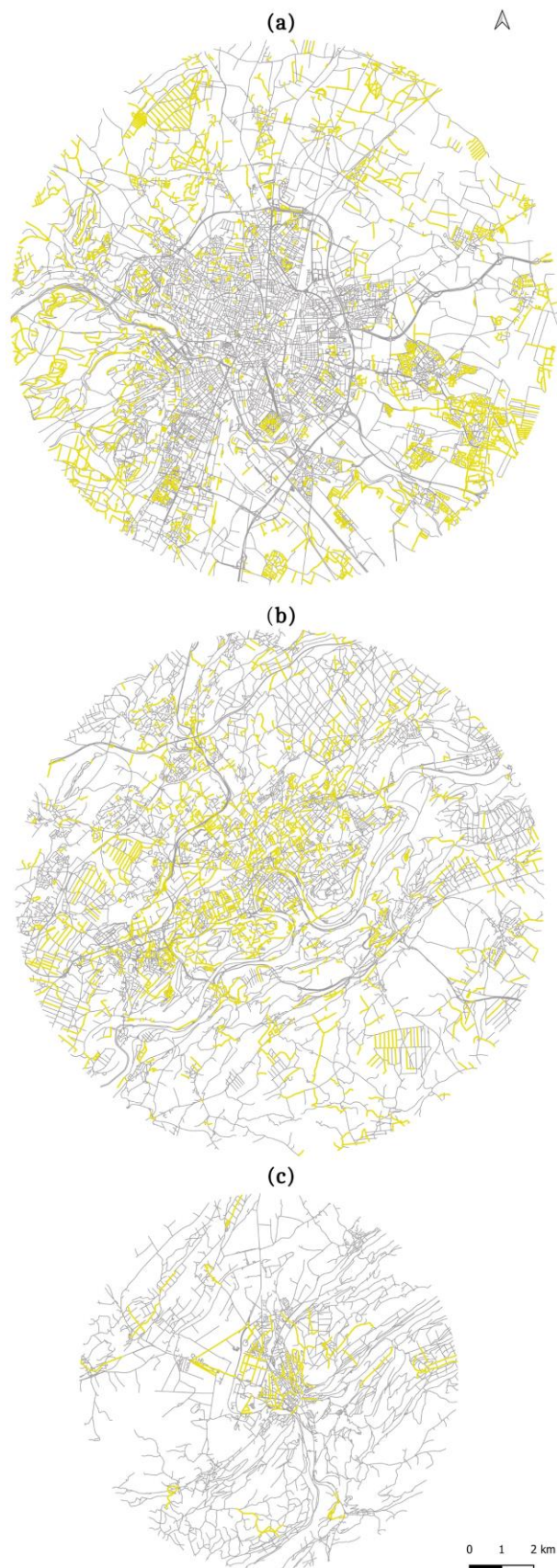


Figure 6.12. Voies de la classe 5 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies orthogonales/diagonales. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

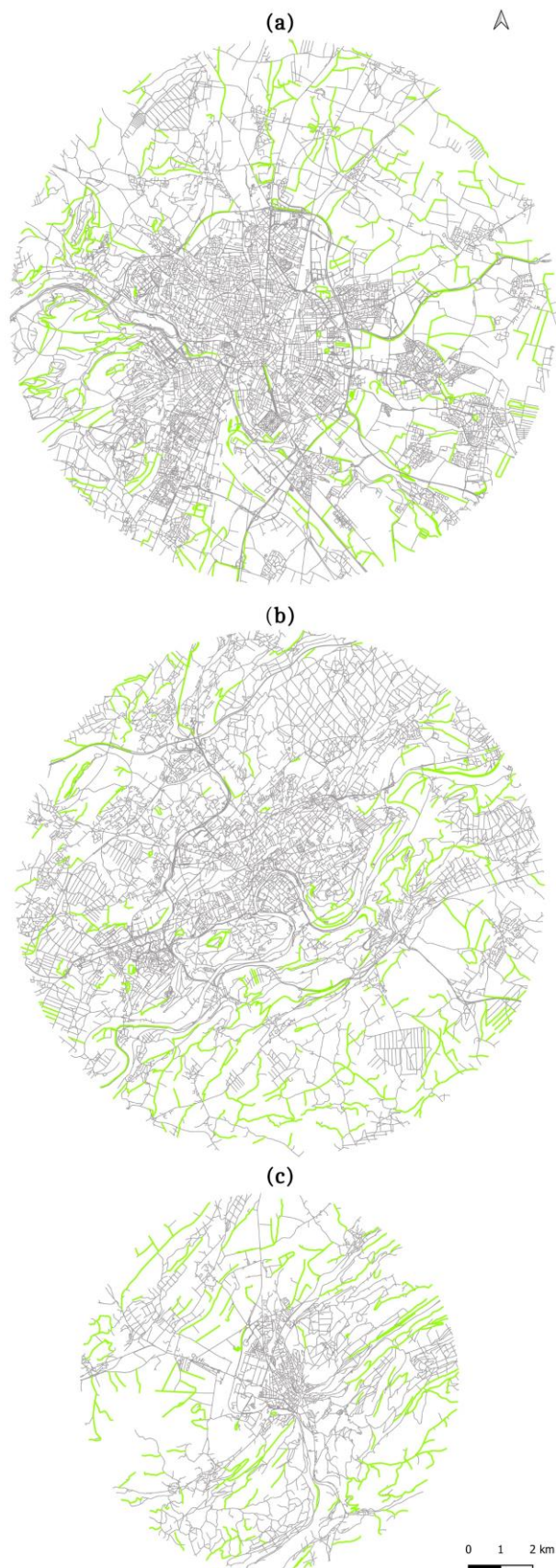


Figure 6.13. Voies de la classe 4 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies ramifiées. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

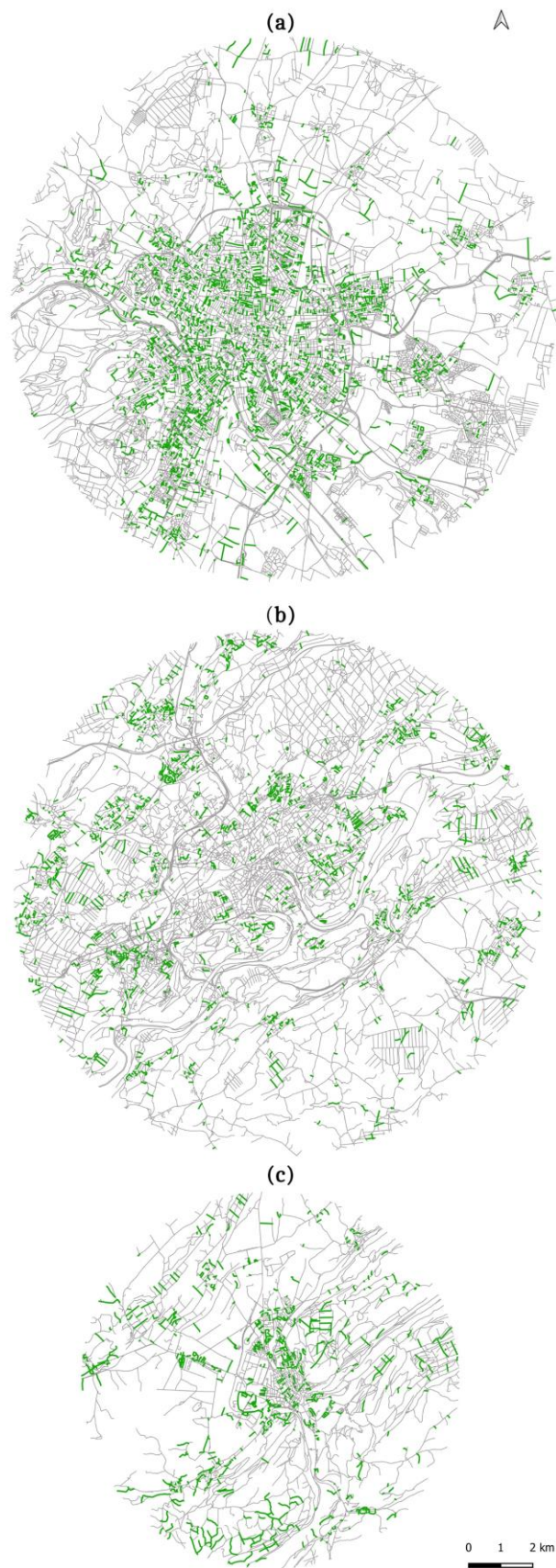


Figure 6.14. Voies de la classe 3 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies intercalaires. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

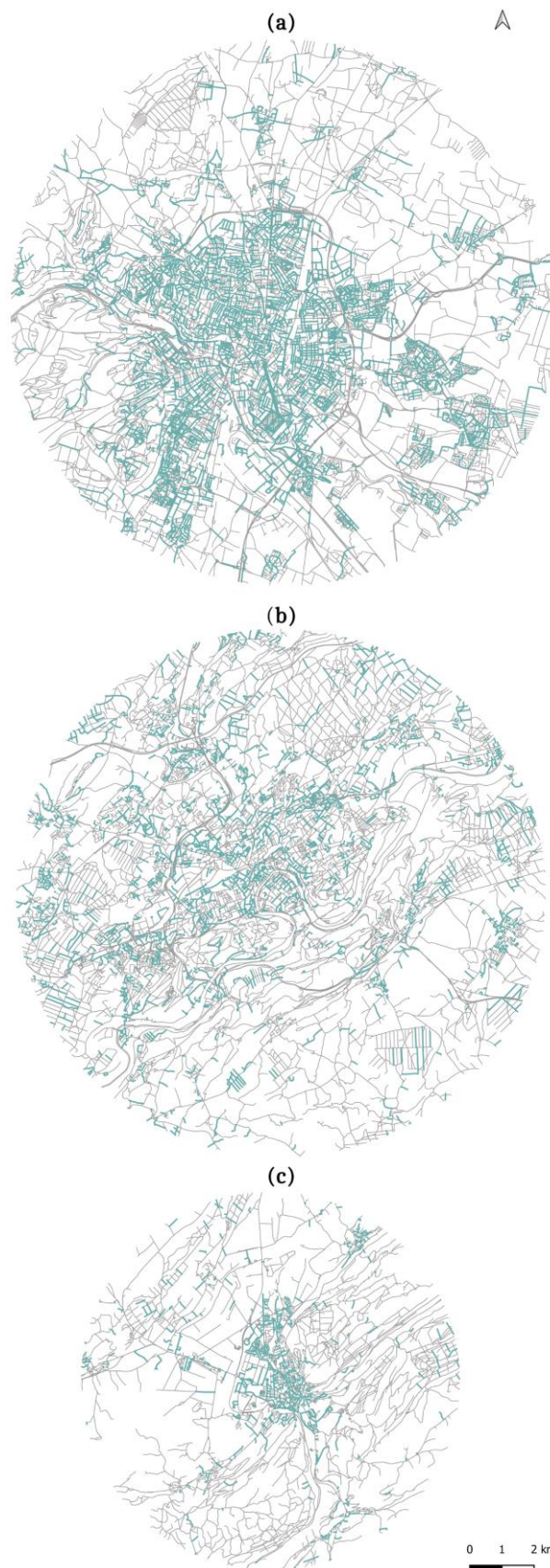


Figure 6.15. Voies de la classe 2 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies cellulaires. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

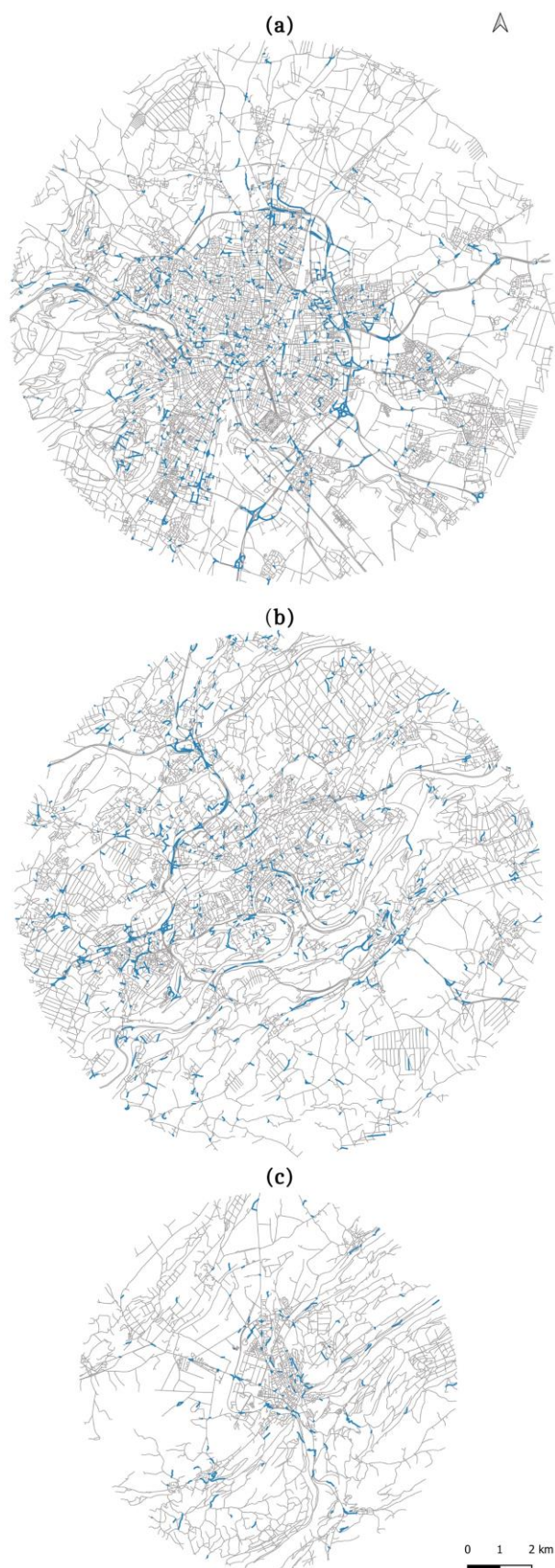


Figure 6.16. Voies de la classe 1 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant à un nouveau morphotype de voies *articulaires*. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).

6.4 Synthèse du chapitre 6

Ce chapitre a d'abord permis l'identification de motifs viaires à partir du croisement de trois indicateurs locaux deux à deux. Le croisement entre l'espacement et l'orthogonalité a permis de distinguer les motifs arborescents et les motifs maillés selon leur localisation préférentielle (au centre, en péricentre ou en périphérie). Le croisement entre le degré et l'espacement a permis de distinguer les motifs selon leur taille (étendue) : motifs larges (très étendus, qui traversent le réseau), et motifs étroits/petits (moyennement ou peu étendus, qui est sur une zone locale du réseau), chacun correspondant à des localisations préférentielles dans la ville. Le croisement entre le degré et l'orthogonalité a permis d'identifier des motifs maillés et arborescents de différentes tailles (larges ou étroits).

Ensuite, en considérant différents critères de classification qualitatifs et quantitatifs, d'ordre synchronique et diachronique, nous avons proposé une typo-morphologie des voies. Huit morphotypes de voies ont été identifiés : (1) voies radiales/linéaires, (2) voies concentriques, (3) voies convergentes/divergentes, (4) voies ramifiées, (5) voies orthogonales/diagonales, (6) voies transversales, (7) voies intercalaires, (8) voies cellulaires. Ces morphotypes ont été associés à des processus (modes) d'évolution et des patrons de formation/ rattachement des nouvelles voies aux voies existantes.

L'application d'une classification ascendante hiérarchique sur toutes les voies des réseaux viaires contemporains (en 2019) des villes de Dijon, Besançon et Pontarlier a permis de valider sept morphotypes parmi les huit identifiés. La classification n'a pas permis d'identifier distinctement les voies transversales. Cela peut être attribué au fait que ces voies tendent souvent à évoluer par un processus de réticulation pour se transformer en voies orthogonales/diagonales ou en voies convergentes/divergentes, à mesure que le réseau se développe. Cependant, la classification ascendante hiérarchique (CAH) a révélé une nouvelle catégorie qui n'avait pas été prise en compte dans la classification semi-quantitative des morphotypes : les voies "articulaires". Ces voies jouent principalement un rôle de liaison avec d'autres voies, à une échelle très fine.

Conclusion de la partie 2

En conclusion de cette deuxième partie, nous pouvons établir que l'association d'une approche typo-morphologique à l'approche morpho-historique (menée dans la partie 1) du réseau viaire, nous a permis de démontrer que ce réseau viaire est composé de plusieurs morphotypes de voies. Ces morphotypes sont identifiables sur les différents réseaux, à différentes dates, en se basant sur des indicateurs topo-géométriques simples d'ordre local. Le suivi de l'évolution morphologique à l'échelle des voies mené dans la partie 1 de cette thèse a permis d'associer ces morphotypes à différents processus (modes) d'évolution du réseau viaire, à savoir la densification, l'extension et la réticulation. La caractérisation quantitative de chaque morphotype par des valeurs d'indicateurs qui peuvent être suivis dans le temps représente une contribution méthodologique et scientifique précieuse pour étudier l'évolution des réseaux.

L'évolution des villes étant un phénomène complexe, l'aborder par son réseau viaire en le décomposant en morphotypes permet de simplifier la lecture de son évolution et de sa forme finale. Le squelette du réseau est créé au départ. Des voies de desserte globale, locale ou intermédiaire, s'y rattachent progressivement. Suivant cette logique, le réseau se construit par phases successives, ce qui induit un certain ordre d'émergence des morphotypes. Dans une logique constructiviste de la morphogénèse, nous pouvons conclure que l'emboîtement et l'articulation de quelques morphotypes constitue un tissu urbain. Ainsi l'emboîtement et l'articulation de plusieurs morphotypes constitue la forme globale d'un réseau, qui se rapporte elle-même à la forme des villes.

Dans l'optique de modéliser et de simuler la morphogénèse des réseaux viaires, le décryptage de l'évolution des réseaux à partir d'une réflexion sur l'évolution et l'ordre d'émergence des morphotypes de voies revêt un grand intérêt. Les processus d'évolution ainsi que les patrons de formation/rattachement des voies associés aux morphotypes peuvent servir de fondement pour la conception des mécanismes génératifs d'un modèle de simulation.

Troisième partie
Simulation de la morphogénèse
des réseaux viaires

Introduction de la partie 3

Dans les deux précédentes parties de la thèse, la modélisation de la forme des réseaux viaires urbains a consisté en une simplification schématique de l'espace urbain (Baro, 2015) visant à représenter correctement l'environnement urbain à partir de sources hétérogènes (Perret, 2016). Dans cette partie 3 de la thèse, c'est la modélisation de la morphogénèse du réseau qui nous intéresse, c'est-à-dire la reproduction, par simulation, de processus observables ayant été détectés dans les deux premières parties de la thèse.

Notre modélisation de la morphogénèse du réseau viaire d'une ville porte sur deux échelles, celle du réseau dans son ensemble, représenté par un graphe viaire, et celle des voies. Les résultats des analyses menées lors de la partie 1 de la thèse ont en effet confirmé la pertinence de la lecture du réseau viaire au prisme de son graphe viaire et de l'objet "*voie*". À l'échelle du graphe viaire, les analyses morpho-historiques ont permis l'identification de propriétés structurelles des réseaux. Ces propriétés sont persistantes dans le temps et valables pour les trois réseaux viaires étudiés (Besançon, Dijon et Pontarlier), indépendamment du lieu et de l'époque de leur construction. Dans la partie 2, le rôle crucial de la voie a été démontré pour le suivi de l'évolution morphologique du réseau viaire dans le temps et pour l'identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution associés

Ces résultats d'analyse nous amènent à considérer que le réseau viaire urbain se construit par phases d'évolution successives et qu'il résulte de différents mécanismes, spatialement différenciés, de subdivision et de densification du réseau. La forme finale du réseau consiste en une juxtaposition et une imbrication de différents morphotypes de voies, qu'il est possible de créer par simulation à partir de règles morphologiques et topologiques simples. Les caractéristiques attendues des réseaux viaires simulés sont les suivantes : trois propriétés structurelles à l'échelle du graphe viaire (les lois d'échelle des propriétés deux à deux du graphe, l'invariance d'échelle de la longueur et de l'espacement des voies et les propriétés de "petit monde" relatives au degré des voies et des nœuds) et la présence dans les réseaux simulés de tout ou partie de huit morphotypes de voies (concentriques, radiales/linéaires, convergentes/divergentes, orthogonales/diagonales, transversales, intercalaires, cellulaires et ramifiées).

Cette troisième partie de la thèse est organisée comme suit. Le chapitre 7 fournit un aperçu des expériences de modélisation de la morphogénèse viaire. Une série de modèles sont

étudiés en vue de déterminer s'ils permettent de simuler des réseaux viaires présentant toutes les caractéristiques attendues. Le chapitre 8 décrit un nouveau modèle de simulation de la morphogenèse de réseaux viaires intitulé WayMorph, conçu en vue de simuler des réseaux viaires présentant l'ensemble des caractéristiques attendues. Le chapitre 9 consiste d'abord en l'évaluation du modèle WayMorph. Une analyse de stabilité est menée tout d'abord afin d'identifier les effets de l'aléa sur les résultats de la simulation. Une analyse de sensibilité est ensuite menée pour étudier la variation des résultats en fonction de la modification des valeurs de paramètres du modèle et du réseau d'initialisation. Enfin, un calibrage des paramètres du modèle est effectué pour permettre de simuler l'émergence de chaque morphotype de voie. Une validation empirique du modèle est présentée par rapport à l'objectif de simuler l'ensemble des morphotypes. Le chapitre 10, dernier chapitre de cette troisième partie de la thèse, est dédié à l'exposé de différents scénarios de simulation de réseaux viaires avec le modèle WayMorph. Les simulations permettent de recréer différentes formes de villes. Les résultats obtenus sont évalués en mobilisant un nombre réduit d'indicateurs. L'interprétation des résultats de ces simulations permet de comparer les propriétés structurelles des différents réseaux simulés à celles identifiées pour les réseaux viaires des trois villes étudiées.

Chapitre 7

Un aperçu des expériences de simulation de la morphogénèse viaire

Les modèles de morphogénèse des réseaux viaires relèvent de deux types d'approches : les approches non spatiales, notamment statistiques (Bettencourt, 2020) et économiques (de Vries et al., 2001), et les approches spatiales où la ville est considérée comme un système complexe façonné par des dynamiques opérant à différentes échelles (Perret, 2016). Nous nous intéressons ici uniquement aux modèles spatialement explicites de morphogénèse des réseaux. Ils sont issus de travaux de recherche en physique, en géographie quantitative, en informatique et en ingénierie des transports. Ils visent, d'une part, à décrypter la manière dont les différentes contraintes physiques et géographiques influencent l'évolution des réseaux viaires. D'autre part, l'objectif est d'identifier les processus qui sous-tendent l'émergence de topologies complexes de réseaux à différentes échelles spatiales (Bottinelli et al., 2015; Gastner et Newman, 2006a).

Certains parmi ces modèles relèvent de la science des réseaux, qui a émergé vers la fin des années 1990 au sein de la théorie des systèmes complexes et qui a apporté une perspective pluridisciplinaire pour la construction de modèles de croissance géographique (Pumain et al., 2006). Les modèles relevant de la science des réseaux ont la particularité de représenter les réseaux au moyen de graphes de différents types (Barthelemy, 2011). Leurs propriétés sont déduites au moyen d'analyses statistiques de données spatialisées (Taylor et Miller 2003, Levinson 2007, Levinson et Chen 2007).

Une grande majorité de ces modèles vise à expliquer les caractéristiques statiques des réseaux à différents dates mais peu se concentrent sur la compréhension de leur évolution au cours du temps (Barthelemy, 2018). En effet, la compréhension de cette évolution nécessite une analyse des réseaux viaires dans le temps, qui est contrainte par la disponibilité des données historiques.

La littérature scientifique dans différentes disciplines a montré que la morphogénèse du réseau viaire est simultanément régie par des processus de croissance urbaine descendants (i.e. "top-down") de planification ; et ascendants (i.e. "bottom-up") d'auto-organisation (Barthelemy et al., 2013; Barthelemy, 2015; J. Wang, 2015; J. Yang et al., 2023). Cela signifie

que la structure et la forme des réseaux viaires sont influencées non seulement par les dimensions topologiques (par exemple, l'ajout et l'abandon de liens entre les lieux) ou morphologiques (par exemple, les changements de la forme ou la configuration spatiale des îlots urbains) au niveau micro-géographique, mais aussi par des dimensions sociales et politiques au niveau de chaque ville et du système de villes (Batty, 2010) qui varient dans le temps et selon les villes en fonction du contexte (politique, économique, culturel, etc.) (Zhou et al., 2020). Les interactions entre les dimensions topologiques et morphologiques (micro-géographiques), d'une part, et sociales et politiques (mésos- ou macro-géographiques), d'autre part, n'ont été que peu étudiées (J. Yang et al., 2023). La question de savoir comment cela affecte la forme et l'organisation des réseaux viaires reste encore à explorer.

Dans ce chapitre, nous proposons un état de l'art non exhaustif d'expériences pluridisciplinaires de modélisation de la morphogénèse des réseaux viaires. Nous discuterons de modèles qui sont spatialement explicites et portent sur l'une (ou plusieurs) des échelles suivantes : l'échelle de la ville dans son ensemble, l'échelle des tissus urbains et l'échelle des rues et de leurs intersections. Ces modèles seront étudiés en vue de déterminer s'ils permettent de simuler des réseaux viaires présentant certaines caractéristiques exposées dans l'introduction de cette partie 3 de la thèse, à savoir : l'invariance d'échelle, les propriétés de "petit monde", et les lois d'échelle des propriétés du graphe.

7.1 Modèles origine-destination

Pendant les années 1960 et 1970, le mouvement de géographie économique (géographie des transports) et de science régionale (Isard, 1956) a vu l'émergence des premiers travaux de modélisation de l'évolution des réseaux de transport en termes de changements structurels et topologiques (Haggett et Chorley, 1969; Lowe et Moryadas, 1975; Taaffe et al., 1973). En raison de la disponibilité limitée de données et de ressources de calcul, les premiers modèles proposés étaient basés sur des règles intuitives et heuristiques et peu de données empiriques détaillées (Louf et al., 2013).

Xie et Levinson (2009b) présentent une revue de littérature détaillée des modèles basés sur la représentation des origines et des destinations des flux de circulation. Nous mentionnerons ici uniquement quelques travaux qui nous semblent pertinents par rapport à notre recherche.

7.1.1 Modèles intégrant des logiques de déplacement

À une échelle spatiale très fine, les modèles de déplacement actif (Lam, 1995; Lam et al., 1993) ont permis de simuler l'apparition de sentiers dans les espaces verts urbains façonnés par le mouvement des piétons. Ces modèles parviennent à reproduire certaines caractéristiques spatiales des systèmes de sentiers. Le modèle de Helbing et al. (1997) est l'un des travaux pionniers de modélisation des déplacements piétons basés sur le principe de "détour minimal". Le détour minimal représente un compromis entre un système de voies directes et un système de voies minimales (qui est le système de voies le plus court qui relie tous les points d'origine et toutes les destinations) (Figure 7.1). Yamins et al. (2003) ont, eux, modélisé la croissance de routes urbaines à une échelle spatiale plus globale. D'abord, le potentiel de transport maximal entre deux endroits de la ville est identifié. Ensuite, la route la moins coûteuse pour les relier est générée. Ce modèle a permis de reproduire des caractéristiques globales observées de réseaux de transports en commun réels (Figure 7.2), Cependant, il n'inclut pas la demande de déplacement ni la dynamique des flux de circulation.

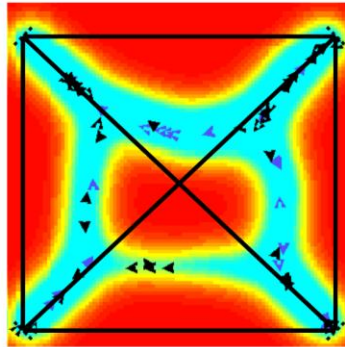


Figure 7.1. Le modèle de Helbing et al. (1997). Comparaison des différents types de systèmes de chemins entre quatre endroits : le système de chemins directs (représenté par les lignes noires) correspond aux connexions les plus courtes entre tous les points d'origine et les destinations. Source : Helbing et al. (1997).

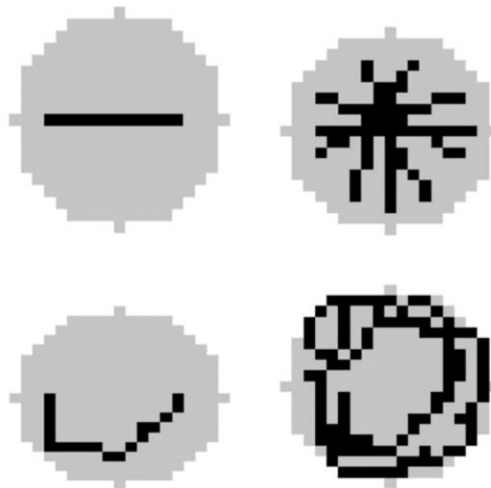


Figure 7.2. Le modèle de Yamins et al. (2003). L'évolution d'un réseau viaire à partir d'une zone urbanisée sans routes principales. La croissance des voies radiales et des rocades est principalement contrôlée par l'équilibre entre le coût de la construction de routes à travers des zones urbanisées denses et le coût de la construction de routes plus longues et plus sinueuses. Source : Yamins et al. (2003).

7.1.2 Modèle incluant la demande de déplacement

Avec une approche similaire d'origine-destination, toutefois prenant en considération la demande de déplacement entre deux localités, Levinson & Zhang (2004) ont mené des expériences de simulation pour prédire les extensions routières à partir de l'analyse de la croissance du réseau réel de deux villes jumelles (Figure 7.3). Un modèle de demande de déplacement couplé à des modèles de revenus, de coûts et d'investissements a été proposé par Levinson et Yerra (2006) et Yerra et Levinson (2005). Les simulations appliquées sur un

réseau en grille ont démontré que la hiérarchie des routes émerge dans tous les cas : hiérarchie par rapport à la vitesse ou aux flux de déplacement (Figure 7.4).

Xie et Levinson (2009a) ont étudié dans un environnement de simulation, les différences de déploiement d'un réseau routier sous un contrôle juridictionnel centralisé versus décentralisé. Le modèle implémente le déploiement du réseau viaire comme un processus interne de connexions incrémentales qui émerge des décisions prises par les individus lors de leurs déplacements, notamment en ce qui concerne le choix de la destination et de l'itinéraire à court terme (Figure 7.5). Les autorités publiques, qu'elles soient centrales ou locales, contribuent également à ce processus en prenant des décisions sur la tarification routière et l'investissement à long terme, en fonction de diverses initiatives politiques.

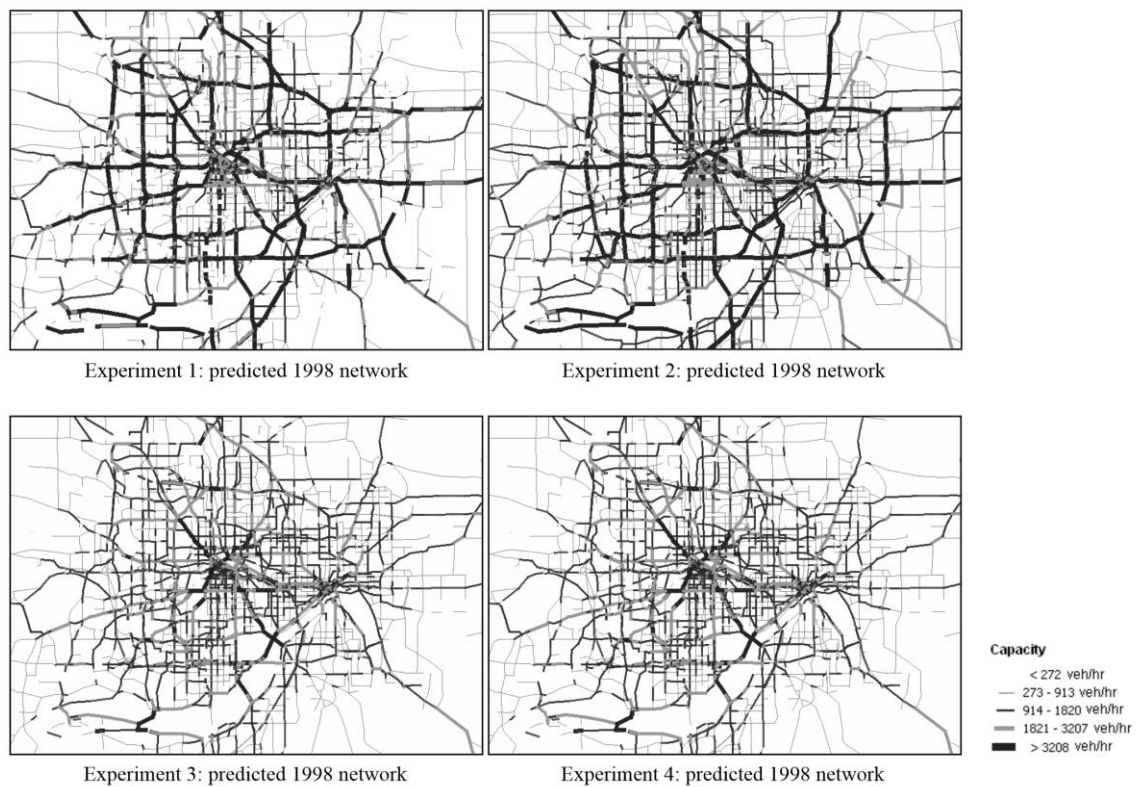


Figure 7.3. Le modèle de Levinson & Zhang (2004). Les impacts des conditions initiales et des contraintes sur la croissance du réseau.

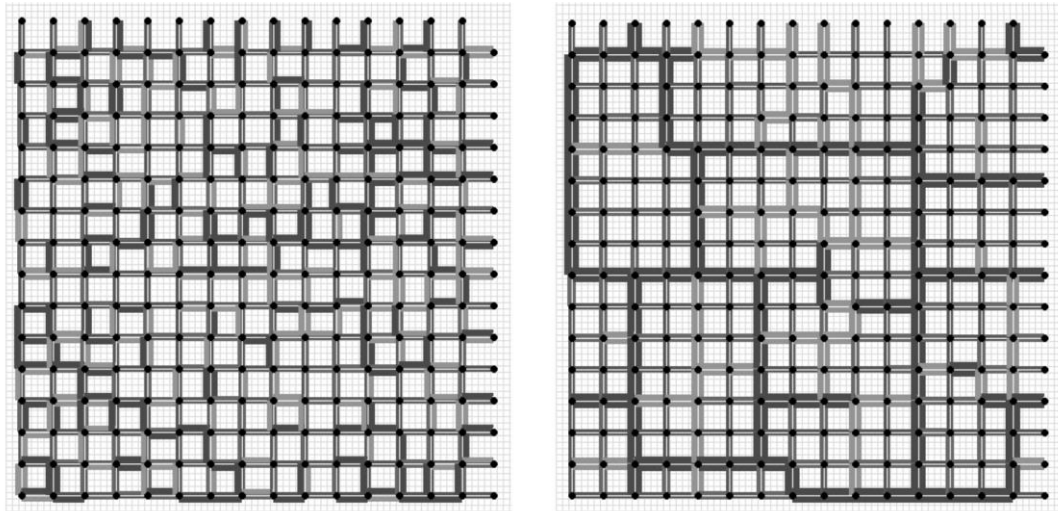


Figure 7.4. Le modèle de Levinson et Yerra (2006) Distribution spatiale d'une vitesse initiale aléatoire (à gauche). Distribution spatiale des vitesses pour le réseau après avoir atteint l'équilibre (à droite). La couleur et l'épaisseur du lien est associée à la vitesse ou aux flux de déplacement.

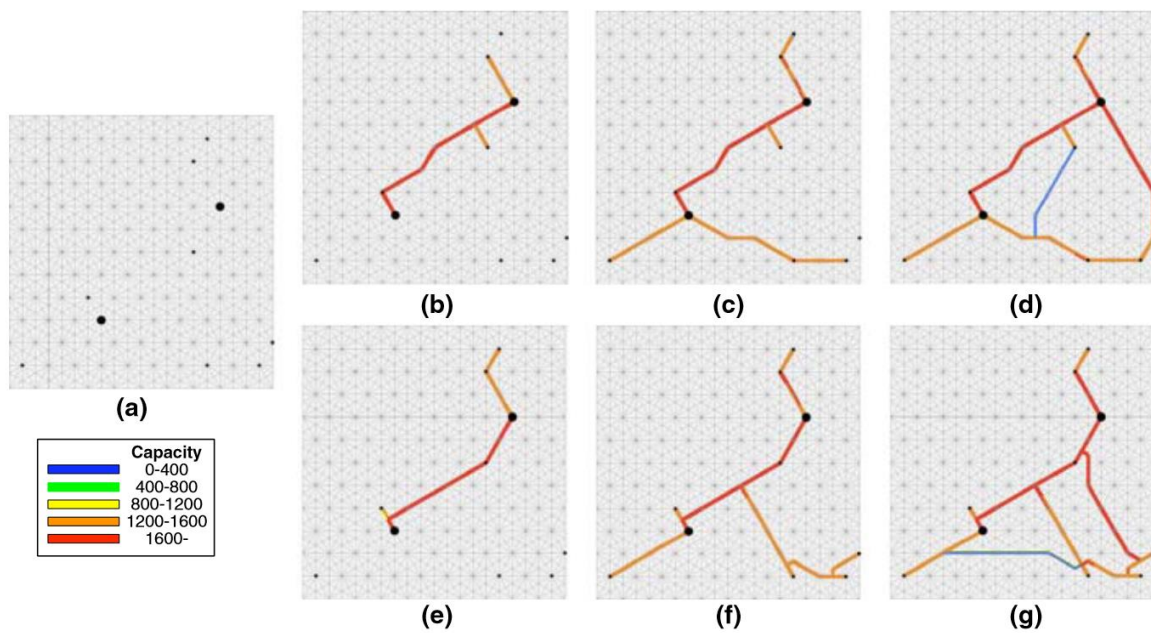


Figure 7.5. Le modèle de Xie et Levinson (2009). Etapes de croissance incrémentale du réseau. (a) Le réseau initial ; (b) Expérience A, itération 4 ; (c) Expérience A, itération 8 ; (d) Expérience A, itération 12. (e) Expérience B, itération 4 ; (f) Expérience B, itération 8 ; (g) Expérience B, itération 12.

7.1.3 Propriétés des réseaux simulés par les modèles origine-destination

Les modèles origine-destination précédemment évoqués permettent de simuler des réseaux viaires en intégrant des logiques de déplacements, mais ils ne capturent pas les mécanismes sous-jacents de morphogénèse du réseau viaire (extension et densification du réseau, en particulier). Bien que certains modèles génèrent des formes de réseaux relativement réalistes, la plupart des résultats sont plutôt schématiques. Sans représenter le réseau sous forme de graphe, ils incluent toutefois certaines dimensions topologiques et morphologiques. Par exemple, ils prennent en compte les chemins les plus courts et les plus directs (Helbing et al., 1997) ainsi que la hiérarchie des routes (Levinson & Yerra, 2006; Levinson & Zhang, 2004; Yerra & Levinson, 2005). D'un point de vue dynamique, certains réseaux simulés s'auto-organisent à travers la hiérarchisation des routes au cours du temps. Cela implique l'émergence de certaines propriétés structurelles. En outre, certains modèles sont capables d'approximer certains morphotypes de voies, à savoir les voies radiales/linéaires et concentriques ((Levinson & Zhang, 2004; Yamins et al., 2003)).

7.2 Modèles de reproduction et de complétion de textures (motifs, patterns)

Les modèles de reproduction et de complétion de textures revêtent d'une grande importance dans les applications de simulation de réseaux viaires basées sur l'intelligence artificielle. Ces modèles sont conçus pour reproduire ou compléter des motifs à une échelle locale. Ces motifs peuvent ensuite être choisis arbitrairement pour être appliqués localement par l'utilisateur du modèle.

Les modèles de reproduction et de complétion de textures sont basés sur l'analyse d'images et l'apprentissage profond, leur permettant ainsi de capturer et de reproduire les caractéristiques morphologiques et topologiques spécifiques de réseaux routiers existants. Il s'agit de modèles ad hoc généralement adaptés à une situation ou à un ensemble spécifique de données. Ils n'intègrent que marginalement les processus généraux à l'origine des évolutions structurelles des réseaux viaires.

7.2.1 L-Systèmes

Le concept central des L-systèmes est la réécriture parallèle de chaînes de caractères à partir d'un ensemble de postulats ou de règles de production. Un L-System est une grammaire formelle permettant un processus de développement algorithmique. Le système fait évoluer itérativement une forme initiale avec des règles d'évolution, pouvant intégrer une certaine stochasticité, tout en veillant à préserver la cohérence globale du système.

Les L-systèmes sont principalement utilisés pour la modélisation de la croissance d'organismes biologiques (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 2012). Ils sont aussi utilisés pour la simulation d'environnements urbains virtuels (Parish et Müller, 2001; Perret, 2006). Les modèles développés sont basés principalement sur la génération procédurale³², qui est une grande famille de méthodes appliquées à la modélisation urbaine (Halatsch et al., 2008). Le programme CityEngine (Parish et Müller, 2001), par exemple, utilise deux L-systèmes hiérarchiques pour la génération procédurale de villes virtuelles (Figure 7.6). Le premier L-système génère le réseau routier à partir d'une carte de densité de population et de contraintes géographiques. Une fois le réseau routier généré, le système crée des îlots urbains (i.e. des zones délimitées par les rues), qui sont ensuite réduits et subdivisés en parcelles. Le deuxième L-système crée alors un bâtiment par parcelle. Dans la perspective de reproduction des motifs du réseau viaire urbain de villes réelles, à chaque étape du programme la ville croît par l'ajout d'un segment de rue, selon un motif viaire choisi (radial, ramifié, etc.).

Répondant à un objectif de simplicité, le logiciel *CityZen* (Perret, 2006) génère des tissus urbains à partir de la création d'un réseau routier simple et régulier en grille (qui peut être déformée). Le programme permet l'ajout, la suppression et le découpage des segments de rues pour ensuite générer les îlots et les bâtiments.

³² La génération procédurale consiste en la création du contenu numérique de manière automatisée tout en répondant à un ensemble de règles définies.



Figure 7.6. Cartes utilisées dans CityEngine (Parish et Müller, 2001). A gauche : données d'entrée : hydrographie, relief, densité de population. A droite : réseau routier généré à partir des données. Source : Perret (2006).

7.2.2 Modèles basés sur des algorithmes d'apprentissage

Plus récemment, différents modèles génératifs basés sur l'apprentissage automatique ont été développés pour générer des réseaux de voirie urbaine. Cet apprentissage est basé sur des méthodes de détection des routes qui sont généralement classées en trois catégories (Zhong et Liu, 2021) : celles qui reposent sur un modèle, celles qui sont basées sur des caractéristiques spécifiques, et celles qui utilisent l'apprentissage automatique.

La méthode de détection des routes basée sur un modèle consiste à établir un modèle mathématique pour l'identification des routes en analysant leurs formes géométriques. Dans le cadre du modèle StreetGAN (Hartmann et al., 2017), par exemple, des réseaux génératifs antagonistes (Creswell et al., 2018) sont utilisés pour reproduire des réseaux viaires en cohérence avec l'ensemble de données d'entraînement (Figure 7.7). Des réseaux de neurones artificiels sont également utilisés pour capturer les motifs des réseaux viaires urbains réels à partir d'images, afin de les reproduire ensuite pour créer de nouveaux réseaux viaires (Kempinska et Murcio, 2019) (Figure 7.8 et Figure 7.9). Zhang et al. (2019) notent que la précision de la détection automatique des routes peut être biaisée par les effets d'ombre, les bords de route inégaux et la discontinuité du réseau.

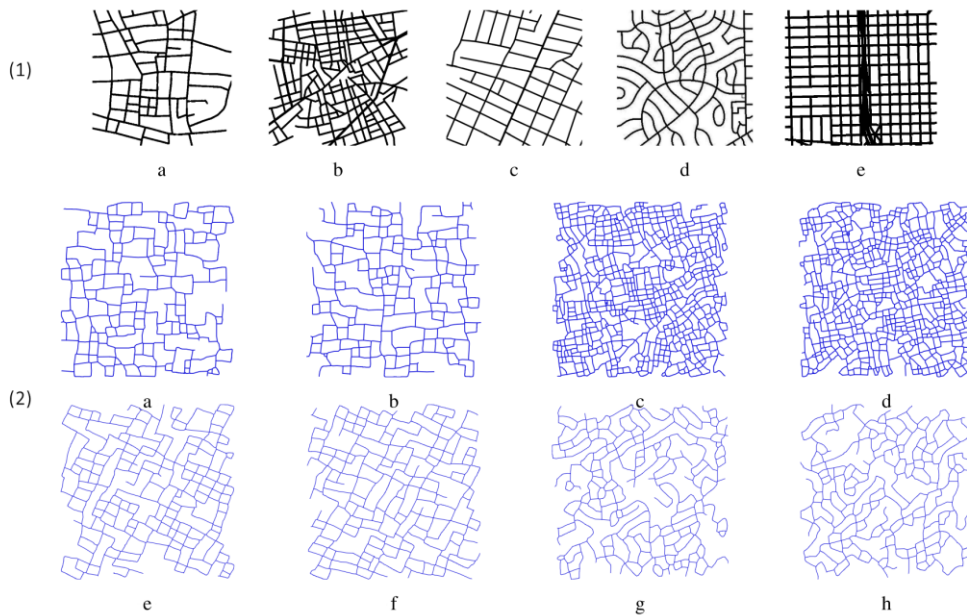


Figure 7.7. Modèle StreetGAN. (1) Aperçu des différents styles de réseaux routiers utilisés pour entraîner le modèle : (a) Synthétique irrégulier, (b) Cellino San Marco irrégulier, (c) Berlin irrégulier, (d) Synthétique suburbain, (e) Portland avec autoroutes. (2). Différents échantillons générés par le modèle entraîné à partir des différents styles de réseaux routiers (1). Synthétique irrégulier (a) et (b), Cellino San Marco (c) et (d), Berlin irrégulier (e) et (f), Synthétique suburbain (g) et (h). D'après : Hartmann et al. (2017)

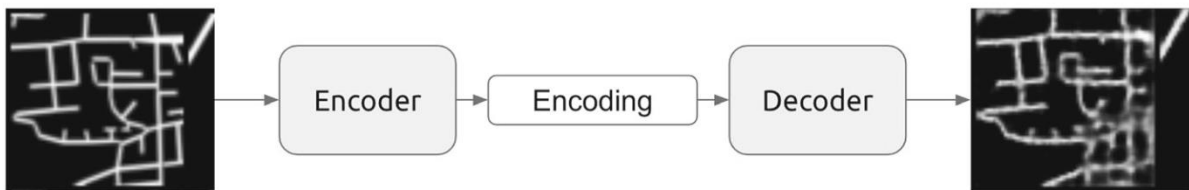


Figure 7.8. Modèle de Kempiska et Murcio (2019). Le modèle prend en entrée une image du réseau routier (gauche), la condense en un encodage de dimension inférieure (milieu) et finalement reconstitue l'image à partir de l'encodage (droite).

Source : Kempinska et Murcio (2019).

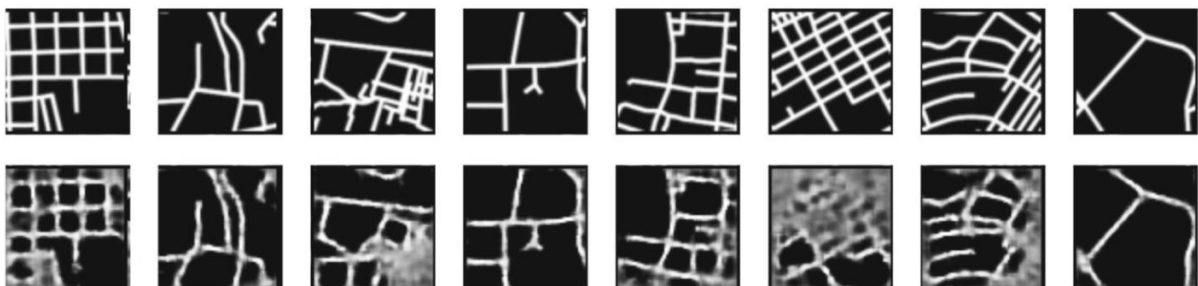


Figure 7.9. Modèle de Kempiska et Murcio (2019). Réseau viaire reconstruit (en bas) à partir des images originales (en haut) à l'aide du modèle entraîné.

Source : Kempinska et Murcio (2019)

D'autres modèles de complétion de textures de réseaux viaires se basent sur la détection des caractéristiques spécifiques locales. Par exemple, Fang et al., (2020) ont proposé un modèle de génération de voirie urbaine intitulé DeepStreet, inspiré des approches d'apprentissage profond pour la complétion d'images. Le réseau viaire urbain support d'apprentissage est échantillonné et converti en unités de données pixelisées. Le modèle détecte et regroupe automatiquement les motifs complexes des rues et prédit à la fois les réseaux routiers en grille et irréguliers dans une zone prédéfinie. Ensuite, le modèle est entraîné à détecter, reconnaître et capturer les différentes caractéristiques de réseaux de rues donnés et classer automatiquement les motifs de rues. Les réseaux viaires ainsi générés sont généralement précis et cohérents avec les motifs en grille ou irréguliers observés dans une zone prédéfinie du cas d'étude (Figure 7.10).

Zhong et Liu (2021) ont, pour leur part, conçu un modèle sur la base d'un réseau antagoniste génératif et d'une machine de codage automatique pour la génération de réseaux viaires. L'entraînement du modèle permet de reproduire quatre motifs différents de réseaux viaires : un réseau quadrillé, un réseau radioconcentrique, un réseau irrégulier, un réseau mixte (qui combine des motifs de réseaux de différents tissus urbains en fonction des conditions géographiques de la ville). À partir d'échantillons massifs de réseaux viaires, le modèle apprend progressivement les règles et les caractéristiques du réseau au cours du processus d'entraînement. Après l'apprentissage, le modèle peut générer un grand nombre de réseaux routiers du type spécifié. Il englobe trois processus : le codage du réseau viaire (qui est utilisé pour convertir les données viaires vectorielles en code), le décodage du code du réseau routier en données viaires, et la discrimination du réseau (vérification que le nombre de segments dans chaque classe est identique entre les données d'entrée et de sortie). La première et la deuxième étapes du modèle constituent une machine de codage automatique, et la première et la troisième étapes constituent un réseau antagoniste génératif (Creswell et al., 2018). Au final, le modèle est capable de générer des réseaux qui correspondent uniquement à l'un des quatre motifs d'entraînement à la fois.



Figure 7.10. Résultats obtenus avec le modèle DeepStreet sur le réseau routier de Barcelone.
Source : Fang et al. (2020)

7.2.3 Propriétés des réseaux simulés par les modèles de reproduction et de complétion de textures

Les modèles présentés dans cette section permettent de reproduire de manière statique des motifs de réseaux viaires. Ils se basent principalement sur le traitement de données rasterisées et n'adoptent pas une représentation du réseau en graphe, ce qui implique que la dimension topologique du réseau n'est en aucun cas intégrée.

Les modèles de L-systèmes permettent principalement de reproduire des motifs uniformes de réseaux viaires mais les résultats ne parviennent pas à refléter les propriétés structurelles des réseaux réels et n'intègrent pas les mécanismes de morphogénèse locale.

Les modèles basés sur des algorithmes d'apprentissage ne sont pas capables de reproduire les structures viaires à l'échelle d'une ville ou d'un quartier (Fang et al., 2020; Kempinska et Murcio, 2019), ni de reproduire les propriétés structurelles des réseaux réels telles que la continuité et la hiérarchie. Les résultats de ces modèles permettent de générer des motifs uniformes (Hartmann et al., 2017) et isolés (Kempinska et Murcio, 2019) de réseau viaire, qui ne peuvent pas être intégrés de manière cohérente à un réseau existant. Ils permettent pas non plus de générer des morphotypes de voies complexes. Ils permettent uniquement de compléter les motifs viaires existants ou de reproduire des segments de rue ayant les mêmes caractéristiques morphologiques que ceux existants, sans aucune possibilité de restructuration du réseau viaire.

7.3 Modèles de génération de tissus urbains

7.3.1 Modèles informatiques d'aide à la conception de projets urbains

En architecture et en urbanisme, la conception de projets urbains ("*urban design*") est basée sur l'élaboration manuelle de plusieurs schémas (ou dessins) de propositions d'aménagement. Par définition, un projet urbain est nettement plus complexe qu'un projet architectural. Ceci explique que les décisions d'aménagement telles que l'occupation des sols, la densité bâtie et la morphologie des bâtiments (Mueller et al., 2018) ne résultent pas d'une analyse systématique d'un ensemble assez conséquent de projets urbains possibles, et de leurs impacts sur la configuration et le fonctionnement de l'espace urbain.

Les défis actuels liés à l'urbanisation rapide incitent les concepteurs et aménageurs à utiliser des outils quantitatifs pour appuyer la conception des projets urbains (Robinson, 2012). Durant ces dernières années, des modèles informatiques ont été proposés à cet effet (Fusero et al., 2013; Schnabel et al., 2017), mais leur adoption dans la pratique est encore très limitée (Çalışkan, 2017).

Lorsqu'il s'agit d'outils d'assistance numérique pour la conception des projets urbains, la plupart des méthodes développées portent sur la forme et la configuration bâtie, en mettant l'accent sur certains aspects spécifiques tels que l'accès aux bâtiments, l'orientation des bâtiments ou la ventilation des îlots. En revanche, ces outils mettent peu l'accent sur la génération du réseau viaire. Pour la majorité des modèles, la création des routes n'est qu'une résultante de la génération des autres entités morphologiques (le bâti et les îlots). Pour d'autres, le réseau viaire est une donnée d'entrée dont la forme est choisie arbitrairement. Pour certains modèles cependant, la génération du réseau viaire est une étape fondamentale de la simulation. Certains visent en particulier à optimiser les déplacements sur le réseau, en mettant l'accent sur les déplacements piétons.

7.3.1.1 Génération marginale ou arbitraire du réseau viaire

À l'échelle urbaine, la modélisation générative permet principalement d'évaluer la performance des formes urbaines à travers une analyse quantitative pendant le processus de conception de projets urbains. L'application de ces modèles se fait principalement à l'échelle des bâtiments (Montenegro et Duarte, 2009) même si la finalité de la conception est une planification à une échelle urbaine ou régionale (Luca, 2007). Le réseau viaire n'est pas

toujours considéré comme une composante urbaine à optimiser en soi, puisqu'il est souvent généré automatiquement, au fur et à mesure que les îlots sont définis. Dans certains cas, le réseau peut même être créé manuellement de manière arbitraire, selon les choix des parties prenantes de la conception du projet.

Par exemple, le modèle de Knecht et König, (2012) génère des parcelles et des bâtiments avec un réseau de rues donné. Une approche similaire est adoptée pour le modèle de Wilson et al., (2019) qui comprend quatre étapes : 1) représentation simplifiée des données d'entrée, 2) génération procédurale des géométries, 3) évaluation des performances, et 4) génération et tests de plusieurs scénarios de projets/plans d'aménagement. L'étape de génération nécessite des données d'entrée qui peuvent être des cartes en pixels de densité et d'usage, qui permettent de définir l'occupation du sol, et le réseau viaire, qui permet de définir la hiérarchie des rues et la taille des îlots (Figure 7.11).

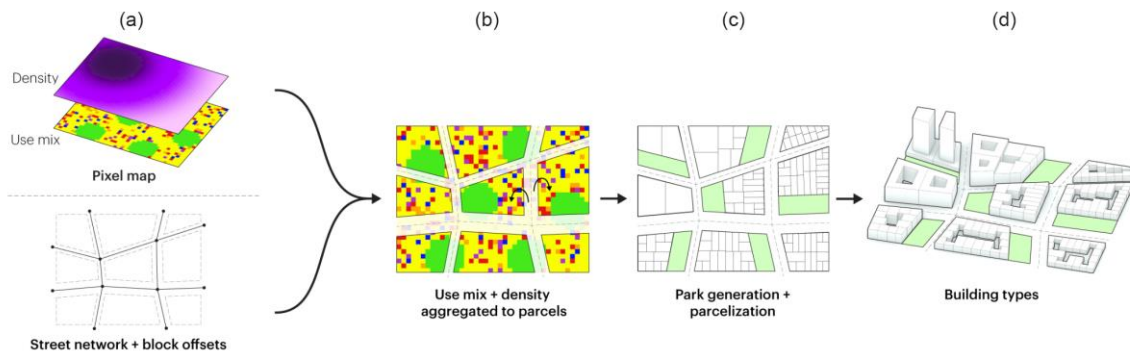


Figure 7.11. Modèle de Wilson et al. (2019) : processus de génération procédurale. (a) données d'entrées. (b) Agrégation des données d'entrées. (c) Génération de parcs et de parcelles (d) Génération de typologie bâtie. Source : L. Wilson et al. (2019)

L'objectif d'optimisation énergétique préside le plus communément à l'application des modèles de génération de formes (Nagy et al., 2018). À l'échelle d'un projet urbain, le modèle de Cajot et al. (2017) introduit un algorithme d'optimisation multivariée qui tente d'équilibrer les objectifs de tous les décideurs afin d'assurer une optimisation énergétique. À mesure que les îlots et les bâtiments sont générés, le réseau viaire est automatiquement créé de manière marginale à la simulation.

À une échelle spatiale plus fine, celle d'un tissu résidentiel, Nagy et al. (2018) combinent deux objectifs pour l'optimisation des formes : la rentabilité du projet pour le promoteur et le potentiel de production d'énergie des panneaux solaires placés sur les toits des bâtiments (Figure 7.12). Le modèle est basé sur une subdivision en une grille de l'espace urbain (Figure 7.13 - a). Les rues sont générées de manière à traverser le site perpendiculairement aux rues

existantes adjacentes, permettant ainsi une circulation dans les deux directions (Figure 7.13 - b). Les rues divisent le terrain en zones, soumises aux contraintes internes du modèle, telles que les proportions et les surfaces minimales des îlots. Les îlots qui ne respectent pas ces critères sont soit subdivisés (en créant de nouvelles rues), soit fusionnés (en supprimant la rue qui les sépare). Chaque îlot résultant est aménagé par des espaces verts, des maisons, des immeubles d'habitation et des chemins piétonniers (Figure 7.13 - c, d, e).

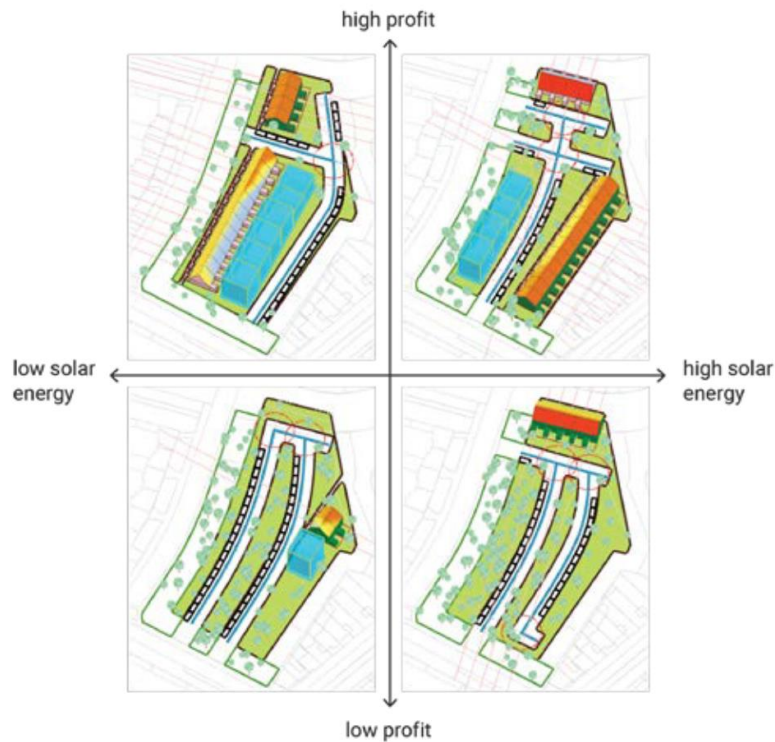


Figure 7.12. Modèle de Nagy et al. (2018). Comparaison des conceptions pour des cas de performance extrêmes. La zone peut être configurée en différents aménagements, tels que des espaces verts publics (représentés en vert), des habitations individuelles, ainsi que des immeubles (en bleu), de même que des rues et des chemins piétons.

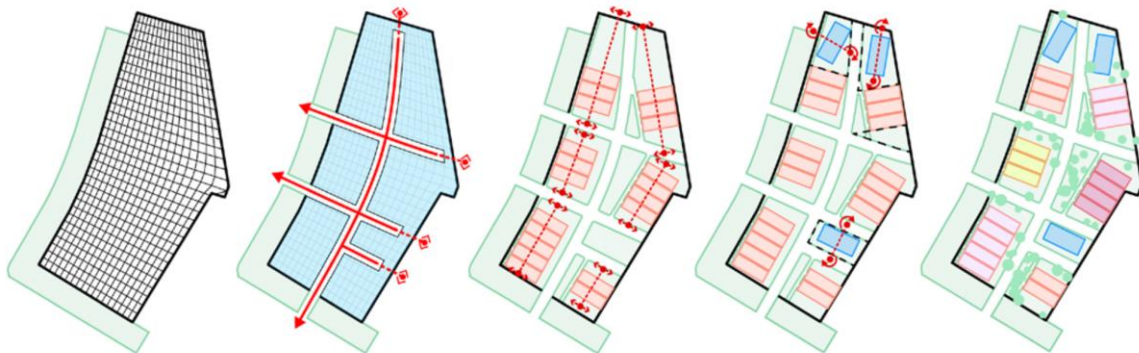


Figure 7.13. Etapes de simulation à partir du modèle paramétrique pour générer chaque option de conception. Source : (Nagy et al., 2018)

7.3.1.2 Assistance numérique pour la conception de réseaux viaires

Le développement d'outils d'assistance numérique plus avancés pour la planification des réseaux de transport urbains est un domaine en évolution exponentielle ces dernières années. Ces outils reposent sur des technologies telles que la réalité virtuelle et augmentée (Sun et al., 2002) et l'intelligence artificielle. Ces outils ont à la fois aidé les professionnels et permis d'améliorer la qualité de l'aménagement urbain, notamment en alliant l'occupation des sols à l'aménagement des réseaux viaires (Tu et Zhang, 2022). Les travaux de recherches développés dans ce cadre se concentrent sur l'optimisation du processus de conception des formes urbaines en tenant compte de la mobilité des personnes.

Y. Yang et al. (2020) ont développé Urbano, un modèle génératif de conception urbaine permettant de simuler le réseau viaire, la localisation des équipements et services, et la répartition de la population sur un site urbain délimité. La première étape d'une simulation consiste en l'analyse automatique de données cartographiques (le réseau de rues, les équipements et les bâtiments) dans l'environnement immédiat du site à aménager. Si les informations requises ne sont pas accessibles à partir des sources OpenStreetMap (osm)³³ ou Google Places API³⁴, le modèle comporte des fonctions qui peuvent déduire les données ou aider à synthétiser ces informations à partir d'autres sources. Cette première étape permet de créer des modèles d'état initial comprenant des informations sur la population au niveau de chaque bâtiment et les équipements existants. Dans une seconde étape, le modèle réalise des simulations de mobilité en utilisant un algorithme de simulation de trajets piloté par le profil de demande d'activités dans la zone d'étude. Les données des trajets simulés permettent d'attribuer trois métriques complémentaires à l'échelle du site : *"Street Hits"*, *"Amenity Hits"* et *building-level Walkscore*. *"Street Hits"* correspond au nombre de personnes qui utilisent un certain segment de rue pour tous leurs déplacements. *"Amenity Hits"* comptabilise le nombre total de personnes qui se rendent vers un équipement ou un service spécifique considérant l'ensemble des trajets simulés. Le *"building-level Walkscore"* est calculé en utilisant les données de tous les trajets qui partent d'un seul bâtiment. Toutes ces métriques contribuent à la troisième étape de simulation qui est celle de la conception générative. Cette étape consiste à remplacer le site d'origine par une grille dense imitant un environnement virtuel qui permet aux individus de se déplacer librement (Figure 7.14, *step*

³³ OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>

³⁴ Places | Google Maps Platform, Google Cloud. <https://cloud.google.com/maps-platform/places>

1). Cette étape permet d'établir parallèlement une grille plus grossière représentant tous les emplacements potentiels des équipements et services (Figure 7.14, *step 2*).

Les résultats de la simulation sur la grille dense révèlent les itinéraires de déplacement potentiel des personnes sur le site. Les itinéraires présentant un score "*Street Hits*" élevé sont transformés en nouvelles routes dans le réseau simulé. Les résultats du score d'équipements et de services "*Amenity Hits*" sur la grille plus grossière permettent d'identifier les emplacements optimaux des équipements et services qui maximisent l'accès à pied pour la population considérée.

Rakha et Reinhart (2012) ont adopté une approche similaire et proposé un modèle de simulation basé sur l'évaluation de l'accessibilité piétonne. Le modèle génère des formes urbaines à l'échelle du quartier en procédant en deux étapes : une étape de génération et une étape d'optimisation (Figure 7.15). La première étape génère le réseau viaire et les blocs de bâtiments. La génération du réseau viaire correspond à une subdivision itérative du terrain en grille, selon deux paramètres : un nombre de divisions prédéfini et la taille minimale d'un îlot (en pixels). La seconde étape évalue l'accessibilité piétonne du réseau généré pour choisir le meilleur réseau à l'aide d'un algorithme génétique.

En utilisant la modélisation générative pour l'aide à la conception de projets urbains, il est possible de mener une évaluation systématique d'un ensemble de projets possibles. Les modèles peuvent notamment être utilisés comme des supports de discussion et d'interaction pour les équipes de conception (Beirão et al., 2010), ou avec les citoyens (Mueller et al., 2018). Cependant l'implication de tous les acteurs dans une "conception collaborative" par le biais de la modélisation générative reste difficile, notamment dans le cas de projets urbains de grande superficie. Les applications de ces modèles dans la pratique sont limitées (Nagy et al., 2018) car certains jugent que les modèles n'ont pas la complexité requise (Beirão et al., 2010). En outre, la quantité des données d'entrées requises, et des données de sortie pour l'analyse des résultats, engendre des contraintes liées à la limitation des capacités de calcul des ordinateurs et à la complexité des traitements informatiques mis en œuvre. Par conséquent, la conception de projets urbains basée sur des modèles génératifs pour l'aménagement urbain requière toujours des interventions manuelles, du moins jusqu'à présent.

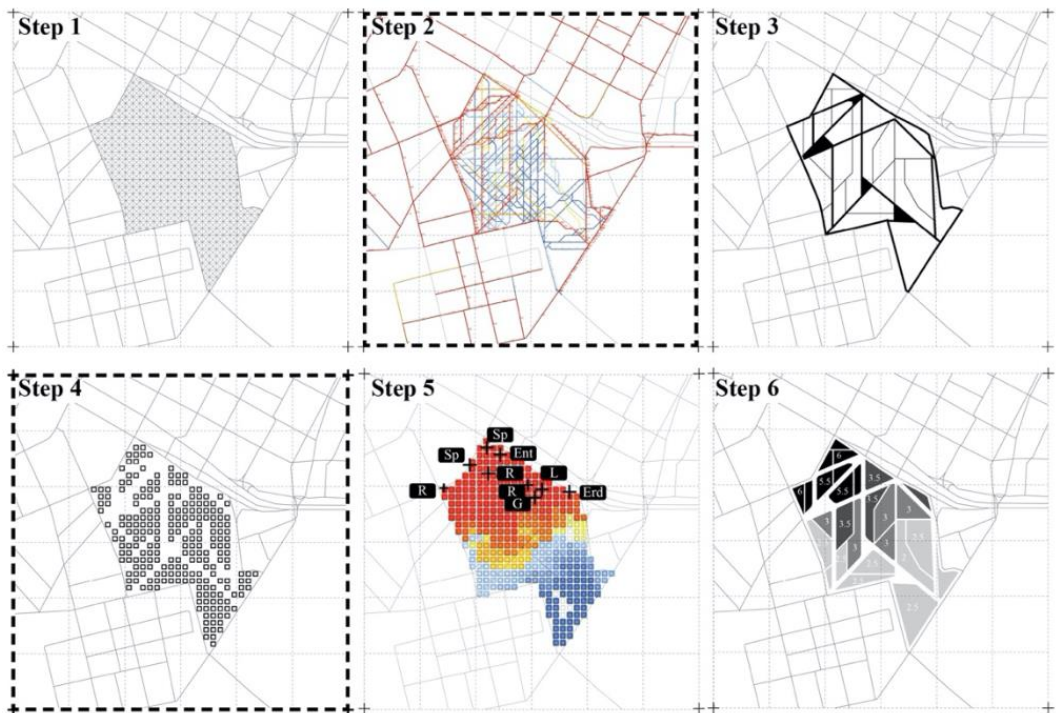


Figure 7.14. Processus génératifs du modèle "Urbano". (1) Configuration primaire avec la grille dense. (2) Résultat des scores des rues à partir des données de trajets simulés. Apparition progressive des routes principales présentant un score élevé (en bas). (3) Génération d'un nouveau réseau de rues à partir des rues les plus fréquentées (en fusionnant les liens mineurs et en convertissant les intersections les plus importantes en places potentielles). (4) Analyse de la distribution des équipements et services. (5) Calcul du score de marche final basé sur la grille de coordonnées. (6) Calcul de la densité d'équipements et de services dans les îlots créés par simulation. Source : Y. Yang et al. (2020).

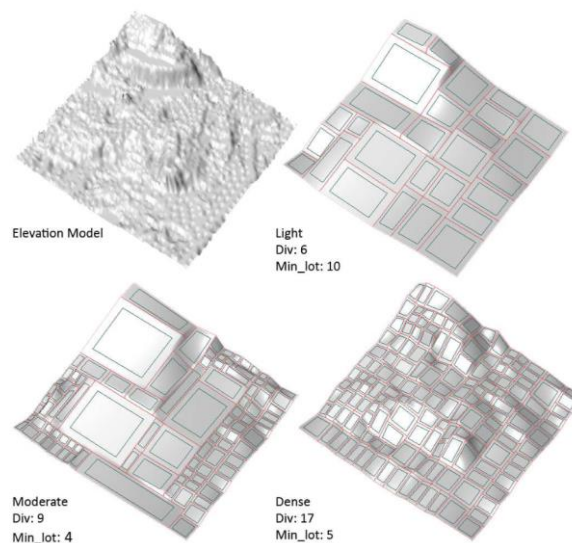


Figure 7.15. Trois subdivisions de rues simulées avec le modèle de Rakha et Reinhart (2012). Source : Rakha et Reinhart (2012).

7.3.2 Modèles à base de règles

L'approche adoptée pour les modèles à base de règles consiste à examiner minutieusement les mécanismes élémentaires qui gouvernent l'évolution des villes. Certains modèles de génération de tissu urbain à base de règles simulent explicitement l'évolution du réseau viaire conjointement à celle d'autres entités morphologiques. Pour d'autres modèles, notamment certains modèles de morcellement urbain, la création des routes est une résultante.

7.3.2.1 Modèles basés sur des règles d'évolution empiriques

Certains travaux de recherches en modélisation de la morphogénèse urbaine se basent sur l'étude des dynamiques dans le temps, à différentes échelles, en s'appuyant sur des données géohistoriques. Cette approche géohistorique est contrainte par la disponibilité des données et la qualité des informations fournies par la documentation historique. La modélisation de la croissance urbaine nécessite la construction et l'utilisation de bases de données spatio-temporelles. L'analyse des données, souvent vectorielles, permet de construire des règles d'évolution réalistes.

Dans le cadre du modèle GeOpenSim, la modélisation multi-agents est utilisée en considérant chaque entité géographique (rue, îlot, bâtiment) comme étant un agent ayant une durée de vie. Le modèle construit des objets informatiques représentant ces entités à un temps donné (t), à partir des données stockées dans les bases de données spatio-temporelles. Ces objets peuvent être des zones urbaines, des îlots urbains, des groupes de bâtiments ou des portions de réseaux de rues (Figure 7.16 et figure 7.17). Le modèle s'appuie sur des outils d'analyse spatiale pour la caractérisation de ces objets géographiques, ainsi que sur des algorithmes d'apprentissage automatique supervisé, notamment pour la classification des îlots urbains et la généralisation des exemples en règles d'évolution (Figure 7.18). Les règles d'évolution sont comparables aux règles des modèles d'automates cellulaires mais le voisinage qu'elles prennent en compte est plutôt topologique (Perret et al., 2010). Le modèle permet de simuler la densification des îlots urbains (Curie et al., 2010), de modéliser des propriétés d'auto-organisation des systèmes urbains dans le temps (Perret et al., 2010), et de simuler l'extension des villes (Perret, Ruas, et al., 2009).

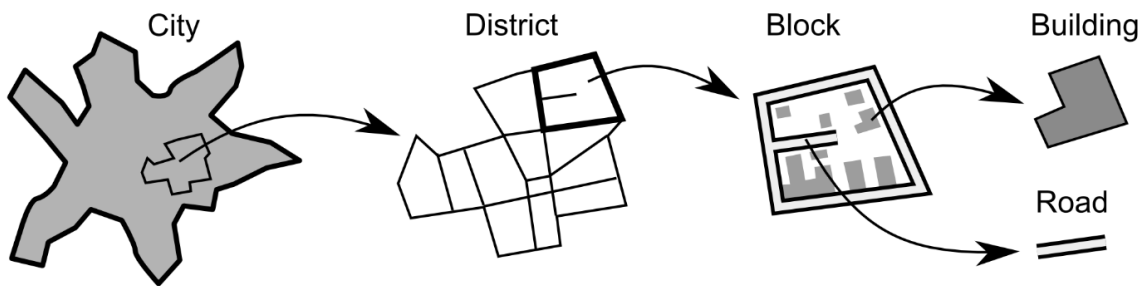


Figure 7.16. Les différentes échelles considérées dans le modèle GeOpenSim : ville, quartier, îlot, bâtiment et route. Source : Perret et al. (2010).

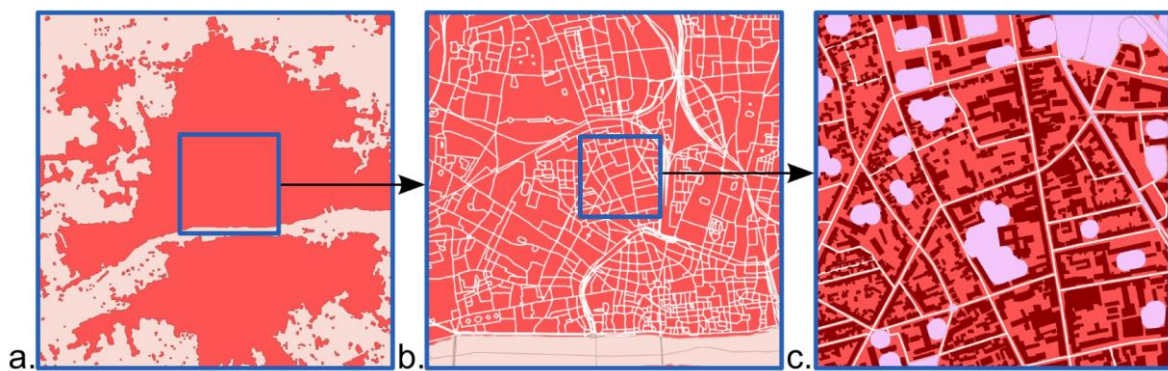


Figure 7.17. Différentes étapes du processus hiérarchique de modélisation de GeoOpenSim : a. zones urbanisées (en rouge) créées lors de l'étape 1, b. îlots urbains (en rouge) créés à partir du réseau viarie (en blanc) lors de l'étape 2, c. îlots, bâtiments (en rouge foncé) et espaces vides créés lors de l'étape 5. Source : Perret et al. (2009).

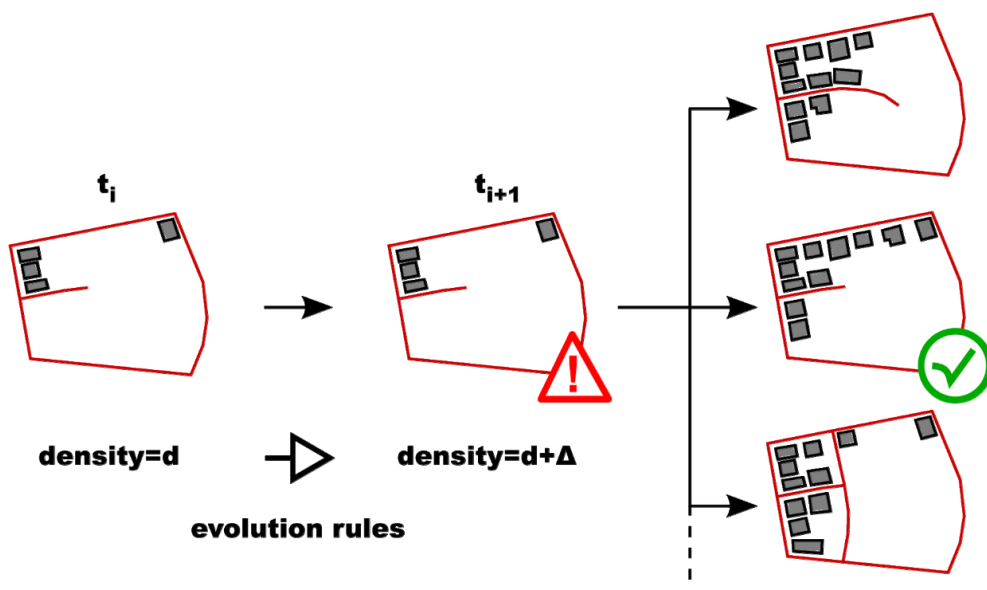


Figure 7.18. Modèle GeOpenSim. Les règles d'évolution fixent une valeur désirée de densité pour le bloc urbain. Après l'application des règles d'évolution. Source : Curie et al. (2010).

7.3.2.2 Modèles de morcellement

Le processus de morcellement consiste à diviser un terrain assez vaste en îlots délimités par des rues et en sous-espaces plus petits, désignés comme étant des parcelles ou des lots. Les modèles de morcellement simulent souvent la création conjointe de nouvelles routes, particulièrement à une échelle locale, mais ils ne sont pas destinés en tant que tels à la création d'un réseau routier, ou du moins, ce n'est pas leur objectif principal.

Des modules de subdivision (morcellement) des terrains sont intégrés dans des modèles plus complets de croissance urbaine à base d'agents (Jjumba et Dragičević, 2012) ou de génération procédurale (Kelly et Wonka, 2011; Vanegas et al., 2009, 2012).

S'inscrivant dans une approche différente, des techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) et des fonctionnalités de systèmes d'information géographique (SIG) ont aussi été développées pour la génération et la recombinaison de parcelles (Demetriou et al., 2012). Certains travaux de recherche se sont concentrés sur l'automatisation du processus de partitionnement de zones assez vastes (Wickramasuriya et al., 2011), de subdivision et de recombinaison de parcelles (Dahal et Chow, 2014) (Figure 7.19), en intégrant possiblement des règles d'urbanisme et de planification urbaine (Colomb et al., 2022). Les résultats de ces modèles peuvent être très précis et réalistes. Plusieurs sont notamment capables de prolonger et de créer des routes à partir de nouvelles subdivisions parcellaires (Figure 7.19

D'autres modèles utilisent des processus de redécoupage pour la modélisation de la morphogénèse du réseau viaire. Ces modèles visent principalement à tester des méthodologies de hiérarchisation des voies et à reproduire des distributions statistiques de la surface des îlots similaires aux résultats empiriques observés pour des villes réelles. Perna et al. (2011) ont ainsi développé un modèle basé sur un processus de découpage successif d'un espace délimité (Figure 7.21). Le modèle procède par itérations. De nouvelles voies sont connectées perpendiculairement aux voies créées lors de l'itération précédente. Suivant la même logique, Pousse (2020) a exploré des méthodes de densification de réseau afin de retrouver les mêmes statistiques de longueur et de hiérarchie des voies que celles de villes réelles. Il considère que le réseau viaire se construit par l'intermédiaire de processus de division et d'extension (Figure 7.22). Le travail de modélisation est basé sur des observations de villes réelles ayant montré que le processus d'urbanisation conduit à l'apparition de nouvelles rues (au départ, souvent des impasses), en général à proximité des grandes voies périphériques, ce qui déclenche la subdivision des parcelles agricoles avoisinantes.



Figure 7.19. Subdivision d'une parcelle effectuée avec le modèle de Dahal et Chow (2014). a) parcelle candidate, b) îlots et rues modélisés, c) subdivision de la parcelle observée en réalité, et d) une ortho-photo de parcelle. Source : Dahal et Chow (2014).

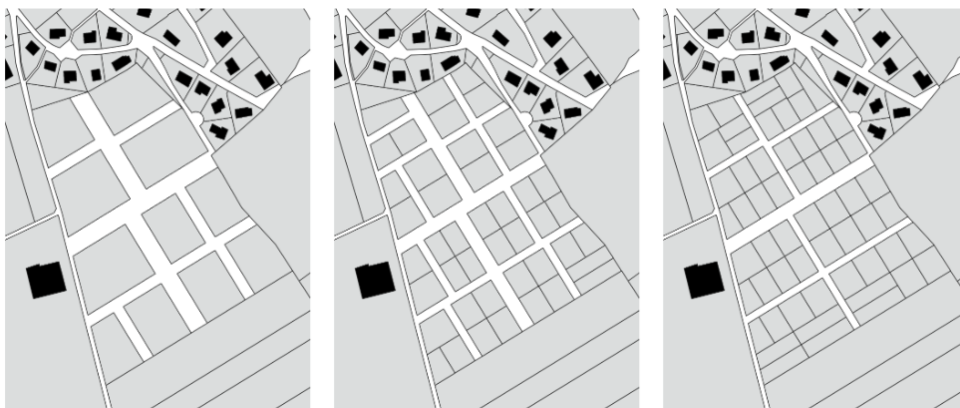


Figure 7.20. Exemples de parcelles et de rues simulées avec le modèle Parcel Manager. Source : Colomb et al. (2022).

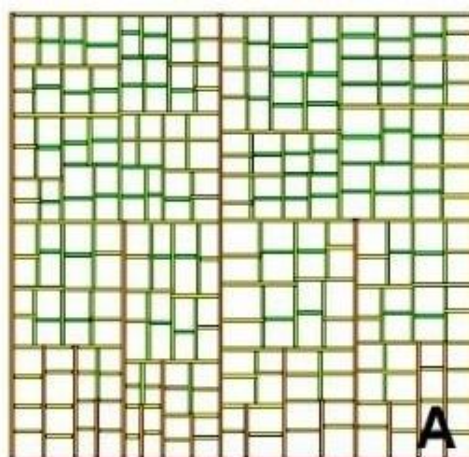


Figure 7.21. Modèle Mondrian générant de nouvelles voies par découpages successifs. La coloration des voies traduit leur distance topologique calculée sur l'ensemble du réseau. Source : Perna et al. (2011).

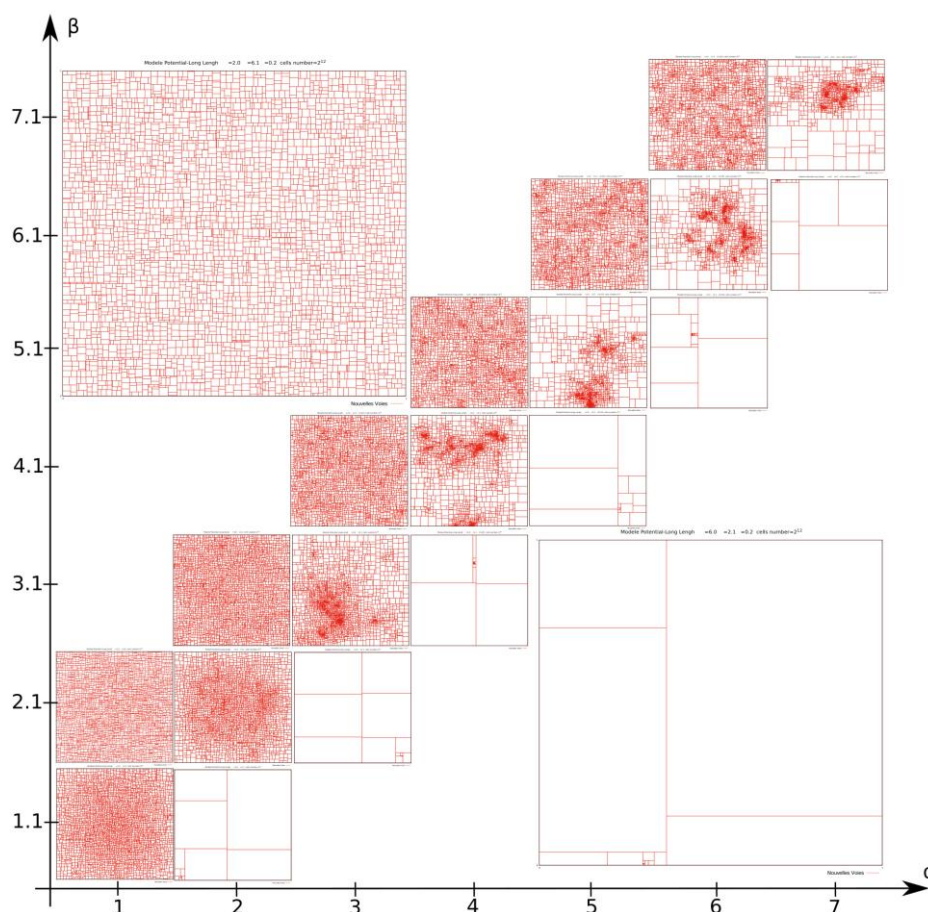


Figure 7.22. Exploration de l'espace des paramètres du modèle de Pousse.
Source : Pousse (2020).

7.3.3 Propriétés des réseaux simulés par les modèles de génération de tissus urbains

Les modèles de génération de tissus urbains portent sur la simulation des entités morphologiques dans un espace délimité en incorporant principalement des mécanismes de densification et de subdivision. Certains parmi ces modèles sont capables de générer des réseaux présentant une hiérarchisation progressive des routes au cours du temps. Cependant, des limites peuvent être identifiées lorsqu'il s'agit de simuler la morphogénèse du réseau viaire.

Les modèles informatiques pour l'aide à la conception de projets urbains (section 7.3.1) sont souvent critiqués pour le manque d'une approche empirique des dynamiques de l'évolution urbaine. Cela émane du fait que la modélisation informatique en architecture et en urbanisme est basée sur la synthèse de solutions de conception plutôt que sur l'analyse des systèmes urbains (Al Sayed et al., 2012). Les modèles génératifs proposés sont principalement basés sur des mécanismes hypothétiques plutôt que sur des résultats d'analyses empiriques. Ainsi les

résultats sont orientés pour répondre à des objectifs ciblés et spécifiques de la conception, sans nécessairement refléter les dynamiques réelles de l'évolution urbaine.

Les modèles à base de règles (section 7.3.2) intègrent, eux, des mécanismes de morphogénèse mais ces mécanismes concernent essentiellement la morphologie des tissus urbains (îlots et parcelles notamment) et non celle du réseau viaire. Par ailleurs, les tissus urbains simulés ne représentent pas pleinement la grande diversité des configurations observées dans le paysage urbain réel en termes de forme, de taille, d'orientation des îlots et parcelles, ainsi que les différentes morphologies du réseau viaire.

7.4 Modèles topologiques et morphologiques à base de graphes

Les graphes sont utilisés non seulement pour la modélisation et l'analyse des propriétés de réseaux à un instant t (Beauquier et al., 2005), mais également pour la modélisation de leur morphogénèse (Barthelemy, 2011). La modélisation de la morphogénèse des réseaux viaires basée sur la théorie des graphes a permis d'intégrer des hypothèses théoriques et des règles empiriques d'évolution des systèmes urbains dans des modèles. Les règles empiriques sont issues d'études récentes stimulées par l'augmentation du nombre de sources de données et de leur finesse. Ces études suggèrent que le développement urbain se produit simultanément à une échelle spatiale locale et globale (Krafta, 1994; Krafta et al., 2003). Les dynamiques spatiales identifiées dans le cadre d'études empiriques se traduisent principalement par des lois locales d'évolution.

L'approche interdisciplinaire des réseaux par la théorie des graphes a suscité un grand intérêt, notamment en ce qui concerne la pertinence des structures topologiques des réseaux : les relations topologiques entre les différentes entités des réseaux jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus dynamiques (Reggiani et Nijkamp, 2009). En effet, bien que les domaines d'application de la théorie des graphes soient très différents (tels que la sociologie, l'économie, la biologie, la physique, l'informatique et réseau, entre autres), il a été démontré que tous les réseaux complexes présentent des patrons topologiques communs (Reggiani et Nijkamp, 2015).

Les premiers travaux de modélisation de la morphogénèse des réseaux développés dans le cadre de la théorie des graphes concernent des modèles théoriques qui se rapportent principalement à la topologie des réseaux. Ils relèvent du domaine de la physique statistique

(science des réseaux et systèmes complexes). L'un de ces premiers travaux est le modèle d'attachement préférentiel de Barabási et Albert (1999), qui est basé sur un mécanisme de génération de graphes orientés reproduisant la distribution statistique en loi de puissance des degrés des nœuds du graphe. Dans ce modèle, les nœuds sont ajoutés un par un à un réseau en expansion et chaque nouveau nœud se connecte à un ensemble de nœuds existants. Les nouveaux nœuds rajoutés au réseau sont davantage susceptibles de se lier à des nœuds déjà fortement connectés qu'à des nœuds moins connectés. Ce faisant, le nombre de nouvelles connexions d'un nœud existant est proportionnel à son degré. Chaque lien du graphe est orienté en partant du plus récent des deux nœuds qu'il relie vers le moins récent. Un autre modèle théorique parmi les plus simples pour l'optimisation des réseaux est celui proposé par Cancho et Solé (2003). Dans ce modèle, le coût de maintenance et d'exploitation du réseau est représenté par le nombre de liens dans le graphe. L'optimisation du coût est associée à la minimisation des nombres de liens. Gastner et Newman (2006a) ont généralisé le modèle de Cancho et Solé (2003) en considérant non seulement le nombre de liens mais aussi la distance géographique qui les caractérise. Ainsi, l'optimisation dépend de la distance spatiale réelle. Une troisième catégorie de modèles théoriques fondateurs est celle des modèles de liens aléatoires (*random links*). Ceux-ci consistent à ajouter des liens à un réseau existant de manière aléatoire afin d'explorer son comportement sous différentes conditions. Un nœud est choisi aléatoirement pour être connecté à un autre nœud auquel il n'est pas déjà connecté (Newman, 2018). Les résultats de ces modèles sont des réseaux arborescents sans boucle.

Le modèle d'attachement préférentiel (Barabási et Albert, 1999) et les modèles d'optimisation (Cancho et Solé, 2003; Gastner et Newman, 2006a) sont des modèles de génération de graphes qui peuvent être appliqués pour la simulation des réseaux viaires. Toutefois, ils ne visent pas la génération de formes réalistes de réseaux. Les modèles de liens aléatoires sont, eux, plutôt utilisés comme modèles de base ou modèles dits "nuls" pour comparer les réseaux simulés à des réseaux complexes réels (Barabási, 2013; Fortunato, 2010; Newman, 2018). Ils ne peuvent pas être appliqués pour la simulation des réseaux viaires mais permettent de comprendre le rôle du hasard dans la structuration des réseaux complexes, d'une part, et d'identifier des patrons, des structures ou des processus qui ne sont pas simplement le résultat du hasard ou d'interactions aléatoires, d'autre part.

Les modèles présentés ci-après s'inscrivent dans la continuité de ces travaux pionniers.

7.4.1 Modèles de coévolution du réseau viaire et de la population

Dans les modèles d'interaction spatiale (également appelés modèles gravitaires), les entités spatiales interagissent les unes avec les autres en fonction de leur position relative dans l'espace (Erlander & Stewart, 1990; Isard, 1998; Stewart, 1948). Ils sont souvent utilisés dans la modélisation de la géographie des flux (Masucci, Serras, et al., 2013; Simini et al., 2012; Stouffer, 1960; A. G. Wilson, 1971; Yan et al., 2014). Appliqués aux réseaux, ils permettent de calculer les forces d'interaction entre les différents nœuds d'un réseau, en fonction de leur distance et de leur population (ou de leur poids économique), auxquelles est souvent ajouté un coefficient d'ajustement. Les modèles de coévolution du réseau et de la population sont principalement basés sur des modèles gravitaires (Raimbault, 2021).

Un modèle d'évolution du réseau routier basé sur un modèle de croissance des nervures des feuilles a été développé par C. Yang et al., (2011). Le mécanisme de morphogénèse intégré s'appuie sur une corrélation de la génération de nouveaux nœuds et des facteurs caractéristiques tels que l'économie et la population (Figure 7.23). Les simulations ont porté sur le district de Pudong à Shanghai pour comparer les résultats simulés et l'évolution réelle du réseau routier sur plusieurs années (Figure 7.24).

Suivant une logique similaire, Zhao et al. (2016) ont proposé un modèle d'évolution tenant compte de l'interaction entre la répartition de la population et le réseau viaire urbain. Dans ce modèle, de nouvelles routes sont construites lorsque de nouvelles zones émergent, et les zones densément peuplées ont une probabilité plus grande d'être connectées à ces nouvelles routes. Le modèle est initialisé compte tenu d'une densité de population distribuée sous forme de grille (de taille 60 x 60 mètres). Ensuite, le graphe de voisinage relatif et la logique de localisation de Fermat-Weber³⁵ sont utilisés comme mécanismes de connexion pour représenter l'évolution des réseaux routiers. Pour la simulation des réseaux, la distribution de la population et la distance euclidienne sont prises en compte dans le coût de construction des segments du réseau. La variation de ces paramètres (la distribution de la population et la distance euclidienne) implique que la réduction des coûts des segments conduit à une topologie du réseau proche d'une structure circulaire. Toutefois, certaines topologies de réseaux simulés sont similaires à celles obtenues sans la prise en considération la population.

³⁵ Dans le cas du triangle, le problème de Fermat-Weber consiste à localiser un point D par rapport à trois points A, B et C de telle manière que la somme des distances entre D et chacun des trois autres points soit minimisée.

A une échelle globale, les réseaux générés sont en général proches de structures arborescentes (Figure 7.25). L'étude des distributions statistiques d'indicateurs topologiques (tels que le degré des nœuds et la centralité d'intermédierité des nœuds et des arcs) montre que la répartition de la population dans la ville a une influence sur la configuration du réseau routier, aboutissant à un réseau présentant des variations spatiales de sa topologie.

Yu (2019) a aussi proposé un modèle de coévolution de la population et du réseau routier urbain. La dynamique d'évolution des deux composantes est modélisée de manière interdépendante en se basant sur la corrélation entre la densité de population et la connectivité du réseau (Figure 7.26).

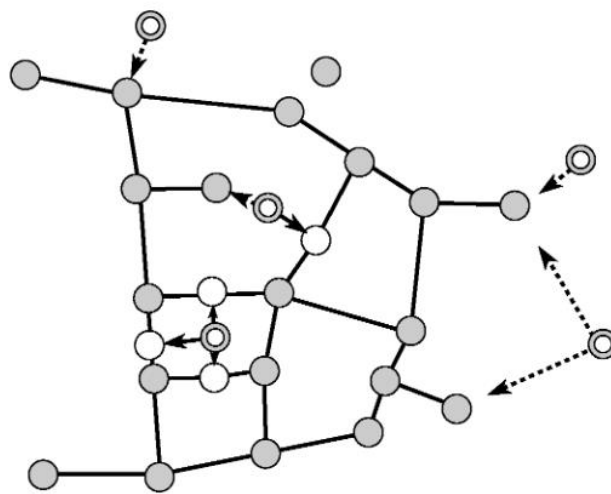


Figure 7.23. Schéma de l'évolution du réseau viaire d'après C. Yang et al. (2011). Chaque nouveau nœud généré (représenté par un anneau) est connecté au réseau existant, soit au nœud le plus proche (cercle gris), soit par une projection orthogonale qui implique la création d'un nouveau nœud (représenté par un cercle blanc) sur le réseau existant.



Figure 7.24. Réseau simulé de la nouvelle zone de Pudong à différentes dates.
Source : C. Yang et al. (2011).

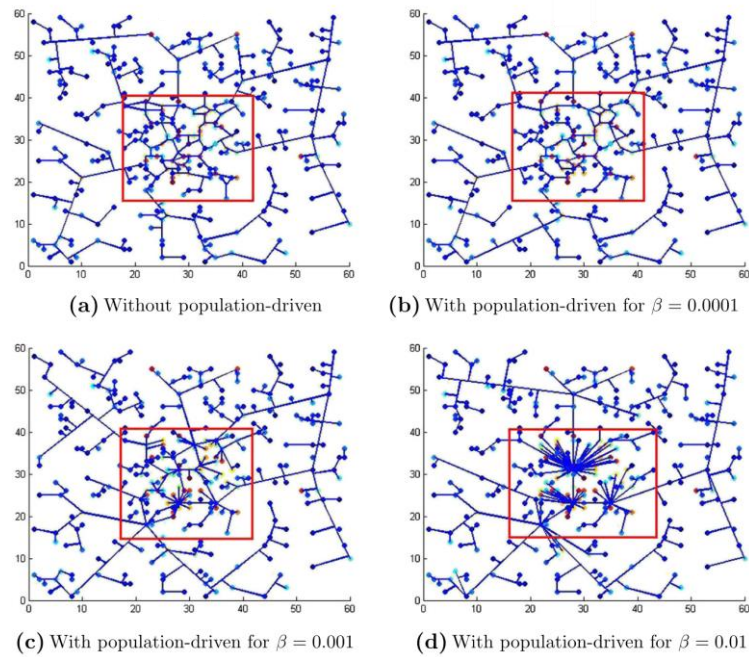


Figure 7.25. Structures topologiques du réseau routier urbain simulé avec et sans l'effet de la répartition de la population. Les axes X-Y correspondent aux coordonnées spatiales des différentes populations sur la grille. D'après : Zhao et al. (2016).

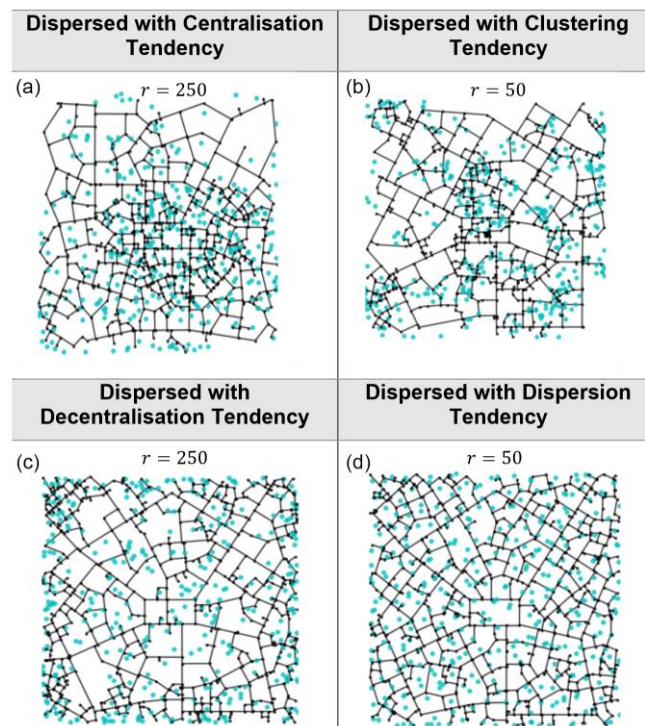


Figure 7.26. Influence de la population sur la forme du réseau viaire d'après Yu (2019). Quatre distributions de population et structures de réseau viaire simulées sous différentes combinaisons de paramètres : structures (a) centralisées, (b) regroupées, (c) décentralisées et (d) dispersées.

7.4.2 Modèles de syntaxe spatiale

Les modèles de morphogénèse des réseaux viaires qui relèvent de la syntaxe spatiale ont été construits autour d'hypothèses dérivant de la centralité (Hillier, 1999; Hillier & Hanson, 1989). Les villes sont considérées comme étant des produits de l'action d'individus qui prennent des décisions sur une base spatiale.

Initialement, Krafta et al. (2003) ont proposé un modèle construit sur l'hypothèse que la centralité est un processus d'évolution urbaine dans la mesure où elle conduit à la concentration des activités économiques des fonctions urbaines le long des routes (Hillier, 1999). Cependant, aucune preuve substantielle n'a été apportée sur le mécanisme par lequel la centralité agit pour le développement urbain dans les villes réelles.

Quelques années plus tard, les recherches d'Al Sayed et al. (2009, 2010) ont apporté de nouvelles preuves du rôle de la centralité dans la morphogénèse du réseau. Ils ont défini la centralité comme la fréquence à laquelle un point se trouve sur le chemin angulaire le plus court entre toutes les origines et destinations dans un graphe donné. Le chemin angulaire le plus court est celui qui minimise l'angle entre chaque élément et les autres éléments du graphe. L'intégration angulaire des segments est un indicateur qui évalue la profondeur spatiale d'un système (Al Sayed et al., 2010). L'analyse de l'intégration angulaire des segments peut mettre en évidence différents schémas évolutifs d'un réseau. En partant de l'analyse de l'évolution des réseaux viaires de Manhattan (16 dates de 1642 à 2009) et Barcelone (12 dates de 1260 à 2009), Al Sayed et al. (2012) ont identifié deux mécanismes élémentaires de morphogénèse. Un mécanisme de rétroaction positive qui résulte de l'ajout de nouveaux segments (mécanisme d'attachement préférentiel par lequel les nœuds déjà bien connectés continuent à additionner davantage de connexions), et un mécanisme de rétroaction de renforcement de la centralité de certaines structures qui résulte de la suppression de certains segments. Le processus de rétroaction de renforcement entraîne la densification des structures qui ont connu des gains importants en termes de centralité dans des états précédents, ainsi qu'un processus de suppression des éléments peu intégrés dans le réseau (Al Sayed et al., 2022) (Figure 7.27).

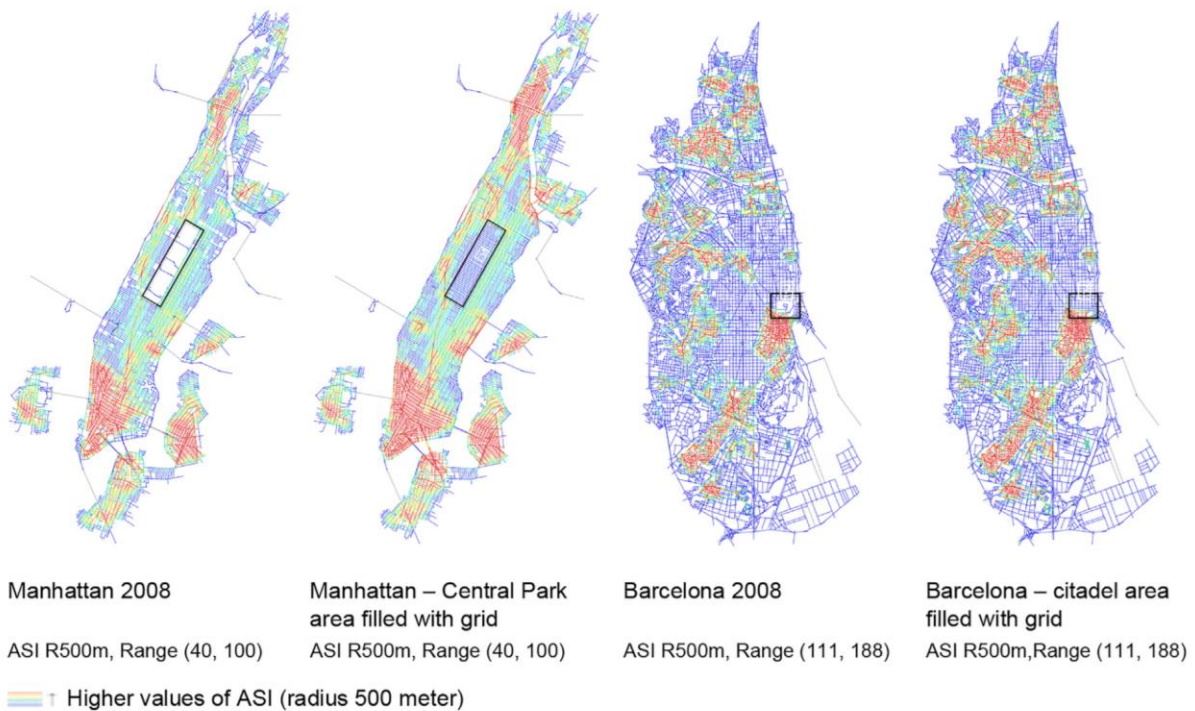


Figure 7.27. Deux applications du modèle d'Al Sayed et al. (2022). Les réseaux à droite de chaque carte sont produits en comblant le vide de Central Park à Manhattan et la zone de la Citadelle à Barcelone (représentés par les deux encadrés noirs), suivant une structure en grille similaire à celle de leurs zones environnantes. L'intégration angulaire des segments (ASI : "Angular segment integration") est calculée sur les réseaux initiaux et ceux résultants des simulations. Source : Al Sayed et al. (2022).

7.4.3 Modèles d'optimisation

Les travaux de recherches qui portent conjointement sur la morphologie et la topologie des réseaux représentent leurs dynamiques évolution par des processus d'optimisation (Barthélemy et Flammini, 2006; Gastner et Newman, 2006c; Schweitzer et al., 1997). Les modèles de génération de réseaux viaires basés sur l'optimisation ont été largement étudiés (Barthelemy, 2011), en partant des approches les plus simples à celles plus complexes. Les modèles simples sont basés sur une hiérarchisation du réseau (Louf et al., 2013) ou sur des transitions entre différents états optimaux du réseaux (Taillanter et Barthelemy, 2022). Les modèles plus complexes intègrent des considérations géographiques et socio-économiques. Ces modèles génèrent des réseaux viaires à partir de règles prédéfinies pouvant considérer la forme, la circulation, l'accessibilité, ou l'optimisation de coût-bénéfice (Louf et al., 2013).

7.4.3.1 Optimisation coût-bénéfice

Avec ces modèles, une attention particulière est portée à l'identification des caractéristiques globales du réseau en utilisant des fonctions de coût simplifiées. À l'échelle des agglomérations urbaines, les modèles d'agrégation des coûts et des bénéfices (*cost benefit aggregation*) s'intéressent à la minimisation des coûts de construction et de maintenance du réseau, tout en maximisant son efficacité. Les critères d'efficacité considérés sont divers, notamment : le plus court chemin moyen par rapport à la densité des liens (Albert et Barabási, 2002) ou à la longueur totale (Brede, 2010a); la longueur totale par rapport à la synchronisation (Brede, 2010b) ou à la centralité (Barthélemy et Flammini, 2006). Le coût est généralement associé à la longueur des liens dans les réseaux, englobant leur coût de construction et de maintenance (Barthelemy, 2011). Ces coûts affectent la croissance et la topologie du réseau car ils représentent une contrainte intrinsèquement liée à leur nature spatiale. D'autres modèles évaluent le coût par la distance du lien construit pondérée par le potentiel d'interaction entre chaque couple de nœuds (Louf et al., 2013).

Gastner et Newman (2006b) ont étudié des réseaux spatialisés de distribution ou de collecte, en se concentrant sur leur coût en termes de longueur totale des liens et sur leur efficacité en termes de distance entre les nœuds. Leurs observations empiriques indiquent que les réseaux réels spatialisés tendent vers l'optimisation de ces deux valeurs. Par la suite, leur intérêt s'est porté sur les réseaux de transport. Ils ont proposé un modèle simple, basé sur une optimisation Monte Carlo des coûts et des bénéfices, permettant ainsi la simulation de graphes qui reproduisent des caractéristiques qualitatives des réseaux étudiés (Gastner et Newman, 2006c) (Figure 7.28).

Taillanter et Barthelemy (2022) ont, eux, proposé une analyse coût-bénéfice pour évaluer différents scénarios d'évolution des infrastructures routières dans les grandes villes, en particulier les autoroutes urbaines et les rocares. Un modèle simple a été développé pour simuler l'émergence de nouvelles routes en se basant sur des seuils de population. Ces seuils sont exprimés par des paramètres tels que le coût de construction par unité de longueur, la vitesse sur la rocade, la valeur du temps et la capacité des routes.

Dans une perspective inverse, Xie et Levinson (2008) ont développé un modèle de dégénération de réseau en se basant sur l'heuristique du maillon le plus faible. Ce modèle a été utilisé pour étudier l'évolution topologique des réseaux de transport terrestre en simulant une région sous-développée (Xie et Levinson, 2007). Le modèle renforce les chemins les plus indispensables et abandonne progressivement les moins utilisés, permettant ainsi une

reconfiguration de la topologie du réseau à partir d'un processus ascendant. Les résultats du modèle reproduisent efficacement les processus locaux et globaux d'abandon des liens dans le réseau interurbain (Xie, 2008).

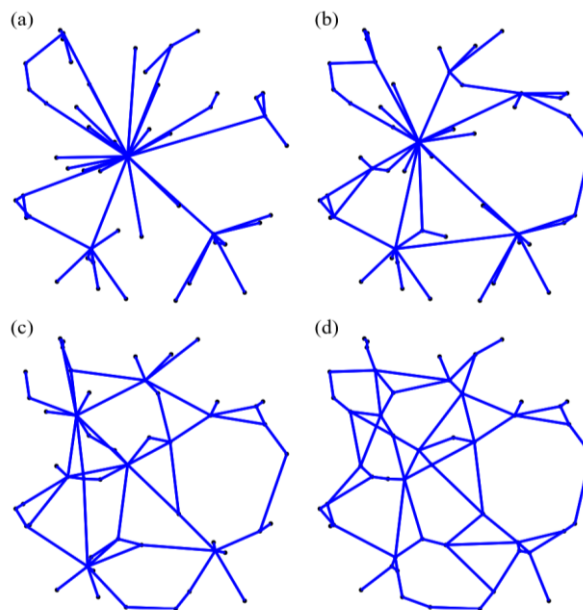


Figure 7.28. Structures de réseaux optimisé. Les réseaux (a) et (d) ressemblent respectivement à des réseaux aériens et routiers, tandis que (b) et (c) présentent une structure intermédiaire entre les deux extrêmes. Source : Gastner et Newman (2006c).

Goss et al. (2019) ont proposé un ensemble d'algorithmes pour générer des réseaux viaires plus ou moins complexes, dans le but de maximiser leur efficacité tout en optimisant le coût relatif de la construction des liens. L'algorithme 1 prend en entrée les données relatives aux nœuds et aux liens du graphe et renvoie une matrice d'adjacence pour représenter un graphe orienté. L'algorithme 2 applique l'agrégation *k-means* aux nœuds en se basant sur la distance euclidienne de leurs coordonnées, chaque nœud étant attribué à un agrégat. L'étape suivante consiste à trouver les centroïdes des agrégats de nœuds pour les regrouper en un seul nœud. L'algorithme 3 localise les nœuds nouvellement créés (centroïdes de chaque agrégat) et ces nouveaux nœuds sont connectés suivant la manière dont les intersections d'un réseau viaire sont reliées par des routes. L'algorithme 4 associe les nœuds aux liens pour créer le graphe viaire. Les résultats démontrent l'efficacité et la flexibilité de la méthode proposée pour créer des graphes viaires présentant un niveau de complexité ajustable (Figure 7.29 et Figure 7.30).

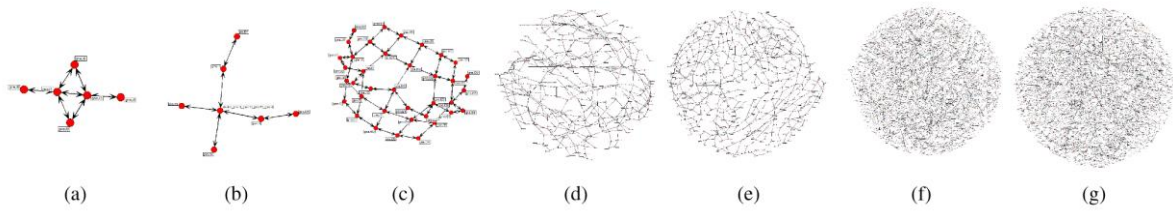


Figure 7.29. Sept graphes orientés de réseaux routiers, où la complexité augmente de (a) à (g). Source : Goss et al. (2019).

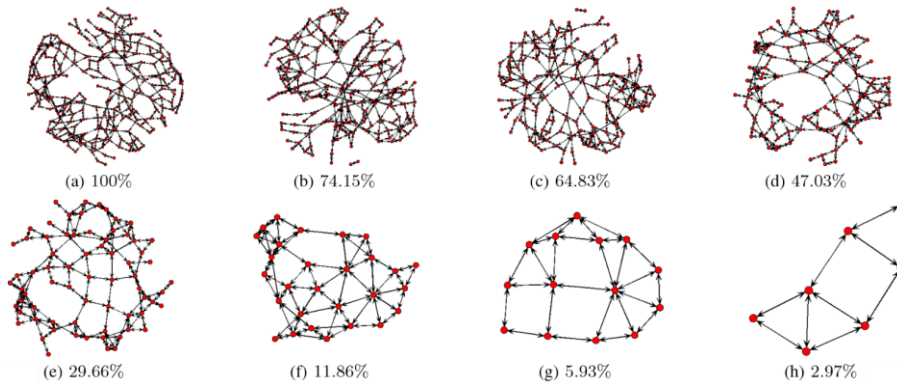


Figure 7.30. Les graphes orientés d'un réseau routier avec des niveaux de réduction progressifs du nombre de nœuds. Source : Goss et al. (2019).

Le modèle de Bottinelli et al. (2017) explore, lui, l'antagonisme entre les contraintes associées aux coûts de construction et d'entretien d'un réseau de sentiers. Le modèle optimise soit la longueur totale construite en ajoutant un lien au graphe viaire, soit les coûts d'entretien. Les structures réticulaires créées avec le modèle sont arborescentes à une échelle microscopique (Figure 7.31).

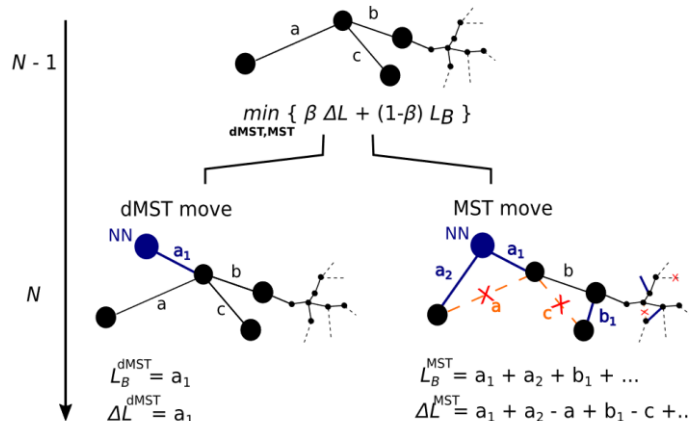


Figure 7.31. Modèle de Bottinelli et al. (2017). Le réseau évolue par ajout aléatoire d'un seul nouveau nœud par itération. Le nouveau nœud est soit connecté au nœud le plus proche, soit le réseau est restructuré pour minimiser la longueur totale des liens. Source : Bottinelli et al. (2017).

7.4.3.2 Optimisation topologique et morphologique

Le premier modèle relevant de cette catégorie, de modèles d'optimisation topologique et morphologique, est celui de Barthélemy et Flammini (2008). Il simule la création de nouveaux segments de rue se connectant à ceux existants à partir de points répartis dans l'espace selon une distribution de densité prédéfinie (uniforme, exponentielle, etc.). Il s'agit d'un modèle simple d'évolution du réseau par un processus d'optimisation locale, basé sur la densité de la population et la topologie (particulièrement la centralité d'intermédiarité des nœuds) du graphe viaire. Chaque nouvelle route est construite pour relier le plus orthogonalement possible un nouveau nœud au réseau viaire existant de la manière la plus efficace possible (Bejan et Ledezma, 1998), en utilisant le moins de longueur de route possible (Figure 7.32). L'objectif principal du modèle est de simuler différentes formes de réseau viaires (Figure 7.33) et de reproduire les propriétés statistiques des îlots urbains (distributions statistiques de leurs surfaces et de leurs rapports d'aspect³⁶) observées dans (Lämmer et al., 2006).

Barthélemy et Flammini (2009) ont ensuite affiné ce modèle en connectant parfaitement orthogonalement les nouveaux segments de rue au réseau existant selon une loi d'angle très prégnante dans les réseaux réels (Lagesse et al., 2015). Les réseaux simulés présentent des distributions statistiques en accord avec les observations empiriques. Cela confirme l'hypothèse initiale selon laquelle l'auto-organisation du réseau peut être le résultat de règles simples d'optimisation locale.

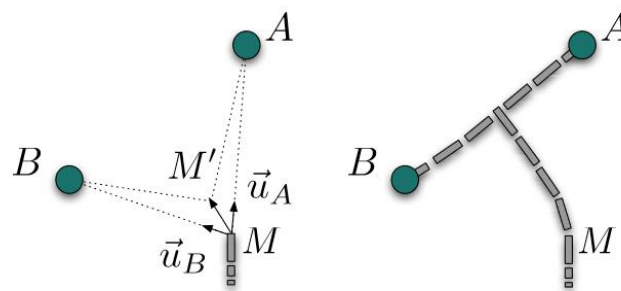


Figure 7.32. Modèle de Barthelemy et Flammini (2008) : M est le point le plus proche des nœuds A et B. Un segment de rue se développe du point M jusqu'au point M' afin de réduire au maximum la distance cumulée avec les nœuds A et B du réseau existant. Source : Barthélemy et Flammini (2008)

³⁶ Rapport des deux dimensions d'un objet géométrique.

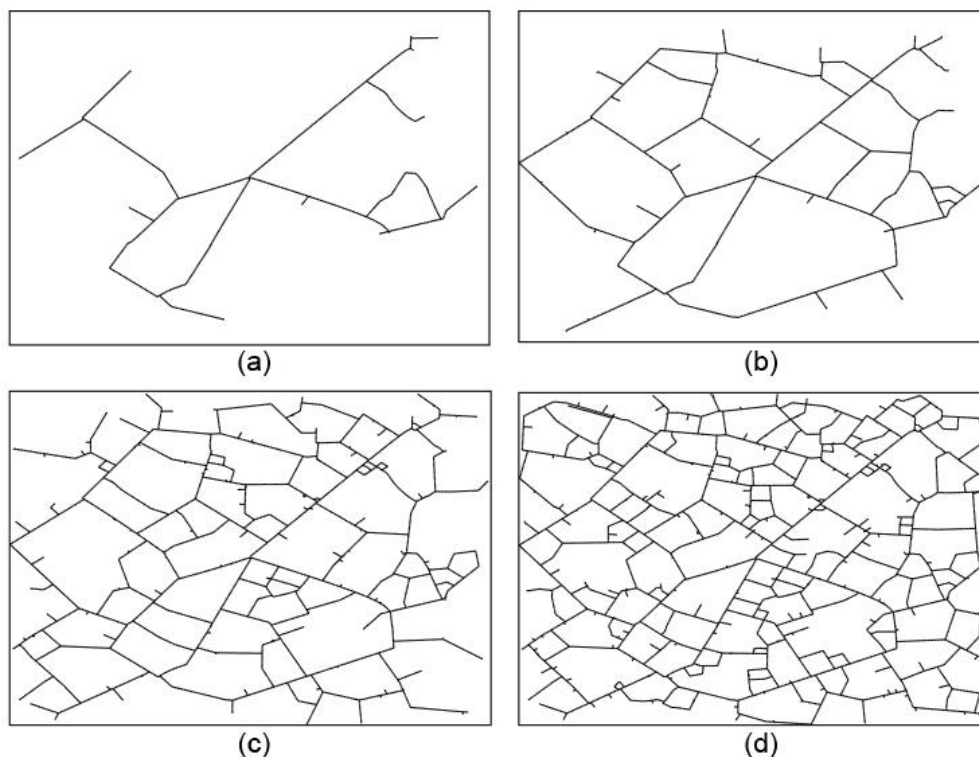


Figure 7.33. Modèle de Barthelemy et Flammini (2008). Evolution du réseau viaire à différents instants t : (a) $t = 1\ 000$, (b) $t = 2\ 000$, (c) $t = 3\ 000$, (d) $t = 4\ 000$. Au fil des itérations le réseau évolue d'abord en une structure arborescente, ensuite des boucles apparaissent pour des valeurs de densité plus élevées. Source : Barthélemy et Flammini (2008)

Rui et al. (2013) ont proposé un autre modèle génératif reposant sur une dynamique d'interaction entre les nœuds qui sont caractérisés par des rayons d'attraction différents, en tenant compte de certains aspects morphologiques et topologiques du graphe viaire (optimisation locale de la création des nouveaux liens et probabilité de formation de boucles dans le réseau). Les différentes valeurs du rayon d'attraction des nœuds ont pour effet que les réseaux simulés varient entre des structures polycentriques et monocentriques (Figure 7.34).

Le modèle de Courtat (2012) ne prescrit, lui, pas de densité des nouveaux nœuds du réseau mais les choisit en fonction d'un potentiel créé par le réseau lui-même, exprimant le fait que l'urbanisation autour des rues existantes attire l'installation de nouvelles constructions, et donc de nouvelles voies. Le modèle est basé sur des sources indirectes d'optimisation globale. Il introduit un potentiel d'attraction du réseau existant pour attirer la création de nouveaux nœuds, et un potentiel de répulsion local pour tenir compte de l'occupation locale de l'espace par le réseau. Les nouveaux nœuds du réseau sont créés dans des zones de fort potentiel positif. Chaque nouveau nœud est ensuite connecté au réseau existant, pour constituer la

structure viaire finale (Figure 7.35). L'objectif du modèle est de reproduire statistiquement des distributions de superficies des îlots, délimités par les rues, conformes aux lois de puissance observées dans de nombreuses villes (Lämmer et al., 2006). Ce modèle crée uniquement des segments de courte longueur et aucune voie traversant tout l'espace urbain (Pousse, 2020). Il est donc par nature incapable de reproduire la structure multi-échelle des voies telle qu'elle est observée (Pousse, 2020). Une deuxième version du modèle plus prometteuse a été introduite en ouverture de la thèse de Courtat (2012), bien que son examen détaillé n'ait pas été entrepris.

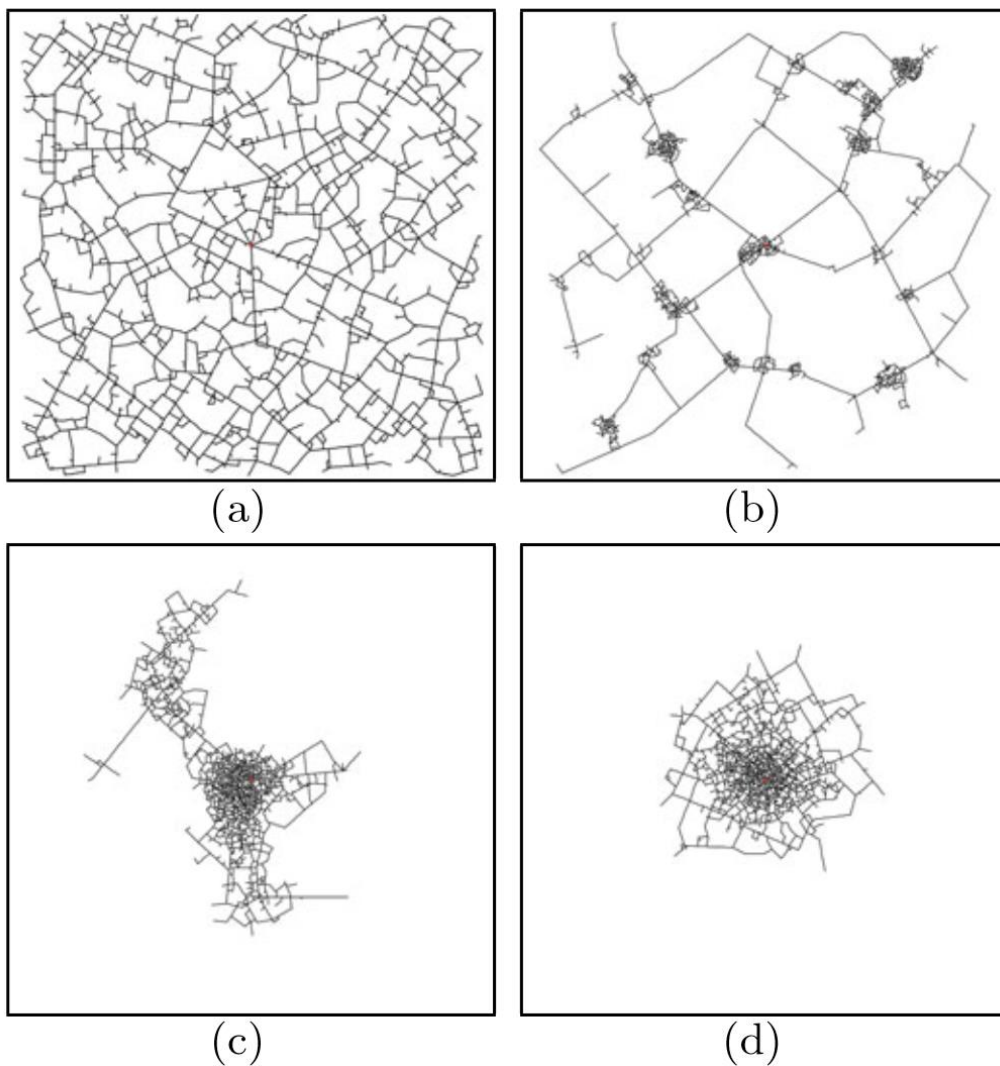


Figure 7.34. Réseaux viaires générés à partir d'un unique nœud initial, dans une fenêtre de simulation délimitée, avec une variation des valeurs de paramètres du modèle.

Source : Rui et al. (2013)

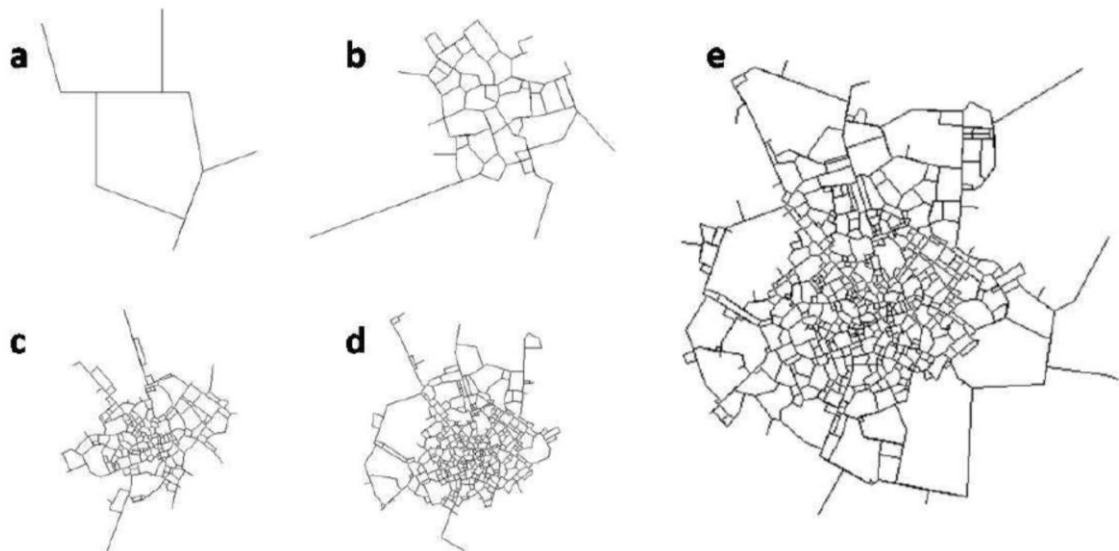


Figure 7.35. Modèle de Courtat (2012) : quatre étapes (a, b, c, d) du développement d'une ville, (e) réseau résultant de la simulation. Source : Courtat (2012)

Tirico (2020) a proposé deux modèles de génération de graphes intégrés dans un espace euclidien bidimensionnel. Les deux modèles utilisent des mécanismes similaires, en se basant sur un système de réaction-diffusion appliqué à une grille régulière, où un champ vectoriel dynamique régit l'évolution d'un ensemble de graines mobiles. Un graphe géométrique est formé à partir de ces graines déplacées par des vecteurs (Figure 7.36). L'objectif étant de simuler l'évolution de graphes géométriques qui présentent des caractéristiques similaires à celles observées dans les réseaux viaires (Tirico et al., 2019). Les processus sous-jacents varient entre les deux modèles. Le premier modèle s'inscrit dans le domaine des générateurs de graphes géométriques classiques, tandis que le second modèle introduit une complexité supplémentaire par les processus de réaction et de diffusion.

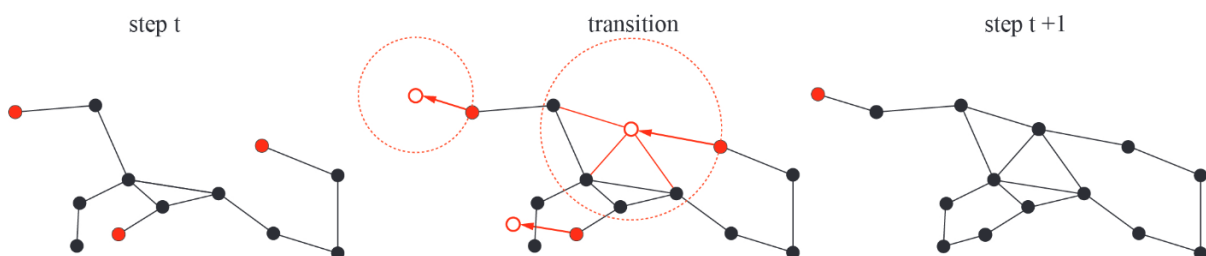


Figure 7.36. Interactions entre les nœuds et le graphe dans le générateur de graphe planaire de réaction-diffusion. Source: Tirico et al. (2019).

7.4.4 Propriétés des réseaux simulés par les modèles topologiques et morphologiques à base de graphes

Les modèles présentés dans cette section intègrent des mécanismes d'évolution topologique et quelques dynamiques physiques pour la génération de graphes viaires, définissant la configuration morphologique finale du réseau. L'ensemble de ces modèles de morphogénèse viaire sont basés sur des graphes et se caractérisent principalement par un processus de croissance itérative. Les résultats simulés sont souvent validés par rapport à des données empiriques.

Ces modèles présentent des limites en ce qui concerne notamment la forme des villes simulées qui tendent à être soit, très circulaires (Courtat, 2012) soit, très irrégulières (Rui et al., 2013), ainsi que la régularité excessive des réseaux simulés qui sont fortement orthogonaux. En conséquence, les résultats obtenus ne mettent pas suffisamment en évidence l'importance des rues existantes en tant qu'éléments structurants qui favorisent des développements spécifiques, tels que des extensions linéaires le long des voies primaires. Cela induit un manque de hiérarchie des voies des réseaux simulés.

La capacité de ces modèles à générer les différents morphotypes de voies nécessite une exploration plus approfondie. Toutefois une limite peut déjà être déduite du fait que la majorité de ces modèles se base sur des mécanismes d'évolution du réseau à une échelle locale, ce qui restreindrait la simulation de plusieurs morphotypes de voies de large étendue (telles que les voies concentriques, les voies radiales/linéaires, et les voies convergentes/divergentes).

7.5 Synthèse du chapitre 7

La simulation de la morphogénèse viaire est un domaine de recherche pluridisciplinaire et en constante évolution.

De nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour étudier la croissance des réseaux dans différents domaines, ce qui a conduit à la production d'une vaste littérature abordant diverses méthodes et mécanismes de croissance des réseaux durant les années 1960 et 1970. Ces études ont été motivées par l'intérêt de reproduire les topologies de réseaux observées. Les efforts de recherche ont principalement porté sur l'identification des règles heuristiques et intuitives pour reproduire les changements structurels des réseaux observés empiriquement. Cela était principalement dû au manque d'analyses spatio-temporelles des mécanismes sous-jacents explicatifs de l'évolution des réseaux viaires. Il n'existe donc que peu de modèles de morphogénèse viaire durant cette période. Pendant les trente années qui ont suivi, l'étude du développement temporel des réseaux de transport est restée largement négligée.

Depuis le début des années 2000, les avancées scientifiques en matière de modélisation des systèmes et réseaux complexes offrent de nouvelles opportunités. L'évolution temporelle des réseaux viaires au cours du temps, étant un processus complexe et multidimensionnel, a suscité un vif intérêt. La modélisation de la croissance des réseaux viaires s'est développée en adoptant les concepts d'attachement préférentiel et d'auto-organisation issus des sciences naturelles.

Nous pouvons à présent faire le bilan des expériences de modélisation de la morphogénèse des réseaux viaires précédemment exposées, en vue de la conception du modèle WayMorph.

Différenciation des échelles

L'échelle est une dimension essentielle de la simulation de la morphogénèse. Le changement d'échelle de modélisation peut mener à différentes interprétations de la morphologie urbaine (qui résulte d'une imbrication d'échelles) (Baro, 2015). Cependant, la plupart des modèles considèrent une seule échelle fixe, ce qui peut être expliqué par un objectif de simplification, à l'exception de quelques travaux qui intègrent différentes échelles (Perret et al., 2010). Les L-systèmes, notamment, présentent des résultats intéressants avec une approche multi-échelle intégrant des règles d'évolution locales tout en préservant la cohérence globale du système.

Intégration des mécanismes génératifs

La majorité des modèles de simulation de la morphogénèse viaires ne sont pas basés sur des études empiriques de l'évolution des réseaux viaires réels. Par conséquent, peu d'entre eux intègrent des mécanismes explicites de morphogénèse viaire. Par ailleurs, les mécanismes d'évolution modélisés sont souvent généraux sans mettre suffisamment en évidence les mécanismes spécifiques et inhérents à chaque type de réseau viaire. En outre, la dimension temporelle de la morphogénèse urbaine, ainsi que son aspect incrémental, sont souvent négligées dans la conception des modèles.

En revanche, la plupart des modèles adoptant une approche par des graphes, sont empiriques et incluent des processus déduits des analyses de réseaux réels. Ces modèles sont basés sur les logiques de connexion et d'apparition ou d'abandon des nœuds et des segments viaires.

Validation des résultats

Les résultats des différents modèles sont validés soit, en se référant aux propriétés structurelles, qui sont principalement liées à la topologie du réseau, soit, en se référant à la forme du réseau.

Bien que certains modèles produisent des résultats satisfaisants en termes de formes de réseaux, ils sont uniquement validés par comparaison visuelle des résultats avec des réseaux existants. En outre certains modèles ne permettent pas d'interpréter les résultats en comparaison avec des villes réelles, à savoir les modèles origine-destination dont les résultats sont plutôt schématiques.

La majorité des modèles morphologiques et topologiques s'intéressent principalement à la cohérence des résultats vis-à-vis de propriétés empiriques préalablement identifiées (distributions statistiques concernant, le plus souvent, le nombre de nœuds ou le nombre de liens, ou comparaison visuelle) ou avec d'objectifs prédéfinis (reproduction par simulation de faits stylisés tels que l'organisation hiérarchique du réseau ou la distribution des mesures du réseau).

La hiérarchisation du réseau est l'un des critères de validation souvent considéré. En effet, nombre d'analyses de données empiriques ont montré que les réseaux viaires urbains sont caractérisés par une hiérarchie, qui se manifeste par une invariance d'échelle des longueurs des segments de rue. La distribution statistique des longueurs des segments de rue correspond à une loi log-Normale en échelle logarithmique. La hiérarchie des réseaux se

traduit aussi par une propriété de "petit monde", avec une distribution des degrés des nœuds du réseau qui suit une loi de puissance en échelle logarithmique (voir partie 1).

Cependant, la plupart des modèles sont incapables de reproduire pleinement ces propriétés, ou les reproduisent partiellement, le cas échéant. Ils ne parviennent pas non plus à représenter la continuité et la structure multi-échelle des voies du réseau.

Opportunités pour la conception du modèle WayMorph

Vu les caractéristiques attendues des réseaux viaires que nous souhaitons simuler, les modèles issus de la physique (statistique) appliquée à l'étude des réseaux nous semblent particulièrement intéressants, notamment car ils intègrent des processus d'optimisation locale ainsi que des lois localisées de production et de consommation d'espace par les réseaux. En outre, certains de ces modèles intègrent également des sources indirectes d'optimisation globale. Ces modèles ne permettent pas de simuler une grande variété de morphotypes de voies mais offrent des possibilités d'amélioration et de développement directes, via l'ajout de mécanismes supplémentaires de morphogénèse des réseaux viaires.

Chapitre 8

Proposition d'un modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph

Les modèles de simulation de réseau viaire à base de graphes présentés dans le Chapitre 7 (Barthélemy & Flammini, 2008, 2009 ; Courtat, 2012 ; Pousse, 2020 ; Rui et al., 2013 ; C. Yang et al., 2011 ; Zhao et al., 2016) visent principalement à reproduire les caractéristiques statistiques observées dans les réseaux viaires urbains réels. Cependant, seules les structures finales des réseaux générés par ces modèles sont examinées par leurs auteurs tandis que les trajectoires d'évolution des réseaux simulés, et les processus sous-jacents ont été relativement peu étudiés et pris en compte.

L'idée à la base de la conception de WayMorph est de partir de modèles existants et de les enrichir afin de représenter, sous la forme de règles morphologiques et topologiques simples, les processus d'évolution et les patrons de formation/rattachement mis en évidence dans les parties 1 et 2 de la thèse.

Comme mentionné au début de ce manuscrit de thèse, cette recherche doctorale s'inscrit dans la continuité des recherches menées par l'équipe pluridisciplinaire Morphocity. Au sein de cette équipe, deux travaux de modélisation de la croissance de réseaux viaires ont été menés : celui de Thomas Courtat (2012) et celui de Romain Pousse (2020). Le nouveau modèle de morphogénèse viaire que nous présentons dans le présent chapitre est complémentaire à ces travaux. Il est basé sur la représentation du potentiel de création de nouveaux nœuds autour du réseau existant proposé par Courtat (2012) ; il incorpore également des propriétés que le modèle de Courtat (2012) n'intègre pas, qui sont inspirées d'autres modèles. Plus particulièrement, le modèle WayMorph intègre dans ses nouveaux mécanismes des règles simples inspirées de l'optimisation locale du modèle de Barthélemy et Flammini (2008), ainsi que l'aspect multi-échelle du modèle de Pousse (2020) (par la génération de segments de rue courts et de segments longs qui sont ensuite redécoupés).

WayMorph comporte en outre de nouveaux mécanismes capables de recréer les différentes propriétés structurelles des réseaux viaires mises en évidence dans la partie 1 de la thèse, ainsi que les différents morphotypes de voies identifiés dans la partie 2.

Ce chapitre de la thèse est organisé en cinq sections. Dans la section 8.1, les cadres méthodologique et conceptuel et heuristique de la modélisation sont posés. Dans la section 8.2, le modèle de Courtat (2012), à la base du modèle WayMorph, est décrit de manière détaillée. Dans la section 8.3, les mécanismes du modèle WayMorph sont présentés. Les variables et les paramètres du modèle sont récapitulés dans la section 8.4. Enfin, le paramétrage par défaut du modèle est effectué dans la section 8.5.

Ce chapitre pose ainsi les fondements du modèle WayMorph pour la simulation de la morphogénèse de réseaux viaires et fournit les informations méthodologiques et techniques nécessaires à son utilisation.

8.1 Cadres méthodologique, conceptuel, et heuristique

8.1.1 Cadre méthodologique

D'un point de vue méthodologique, un modèle de simulation complexe peut relever d'une approche KISS (*Keep It Simple Stupid*) (Axelrod, 1997) ou KIDS (*Keep It Descriptive Stupid*) (Banos, 2016; Edmonds & Moss, 2005). L'approche KISS vise la reproduction par simulation de structures macroscopiques observées en modélisant des comportements de manière très simples, potentiellement très éloignés de la réalité (Tannier, 2017). L'objectif est de privilégier la simplicité de la modélisation pour faciliter l'interprétation des résultats de simulation. L'approche KIDS préconise, elle, une modélisation aussi simple que possible des comportements observés dans la réalité, tout en se concentrant sur le réalisme des mécanismes sous-jacents (Banos, 2016; Edmonds & Moss, 2005).

Dans le cadre de notre travail de modélisation de la morphogénèse de réseaux viaires, nous avons choisi d'adopter une approche KISS. D'une part, le modèle se focalise sur la reproduction par simulation de propriétés structurelles observées à l'échelle des réseaux viaires. D'autre part, il intègre des mécanismes simplifiés pour la simulation de morphotypes de voies qui doivent ressembler à ceux observés dans la réalité empirique.

8.1.2 Cadre conceptuel

La croissance du réseau viaire résulte d'un processus plus complexe que celui qui sera représenté dans le modèle. Notamment, certains facteurs qui relèvent de la planification urbaine ou de l'existence d'autres entités physiques (bâtiments par exemple) peuvent intervenir mais ne sont pas considérés. Nous faisons aussi l'hypothèse que la représentation de la seule structure d'un réseau viaire, sans tenir compte de la largeur des voies, de leur hiérarchie fonctionnelle, ou du sens de circulation, suffit pour comprendre et analyser sa morphogénèse.

WayMorph a été développé à partir d'un modèle préexistant (Courtat, 2012), en intégrant de nouveaux mécanismes dont certains sont généraux et d'autres, spécifiques. Les mécanismes généraux (par exemple, le mécanisme de densification/extension du réseau) sont associés à l'évolution globale des réseaux viaires et président à la génération de n'importe quel morphotype viaire. Les mécanismes spécifiques (par exemple, la ramification) président à la

génération d'un morphotype donné et sont liés à l'attachement local de parties du réseau à la structure existante.

Les réseaux viaires existants ne semblent pas résulter d'un processus d'optimisation globale, qui serait caractérisé par l'absence de différenciation locale de la forme des réseaux, mais plutôt de l'ajout progressif de nœuds et de segments résultant d'une optimisation locale (Louf et al., 2013). C'est pourquoi les entités élémentaires modélisées correspondent aux nœuds et aux segments d'un réseau viaire. Ce choix est cohérent avec notre objectif de simulation, qui consiste à reproduire les morphotypes de voies et les caractéristiques topologiques des réseaux existants.

8.1.3 Cadre heuristique

L'aspect heuristique du processus de modélisation correspond au choix des caractéristiques et des comportements des objets à observer dans le cadre des simulations. Dans le cas du modèle WayMorph, cela implique un décalage systématique entre les niveaux de modélisation (i.e. les segments et les nœuds d'un graphe) et d'évaluation et de validation du modèle (i.e. les morphotypes de voies et la structure des réseaux). Les faits stylisés³⁷ que le modèle vise à reproduire sont donc les morphotypes de voies identifiés dans la partie 2 de la thèse, à l'échelle des voies, et les propriétés structurelles des réseaux identifiés dans la partie 1, à l'échelle du graphe viaire.

Par ailleurs, nous disposons de suffisamment d'informations à partir des analyses morpho-historiques des réseaux de Dijon, Pontarlier et Besançon pour être en mesure d'affecter des valeurs aux variables et paramètres intervenant dans chaque mécanisme du modèle.

8.2 Le modèle de Courtat (2012) comme socle de réflexion

8.2.1 Principes du modèle

Courtat et al. (2011c) ont proposé un modèle de génération de réseau pour simuler la morphologie d'une ville représentée par ses rues. Il repose sur trois grands principes. D'abord, le réseau viaire d'une ville est considéré comme étant le résultat de plusieurs étapes

³⁷ Un fait stylisé est une présentation simplifiée d'une régularité empirique récurrente (Mathian & Sanders, 2014), observable par exemple sous forme d'une distribution ou d'un indicateur statistique, ou encore d'une configuration spatiale reconnaissable (Tannier, 2017).

d'évolution au cours du temps. Ces évolutions se traduisent par l'émergence de nouveaux centres, représentant de nouvelles habitations, entreprises, etc., qui sont rattachés au réseau existant par la construction de nouvelles routes. Ensuite, il est supposé que les structures viaires existantes sont conservées au cours du temps. Cela signifie qu'une fois qu'une rue est construite, elle fait toujours partie du réseau viaire. Enfin, le réseau est soumis à des contraintes quant à son expansion, sa taille, etc. Ces contraintes découlent de quatre caractéristiques fondamentales des villes identifiées à partir de l'analyse de plusieurs villes françaises présentée dans l'article de Courtat et al. (2011c) :

- La **planification** d'une ville peut être organique ou centralisée. Selon une logique organique, la ville se développe de manière itérative et évolutive en s'adaptant aux changements (notamment la création de nouveaux centres) et aux besoins (par exemple celui d'assurer l'accessibilité à ces nouveaux centres). Selon une logique centralisée, une autorité centrale ou différentes instances guident la construction cohérente et simultanée du réseau viaire. Ces deux logiques de planification ne sont pas nécessairement mutuellement exclusives et peuvent coexister au sein d'une même ville.
- La **construction** correspond à la capacité d'ajouter de nouveaux centres ou de nouvelles rues au réseau. Cette possibilité peut être entravée par des contraintes économiques liées au coût de leur construction, ou par des contraintes géographiques, telles que des rivières, des lacs ou des montagnes.
- L'**organisation spatiale** d'une ville peut varier entre un agencement aléatoire d'habitations et une structure organisée. Un agencement aléatoire peut être dû à des facteurs tels que la croissance naturelle de la population, les expansions informelles ou l'absence de réglementations strictes en matière d'urbanisme. Un bidonville en est un exemple concret, car les habitations y sont reliées de manière aléatoire à travers le réseau, par une structure arborescente. À l'inverse, la ville américaine typique illustre un réseau viaire très structuré, avec des rues larges et parallèles qui s'entrecroisent à angle droit.
- L'**étalement** d'une ville représente le compromis induit entre son développement interne et sa croissance externe. Un facteur d'étalement élevé correspond à l'expansion de la ville au-delà de ses frontières. Cela peut prendre la forme d'extensions périphériques (en continuité de la ville existante) ou périurbaines discontinues. Un facteur d'étalement plus faible correspond à un développement

concentré à l'intérieur des limites de la ville, encourageant la densification. Les quartiers denses, tels que les centres-villes, affichent généralement un facteur d'étalement élevé³⁸. Les zones industrielles affichent le contraire. Souvent, ce facteur n'est pas une constante pour l'ensemble de la ville, mais varie dans le temps en fonction des différentes étapes de son développement.

8.2.2 Formalisation du modèle

Nous présentons ici le modèle de morphogénèse de réseau viaire de Courtat (2012), qui est une variante du modèle présenté dans Courtat et al. (2011c). Les principes fondamentaux mentionnés précédemment sont communs aux deux modèles.

Le réseau modélisé est représenté par un graphe viaire spatialisé $G = (V ; A)$, qui se compose d'un ensemble de nœuds V et d'un ensemble d'arcs A . Chaque lien $(v_1 ; v_2)$ relie les nœuds v_1 et v_2 . Les nœuds représentent donc des intersections entre les arcs ou leurs points d'extrémité. Un poids spécifique w est attribué à chaque lien et représente sa longueur en mètres. Un hypergraphe $G' = (V' ; A')$ est introduit. Il consiste en une représentation simplifiée du graphe géométrique $G = (V ; A)$ par un graphe planaire et rectiligne (Figure 8.1).

Le modèle part de l'hypothèse qu'une ville peut être représentée par un hypergraphe viaire, et qu'elle se développe localement par la division et l'extension contraintes des arcs du graphe. La simulation de la morphogénèse viaire repose donc sur le postulat d'un développement organique de la ville.

Le mécanisme génératif a été implémenté comme suit : (Etape 1) de nouveaux nœuds sont ajoutés itérativement au réseau, en fonction d'un potentiel P de création de routes qui est fonction du réseau existant. (Etape 2) Ce potentiel quantifie la probabilité d'attraction et de répulsion pour qu'un nouveau centre (nœud) s'installe autour du réseau existant. (Etape 3) Chaque nouveau nœud est ensuite connecté au réseau existant par projection orthogonale, tout en maintenant un réseau planaire et en satisfaisant la proximité du graphe de voisinage relatif (RNG) (voir sous-section 8.2.2.4).

³⁸ L'intitulé du facteur d'étalement est contre-intuitif au regard de sa formalisation, dans le modèle de Courtat (2012).

L'algorithme 1 résume le processus de la modélisation de la croissance du réseau viaire d'une ville adopté par Courtat (2012), et donne un aperçu des principales étapes de la simulation qui seront détaillées ultérieurement.

Algorithme 1 : "City Growth Simulation"

Initialisation du modèle. Choix du nombre N de nœuds devant être créés à l'issue de la simulation.

Etape 1. Calculer le potentiel autour du réseau existant - Fonction de potentiel.

. Tirer Q nœuds candidats - Simulation Monte-Carlo.

Etape 2. Sélection d'un nœud parmi les Q nœuds candidats.

Etape 3. Connecter le nœud sélectionné au réseau existant.

Arrêt de la simulation quand le réseau comporte N nouveaux nœuds.

Sinon retour à l'étape 1

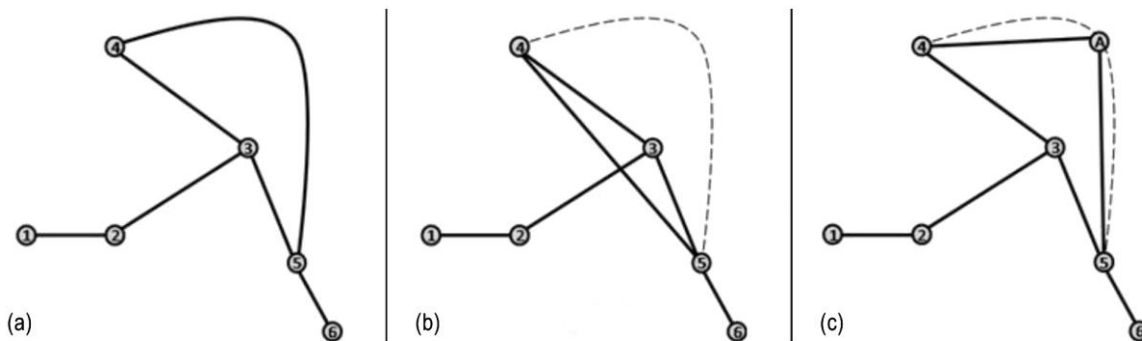


Figure 8.1. (a) Un graphe géométrique. (b) Un graphe rectiligne (rectification de la sinuosité). (c) Un graphe planaire (suppression des superpositions des arcs).
D'après Courtat et al. (2011c).

8.2.2.1 Initialisation du modèle

Le modèle est appliqué à un réseau initial qui peut être un segment unique ou un ensemble de quelques segments (4 ou 5) connectés. La croissance du réseau se produit au sein d'une fenêtre carrée de taille (superficie) W donnée. Cette fenêtre représente la zone maximale comprenant le réseau existant et dans laquelle les nouveaux nœuds peuvent être ajoutés au cours de la simulation. La taille de la fenêtre peut être statique (fixe pour chaque simulation) ou dynamique (croissante en fonction du réseau viaire qui évolue lui-même au cours de la simulation). Le nombre total de nœuds N dans le réseau à la fin de la simulation est défini à l'initialisation du modèle.

8.2.2.2 Etape 1 : Tirage de Q nœuds candidats et calcul du potentiel autour du réseau existant

Calcul du champ de potentiel autour du réseau existant

- Le potentiel unitaire de chaque point x

Pour chaque point x de l'espace dans la fenêtre de taille W , le potentiel $P_h(x)$ quantifie dans quelle mesure x est un bon choix pour localiser un nouveau nœud considérant un seul et unique objet h sur le réseau existant (Courtat, 2012, page 128).

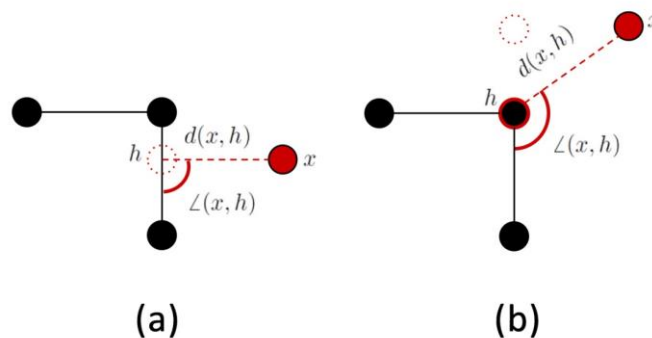


Figure 8.2. Un point x (disque rouge) et sa projection orthogonale (cercle en pointillé). (a) représente la projection orthogonale de x sur un segment existant. (b) Si la projection orthogonale de x n'atteint pas un segment existant, x est projeté sur le nœud existant le plus proche. Illustration réalisée par Clément Sebastio³⁹ et modifiée par nos soins.

Géométriquement, l'objet h est un point du réseau existant. Il peut s'agir soit, du point d'arrivée de la projection orthogonale de x sur le segment considéré (Figure 8.2 - a) soit, d'un nœud d'extrémité du segment considéré (Figure 8.2 - b). Le potentiel unitaire $P_h(x)$ dépend de la distance de x à h , notée $d(h, x)$, mais aussi de l'angle entre le segment du réseau et le segment, noté $\angle(h, x)$.

Le potentiel unitaire $P_h(x)$ pour chaque point x du réseau existant est le produit de la fonction de potentiel $V(d(h, x))$ et d'un effet angulaire (Équation 8.1).

$$P_h(x) = V(d(h, x)) \times |\cos(2|\angle(h, x)|)|$$

Équation 8.1. Potentiel unitaire défini par Courtat (2012)

³⁹ Clément Sebastio a effectué un stage au sein du laboratoire ThéMA (Février - Juillet 2023), dans le cadre de son Master 2 à L'Ecole Normale Supérieure de Lyon. Le stage a porté principalement sur le projet COVADEO et il a également participé aux discussions autour du modèle de Courtat (2012) et le modèle WayMorph.

Courtat (2012, page 137) indique que l'angle dans la fonction cosinus est multiplié par deux pour assurer la continuité spatiale du potentiel unitaire.

- **La fonction de potentiel (Figure 8.3)**

La fonction $V(d(h, x))$ calcule la valeur du potentiel V induit par un segment du réseau compte tenu de la distance métrique d d'un point h à chaque point x . La distance métrique $d(h, x)$ dans le potentiel unitaire $P_h(x)$, est notée ici r pour simplifier l'écriture de la fonction de potentiel V définie ainsi :

$$V(d(h, x)) = V(r) = \alpha \cdot \left(\left(\frac{\beta}{r} \right)^{2 \cdot \eta} - \left(\frac{\beta}{r} \right)^\eta \right)$$

Équation 8.2. La fonction de potentiel de Courtat, (2012)

Cette fonction est inspirée du potentiel Lennard-Jonnes proposé pour un modèle de physique atomique⁴⁰. α est un paramètre d'amplitude, ou paramètre d'échelle du potentiel, dont la valeur n'a pas une grande influence tant qu'elle est positive. β est le rayon du rejet, équivalent à la zone d'inhibition autour du réseau existant. Dans le cas d'un réseau viaire, ce rejet représente l'effet des installations (habitations, commerces, etc.) qui se développent autour des routes et entravent la création de nouveaux segments de rue. Il est défini comme $\beta = r_0$ (disque jaune sur la figure 8.4), r_0 est le rayon de rejet fixe autour du réseau⁴¹. Dans $[0, r_0]$ le potentiel est positif, la création d'un nouveau nœud est interdite à une distance inférieure à r_0 . Une probabilité d'étalement f_{ext} peut être ajoutée. Elle représente la fréquence à laquelle un facteur d'étalement k_{ext} est appliqué à ce rayon de rejet, ce qui revient à définir $\beta = k_{ext} \times r_0$ comme rayon de rejet. La création d'un nouveau nœud est alors impossible dans un rayon $k_{ext} \times r_0$, ce qui force les nouveaux nœuds à s'installer à la périphérie du réseau (i. e. de la ville simulée).

Le **rayon de potentiel optimal** pour l'implantation de nouveaux nœuds est défini comme $r_m^\eta = \beta \times 2^{\frac{1}{\eta}}$ (anneau en bleu foncé autour du rayon de rejet)⁴², où η est un paramètre d'étalement qui influence la taille du rayon de potentiel optimal. Ce rayon optimal dépend du

⁴⁰ Le potentiel de Lennard-Jonnes décrit potentiel d'interaction entre une paire d'atomes. Ce potentiel définit une attraction entre les deux atomes lorsque la distance qui les sépare est grande et une répulsion pour de petites distances.

⁴¹ Le paramètre β est appelé "*long-range influence*" ou "*Hard rejection radius*" et il est considéré comme équivalent à r_0 dans Courtat (2012).

⁴² La formulation mathématique du rayon de potentiel optimal a été corrigée par Graftiaux (2021), en raison d'une faute de frappe dans la thèse de Courtat (2012) qui l'avait défini comme $r_m^\eta = 2 \times \beta^\eta$.

type de structure urbaine souhaitée. Un réseau avec un paramètre d'étalement η faible se développera de manière plus étalée, en raison d'un rayon optimal large. En revanche, un réseau avec un paramètre d'étalement élevé a un rayon optimal plus restreint et donc son développement sera plus compact.

La valeur du potentiel minimal est $V_m = -\alpha \times \left(\frac{2^\eta - 1}{4^\eta}\right)$.

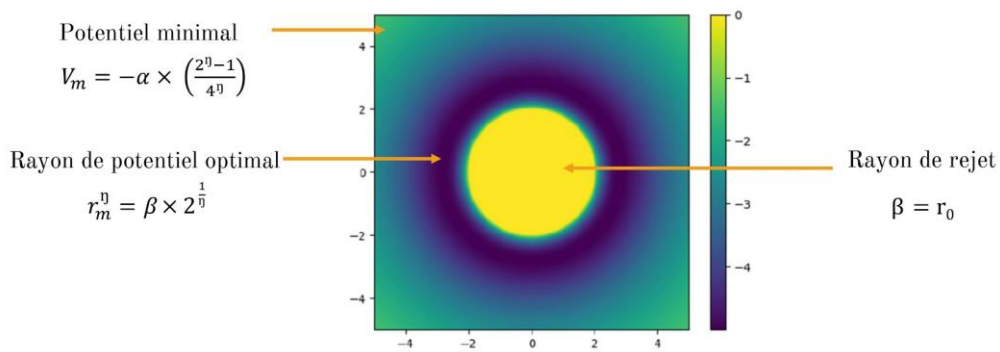


Figure 8.3. Champ de potentiel de tous les points x par rapport à un seul objet h en l'absence d'effet angulaire. L'objet h est un point situé au centre du disque jaune. Source : Graftiaux (2021).

- **L'effet angulaire (Figure 8.4)**

Dans la formule de l'effet angulaire $|\cos(2|\angle(h, x)|)|$ (Équation 8.1), la fonction cosinus a pour résultat de pénaliser les points x pour lesquels l'angle de la projection orthogonale sur un segment de rue est petit (se rapproche de 45°), et de favoriser les points x qui sont orthogonaux ou alignés aux segments existants (angle de 90° ou 0° , respectivement).

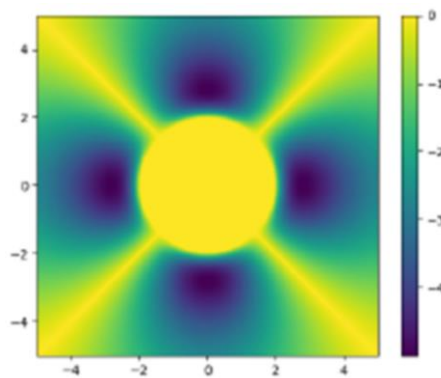


Figure 8.4. Champ de potentiel avec l'effet angulaire de tous les points x par rapport à un seul objet h situé au centre du disque jaune. Source : (Graftiaux, (2021).

- **Le potentiel global (Figure 8.5)**

Pour chaque nœud candidat x , le potentiel global $P(x)$ est la somme des potentiels unitaires $P_h(x)$ induits par tous les objets h .

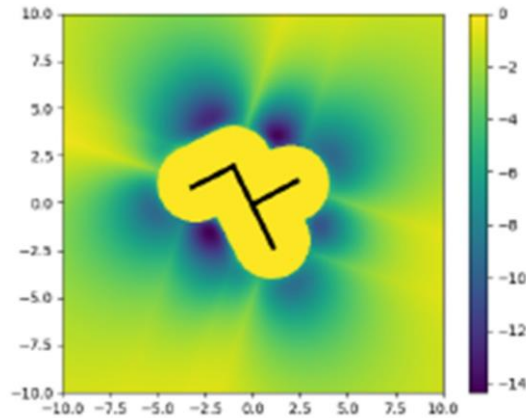


Figure 8.5. Champ de potentiel d'un petit réseau. En bleu, les zones très favorables à la localisation d'un nouveau nœud. En vert, les zones moins favorables mais possibles pour la localisation d'un nouveau nœud. En jaune, les zones défavorables, qui se situent à proximité des segments initiaux ainsi que sur les diagonales. Source : Graftiaux (2021).

Tirage de Q nœuds candidats - Simulation Monte-Carlo

Pour éviter de calculer le champ de potentiel en tenant compte de tous les points x de la zone d'étude, Q nœuds candidats sont tirés au hasard dans la fenêtre W en utilisant une simulation de Monte-Carlo (Von Neumann & Ulam, 1951). $Q = 3N$, où N représente la taille souhaitée, en nombre de nœuds, du réseau simulé.

Pour la sélection de chacun des Q nœuds candidats, le nombre d'essais du processus de Monte-Carlo est q (Équation 8.3). Ce nombre d'essais q est calculé à partir d'un paramètre d'organisation P_e , qui représente la probabilité que la simulation de Monte-Carlo tire un point de potentiel minimum à l'intérieur du rayon de potentiel optimal. Pour les réseaux non organisés, P_e est proche de 0, q est proche de 1 et les nœuds candidats sont choisis au hasard sans aucune influence du champ de potentiel. Pour les réseaux organisés, P_e est proche de 1, q est très élevé, et seuls les nœuds optimaux sont choisis. L'étude de la variation de ce paramètre (P_e) peut aider à choisir des valeurs appropriées pour les simulations (cf. section 9.3.1.2).

$$q = \frac{-\log(1 - P_e) \cdot W}{e^2}$$

Équation 8.3. Nombre d'itérations de la méthode de Monte-Carlo⁴³. q : nombre de nœuds testé. P_e : paramètre d'organisation. W : aire de la fenêtre de simulation. e^2 : rayon local fixe autour du minimum.

⁴³ La formulation mathématique a été corrigée par Gilles Vuidel (laboratoire ThéMA, Besançon), qui a détecté une erreur dans la thèse de Courtat (2012).

8.2.2.3 Etape 2 : Sélection d'un nœud parmi les Q nœuds candidats

Les Q nœuds candidats tirés au sort sont classés en fonction de leur potentiel $P(x)$. Parmi eux, le nœud ayant la valeur de potentiel $P(x)$ la plus faible dans le rayon de potentiel optimal⁴⁴ (l'anneau en bleu le plus proche du rayon de rejet sur la figure 8.4) est sélectionné pour être ajouté au réseau.

- Si q est égal à 1, les nœuds candidats sont tirés au hasard et celui qui a le potentiel le plus faible parmi eux est sélectionné.
- Si q est élevé, les nœuds candidats tirés ont les valeurs de potentiel les plus faibles dans le rayon de potentiel optimal.

8.2.2.4 Etape 3 : Connexion du nœud sélectionné au réseau existant

Une fois que le nouveau nœud est choisi, il est connecté au réseau existant. Cette opération est guidée par le paramètre de construction.

Déterminer l'ensemble de voisinage visible VN

Pour connecter le nouveau nœud au réseau existant, la première étape consiste à déterminer l'ensemble de voisinage visible VN . Cet ensemble regroupe deux sous-ensembles de points (Figure 8.6) :

- les nœuds visibles depuis le nouveau nœud sont les nœuds du réseau existant qui peuvent être connectés avec le nouveau nœud sans traverser aucun segment du réseau ;
- les projections orthogonales visibles : les projections orthogonales du nouveau nœud sur les segments du réseau existant, qui ne croisent aucun de ces segments.

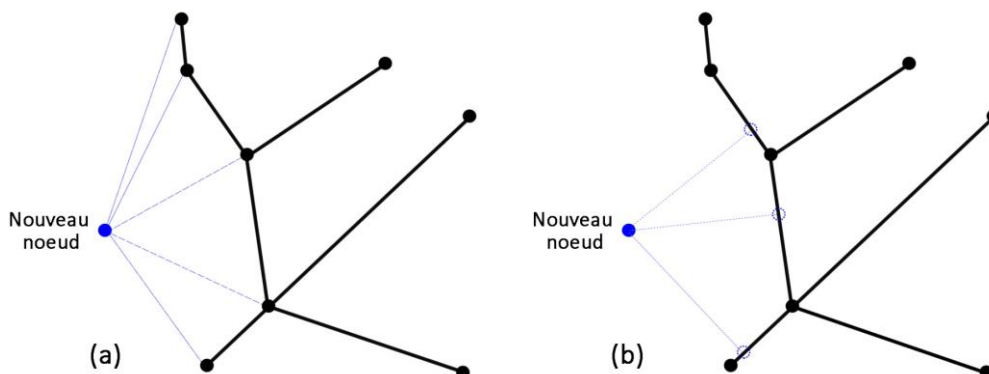


Figure 8.6. Voisinage visible VN d'un nouveau nœud représenté par des segments de couleur bleue : (a) ensemble des nœuds visibles. (b) ensemble des projections orthogonales visibles.

⁴⁴ Les valeurs les plus faibles dans la zone de potentiel global correspondent au rayon du rejet.

Déterminer le voisinage relatif RN du nouveau nœud dans l'ensemble de voisinage visible VN

Le voisinage relatif RN dans l'ensemble de voisinage visible VN est le sous-ensemble de toutes les connexions réalisables dans VN . Comme la connexion du nouveau nœud à tous les nœuds de l'ensemble VN peut entraîner des connexions trop proches les unes des autres ou qui se croisent, le processus suivant est appliqué (Figure 8.7) :

- Création d'un ensemble de connexions réalisables à l'aide d'une triangulation de Delaunay (Delaunay, 1934). Les nœuds x_i , x_j et x_k sont trois nœuds différents dans l'ensemble des nœuds X . Le triangle $x_i x_j x_k$ est dessiné si et seulement si aucun autre nœud ne se trouve à l'intérieur du cercle de $x_i x_j x_k$. La triangulation de Delaunay est calculée pour tous les nœuds de VN . Seuls les nœuds du réseau connectés directement au nouveau nœud dans cette triangulation sont gardés.
- Sélection de l'ensemble de voisinage relatif RN parmi les nœuds dont les connexions sont réalisables suite à la triangulation Delaunay. Dans un graphe de voisinage relatif, le segment entre deux nœuds x_i et x_j est créé si et seulement si aucun nœud du graphe n'est plus proche de x_i ou de x_j qu'ils ne le sont l'un de l'autre. Seuls les nœuds dont les connexions sont réalisables (avec le nouveau nœud) dans le graphe de voisinage relatif font partie de l'ensemble de voisinage relatif RN (Goldman, 1998).

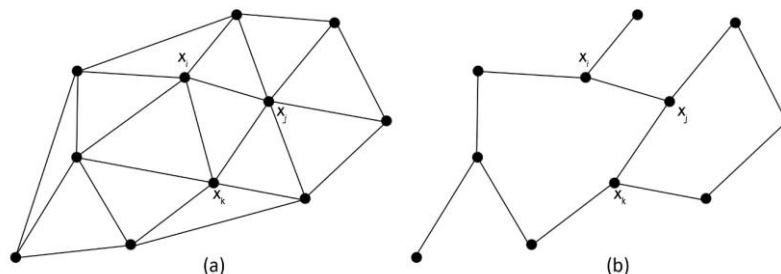


Figure 8.7. (a) Triangulation de Delaunay d'un graphe. (b) Le graphe de voisinage relatif correspondant au graphe de Delaunay (a). Figure simplifiée inspirée de Sharma et al. (2015).

Ordonner les connexions possibles

Les n connexions possibles entre le nouveau nœud et le voisinage relatif RN sont alors ordonnées $(S_1 ; S_2 ; \dots ; S_n)$, de sorte que S_1 représente la connexion la plus courte entre le nouveau nœud et n'importe quel nœud de RN et S_n la plus éloignée.

Définir le nombre n' de connexions acceptées parmi les n connexions possibles

Le nombre n' est issu d'un tirage de probabilité de créer un ou plusieurs segments de rue selon la distribution de probabilités binomiale $B(\omega, n - 1) + 1$ où ω est un paramètre de construction. La connexion la plus courte s_1 est toujours créée.

Les valeurs du paramètre de construction ω sont comprises dans un intervalle $[0,1]$. Si le paramètre de construction $\omega = 0$, le nouveau nœud est connecté uniquement par le segment le plus court. Et si $\omega = 1$, le nouveau nœud est connecté au réseau existant avec tous les segments réalisables.

Paramètres supplémentaires

Une longueur maximale l_{max} , des segments construits est fixée pour éviter les connexions trop longues. Par ailleurs, un facteur c de séparation des rues contraint la construction pour éviter le cas de segments très proches les uns des autres : si une projection orthogonale se trouve dans un rayon $c \times r_0$ d'un nœud existant visible depuis le nouveau nœud, cette projection orthogonale est alors supprimée. Dans ce cas, le nouveau nœud est connecté au nœud existant le plus proche de la projection orthogonale qui a été supprimée (Figure 8.8). $c = 0,3$ par défaut (Courtat et al., 2011c). Le rayon de rejet dans le cas où $\beta = r_0$ du calcul du potentiel global intervient donc aussi localement.

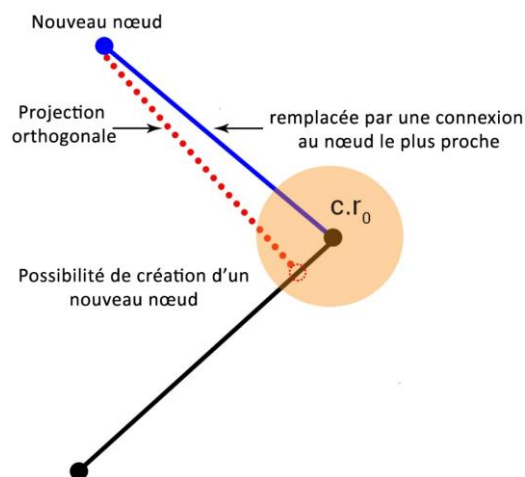


Figure 8.8. Suppression de toute projection orthogonale très proche d'un nœud existant (dans un rayon $c \times r_0$ d'un nœud visible depuis le nouveau nœud).

8.2.2.5 Fin de la simulation

Lorsque le réseau comporte N nouveaux nœuds la simulation s'arrête.

8.2.3 Récapitulatif des paramètres et variables du modèle de Courtat (2012)

Etape	Paramètres et variables	Nom	Description	Valeur possible
Initialisation	N	Nombre de nœuds	Nombre total de nœuds ajoutés au réseau à la fin de la simulation.	$[0 ; \infty[$
Initialisation	W	Fenêtre de simulation	Dimensions de la fenêtre de simulation dans laquelle un nouveau nœud peut être ajouté.	Statique ($400 \times 400\text{m}$) ou dynamique (varie en fonction de la taille du réseau)
Etape 1	q	Nombre d'essais	Nombre d'essais Monte-Carlo pour tirer des nœuds candidats.	-
Etape 1	Q	Nœuds candidats	Nombre de nœuds candidats tirés lors d'un tirage Monte-carlo.	$Q=3N$
Etape 1	P_e	Paramètre d'organisation	Probabilité que le tirage Monte-Carlo place un point dans un rayon de minima local.	$[0 ; 1]$
Etape 1 et 2	P_h(x)	Potentiel unitaire	Valeur du potentiel unitaire d'un point x situé à une distance $r = d(h, x)$ d'un objet h du réseau existant.	-
Etape 1 et 2	r₀	Rayon de fixe	Distance de rejet fixe autour du réseau existant.	10
Etape 1 et 2	β	Rayon de rejet	Zone d'inhibition autour du réseau existant dans lequel la création d'un nouveau nœud est interdite.	-
Etape 1 et 2	α	Paramètre d'amplitude	Paramètre intervenant dans le calcul du potentiel V.	5
Etape 1 et 2	r_m^η	Rayon optimal	Rayon de potentiel optimal pour la localisation d'un nouveau nœud par rapport au réseau existant.	-
Etape 2	η	Paramètre d'étalement	Paramètre qui détermine en partie la taille du rayon de potentiel optimal.	$[0.3 ; 1.2]$
Etape 2	k_{ext}	Facteur d'étalement	Facteur qui agrandit le rayon de rejet quand il est strictement supérieur à 1.	$[1 ; 10]$
Etape 2	f_{ext}	Fréquence d'étalement	Probabilité que le facteur d'étalement soit utilisé dans le calcul du rayon de rejet avec $\beta = k_{ext} \times r_0$	$[0 ; 1]$
Etape 3	ω	Paramètre de construction	Paramètre qui détermine la probabilité de créer un ou plusieurs segments à partir d'un nouveau nœud.	$[0 ; 1]$
Etape 3	l_{max}	Longueur maximale	Longueur maximale d'un segment de rue nouvellement créé.	200
Etape 3	c	Facteur de séparation	Facteur de séparation des rues qui interdit la création d'un nouveau nœud dans un rayon $c \times r_0$ autour d'un nœud existant.	0.3

Tableau 8.1. Récapitulatif des variables et des paramètres du modèle de Courtat (2012).

8.2.4 Tentatives de simulation à partir du modèle de Courtat (2012)

Le code source du modèle de Courtat (2012) n'est pas librement accessible. Toutefois, l'équipe de recherche Morphocity qui a travaillé de manière étroite avec ce chercheur, ce qui nous a permis de recueillir des éléments supplémentaires par rapport à ce qui était présenté dans la thèse (Courtat, 2012) et l'article (Courtat et al., 2011c), ce qui a facilité le recodage informatique du modèle. Ce recodage a été réalisé dans le cadre d'une collaboration de Claire Lagesse et Hanae El Gouj (laboratoire ThéMA, Besançon) avec Paul Bouman (maître de conférences en économétrie) de l'Université Erasmus de Rotterdam (Pays-Bas) et Liubov Tupikina (chercheuse en physique théorique) du "Learning Planet Institute" (ex Centre de recherches interdisciplinaires (CRI) (Paris).

Les premières étapes de la reproduction du code du modèle de Courtat (2012) et les premières simulations de réseaux faites sur cette base ont été réalisées en collaboration avec Marie-Sophie Graftiaux (2021) dans le cadre de son projet de fin d'études dirigé par Paul Bouman, dont le sujet était piloté par l'équipe citée ci-dessus. Cette version informatique du modèle de Courtat a été développée en langage Python⁴⁵.

Nous présentons ci-après les essais de simulations effectués avec le modèle de Courtat (2012) recodé par Graftiaux (2021), et les limites identifiées par rapport à nos propres objectifs de simulation. On notera qu'une deuxième version informatique du modèle existe mais qu'elle n'a pas été utilisée pour cette thèse. Cette deuxième version a été développée aussi en Python en 2022 par Lars Pasler dans le cadre d'un stage en licence encadré par Paul Bouman, dans le cadre de la même collaboration.

8.2.4.1 Types de réseaux viaires pouvant être simulés

Les simulations présentées dans cette sous-section ont été effectuées par Courtat (2012) et Graftiaux (2021). Elles visent à illustrer l'effet des valeurs des paramètres choisies sur les types de réseaux viaires simulés.

Le **paramètre d'organisation P_e** détermine la probabilité que la simulation de Monte-Carlo place un point dans un rayon de minima local. Une valeur proche de 1 force le modèle à placer les nouveaux nœuds le plus près possible du réseau existant (c'est-à-dire dans le rayon de

⁴⁵ Les codes sources sont sur un dépôt GitHub qui ne sont accessibles que par les contributeurs actuellement. Cependant, il est prévu qu'ils soient publiés en open source prochainement.

potentiel optimal présenté en bleu foncé au plus proche du rayon de rejet sur la figure 8.5). Ce paramètre renforce ou atténue la compacité du réseau simulé (Figure 8.9). Ainsi le rayon de minima local est le rayon de potentiel minimal à l'intérieur du rayon de potentiel optimal.

Le **paramètre de construction** $\omega \in [0, 1]$ détermine le nombre de connexions réalisées entre le nouveau nœud et le réseau existant. Plus la valeur de ce paramètre est proche de zéro, plus le réseau est en structure arborescente avec des impasses. Plus cette valeur est proche de 1, plus le réseau est connecté, ce qui implique la création d'îlots fermés avec une structure cellulaire (Figure 8.9).

Le **paramètre d'étalement** η influence la taille du rayon de potentiel optimal. Un paramètre d'étalement η faible favorise un développement étalé par rapport à l'existant. Tandis qu'un paramètre d'étalement élevé permet un développement compact autour du réseau (Figure 8.10).

Le **facteur d'étalement** k_{ext} modifie le rayon de rejet avec une probabilité f_{ext} pour forcer un développement extérieur de manière ponctuelle. Un réseau avec un facteur d'étalement faible se développe principalement autour du réseau existant, ce qui signifie que de nouveaux centres apparaissent à l'intérieur de la ville ou à proximité de ses limites. À l'inverse, un réseau avec un facteur d'étalement élevé connaît également l'émergence de centres en dehors du centre-ville en parallèle à son développement interne (Figure 8.11). Ce phénomène est observé dans les villes réelles sous la forme de zones industrielles ou de quartiers périphériques localisés volontairement loin des centres-villes.

Le paramètre d'étalement η , le facteur d'étalement k_{ext} et la probabilité d'étalement f_{ext} peuvent varier au fil du temps, dans la mesure où la ville ne s'étend pas autant à la fin de sa croissance qu'au début. Cette variation de paramètres est introduite par Courtat (2012) pour la simulation des différentes étapes de croissance d'une ville (Figure 8.12). Le réseau viaire d'une ville réelle est façonné par son histoire qui peut être traduite, dans le modèle de Courtat, par une variation des paramètres au fil de la simulation.

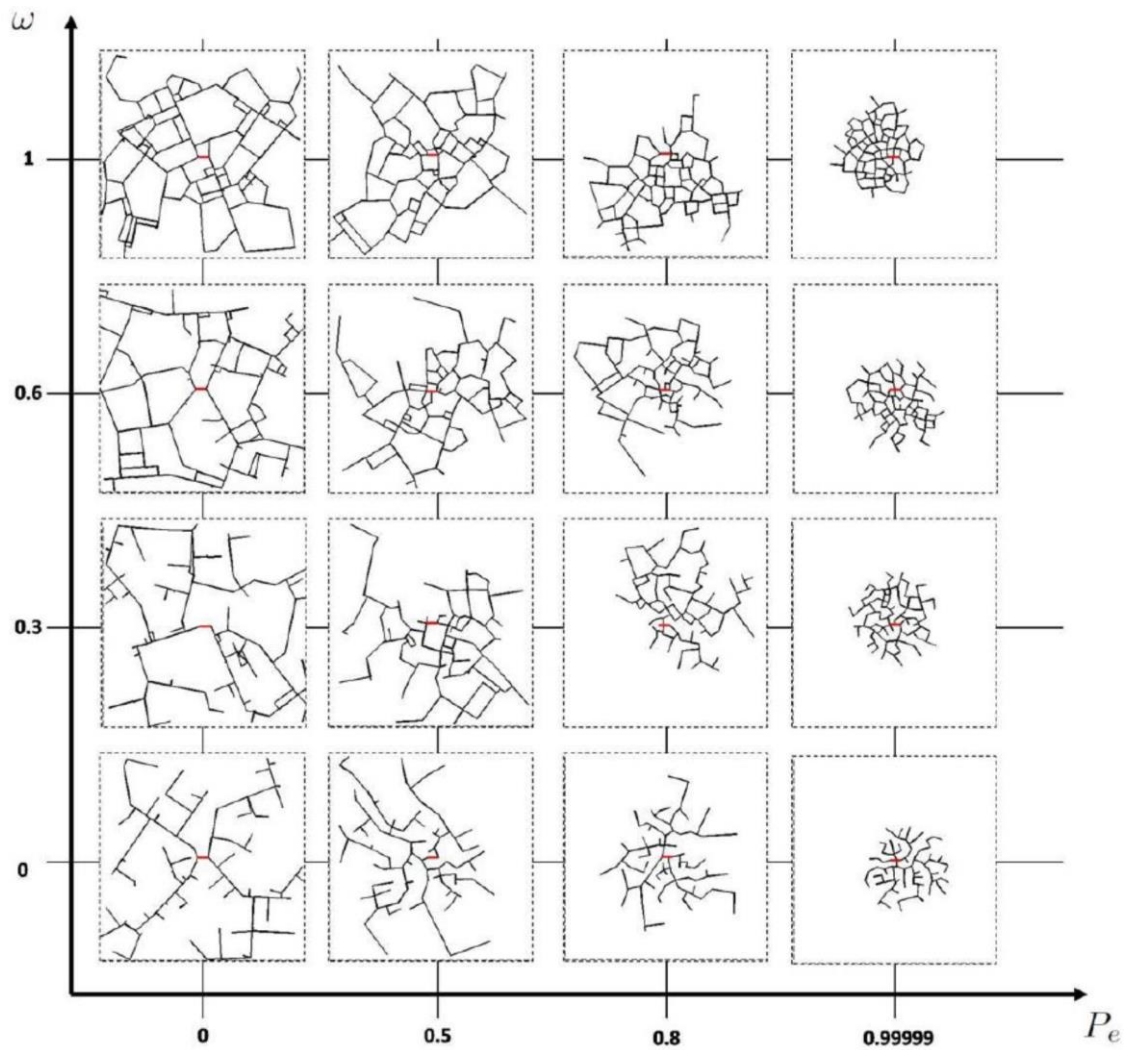


Figure 8.9. Simulations faites avec le modèle de Courtat (2012) pour différentes valeurs des paramètres d'organisation P_e et de construction ω . Le rayon de rejet est $r_0 = 10$ m, il n'y a pas d'étalement : $k_{ext} = 0$, le nombre de nœuds est $N = 80$ et la fenêtre de simulation correspond à un carré de côté 400 m. Le segment rouge représente un segment initial de rue de 20 mètres. Source : Courtat (2012).

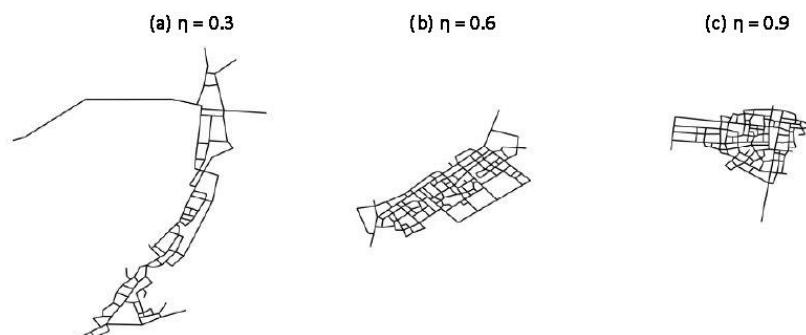


Figure 8.10. Trois réseaux simulés avec le modèle de Courtat (2012) avec différentes valeurs du paramètre d'étalement η . Le paramètre η est égal à (a) 0,3, (b) 0,6 et (c) 0,9. Tous les autres paramètres sont identiques pour les trois simulations. Source : Graftiaux (2021).

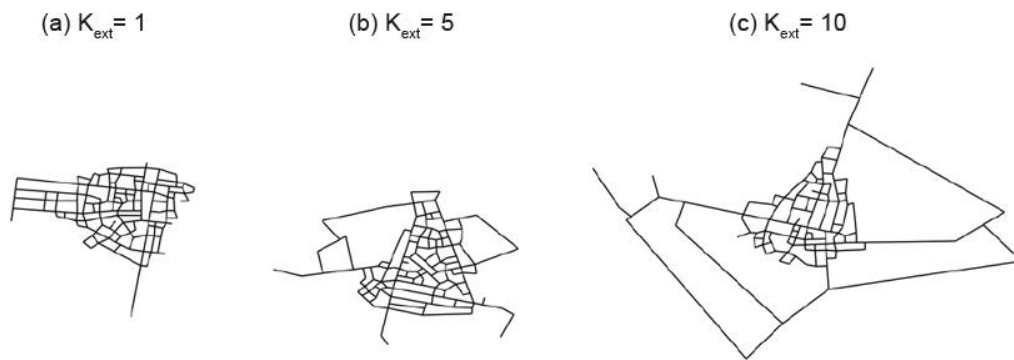


Figure 8.11. Trois réseaux simulés avec le modèle de Courtat (2012) avec différentes valeurs du facteur d'étalement k_{ext} . De gauche à droite, le facteur k_{ext} est de 1, 5 et 10. Tous les autres paramètres sont identiques pour les trois simulations. Source : Graftiaux (2021).

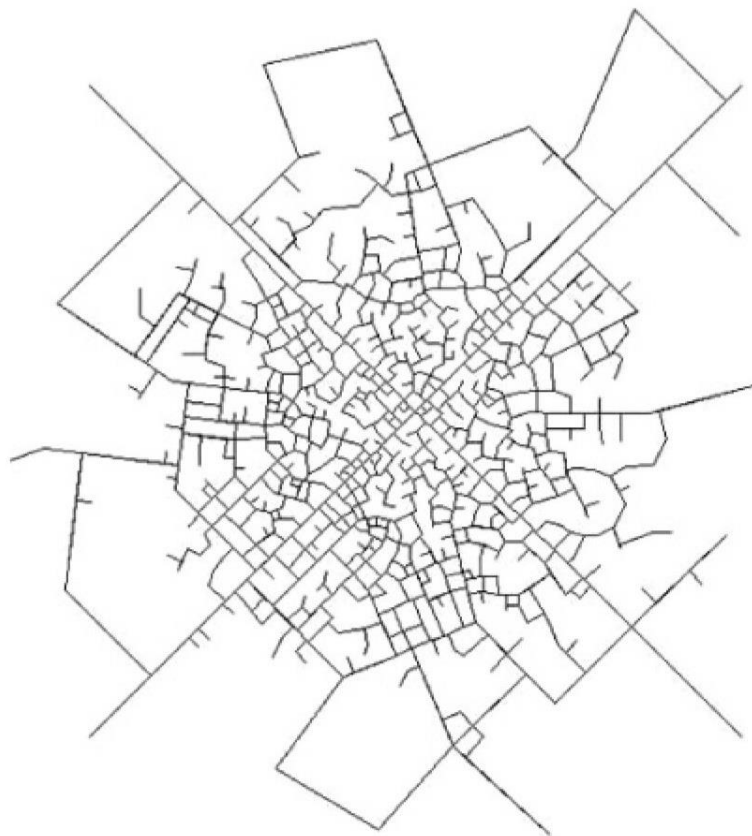


Figure 8.12. Le réseau viaire d'une ville simulé à partir de deux éléments structurants longs et perpendiculaires et avec des valeurs des paramètres d'étalement variables au cours du temps. Le centre historique de la ville a été construit avec un faible paramètre de construction et sans étalement ($\omega = 0,2$ et $f_{ext} = 0$) pour rappeler l'aspect arborescent d'un souk central dans la Casbah. Ensuite, les paramètres sont modifiés à $\omega = 0,8$ et $f_{ext} = 0,15$, ce qui crée une couronne industrielle. Le réseau simulé est nettement circulaire bien que les éléments structurants initiaux soient longs et perpendiculaires. Source : Courtat (2012).

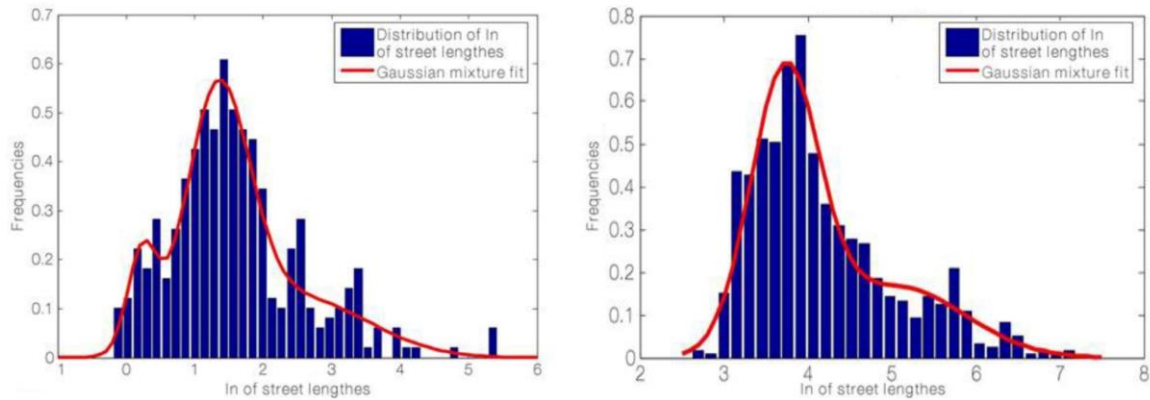


Figure 8.13. La distribution du logarithme des longueurs des rues pour deux réseaux viaires simulés. Source : Courtat (2012).

Le modèle est capable de simuler des réseaux ayant des structures variées et de reproduire certaines propriétés topologiques observées dans les villes réelles telle que la distance topologique des rues par rapport au centre (Courtat, 2012). Néanmoins, en termes de propriétés statistiques, notamment des longueurs des voies (Figure 8.13), les distributions statistiques issues des réseaux simulés sont éloignées d'une loi log-Normale caractérisant les villes réelles (Pousse, 2020). Cela peut résulter d'un manque de continuité entre les segments du réseau viaire. En effet, le modèle n'intègre pas les propriétés multi-échelles relatifs à l'objet voie, qui peut être longue et traverser l'ensemble du réseau, ou bien être plus courte, assurant ainsi un accès local.

8.2.4.2 Morphotypes de voies qu'il est possible de simuler

En utilisant le modèle de Courtat (2012) recodé par Graftiaux (2021), nous avons exploré les possibilités de simuler différents morphotypes de voies. A cet effet, nous avons fixé les valeurs de certains paramètres, pour limiter le nombre de simulations, et fait varier les valeurs d'autres paramètres (voir Tableau 8.2). Les valeurs des paramètres fixes ont été déterminées sur la base des résultats de simulation de Courtat (2012) et Graftiaux (2021) présentés ci-avant, et des valeurs de paramètres définies par Courtat (2012).

Les simulations ont été réalisées de manière itérative. La fenêtre de simulation W , dans laquelle un nouveau nœud peut être ajouté, a été choisie comme dynamique, s'ajustant à la taille de réseau à chaque itération. Les valeurs des paramètres additionnels, tels que la longueur maximale l_{max} et le facteur de séparation c , ne varient pas en conservant les valeurs fixes définies par Courtat (2012). Le paramètre d'amplitude est fixé à $\alpha = 5$, et la fréquence d'étalement est fixée à $f_{ext} = 0.1$. La distance de répulsion r_0 , ainsi que le facteur d'étalement sont maintenus constants pour les itérations d'une même simulation.

Les résultats de simulation montrent que le modèle est capable de simuler les **voies radiales/linéaires** par un mécanisme de création en associant un faible paramètre d'étalement η , une grande distance de répulsion r_0 et un faible paramètre de construction ω . Cependant, il ne parvient pas, a priori, à reproduire le mécanisme de prolongement des rues pour former une seule voie continue.

Un fort paramètre d'étalement η , une faible distance de répulsion r_0 et un faible paramètre de construction ω , permettent de reproduire le mécanisme de ramification, permettant de simuler les **voies ramifiées**.

Le modèle permet de simuler les **voies intercalaires** en se basant sur le fait que les connexions se font principalement par projection orthogonale. En ajustant une valeur moyenne pour le paramètre d'étalement η , une faible distance de répulsion r_0 avec un faible paramètre de construction ω , il est possible d'ajouter des segments au réseau de manière juxtaposée.

Les **voies orthogonales** peuvent également être simulées au moyen des projections orthogonales, par un mécanisme de subdivision. Cela nécessite un fort paramètre d'étalement η , une faible distance de répulsion r_0 et un fort paramètre de construction ω .

Le modèle présente plusieurs limitations pour la simulation de certains morphotypes. Il est incapable de générer les **voies diagonales** par remplissage interstitiel, principalement en raison de la limitation des connexions à des projections orthogonales et de son incapacité à connecter directement deux nœuds existants. Une alternative irréalisable avec le modèle consisterait à ajouter un nouveau nœud dans l'espace disponible à l'intérieur d'un îlot fermé, en veillant à ce qu'il soit connecté à deux nœuds opposés du réseau existant, en formant ainsi un angle total de 180° .

Le modèle présente également des limites pour la simulation des voies concentriques, convergentes/divergentes, transversales et cellulaires. Tout d'abord, la génération de **voies concentriques** n'est pas possible car les mécanismes de prolongation des voies existantes ou de connexion de deux nœuds déjà présents ne sont pas intégrés au modèle. De plus, la création de voies sinueuses n'est pas faisable, car l'ajout de segments est contraint par le fait de favoriser des projections orthogonales.

Paramètres	Nom	Plage de valeur	Morphotypes			
			Radial/ linéaire	Ramifié	Intercalaire	Orthogonal
P_e	Paramètre d'organisation	[0 ; 1]	Proche de 0	Proche de 1	Proche de 1	Proche de 1
r_0	Distance de répulsion r_0	10	Forte	Faible	Faible	Faible
α	Paramètre d'amplitude	5	5	5	5	5
η	Paramètre d'étalement	[0.3 ; 1]	0.3	0.9	0.5	0.9
k_{ext}	Facteur d'étalement	[1 ; 10]	10	5	1	1
f_{ext}	Fréquence d'étalement	Varie	0.1	0.1	0.1	0.1
ω	Paramètre de construction	[0 ; 1]	0	0	0	1
l_{max}	Longueur maximale	400	400	400	400	400
c	Facteur de séparation	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Tableau 8.2. Récapitulatif des valeurs de paramètres pour la simulation de certains morphotypes de voies par le modèle de Courtat (2012).

En ce qui concerne les **voies convergentes et divergentes**, leur simulation est également impossible, en raison des restrictions concernant la connexion de deux nœuds existants et des mêmes contraintes de subdivision de l'espace relatif aux voies diagonales précédemment exposées. En effet, ces deux morphotypes (voies convergentes/divergentes et voies diagonales) impliquent des mécanismes morphologiques similaires, bien qu'ils se produisent à des échelles spatiales différentes.

Les **voies transversales** sont aussi impossibles à reproduire par simulation. La connexion de deux nœuds existants n'est pas faisable, tout comme la création simultanée de deux nœuds en vue de les connecter ultérieurement par un segment. En outre, il est impossible de créer un segment qui se connecte à un nouveau nœud en traversant un segment existant.

Enfin, bien que la création de réseaux cellulaires par subdivision d'espace puisse être réalisée par le modèle, il est impossible de reproduire les **voies cellulaires** telles que définies précédemment, avec une hiérarchie de subdivision et une forte connectivité.

8.2.5 Intérêts et limites du modèle Courtat (2012)

Le modèle de Courtat (2012) est original de par son approche basée sur des sources indirectes d'optimisation globale, qui repose sur le potentiel du réseau existant. En d'autres termes, le modèle simule une morphogénèse du réseau viaire qui est principalement conditionnée par la configuration spatiale du réseau lui-même et sa topologie à chaque étape de la simulation. Cette approche présente un intérêt thématique pour notre recherche, qui se concentre sur le suivi dans le temps de réseaux historiques, ainsi qu'un potentiel considérable pour reproduire les mécanismes de morphogénèse viaire observés à partir des analyses morpho-historiques de réseaux réels.

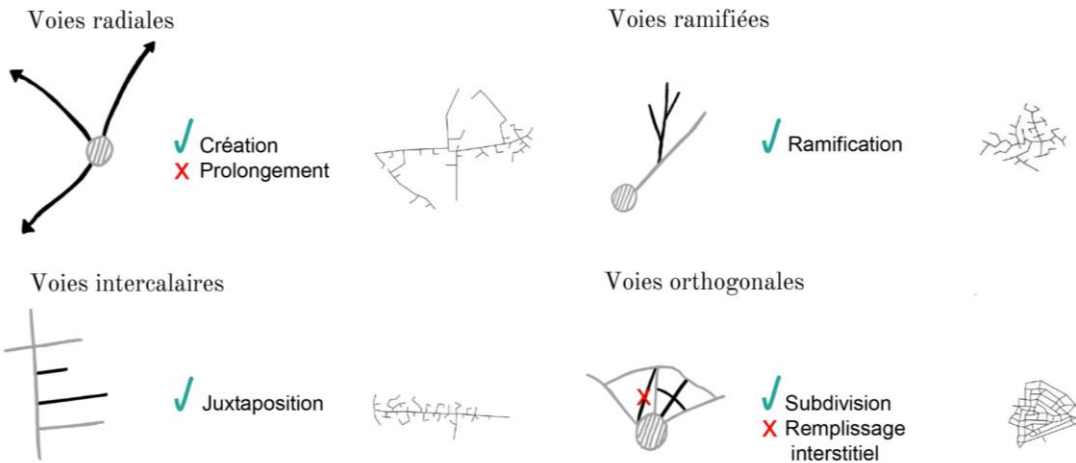
En considérant l'échelle du graphe viaire, le modèle est capable de simuler une variété de réseaux, et de reproduire certaines propriétés topologiques observées dans les villes réelles. Toutefois, à l'échelle des voies, les simulations réalisées montrent que le modèle n'est capable de simuler que quelques morphotypes de voies et, s'il y parvient, il se révèle, dans certains cas, incapable de reproduire les mécanismes de morphogénèse sous-jacents (par exemple, le prolongement des voies) (Figure 8.14). Ces résultats mettent en évidence les limites du modèle concernant la modélisation des processus complexes de morphogénèse de réseau viaire, en particulier ceux relatifs à la continuité des voies dans le réseau.

Le modèle est significativement limité par le processus privilégiant les connexions par projection orthogonale, ce qui entrave considérablement sa capacité à reproduire fidèlement les patrons de rattachement aux structures existantes, ou à reproduire le prolongement des voies. Cette limite pourrait être dépassée en intégrant de nouvelles possibilités de connexion, autres que la projection orthogonale.

En outre, lorsque les connexions possibles sont identifiées, elles sont ordonnées par leur longueur uniquement. Le nombre de segments à créer est déterminé par le paramètre de construction, toutefois, seul le segment le plus court est certainement créé (voir sous-section 8.2.2.4). Ainsi une variante intéressante de ce mécanisme de rattachement supposerait que les connexions possibles puissent être ordonnées selon différents critères autres que les longueurs. Dans ce cas, nous nous attendons à un effet plus important du paramètre de construction pour favoriser la création et l'émergence de morphotypes de voies spécifiques. Le nouveau nœud sera connecté au réseau existant selon la topologie associée au morphotype de voies à privilégier sachant qu'il est nécessaire de définir préalablement le type de rattachement souhaité et de trouver une connexion qui le permet.

Ces constats mettent en évidence les éléments clés à explorer et à développer pour le modèle de morphogénèse WayMorph que nous présentons dans la section suivante.

• **Morpho-types possibles**



• **Morpho-types impossibles**

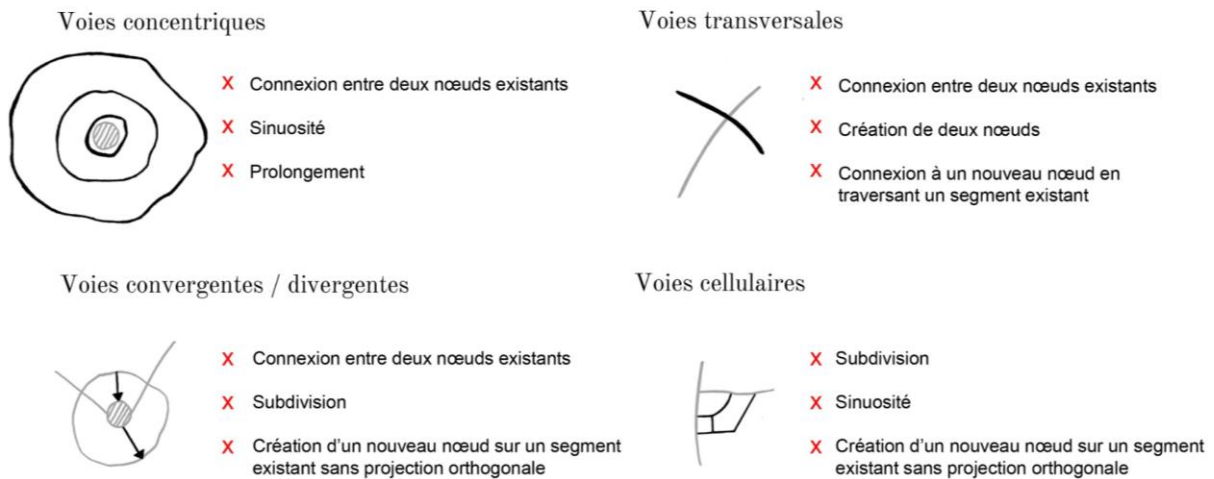


Figure 8.14. Récapitulatif des morphotypes de voies possibles et impossibles à simuler avec le modèle de Courtat (2012)

8.3 Proposition d'un nouveau modèle de morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph

L'objectif prédominant à la conception du modèle WayMorph est de parvenir à reproduire, par simulation, les morphotypes de voies identifiés dans la partie 2 de la thèse et, en combinant ces morphotypes, de créer des réseaux viaires qui présentent des propriétés structurelles correspondant à celles identifiées dans la partie 1. Nous avons souhaité y intégrer des mécanismes de morphogénèse simples, qui sous-tendent l'émergence et l'évolution des voies et conduisent au final à l'apparition des propriétés structurelles à l'échelle du réseau. La conception d'un modèle basé sur des mécanismes simples capable de reproduire les différents morphotypes de voies identifiés constituera une avancée prometteuse dans ce domaine.

Le modèle WayMorph est basé sur le modèle de Courtat (2012) présenté précédemment (section 8.3.1) auquel nous avons ajouté de nouveaux mécanismes (section 8.3.2) permettant d'améliorer la représentation de la dynamique d'évolution des voies dans le temps.

La conception du modèle prend en compte à la fois les mécanismes de morphogénèse (processus d'évolution) et les patrons de rattachement des nouvelles voies aux voies existantes, qui ont été identifiés dans la partie 2. Les processus d'évolution, à savoir la densification, l'expansion et la réticulation, sont formalisés par des mécanismes génératifs au moyen des différents paramètres du modèle WayMorph. Certains patrons de rattachement sont inclus, à savoir la connexion, le prolongement, la ramification, la juxtaposition et le remplissage interstitiel. En revanche d'autres patrons ne sont pas intégrés explicitement : (i) la création ; le modèle est toujours initié par au moins un segment, (ii) la délimitation ; le modèle n'intègre pas la possibilité de générer une voie de contournement en reliant des nœuds d'extrémités d'un réseau, (iii) l'intersection ; le modèle n'intègre pas la possibilité de connecter deux nœuds existants, ni de connecter un nouveau nœud en traversant un segment existant. Bien que ces patrons soient approchés implicitement par le modèle à travers les autres patrons de rattachement.

Le modèle WayMorph a été conçu par l'auteur de cette thèse. Le développement informatique a été réalisé en Java par Gilles Vuidel, ingénieur de recherche en informatique

au laboratoire ThéMA (Besançon). **Le code source et l'application du modèle sont disponibles et accessibles** sur un dépôt Gitlab⁴⁶ hébergé par la MSHE⁴⁷.

8.3.1 Principes généraux de WayMorph intégralement repris du modèle de Courtat (2012)

8.3.1.1 Optimisation globale et locale

Le réseau existant joue un rôle crucial dans l'évolution spatiale des forces qui agissent sur son développement, il rétroagit et il affecte sa propre croissance. Dans ce sens, le modèle repose sur une notion d'optimisation globale, incorporée par la fonction de potentiel que le réseau viaire est censé minimiser. Le modèle intègre également une optimisation locale itérative, incorporée par l'ajout progressif de nœuds et de segments.

En effet, comme évoqué dans le chapitre 7, la grande majorité des réseaux viaires urbains ne semblent pas résulter exclusivement d'une optimisation globale. Si les réseaux viaires sont modélisés comme résultant d'une optimisation globale uniquement, la dimension temporelle de leur développement et l'auto-organisation sous-jacente à leur formation sont souvent négligées (Louf et al., 2013).

Il est donc important de souligner cette distinction entre l'optimisation globale du réseau créé de manière cohérente, et l'optimisation locale itérative d'un réseau qui évolue organiquement (Courtat, 2012).

Le modèle WayMorph n'impose donc pas de distribution de densité a priori pour les nouveaux nœuds. Les nœuds sont positionnés par le biais de la fonction de potentiel, et la distribution de leur densité émerge de simples interactions locales. L'émergence de nouveaux nœuds est conditionnée par la configuration du réseau routier préexistant, ainsi que par la position et le nombre de nœuds déjà existants.

8.3.1.2 L'évolution itérative

Lorsque de nouveaux centres émergent, tels que des résidences, des bureaux ou des commerces, ils doivent se connecter au réseau de voirie existant pour assurer leur accessibilité. Par ailleurs, il est raisonnable de supposer qu'à chaque étape d'évolution, un seul

⁴⁶ <https://gitlab-mshe.univ-fcomte.fr/thema/cinerge/>

⁴⁷ Maison des sciences de l'homme et de l'environnement Claude-Nicolas Ledoux (Besançon).

nouveau centre apparaît et qu'il est logique qu'il soit connecté au segment ou au nœud le plus proche du réseau routier existant. C'est pourquoi le modèle représente un développement organique qui se connecte pas à pas, de manière efficace et optimisée, à un ensemble de points dans l'espace, depuis ces centres (nouveaux lieux de développement urbain).

Dans un scénario réel où de nouveaux centres sont créés simultanément, la tâche de construction des routes pour les relier est généralement confiée aux entités locales concernées. Cependant, il est difficile d'optimiser simultanément les coûts de création de toutes les routes. Le développement simultané de plusieurs routes peut notamment entraîner une divergence de priorité, telle que la connectivité de chaque centre au réseau existant, la connectivité entre les nouveaux centres et la minimisation des coûts de construction. Pour éviter ces effets et dans un souci de simplicité, le modèle est basé sur une évolution itérative du réseau. Il procède à des ajouts incrémentaux de nœuds, en les connectant un à un au réseau existant au fil du temps. Cette méthode nous permet de modéliser en détail les mécanismes de rattachement au réseau.

8.3.1.3 L'aléa

L'intégration d'une probabilité aléatoire dans la génération de nouveaux nœuds et de segments du réseau permettra de simuler différents réseaux partant d'une même configuration initiale et de valeurs de variables et paramètres identiques, tenant ainsi compte des incertitudes et des imprévus qui peuvent se produire dans le monde réel. Cet effet d'aléa est induit par le tirage Monte-Carlo des nœuds candidats et le tirage de probabilité du nombre de connexions acceptées. Ainsi le réseau viaire généré ne sera pas toujours parfaitement prévisible, ce qui reflète la réalité.

8.3.2 Aspects innovants de WayMorph vis-à-vis du modèle de Courtat (2012)

Lors de la conception de WayMorph, des corrections ont été apportées aux équations de Courtat (2012) et de nouveaux procédés ont été mis en place pour optimiser la sélection des nœuds candidats avec la méthode de tirages Monte-Carlo. WayMorph comporte en outre davantage de mécanismes de morphogénèse de réseaux viaires que le modèle de Courtat. Les nouveaux mécanismes intégrés dans WayMorph concernent uniquement la connexion du nouveau nœud au réseau existant (cf. sous-section 8.2.2.4, étape 3 du modèle de Courtat).

Certains processus davantage complexes de morphogénèse de réseaux réels peuvent être représentés via la combinaison de ces nouveaux mécanismes.

8.3.2.1 Initialisation adaptive

Une première étape du développement consiste à permettre l'initialisation du modèle à partir de réseaux très différents, ce que ne permet pas le modèle de Courtat (2012). Cela offre éventuellement la possibilité de simuler l'évolution du réseau à partir d'un réseau historique réel à un temps t et à différents stades de son évolution. En outre, la fenêtre de simulation W dans laquelle se développe le réseau est le rectangle entourant le réseau existant (à l'initialisation du modèle et à chaque itération), agrandie par la longueur maximale d'un segment l_{max} . Ainsi, la fenêtre de simulation évolue en fonction du réseau existant et de la longueur maximale l_{max} .

8.3.2.2 Attachement préférentiel selon le degré des voies

Un nouveau mécanisme intégré dans WayMorph est celui d'attachement préférentiel : "The rich get richer". Ce mécanisme influe sur les propriétés génératives des réseaux sans échelle ; des preuves empiriques de son influence ont également été montrées pour des réseaux réels (Barabási & Albert, 1999). L'attachement préférentiel est un mécanisme de rétroaction positive : les nouveaux nœuds rajoutés à un réseau sont davantage susceptibles de se lier à des nœuds fortement connectés qu'à des nœuds moins connectés (Jeong et al. 2000 ; Barabási 2002 ; Dorogovtsev et Mendes 2002). Autrement dit, à chaque pas de temps, plus un nœud est connecté, plus il est susceptible de recevoir de nouveaux arcs.

Dans WayMorph, nous considérons l'attachement préférentiel aux voies, représentées par des nœuds dans le graphe dual. L'attachement préférentiel est fonction du degré des voies : celles qui sont les plus connectées à d'autres voies, et qui ont donc des valeurs élevées de degré, attirent de nouvelles connexions. Cela a été démontré empiriquement par les analyses morpho-historiques. Un nouveau nœud sera donc connecté de manière préférentielle à la voie ayant le degré plus élevé (Figure 8.15) et cette voie sera modifiée dans l'hypergraphe du réseau sans reconstruire toutes les autres voies.

Dans le cas du réseau urbain, il semble y avoir une limite au nombre d'éléments pouvant se connecter à un nœud ou à un segment (représenté par un nœud sur le graphe dual) (Al Sayed et al., 2012). Des recherches ont confirmé que le degré maximal d'un nœud dans un graphe spatial primaire est restreint à 6 (Lagesse, 2015). Cependant, il n'est pas nécessaire d'introduire cette restriction dans WayMorph car une voie peut avoir un nombre important

de connexions si elle est longue, d'une part, et le rayon de rejet est suffisant pour limiter le nombre de connexions des voies courtes, d'autre part.

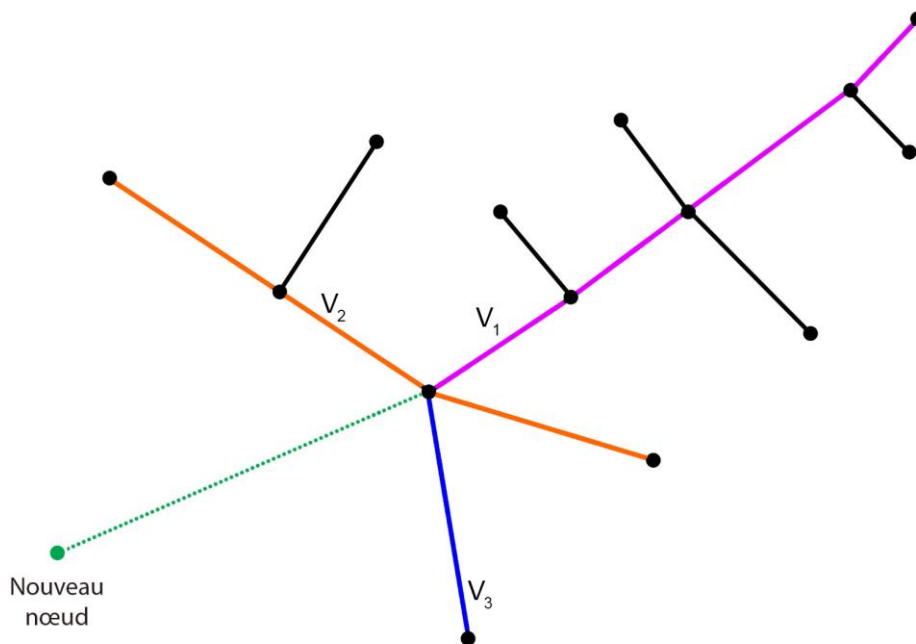


Figure 8.15. Connexion du nouveau nœud avec un attachement préférentiel selon le degré des voies. Le nouveau nœud est connecté au réseau existant en continuité de la voie V_1 avec le degré le plus élevé. La voie V_1 (en mauve) a un degré de 5, la voie V_2 (en orange) a un degré de 3, la Voie V_3 (en bleu) a un de degré de 3.

8.3.2.3 Restriction d'angle

Pour modéliser le prolongement des voies au cours du temps, le mécanisme d'attachement préférentiel selon le degré n'est pas suffisant. Nous introduisons donc un mécanisme de restriction d'angle pour permettre conjointement un alignement des segments et une hiérarchisation des voies.

Ce mécanisme est justifié aussi bien par la nécessité d'une notion de continuité de segments afin de former et hiérarchiser les voies (Figure 8.17- cas (3)), que par la nécessité de favoriser des projections orthogonales lorsque cela est souhaité (Figure 8.17 - cas (2)).

La restriction d'angle porte à la fois sur l'angle entre un nouveau segment possible (pour connecter le nouveau nœud créé) et tous les segments du réseau, angle d'intersection A_i , et sur l'angle entre chaque paire de segments possibles, angle de séparation A_s (Figure 8.16).

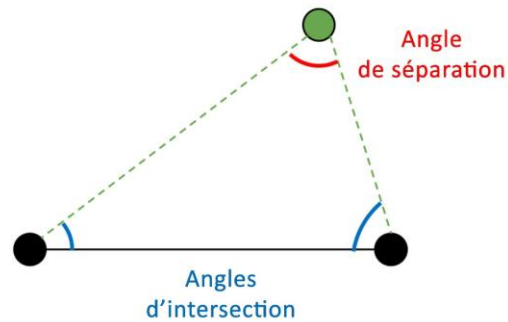


Figure 8.16. Restrictions pour l'angle d'intersection A_i (en bleu), entre le nouveau nœud (en vert) et tous les segments du réseau (en trait noir) et, pour l'angle de séparation A_s (en rouge), entre tous les segments possibles (en traits discontinus verts).

Le modèle ne se limite donc pas seulement à une optimisation topologique, où les nœuds sont ajoutés et connectés par des segments. Il inclut également une optimisation géométrique : l'ajout de segment est contraint à la fois par l'angle qu'il fait avec le réseau existant (i.e. angle d'intersection) et par l'angle qu'il fait avec toutes les autres connexions possibles (i.e. angle de séparation) (Figure 8.17).

Cette restriction d'angle favorise la création de morphotypes spécifiques de voies. Pour simuler des structures viaires orthogonales, la restriction d'angle doit connecter le nouveau nœud avec un angle proche de l'orthogonalité (angle d'intersection), en respectant également un angle seuil entre les segments créés (angle de séparation). Pour simuler le prolongement d'une voie, le nouveau nœud doit être connecté à un point d'extrémité de la voie ayant le degré le plus élevé (attachement préférentiel selon le degré des voies), avec un angle seuil de 60° (en concordance avec l'angle seuil pour la construction des voies) (Figure 8.17 - (3)). Dans ce cas, la restriction de l'angle d'intersection doit être conforme au seuil de 60° et sera appliquée sur l'angle entre le nouveau segment (reliant le nouveau nœud au point d'extrémité de la voie existante) et le premier segment droit de la voie existante (pris entre le point d'extrémité et le premier point latéral de la voie). La connexion doit également respecter un angle minimum de séparation pour assurer un alignement, de sorte que l'angle entre tous les segments possibles soit être supérieur à 60° (sur la figure 8.17, les possibilités (1), (2) et (4) ne seront pas considérées parce qu'elles ne respectent pas cette contrainte d'angle, et seul le segment de la possibilité (3) sera créé). La combinaison du mécanisme d'attachement préférentiel selon le degré des voies et du mécanisme de restriction d'angle peut faire référence à la règle de Hillier (1996) de "centralité et d'extension" : *"don't block a longer local alignment if a shorter one can be blocked"*. Sur le plan informatique, une fois que le nouveau

segment est ajouté à une voie existante qui a été prolongée, cette dernière est mise à jour dans l'hypergraphe du réseau sans reconstruire toutes les voies.

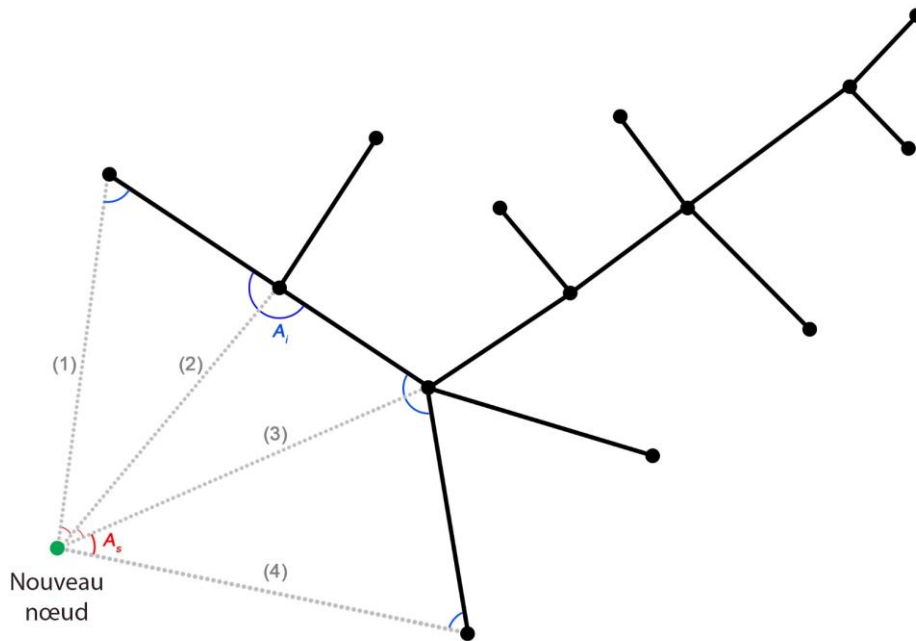


Figure 8.17. Différentes possibilités de connexions du nouveau nœud qui peuvent être restreint par l'angle d'intersection A_i et l'angle de séparation A_s .

8.3.2.4 Rattachement aux nœuds d'extrémité

Le troisième mécanisme intégré au modèle WayMorph est la connexion du nouveau nœud aux nœuds d'extrémité du réseau existant (Figure 8.18). Ce mécanisme contribue aux mécanismes d'émergence de certains morphotypes de voies, à savoir les voies radiales/linéaires (par prolongement) et les voies ramifiées (par ramification).

Ce mécanisme restreint considérablement les possibilités de connexions lors la simulation, ce qui nécessite l'adaptation des valeurs des autres paramètres.

Il restreint aussi considérablement les possibilités de connexions lors la simulation, et peut contraindre la simulation de certains morphotypes, en particulier les voies orthogonales/diagonales et cellulaires. Par exemple, si le nouveau nœud est créé à l'intérieur d'une cellule ou d'une grille, les voies avoisinantes n'auront généralement pas de nœuds d'extrémité. La connexion du nouveau nœud au réseau existant sera donc impossible⁴⁸.

⁴⁸ Dans ce cas de figure, le modèle renvoi un message d'erreur.

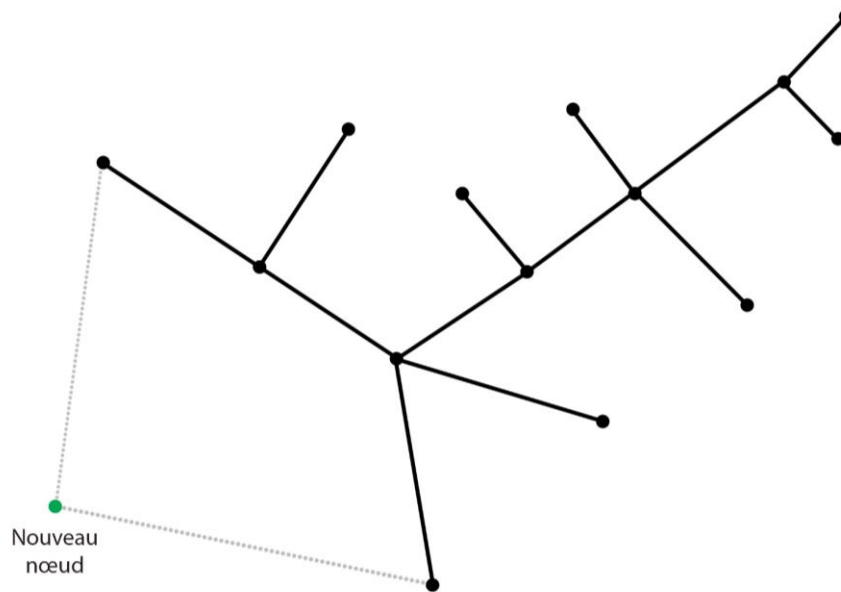


Figure 8.18. Possibilités de connexions du nouveau nœud avec un rattachement aux nœuds d'extrémités.

8.3.2.5 Choix de l'échelle d'application de chaque mécanisme

Alors que les configurations topologiques simulées au moyen de l'attachement préférentiel selon le degré sont plus pertinentes à l'échelle d'un quartier ou de l'ensemble du réseau viaire, les restrictions géométriques relèvent une échelle plutôt locale. Les connexions ordonnées par leur longueur métrique sont, elles, applicables à plusieurs échelles.

Le choix de l'échelle d'application de chaque mécanisme se fait dans WayMorph via le rapport entre la distance de répulsion r_0 et la longueur maximale d'un segment l_{max} , qui permet soit de développer la structure du réseau localement, soit de simuler une évolution à une échelle globale. Le modèle de Courtat (2012) approche cette variation d'échelle puisqu'il contient ces deux paramètres, toutefois leurs valeurs sont considérées comme fixes et indépendantes avec $r_0 = 10$ (mètres) et $l_{max} = 200$ (mètres).

Pour le modèle WayMorph, les différents mécanismes présentés précédemment, associés à la covariation de la distance de répulsion r_0 et de la longueur maximale l_{max} , agissent localement ou globalement. Une distance de répulsion élevée se traduit dans la simulation par des segments de rue plus longs, connectant centre et périphérie du réseau. Inversement une faible distance de répulsion se traduit par des segments de rues courts. Conceptuellement, faire intervenir cette distance de répulsion revient à prendre en compte l'espacement entre les nœuds du réseau.

8.3.2.6 Evolution séquentielle du réseau

Nous posons le postulat que l'évolution d'un réseau viaire est intrinsèquement un processus séquentiel qui permet au réseau de s'adapter à des circonstances qui changent continuellement. Ce postulat repose sur plusieurs résultats théoriques et empiriques de l'évolution des réseaux viaires. Par exemple, Nakicenovic (1998) définit trois phases : une phase de naissance du réseau, une phase de croissance et une phase de maturité.

Par ailleurs, la redéfinition en permanence de la manière dont le réseau évolue est nécessaire pour prendre en compte l'évolution constante des conditions (économiques et sociales) ainsi que des contraintes spatiales.

Pour simuler la morphogénèse de réseau viaire, il est essentiel d'identifier la séquence selon laquelle certaines configurations spatiales à un moment donné conduisent à d'autres configurations à une phase ultérieure. Le modèle décode ces configurations spatiales en utilisant un ensemble de mécanismes qui opèrent à différentes échelles en fonction des structures du réseau ciblées. Ainsi, ces mécanismes jouent un rôle crucial dans l'évolution des configurations spatiales au fil du temps.

Pour simuler ces mécanismes, il est possible de définir des séquences correspondant des valeurs de paramètres spécifiques, en tenant compte de l'ordre d'apparition des configurations synchrones (permettant l'émergence des morphotypes de voies). Chaque séquence d'évolution doit comporter un nombre suffisant d'itérations pour impacter la configuration du réseau, permettant ainsi d'équilibrer les diverses forces qui contribuent à son processus d'évolution (Barthélemy & Flammini, 2009).

Pour le modèle WayMorph, nous considérons qu'une séquence correspond à la simulation d'un morphotype de voies donné, avec un paramétrage spécifique. Ces morphotypes de voies peuvent également être associés à des phases d'évolution spécifiques, en particulier si leur apparition est plus probable au début (par exemple les voies radiales/linéaires) ou à la fin de la simulation (par exemple les voies ramifiées). D'autres morphotypes peuvent correspondre à différentes phases d'évolution selon l'échelle considérée. Nous avons choisi de distinguer possiblement 4 phases principales pour WayMorph :

- **Émergence** ("*Emergence*") : voies radiales/linéaires, voies concentriques, voies convergentes/ divergentes.
- **Construction du réseau** ("*Network build-up*") : voies convergentes/divergentes, voies orthogonales/diagonales, voies transversales.

- **Densification intense** ("*Space filling*") : voies orthogonales/diagonales, voies cellulaires.
- **Extension du réseau** ("*Network expansion*") : voies ramifiées, voies intercalaires.

8.3.3 La formalisation des mécanismes

Nous formalisons les mécanismes de connexion d'un nouveau nœud au réseau existant intégrés dans WayMorph (Figure 8.19) comme suit :

- W_p = **Attachement préférentiel selon le degré des voies** "*Way preference*"

- {0 = Connexion du nouveau nœud avec les n segments de rue réalisables les plus courts ;
- 1 = Connexion **du nouveau nœud à la voie avec le degré le plus élevé**}

- E_{pp} = **Rattachement aux nœuds d'extrémité** "*End point preference*"

- {0 = Connexion du nouveau nœud au réseau avec le segment le plus court ;
- 1 = Connexion du **nouveau nœud à un nœud d'extrémité**}

- O_p = **Rattachement par projection orthogonale** "*orthogonality preference*"

- {0 = Connexion du nouveau nœud au réseau avec le segment le plus court ;
- 1 = Connexion du **nouveau nœud avec une projection orthogonale**}

- A_i = **Angle minimum d'intersection** (entre un nouveau segment et tous les segments du réseau)

$A_i \in [20^\circ, 60^\circ[$: Sinuosité ; $A_i \in [60^\circ, 90^\circ]$: Linéarité.

- A_s = **Angle minimum de séparation** (entre chaque paire de segments possibles)

$A_s \in [20^\circ, 45^\circ[$: Irrégularité géométrique ; $A_s \in [60^\circ, 90^\circ]$: Orthogonalité.

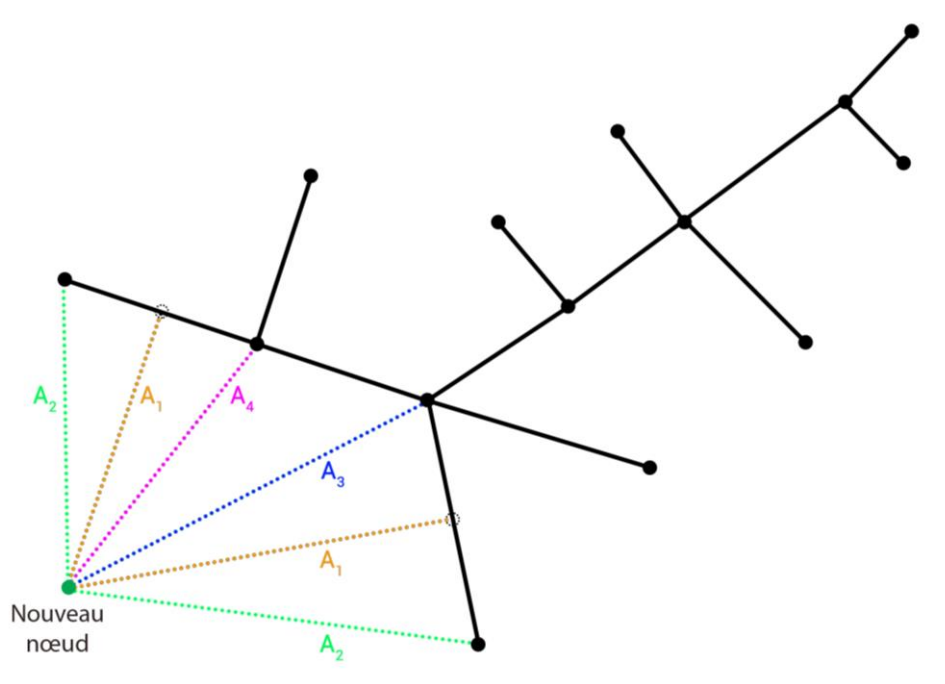


Figure 8.19. Mécanismes de connexion d'un nouveau nœud au réseau existant intégrés dans WayMorph. A_1 : Arc(s) créé(s) avec une préférence pour les projections orthogonales avec le paramètre O_p . A_2 : Arc(s) créé(s) avec une préférence pour les nœuds d'extrémité avec le paramètre E_{pp} . A_3 : Arc créé avec un attachement préférentiel selon le degré de voies avec le paramètre W_p . A_4 ⁴⁹ : Arc créé selon le mécanisme déjà intégré dans le modèle de Courtat (2012).

8.4 Récapitulatif des variables et paramètres du modèle WayMorph

Cette section présente les paramètres, les variables et les données d'entrée du modèle WayMorph, incluant ceux repris depuis le modèle de Courtat (2012), et ceux nouvellement conçus et intégrés.

En amont, nous revenons sur quelques précisions nécessaires. Un paramètre est un cas particulier de variable dont la valeur demeure constante dans un contexte donné. Les variables ont des valeurs qui peuvent changer en cours de simulation, après une ou un certain nombre d'itérations. Les données d'entrée (inputs) ne changent pas durant une même simulation.

⁴⁹ Par défaut les arcs sont ordonnés selon leur longueur, et en considérant le facteur c de séparation des rues, la projection orthogonale se trouve dans un rayon $c \times r_0$ d'un nœud existant. Le nouveau nœud est donc connecté au nœud existant le plus proche

8.4.1 Paramètres

Etape	Paramètres	Nom	Code	Description
<i>Initialisation</i>	N	Nombre de nœuds	N	Nombre total de nœuds générés par le modèle à la fin de la simulation, correspondant au nombre d'itérations.
<i>Etape 1</i>	P_e	Paramètre d'organisation	Pe	Probabilité que la simulation de Monte-Carlo place un point dans un rayon de minima local.
<i>Etape 1 et 2</i>	r_0	Distance de répulsion ⁵⁰	r_0	Zone d'inhibition autour du réseau existant dans lequel la création d'un nouveau nœud est interdite
<i>Etape 1 et 2</i>	α	Paramètre d'amplitude	alpha	Paramètre dans la valeur du potentiel minimal V_m
<i>Etape 2</i>	η	Paramètre de compacité ⁵¹	eta	Paramètre qui influence la taille du rayon de potentiel optimal.
<i>Etape 2</i>	k_{ext}	Facteur d'étalement	kExt	Facteur qui agrandit le rayon de rejet β quand il est strictement supérieur à 1.
<i>Etape 2</i>	f_{ext}	Fréquence d'étalement	fExt	Probabilité que le facteur d'étalement soit utilisé dans le calcul du rayon de rejet avec $\beta = k_{ext} \times r_0$
<i>Etape 3</i>	ω	Paramètre de construction	omega	Probabilité de créer un ou plusieurs segments à partir d'un nouveau nœud
<i>Etape 3</i>	W_p	Attachement préférentiel selon le degré de voie	ways	Choix binaire de connexion du nouveau nœud à la voie ayant le degré le plus élevé
<i>Etape 3</i>	E_{pp}	Rattachement aux nœuds d'extrémité	preferNode	Choix binaire de connexion du nouveau nœud à un nœud d'extrémité du réseau existant
<i>Etape 3</i>	O_p	Rattachement par projection orthogonale	preferOrtho	Choix binaire de connexion du le nouveau nœud par projection orthogonale sur le réseau existant
<i>Etape 3</i>	A_i	Angle minimum d'intersection	minIntAngle	Angle minimum entre un nouveau segment et tous les segments du réseau
<i>Etape 3</i>	A_s	Angle minimum de séparation	minSepAngle	Angle minimal entre tous les segments possibles
<i>Etape 3</i>	L_{max}	Longueur maximale	lMax	Longueur maximale d'un segment de rue nouvellement créé
<i>Etape 3</i>	c	Facteur de séparation	c	Facteur de séparation des rues qui interdit la création d'un nouveau nœud dans ce rayon $c \times r_0$ autour d'un nœud existant

Tableau 8.3. Paramètres du modèle WayMorph.

⁵⁰ Le paramètre r_0 est intitulé rayon de rejet qui est considéré comme fixe dans le modèle de Courtat (2012), toutefois le rayon de rejet peut correspondre à $\beta = r_0$ ou à $\beta = k_{ext} \times r_0$ si le facteur est appliqué selon la probabilité f_{ext} . Nous considérons donc r_0 comme étant un paramètre que nous intitulons « distance de répulsion » et β , le rayon de rejet, comme étant une variable du modèle.

⁵¹ L'intitulé du paramètre η dans le modèle de Courtat (2012) est celui de paramètre d'étalement. Cet intitulé est contre-intuitif au regard de sa formalisation (avec une valeur faible, les réseaux simulés sont plutôt étalés alors qu'avec une valeur élevée les réseaux sont plus compacts). C'est pourquoi nous avons choisi de le modifier.

8.4.2 Variables et données d'entrée

Les variables du modèle sont relatives à l'initialisation de la simulation et à la fonction de potentiel. Pour l'initialisation de la simulation, la surface W de la fenêtre dans laquelle de nouveaux nœuds peuvent être ajoutés est calculée. Cette surface correspond à la surface d'un rectangle enveloppant le réseau d'initialisation, élargi par la valeur de la longueur maximale l_{max} . Les variables du modèle qui relèvent de la fonction de potentiel représentent l'influence (par attraction et répulsion) du réseau initial existant sur son évolution.

Etape	Variables	Nom	Code	Description
<i>Initialisation</i>	W	Fenêtre de simulation	maxEnv	Dimensions de la fenêtre de simulation dans laquelle un nouveau nœud peut être ajouté.
<i>Etape 1</i>	q	Nombre de d'essais	attempts	Nombre d'essais de Monte Carlo pour tirer des nœuds candidats
<i>Etape 1</i>	Q	Nœuds candidats	test_settlnent	Nombre de nœuds candidats
<i>Etape 1 et 2</i>	$P_h(x)$	Potentiel unitaire	potential	Valeur du potentiel unitaire d'un point x situé à une distance $r = d(h,x)$ d'un point h du réseau existant
<i>Etape 1 et 2</i>	$\beta = r_0$ ou $\beta = k_{ext} \times r_0$	Rayon de rejet	rejection	Zone d'inhibition autour du réseau existant dans lequel la création d'un nouveau nœud est interdite
<i>Etape 1 et 2</i>	$r_m^n = \beta \times 2^{\frac{1}{n}}$	Rayon optimal	optimal	Distance optimale d'un nouveau nœud par rapport au réseau existant

Tableau 8.4. Variables du modèle WayMorph.

Le modèle WayMorph intègre la construction des voies et le calcul de leur degré, puisque cela est indispensable pour l'application du mécanisme d'attachement préférentiel selon le degré des voies. Après chaque itération, la voie à laquelle se rattache le nouveau nœud est modifiée dans l'hypergraphe du réseau, ensuite son degré et sa longueur sont recalculés sans reconstruire toutes les autres voies. Les valeurs des données d'entrée utilisées pour la construction des voies correspondent à celles par défaut du plugin Morpheo utilisé précédemment pour l'analyse des réseaux (partie 1).

Etape	Données d'entrée	Nom	Code	Description	Valeur
<i>Construction des voies</i>	W_A	Angle de déviation de la voie	wayMaxAngle	Angle seuil pour la construction des voies	60
<i>Construction des voies</i>	P_B	Zone tampon	placeBuffer	Taille de la zone tampon sur les nœuds formant des places	4

Tableau 8.5. Données d'entrée du modèle WayMorph.

8.4.3 Données de sortie (outputs)

Les données de sortie se présentent sous la forme de trois fichiers : les nœuds, les segments et les voies. Une table attributaire est associée à chaque fichier, dont chaque ligne correspond à une entité spécifique (nœud, segment, voie) (Figure 8.20). Dans chaque table, il y a des attributs qui caractérisent l'entité considérée. L'enregistrement des résultats peut s'effectuer manuellement, en format Geopackage ou en format SVG, ou automatiquement.

À la fin de chaque simulation, l'hypergraphe du réseau est construit et des indicateurs sont calculés sur les voies, à savoir leur degré et leur longueur.

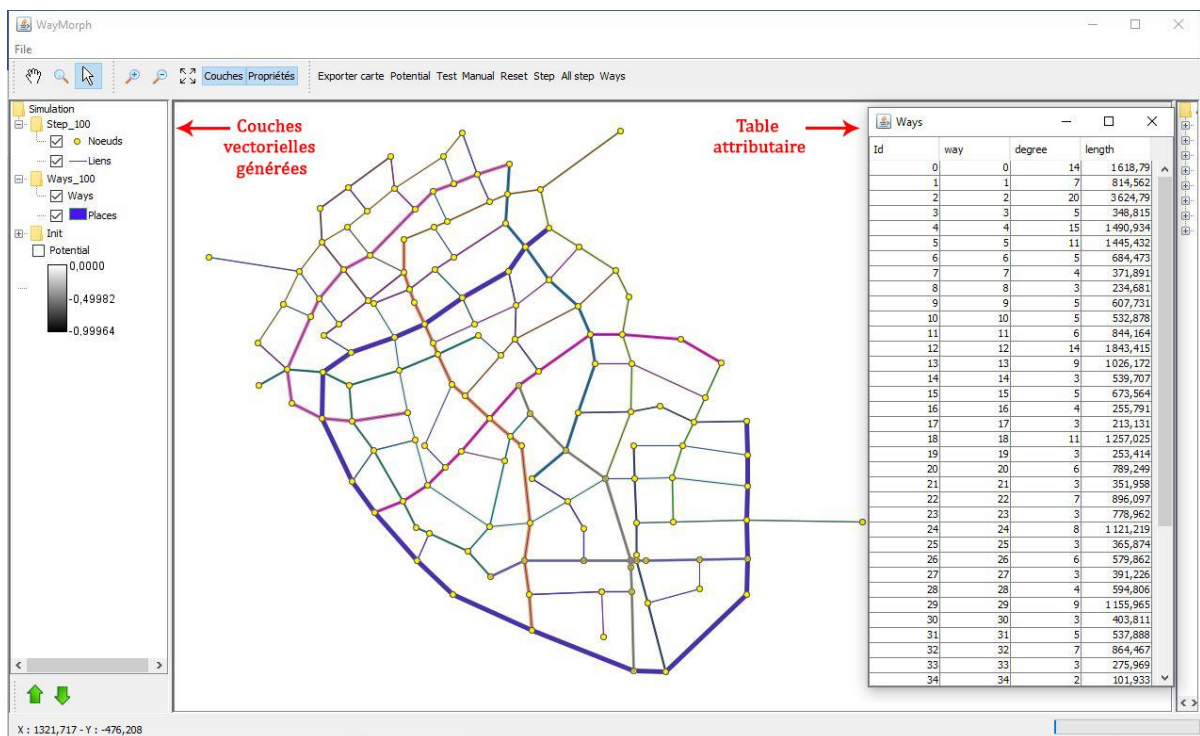


Figure 8.20. Exemple d'outputs du modèle WayMorph.

8.4.4 Interface

Le développement d'une interface pour le modèle WayMorph s'inscrit dans une démarche de science ouverte, rendant l'utilisation du modèle plus accessible aux utilisateurs ayant relativement peu de compétences informatiques.

L'interface comporte une fenêtre centrale permettant la visualisation du réseau et son champ de potentiel. Un menu latéral droit contenant les données d'entrées (réseau initial et champ de potentiel) et de sortie (les nœuds, segments et voies simulés). La barre de navigation permet de charger un réseau initial et de définir les valeurs des paramètres (Figure 8.21). Les utilisateurs peuvent utiliser le modèle en acceptant ou en modifiant les valeurs de paramètres

par défaut. La barre supérieure intègre des curseurs qui permettent à l'utilisateur de tester manuellement l'évolution pas à pas du réseau. Ces curseurs permettent également de visualiser le champ du potentiel après modification des paramètres ou du réseau choisi pour l'initialisation du modèle. Ainsi, l'utilisateur peut comprendre les effets des paramètres un à la fois, ce qui rend l'exploration du modèle plus aisée. Les fonctionnalités intégrées à cette barre permettent également de lancer le calcul des voies, entre autres options.

L'option de test manuel permet d'avoir une vision immédiate de l'association entre chaque entrée (paramètre) et chaque sortie (forme de voies). Cette interface simplifiée permet à un large public d'explorer le modèle et de mettre en évidence visuellement les mécanismes d'évolution.

Une visualisation des distributions statistiques, telles que la distribution du degré et de la longueur des voies, est également possible à l'issue d'une simulation. Ces distributions sont représentées sous forme d'histogrammes de fréquence ou de nuages de points (Figure 8.22). La visualisation de ces graphiques permet d'évaluer les propriétés du réseau simulé et, éventuellement, de recalibrer manuellement les paramètres du modèle pour les N prochaines itérations de la simulation.

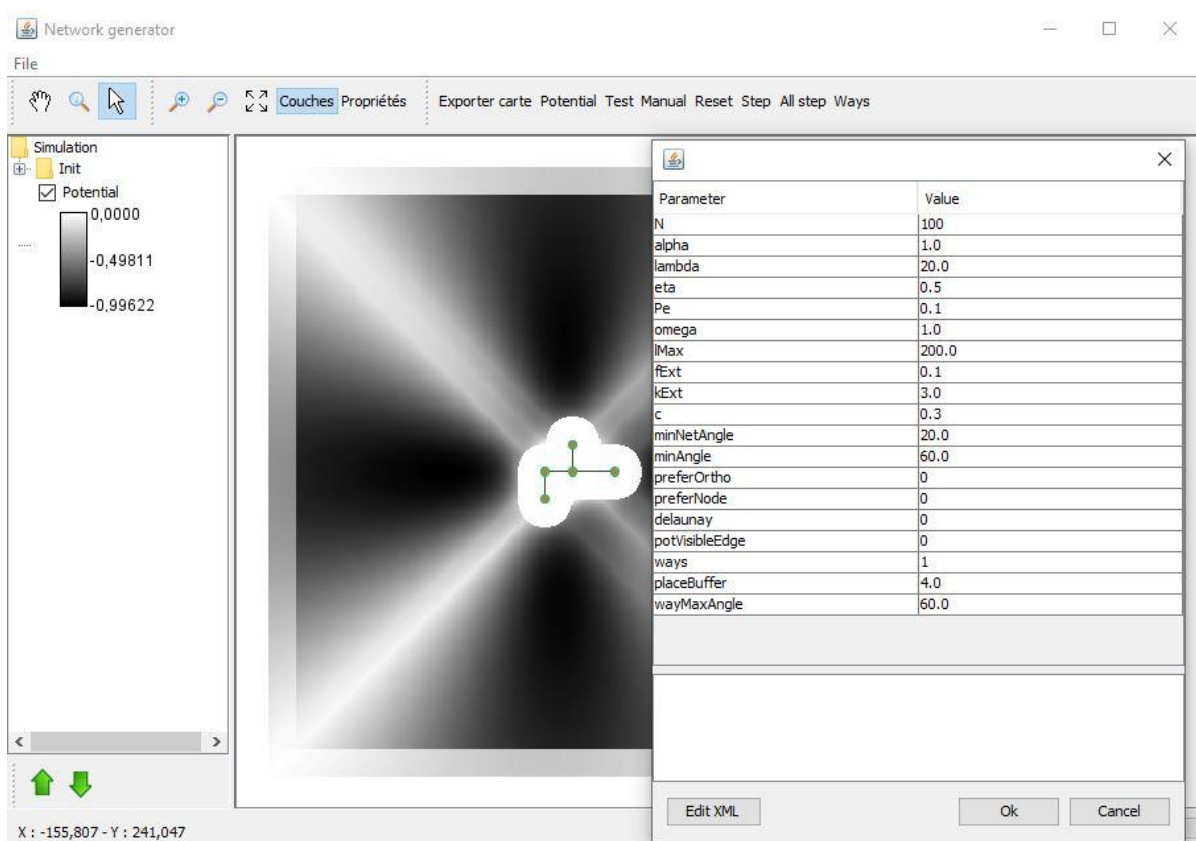


Figure 8.21. Interface du modèle WayMorph, avec la fenêtre pour la définition des valeurs des paramètres

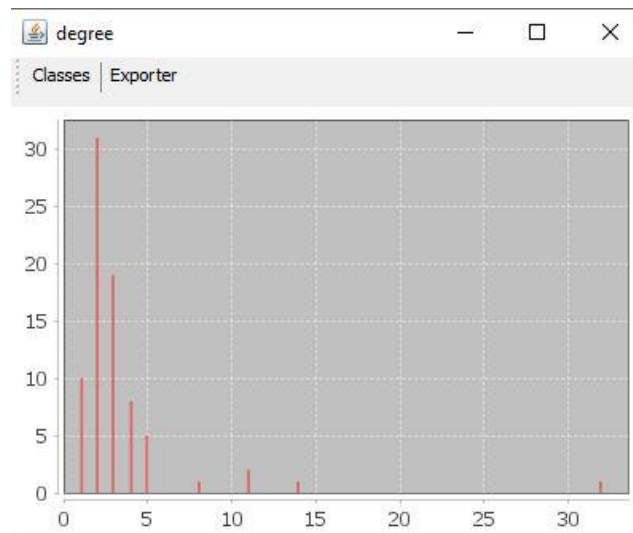


Figure 8.22. Exemple de distribution statistique créée à l'issue d'une simulation.

8.5 Paramétrage initial du modèle WayMorph

Le paramétrage d'un modèle inclut une étape d'estimation et une éventuelle étape de calibrage. L'estimation consiste à déterminer des valeurs des paramètres au moyen d'analyses spatiales ou statistiques de données empiriques (Louf et al., 2013). Pour certains modèles, aucun paramètre ne fait objet d'une estimation statistique mais plutôt d'une estimation à partir d'hypothèse empirique (Tannier, 2017). Le paramétrage initial peut ainsi consister en la transcription, sous forme quantitative, de résultats exposés dans la littérature existant sur le même champ de modélisation (Hirtzel, 2015). En outre, Le calibrage consiste à tester plusieurs valeurs afin de sélectionner celle qui, en fonction de sa capacité à atteindre les objectifs définis, sera utilisée pour exécuter les simulations (Hirtzel 2015). Si les valeurs estimées des paramètres reflètent directement les objectifs établis pour la simulation, il ne sera pas nécessaire de procéder au calibrage des paramètres.

La notion de paramétrage d'un modèle est souvent confondue dans la littérature avec celle de calibrage, bien qu'elles soient distinctes (Richiardi et al., 2006). Le paramétrage n'est pas nécessairement mené de manière ultérieure à la modélisation ou en préalable à l'évaluation du modèle. Le processus de conception d'un modèle nécessite des allers-retours entre la modélisation, le paramétrage et l'évaluation d'un modèle, ce qui implique que les étapes de paramétrage (estimation et calibrage) ne sont pas obligatoirement séquentielles et peuvent être réalisées indépendamment l'une de l'autre.

Pour le modèle WayMorph, le paramétrage initial implique, d'une part, l'estimation des valeurs et de l'ordre de grandeur des nouveaux paramètres conçus et intégrés, d'autre part,

la modification des valeurs et de l'ordre de grandeur des paramètres repris du modèle de Courtat (2012). Le calibrage sera présenté ultérieurement dans le chapitre 9, après l'évaluation du modèle, ce qui permettra de définir les valeurs et leurs ordres de grandeur respectifs en fonction de l'objectif de simulation des différents morphotypes de voies.

Le paramétrage initial du modèle WayMorph est basé sur une approche mixte, puisqu'il porte d'une part sur des paramètres sans valeurs connues dans le domaine empirique, et d'autre part sur des paramètres déduits des analyses morpho-historiques menées préalablement, et qui représentent le domaine empirique de ce modèle.

8.5.1 Estimation des valeurs des paramètres spécifiques au modèle WayMorph

La phase estimation consiste à affecter à chaque paramètre des valeurs numériques initiales et finales déterminant un ordre de grandeur selon les objectifs des simulations. Cette estimation permet de passer d'une représentation théorique du processus de morphogénèse à une évolution morphologique appliquée pas à pas. Chacune des valeurs permet d'explicitier le mécanisme de morphogénèse auquel le paramètre se rapporte.

Les nouveaux mécanismes de WayMorph sont conçus de manière simple, pour modéliser la connexion d'un nouveau nœud au réseau existant. Ces mécanismes suivent un principe de rattachement préférentiel permettant de connecter le nouveau nœud pour assurer la continuité d'une voie de degré élevé, à un nœud d'extrémité, ou par projection orthogonale. Les paramètres associés à ces mécanismes sont aisés à transcrire sous la forme d'un objectif chiffré, sous forme de valeur binaire. De ce fait, ces paramètres qui n'ont pas fait objet d'une estimation statistique, mais plutôt d'un choix binaire selon les objectifs de la simulation (Figure 8.23).

- Le paramètre W_p "*Way preference*" représente le rattachement préférentiel selon le degré de voie. Une valeur de $W_p = 0$ permet de connecter le nouveau nœud au réseau avec le segment le plus court ; une valeur de $W_p = 1$ permet de connecter le nouveau nœud à la voie avec le degré le plus élevé (Figure 8.23 – (a)).
- Le paramètre E_{pp} "*End point preference*" représente le rattachement aux nœuds d'extrémité. Une valeur de $E_{pp} = 0$ permet de connecter le nouveau nœud au réseau avec le segment le plus court ; une valeur de $E_{pp} = 1$ permet de connecter le nouveau nœud à un nœud d'extrémité du réseau existant (Figure 8.23 – (a) et (b)).

- Le paramètre O_p "orthogonality preference" représente le rattachement par projection orthogonale. Une valeur $O_p = 0$ permet de connecter le nouveau nœud au réseau avec le segment le plus court ; une valeur $O_p = 1$ permet de connecter le nouveau nœud avec une projection orthogonale (Figure 8.23 – (c)).

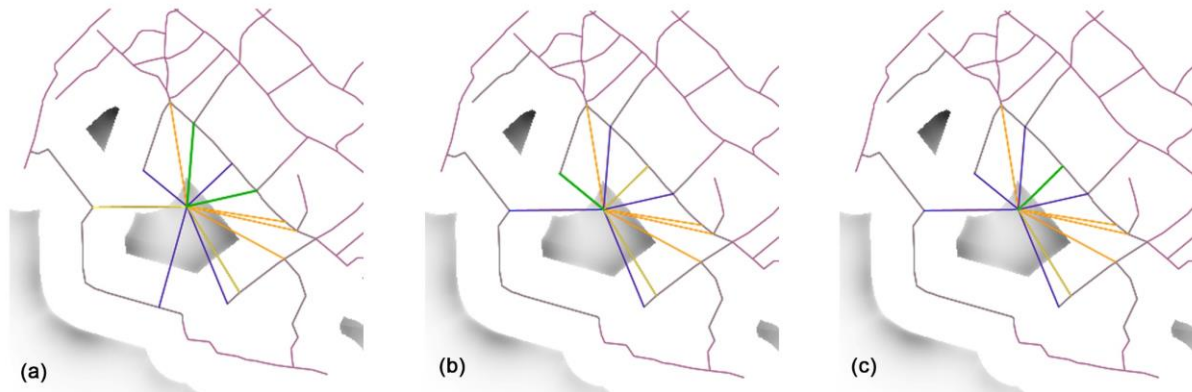


Figure 8.23. Test manuel sur le modèle WayMorph des possibilités de connexion d'un nouveau nœud avec l'activation alternée des paramètres de choix binaires. (a) $W_p = 1$, $E_{pp} = 1$, $O_p = 0$, $W_p = 0$, $E_{pp} = 1$, $O_p = 1$, (c) $W_p = 0$, $E_{pp} = 0$, $O_p = 1$. En vert, le(s) segment(s) créé(s). En bleu, les segments éliminés par la triangulation Delaunay. En jaune, le(s) segment(s) éliminé(s) par la restriction d'angle de séparation A_s . En orange, les segments éliminés par la restriction de l'angle d'intersection A_i .

L'angle minimum d'intersection A_i (entre un nouveau segment et tous les segments du réseau), et l'angle minimum de séparation A_s (entre chaque paire de segments possibles) nécessitent une définition de l'ordre de grandeur de leurs valeurs.

Ces paramètres angulaires ont fait objet d'une estimation basée sur l'analyse empirique des réseaux viaires historiques réels, ce qui a permis l'affectation de l'ordre de grandeur et des valeurs selon l'objectif de la simulation. L'angle A_i $[20^\circ, 90^\circ]$, avec une valeur $20^\circ \leq A_i < 60^\circ$ permet de modéliser la sinuosité du réseau, et avec une valeur $60^\circ \leq A_i \leq 90^\circ$ permet de modéliser la linéarité et la continuité des voies. L'angle A_s $[20^\circ, 90^\circ]$, avec une valeur $20^\circ \leq A_s < 45^\circ$ permet de modéliser des réseaux de forme géométrique irrégulière, et une valeur $45^\circ \leq A_s \leq 90^\circ$ permet de modéliser des réseaux de forme plus orthogonale.

Cette étape d'estimation se base principalement sur des particularités locales. Dans le modèle, les valeurs de certains paramètres sont modifiées lors de la simulation pour représenter différentes étapes d'évolution du réseau. Néanmoins pour la simulation des mécanismes d'émergence de certains morphotypes de voies, les valeurs des paramètres ne changent pas en cours de simulation.

8.5.2 Modification des valeurs par défaut des paramètres de la fonction de potentiel du modèle de Courtat (2012)

La fonction de potentiel détermine les contraintes de connexion d'un nouveau nœud au réseau existant et, de fait, la création des segments de rues. Le calcul de la valeur de cette variable (i.e. le potentiel) peut faire intervenir un ou plusieurs paramètres α , β et η sont des paramètres qui interviennent dans cette fonction du potentiel (Equation 8.2). Toutefois, aucun de ces paramètres n'a fait objet d'une estimation statistique pour le modèle de Courtat (2012). Ainsi leurs valeurs peuvent être ajustées pour le modèle WayMorph, en se basant sur le paramétrage par défaut (Tableau 8.6) et les résultats de simulations présentés dans Courtat et al. (2011), Courtat (2012), et Graftiaux (2021).

Paramètre	Description	Valeur
N	Nombre de nœuds	varie
r_0	Rayon de rejet fixe	10
α	Paramètre d'échelle dans la fonction du potentiel	5
ω	Paramètre d'organisation	[0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]
η	Paramètre d'étalement	[0.3, 0.6, 0.9, 1.2]
k_{ext}	Facteur d'étalement	[1, 5, 10]
f_{ext}	Probabilité d'étalement	0.1
l_{max}	Longueur maximale	400
c	Facteur de séparation de rue	0.3

Tableau 8.6. Valeurs initiales des paramètres du modèle de Courtat (2012).
D'après : Graftiaux (2021).

Pour le modèle WayMorph, les paramètres intervenant dans le calcul du potentiel d'un nouveau nœud $P(x)$ sont : α : Un paramètre d'échelle du potentiel, dont la valeur n'a pas une grande influence tant qu'elle est positive. r_0 : La distance de répulsion autour du réseau existant η : le paramètre de compacité (influence la taille du rayon de potentiel optimal).

Le paramètre α est définie comme fixe dans le modèle de Courtat (2012) avec une valeur $\alpha = 5$, nous considérons comme valeur par défaut $\alpha = 1$ pour le modèle WayMorph, en considérant un ordre de grandeur de α [1, 5].

L'initialisation des simulations du modèle de Courtat (2012) est réalisée à partir d'un seul segment, le rayon de rejet (distance de répulsion) r_0 est ainsi initialement considéré comme une échelle relative et non réelle. La valeur initiale de ce paramètre est fixée à $r_0 = 10$ pour les simulations de Courtat (2012) et Graftiaux (2021). Les tests de simulations à partir de réseaux réels, en considérant différentes valeurs par défaut de ce paramètre, confirme la nécessité d'un ajustement de sa plage de valeurs. De ce fait, nous ajustons les valeurs de la distance de répulsion r_0 par rapport à l'espacement des voies. L'espacement représente la longueur de la voie divisée par sa connectivité (nombre d'arcs qu'elle intersecte), ce qui représente également la longueur moyenne d'un arc et dès lors, la largeur moyenne d'un îlot délimité par des rues. Les distances entre les nœuds correspondent alors à la largeur d'un îlot. À partir des propriétés structurelles déduites des analyses morpho-historiques, la médiane de l'espacement est de 100 mètres avec une valeur maximale à 1000 mètres (voir sous-section 4.2.3.2). Ainsi nous considérons une valeur par défaut de $r_0 = 100$, et nous définissons un nouvel ordre de grandeur de $r_0 [10, 1000]$.

L'ordre de grandeur des valeurs du paramètre de compacité⁵² η est compris entre $\eta = 0.3$ et $\eta = 1.2$ dans le modèle de Courtat (2012). Ce paramètre n'influence que la taille du rayon de potentiel optimal. Une valeur forte permet de simuler un réseau viaire compact, induit par une réduction du rayon de potentiel optimal. Une valeur faible permet de simuler un réseau plus étalé dans l'espace induit par un élargissement du rayon de potentiel optimal. Nous considérons le même ordre de grandeur de valeurs de ce paramètre pour le modèle WayMorph, et nous définissons une valeur par défaut de $\eta = 0.5$.

8.5.3 Paramétrage par défaut du modèle WayMorph

Le Tableau 8.7 ci-dessous présente les paramètres, leur valeur initiale, l'ordre de grandeur retenu pour chacun des paramètres, ainsi que leur valeur par défaut définie pour le modèle WayMorph.

⁵² Pour rappel, ce paramètre correspond au paramètre d'étalement dans le modèle de Courtat (2012).

Etape	Paramètres	Nom	Valeur initiale (Courtat, 2012)	Ordre de grandeur retenu	Valeur par défaut
<i>Initialisation</i>	N	Nombre de nœuds	[10, 220]	[1 ; 1000]	100
<i>Etape 1</i>	P_e	Paramètre d'organisation	[0, 1]	[0, 1]	0.5
<i>Etape 1 et 2</i>	r₀	Distance de répulsion	10	[10, 1000]	100
<i>Etape 1 et 2</i>	α	Paramètre d'amplitude	5	[1, 5]	1
<i>Etape 2</i>	η	Paramètre de compacité	[0.3, 1.2]	[0.2, 1.2]	0.5
<i>Etape 2</i>	k_{ext}	Facteur d'étalement	[1, 10]	[1, 10]	3
<i>Etape 2</i>	f_{ext}	Fréquence d'étalement	0.1	[0, 1]	0.1
<i>Etape 3</i>	ω	Paramètre de construction	[0, 1]	[0, 1]	0.5
<i>Etape 3</i>	W_p	Attachement préférentiel à une voie	-	{0 ; 1}	0
<i>Etape 3</i>	E_{pp}	Préférence pour les nœuds d'extrémité	-	{0 ; 1}	0
<i>Etape 3</i>	O_p	Préférence pour l'orthogonalité	-	{0 ; 1}	0
<i>Etape 3</i>	A_i	Angle minimal d'intersection	-	[20°, 90°]	60
<i>Etape 3</i>	A_s	Angle minimal de séparation	-	[20°, 90°]	60
<i>Etape 3</i>	l_{max}	Longueur maximale	400	[100, 1200]	400
<i>Etape 3</i>	c	Facteur de séparation	0.3	0.3	0.3

Tableau 8.7. Les paramètres, leur valeur initiale, l'ordre de grandeur retenu, et leur valeur par défaut définie pour le modèle WayMorph.

8.6 Synthèse du chapitre 8

Suite à l'étude du modèle de Courtat (2012) et aux simulations effectuées sur la base de ce modèle recodé par Graftiaux (2021), nous avons proposé un nouveau modèle de morphogénèse de réseaux viaires, WayMorph.

La première phase de modélisation (chapitre 8 - section 8.3) a concerné le choix des mécanismes à intégrer, afin de représenter de manière simple les propriétés souhaitées. Cela a impliqué de traduire les propriétés identifiées en mécanismes génératifs qui sont ensuite intégrés dans le modèle, et qui peuvent se produire à différentes échelles (micro, méso ou macro). Ce modèle à base de graphe considère à la fois la capacité à reproduire les morphotypes de voies et à capturer les propriétés structurelles du réseau viaire (observées pour des réseaux réels). Dans ce sens, le choix des paramètres utilisés pour formaliser ces mécanismes a été soigneusement considéré.

La deuxième phase de modélisation a concerné le paramétrage initial du modèle qui correspond à l'estimation des valeurs des nouveaux paramètres et à la modification des valeurs de ceux repris du modèle de Courtat (2012). L'estimation a été faite à partir d'hypothèses empiriques liées à la formalisation des mécanismes de morphogénèse et aux patrons de formation ou de rattachements des différents morphotypes de voies.

Pour finir, il convient de souligner à nouveau que la conception du modèle a impliqué de nombreux allers-retours entre la modélisation et le calibrage. Ainsi, les phases de "modélisation" et de "paramétrage" ont été menées conjointement.

Chapitre 9

Evaluation, calibrage et validation du modèle WayMorph

Le processus de conception d'un modèle de simulation comprend trois phases principales : (1) la modélisation, (2) le paramétrage, ainsi que (3) l'évaluation et la validation. Les deux premières phases de conception du modèle WayMorph ont fait l'objet du chapitre 8. Le présent chapitre est consacré principalement à la troisième phase. Toutefois, le calibrage considéré comme une étape de la phase de paramétrage est également abordé.

L'évaluation du modèle consiste à vérifier que les résultats obtenus sont cohérents avec les hypothèses de leur formalisation, et d'identifier d'éventuelles incohérences entre le jeu de paramètres et les résultats des simulations. Cette évaluation se base sur deux types d'analyses. La première est l'analyse de la stabilité des résultats de la simulation au regard des effets d'aléas (tirages de probabilité) intégrés au modèle. Cette analyse est uniquement utile si le modèle induit une certaine stochasticité⁵³. L'analyse de sensibilité vise à explorer le comportement du modèle à travers la variation des valeurs de ses paramètres. Elle permet de garantir la robustesse du modèle et sa capacité à fournir des résultats fiables et comparables.

La validation d'un modèle consiste à vérifier si les résultats sont conformes aux objectifs prédéfinis de chaque simulation. Ces objectifs correspondent, pour le modèle WayMorph, à la simulation des huit morphotypes de voies et des propriétés structurelles invariantes des réseaux viaires. Pour ce faire, un calibrage du modèle est nécessaire en amont pour définir plusieurs jeux de paramètres possibles (i.e. des combinaisons de valeurs), et choisir celui qui permet d'atteindre les objectifs prédéfinis pour l'exécution de chaque simulation.

Ce chapitre est organisé en deux sections. Dans la section 9.1, nous présentons l'évaluation du modèle WayMorph avec une analyse de stabilité et une analyse de sensibilité. L'objectif est de vérifier que les résultats de simulation sont cohérents par rapport aux hypothèses initiales. Il s'agit aussi de détecter les éventuelles incohérences dans les réseaux simulés ou les dynamiques de morphogénèse simulées, ou encore les incohérences entre des modifications d'inputs du modèle et les propriétés résultantes des réseaux viaires simulés.

⁵³ Un processus stochastique, ou processus aléatoire, correspond à un calcul classique de probabilités.

Dans la section 9.2, nous présentons le calibrage du modèle et la validation de sa capacité à simuler l'ensemble des morphotypes de voies prédéfinis. Nous exposons les résultats de la validation du modèle en comparant les réseaux simulés à des réseaux réels. Nous avons fait le choix de présenter successivement le calibrage des paramètres et la validation du modèle pour chaque morphotype, étant donné que le calibrage a été réalisé en ajustant les valeurs de paramètres en fonction des morphotypes de voies à simuler, dont les résultats ont été ultérieurement validés. En synthèse du chapitre, nous résumons les résultats de l'évaluation et la validation du modèle WayMorph.

Les protocoles d'évaluation et de validation d'un modèle de simulation doivent être choisis en fonction du cadre méthodologique et conceptuel de chaque modèle. Les étapes d'évaluation et de validation, ainsi que leur importance respective, varient en fonction des objectifs présidant à la conception du modèle. Par exemple, dans le cas de modèles entièrement synthétiques⁵⁴, le calibrage ne sera pas pertinent. Dans le cas d'un modèle destiné à être ajusté sur des données empiriques, une exploration systématique de toutes les valeurs possibles des paramètres ne sera pas nécessairement requise. Dans ce chapitre, nous débutons chaque section par la présentation du protocole d'analyse choisi, en le positionnant vis-à-vis des protocoles et des méthodes les plus couramment utilisées.

⁵⁴ Il s'agit de modèles basés sur l'utilisation de données synthétiques, au sens de populations statistiques d'individus générées aléatoirement sous la contrainte de reproduire certaines caractéristiques du système étudié. Par définition, il n'est pas possible de produire des sorties directement liées aux données dans le cas de modèles synthétiques.

9.1 Evaluation du modèle

9.1.1 Positionnements pour l'évaluation de WayMorph

9.1.1.1 Bref aperçu des protocoles d'évaluation existants

En termes d'évaluation d'un modèle de simulation, les protocoles impliquent l'analyse de la stabilité et l'analyse de la sensibilité (Crosetto et al., 2000; Hirtzel, 2015; Reuillon et al., 2013; Richiardi et al., 2006; Tannier, 2017).

L'analyse de la stabilité des résultats de simulation est utile uniquement quand la formalisation d'un modèle induit une certaine stochasticité car une valeur de résultat issue d'une seule exécution de simulation n'est alors pas forcément fiable, en raison de la variabilité possible des résultats de simulation (Crooks, 2010; Huang et al., 2014). Afin de produire un résultat plus représentatif et stable, une simulation doit alors être répliquée plusieurs fois avec les mêmes valeurs de paramètres (Wegener, 2021). Les résultats de ces répliquations sont analysés pour déterminer la stabilité ou, au contraire, la variabilité de tout ou partie des résultats du modèle, à partir d'analyses des résultats relevant de la statistique descriptive (la moyenne ou la médiane, voire la dispersion de différentes variables), et graphique (la distribution et la variation). La variabilité intrinsèque à un modèle ne peut être supprimée, quel que soit le nombre de répliquations effectuées (van Imhoff & Post, 1998). Toutefois, lorsque le nombre de répliquations augmente, cette variabilité a tendance à diminuer. Il n'existe aucun protocole standard pour déterminer le nombre de répliquations nécessaires (Hirtzel, 2015). D'après Amblard (2003) et Huang et al., (2014), l'important est de considérer plusieurs répliquations quel que soit leur nombre.

L'analyse de la sensibilité porte sur l'évaluation de la variation des résultats de simulation par rapport à la modification de valeurs de paramètres. L'objectif est de saisir le comportement du modèle de manière empirique, à travers le test de l'ensemble des variations possibles des valeurs de paramètres (Cariboni et al., 2007; Hirtzel, 2015; Schouten et al., 2014). Certains protocoles d'analyse de sensibilité se basent sur une exploration globale du modèle afin de mieux comprendre les interactions entre toutes les différentes valeurs possibles de paramètres et leur impact sur les résultats du modèle. D'autres protocoles consistent en une exploration locale, l'accent étant mis sur l'identification de valeurs de paramètres potentiellement pertinentes a priori (pour les paramètres nécessitant d'être calibrés), afin d'étudier leur impact sur les résultats de manière plus ciblée (Hirtzel, 2015). On identifie ainsi

les valeurs spécifiques de ces paramètres qui permettent d'atteindre certains objectifs de simulation. Dans cette perspective, l'analyse de sensibilité facilite un éventuel calibrage ultérieur du modèle en mettant en évidence les différents espaces des valeurs des variables de sortie atteints en fonction des valeurs paramètres testées (Barros, 2012; Crosetto et al., 2000; Richiardi et al., 2006).

Des approches simplifiées d'analyse de sensibilité ont été adoptées dans plusieurs travaux en géographie ou en écologie, notamment la méthode OAT (One-At-a-Time) (Ginot & Monod, 2007; Laperrière et al., 2009; Sanders, 2006; Schouten et al., 2014), et l'analyse graphique (Laperrière et al., 2009; Sanders, 2006; Schouten et al., 2014). La méthode OAT consiste à modifier la valeur d'un paramètre tout en maintenant les autres paramètres à leur valeur de référence. Le paramètre est ensuite rétabli à sa valeur de référence et le processus est répété pour chaque paramètre de la même manière. L'analyse graphique consiste principalement à tracer des représentations graphiques statistiques de la variable de sortie en fonction de variables d'entrée. Elle permet une visualisation directe de la sensibilité.

9.1.1.2 Possibilités d'application de ces protocoles à l'évaluation de WayMorph

Le modèle WayMorph comporte un premier effet d'aléa inhérent au processus de Monte-Carlo introduit pour la sélection de Q nœuds candidats. Un deuxième effet d'aléa intervient lors du tirage, selon une loi de probabilité binominale, du nombre de segments créés. L'évaluation du modèle requiert donc une analyse de la stabilité.

L'analyse de la sensibilité est nécessaire pour comprendre le comportement du modèle par rapport à la modification de valeurs de paramètres. En raison du nombre de paramètres du modèle, une analyse globale serait coûteuse et techniquement contraignante en termes de temps de calcul et de traitement des résultats de simulation. Nous considérons qu'il n'est pas nécessaire de procéder à une analyse globale afin d'étudier la sensibilité des résultats de simulation vis-à-vis des différents paramètres du modèle, et qu'une analyse locale est suffisante.

Les indicateurs de sortie considérés pour l'évaluation du modèle sont ceux préalablement exposés en section 8.4.3. L'application informatique WayMorph intègre déjà une automatisation de certains post-traitements des graphes viaires simulés, qui concerne la construction des voies et le calcul du degré et des longueurs. Toutefois le calcul de l'ensemble des indicateurs peut allonger les durées de simulation. Pour considérer l'ensemble des

indicateurs (utilisés précédemment dans l'analyse de réseaux réels, partie 1 de la thèse), les traitements doivent être effectués sur les segments du réseau simulé (à partir du fichier Geopackage en sortie), indépendamment sur QGIS en utilisant le plugin Morpheo.

9.1.2 Analyse de stabilité de WayMorph

Le modèle WayMorph implique de nombreux tirages aléatoires (probabilité Monte Carlo) pour sélectionner un nombre Q de nœuds candidats par rapport à la fonction du potentiel (voir sous-section 8.2.2.2). Cette probabilité induit une stochasticité qui varie selon les valeurs du paramètre d'organisation P_e (probabilité que la simulation de Monte-Carlo tire un point de potentiel minimum à l'intérieur de la zone de potentiel optimal).

La création de nouveaux segments de rue implique également une certaine stochasticité, puisque le nombre de segment(s) créé(s) suit une distribution de probabilité binomiale n' qui dépend du paramètre de construction ω (voir sous-section 8.2.2.4).

Nous optons délibérément pour ne pas faire de distinction entre les deux sources de stochasticité dans l'analyse de stabilité de WayMorph. Par conséquent, nous n'envisageons pas d'examiner les effets spécifiques des deux sources de stochasticité séparément l'une de l'autre. Un test de la stochasticité résultant spécifiquement du tirage de probabilité Monte-Carlo supposerait notamment de pouvoir fixer le nombre de segment(s) créé(s) à chaque itération. Toutefois le modèle tel qu'il est conçu ne permet pas de fixer ce nombre étant donné qu'il dépend du paramètre de construction ω . En outre les effets des deux sources de stochasticité sont interdépendants. Par exemple, pour une simulation, le nombre de nœuds créés durant l'étape 2 du modèle (voir 8.2.2.3) reste stable car à chaque itération de la simulation un nouveau nœud est généré. Ce nombre dépend donc principalement du nombre d'itérations N . Cependant, le nombre de nœuds du graphe à chaque itération dépend également de la création de segments (étape 3 du modèle, voir 8.2.2.4). En effet, la création d'un segment qui se connecte à un segment préexistant du réseau engendre la création d'un nouveau nœud sur le réseau existant. Ainsi, le nombre de nœuds du graphe viaire simulé peut présenter une variation qui découle de la probabilité binomiale n' . De plus, le nombre de segment(s) créé(s) dépend du nombre de segments possibles, qui est conditionnée par la localisation du nouveau nœud. La principale source de variation de cette localisation est la probabilité Monte-Carlo relative au paramètre d'organisation.

Notre objectif est exclusivement de déterminer un seuil acceptable pour le nombre de réplifications nécessaires pour garantir la fiabilité de l'analyse des résultats d'une simulation.

Cela permettra de limiter au maximum le nombre de réplifications car la réalisation de nombreuses réplifications augmente les temps de calculs et d'enregistrement automatique des résultats de simulation.

L'analyse de stabilité vise à répondre à quatre questions :

- Les résultats du modèle présentent-ils une stabilité ou plutôt une instabilité ?
- Quelle est la dispersion des valeurs des différents résultats entre plusieurs réplifications d'une même simulation (en utilisant un même jeu de paramètres), puisque le modèle est soumis à une stochasticité ?
- Comment la variabilité entre les réplifications évolue-t-elle au fur et à mesure des itérations ?
- Quel est le nombre de réplifications d'une simulation nécessaire pour que l'analyse des résultats soit fiable ?

9.1.2.1 Protocole d'analyse de stabilité adopté

Des multiples réplifications d'une même simulation avec les mêmes paramètres et les mêmes conditions initiales peut résulter une variabilité des réseaux viaires simulés. Cette variabilité entre les réplifications d'une même simulation et son impact sur les valeurs des résultats de simulation doit être mesurée.

À l'échelle du graphe, l'analyse porte sur des résultats généraux pour visualiser la stabilité à un niveau agrégé à partir d'indicateurs synthétiques : le nombre de segments, de nœuds et de voies. À l'échelle des voies, l'analyse considère principalement les résultats qui sont soumis à l'effet d'aléa, à savoir le degré et la longueur des voies. Étant donné que tous les résultats ne dépendent pas directement d'une probabilité, seuls quelques indicateurs caractérisant les voies sont analysés. Par exemple, les résultats de l'orthogonalité des voies dépendront uniquement des paramètres angulaires prédéfinis (A_i angle minimal d'intersection et A_s angle minimal de séparation). En outre, les résultats relatifs aux centralités (centralité de proximité et centralité d'intermédiarité) ne sont pas considérés puisque qu'ils relèvent des résultats thématiques des simulations.

Le protocole d'analyse de stabilité comporte les étapes suivantes :

- R réplifications d'une même simulation avec les mêmes valeurs de paramètres et le même réseau initial.
- Étude des indicateurs agrégés à l'échelle du graphe pour l'ensemble des réplifications d'une même simulation.

- Etude de la médiane, de la dispersion et de la distribution d'indicateurs relatifs au degré et à la longueur des voies pour l'ensemble des réplifications.
- Détermination du nombre de réplifications nécessaires pour atteindre un certain niveau de convergence statistique de l'indicateur ou de la distribution étudié(e).

Il est nécessaire de définir préalablement les valeurs des paramètres à considérer pour toutes les réplifications d'une même simulation. Plus particulièrement, il est essentiel de sélectionner attentivement la valeur du paramètre d'organisation P_e . Un P_e proche de 0 implique que les nœuds candidats sont choisis au hasard, sans aucune influence du champ de potentiel, ce qui logiquement entraîne des résultats instables entre les différentes réplifications. Lorsque P_e est proche de 1, seuls les nœuds optimaux sont choisis, réduisant ainsi l'effet d'aléa de manière significative (voir section 8.2.2.2.). Une valeur $P_e = 1$ implique une infinité de tirage Monte-Carlo ce qui serait contraignant pour les réplifications d'une simulation. L'analyse de stabilité doit donc être menée en considérant une valeur du paramètre d'organisation P_e dans un ordre de grandeur intermédiaire (avec $0 < P_e < 1$). Dans le cadre de l'analyse de stabilité du modèle, des réplifications ont été conduites pour trois simulations, chacune avec des valeurs spécifiques du paramètre d'organisation : $P_e = 0.3$, $P_e = 0.5$ et $P_e = 0.7$. Cependant, dans cette sous-section, nous avons choisi de présenter uniquement les résultats des réplifications de la simulation pour la valeur intermédiaire de $P_e = 0.5$. Ce choix découle d'une part, du constat que les résultats diffèrent très peu pour les trois valeurs de P_e , et d'autre part, d'une volonté de simplifier la présentation des résultats des analyses.

Les paramètres de choix binaires du modèle WayMorph permettent d'activer ou non trois mécanismes : W_{op} attachement préférentiel selon le degré des voies, E_{pp} rattachement aux nœuds d'extrémité, et O_p rattachement par projection orthogonale. Quand ces mécanismes sont activés (valeur des paramètres de choix binaires égale à 1), le processus de génération des segments est déterministe, c'est-à-dire qu'il produit toujours les mêmes segments dans les mêmes conditions. Ces mécanismes ne doivent donc pas être activés (valeur des paramètres de choix binaires égale à 0) pour que les résultats du modèle présentent une certaine stochasticité.

Concernant les autres paramètres, nous adoptons leurs valeurs par défaut fixées lors du paramétrage initial du modèle (8.5.3), à l'exception de la valeur de l'angle minimum de séparation A_s , qui est modifiée. En effet, des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s et de l'angle minimum d'intersection A_i de 60° peuvent s'avérer restrictives dans des cas particuliers (ce qui implique qu'aucun segment ne pourrait être créé au cours d'une itération)

(voir sous-section 8.3.2.3). Étant donné notre approche d'enregistrement automatique des résultats à chaque itération pour l'ensemble des réplifications, et pour prévenir toute éventualité de ce cas de figure, il est important que l'un ou l'autre de ces angles ne soit pas égal à 60° . Nous choisissons donc un angle minimum de séparation A_s égal à 45° car il intervient dans un moins grand nombre de cas que l'angle d'intersection.

Nous avons choisi de tester la variabilité des résultats de simulations comportant $N=100$ itérations. Ce nombre de 100 itérations permet modéliser des réseaux viaires ayant une extension spatiale comparable à celle d'un centre-ville historique, ce qui est assez réduit mais qui réduit aussi de fait les coûts de calcul de l'analyse de stabilité. Pour chaque réplification, les mêmes conditions initiales et les mêmes valeurs de paramètres sont appliquées. Nous procédons à $R = 100$ réplifications d'une même simulation, ce qui est suffisant pour vérifier la convergence ou non des valeurs des indicateurs considérés.

- Le paramètre d'organisation $P_e = 0.5$
- Nombre de réplifications d'une simulation $R = 100$
- Nombre d'itérations de chaque simulation $N = 100$
- Même initiateur : un seul segment
- Mêmes valeurs des paramètres : $\alpha = 1$; $r_0 = 100$; $\eta = 0.5$; $\omega = 0.5$; $f_{ext} = 0.1$; $k_{ext}=3$; $l_{max} = 400$; $c = 0.3$; $W_{op} = 0$; $E_{pp} = 0$; $O_p = 0$; $A_s = 60$; $A_i = 45$.

9.1.2.2 Evaluation visuelle de la stabilité du modèle

À l'échelle du graphe viaire

L'analyse visuelle de graphiques des propriétés à l'échelle du graphe permet une première lecture des résultats des réplifications. On constate visuellement une stabilité globale des valeurs des indicateurs pour les 100 réplifications. Cette stabilité diffère légèrement d'une étape de la simulation à une autre.

Le nombre de segments (Figure 9.1) et le nombre de voies (Figure 9.3) présentent le plus de stabilité entre les différentes réplifications, tandis que le nombre de nœuds présente une variabilité plus marquée (Figure 9.2). En ce qui concerne le nombre de segments (Figure 9.1), à l'itération 25, nous observons une plage de variation entre 40 et 60 segments, tandis qu'à l'itération 50, cette plage s'étend de 85 à 115 segments. Cette tendance se poursuit, avec une plage de 130 à 170 segments à l'itération 75, et de 180 à 220 segments à l'itération 100. Pour le nombre de nœuds (Figure 9.2), à l'itération 25, le nombre de nœuds varie entre 30 et 50. À

l'itération 50, cette plage s'étend de 55 à 75, puis de 75 à 115 à l'itération 75, et enfin, de 120 à 150 à l'itération 100.

En ce qui concerne le nombre de voies, nous constatons une e variabilité relativement stable entre les différentes étapes de simulation, principalement aux étapes intermédiaires des simulations (itérations N=50 et N=75). À l'itération 25, le nombre de voies est entre 15 et 20. À l'itération 50, cette variation est de 25 à 30. À l'itération 75, la plage s'accroît pour aller de 30 à 50. Enfin, à l'itération 100, le nombre de voies varie entre 50 et 70.

La corrélation entre les propriétés deux à deux du graphe est quasi-linéaire pour l'ensemble des réplifications et ce, durant les différentes étapes de simulation (Figure 9.4). En particulier, le nombre de nœuds et le nombre de segments présentent une corrélation linéaire marquée pour les différentes réplifications.

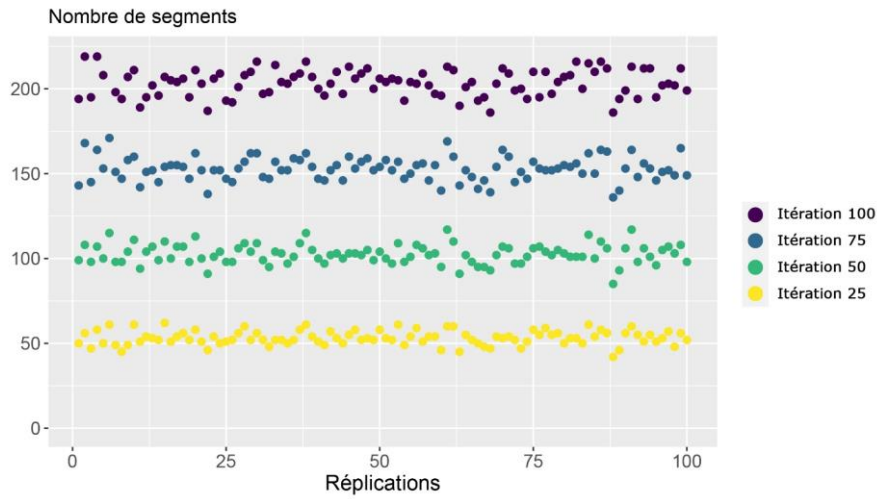


Figure 9.1. Nombre de segments du graphe viaire pour chaque réplication d'une simulation avec $P_e = 0.5$.

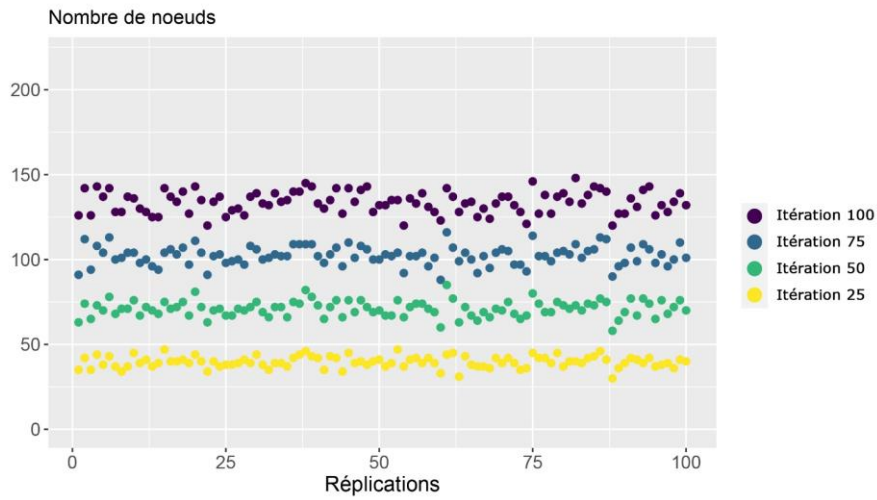


Figure 9.2. Nombre de nœuds du graphe viaire pour chaque réplication d'une simulation avec $P_e = 0.5$.

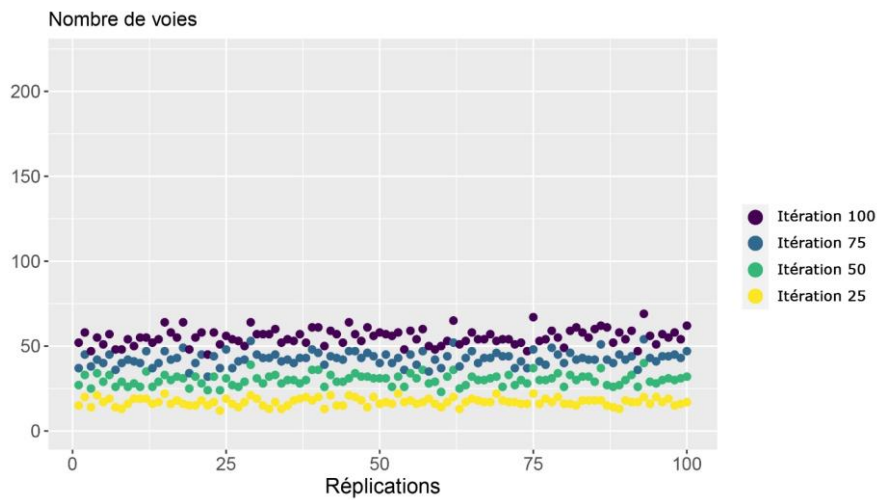


Figure 9.3. Nombre de voies du graphe viaire pour chaque réplication d'une simulation avec $P_e = 0.5$.

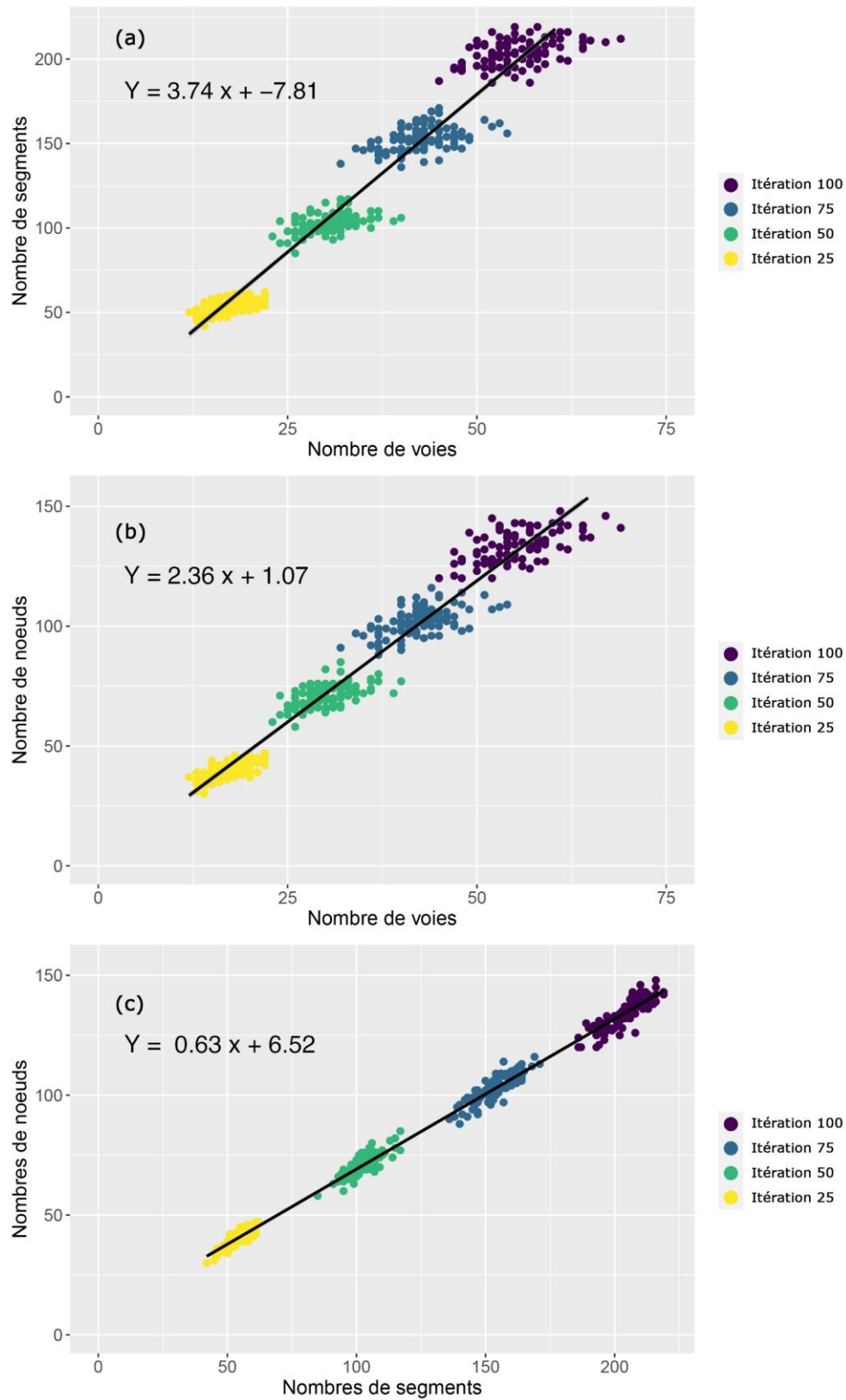


Figure 9.4. Corrélation linéaire entre les propriétés du graphe viaire pour chaque réplification d'une simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Nombre de segments et nombre de voies. (b) Nombre de nœuds et nombres de voies. (c) Nombre de nœuds et nombre de segments.

À l'échelle des voies

La visualisation graphique de la distribution statistique des résultats des indicateurs à l'échelle des voies permet de détecter des similitudes ou des différences entre les résultats des différentes réplifications d'une simulation donnée. La représentation graphique de la distribution statistique par des courbes de densité permet de visualiser la forme de la distribution des valeurs pour l'ensemble des réplifications, et d'obtenir des informations sur la tendance centrale.

Les courbes de densité correspondant au degré (Figure 9.5 - (a)) et à la longueur et des voies (Figure 9.5 - (b)) montrent globalement une uniformité, bien que des différences existent entre la courbe de chaque réplification. Les courbes des différentes réplifications pour les deux indicateurs à l'échelle des voies correspondent à une distribution normale asymétrique. Nous observons une variation des pics des courbes de densité du degré des voies. Ces variations indiquent une différence entre les réplifications pour les valeurs moyennes qui sont les plus probables dans la distribution. Les courbes de densité de la longueur des voies présentent une variabilité plus marquée en termes de forme globale de la distribution. Cela indique que les longueurs des voies peuvent différer considérablement d'une réplification à l'autre, avec des variations significatives dans les valeurs les plus probables. Contrairement au degré des voies, où l'on observe plus de cohérence dans la forme globale de la courbe, les longueurs des voies peuvent varier de manière plus substantielle entre les réplifications. Cette variation plus importante des longueurs des voies suggère une plus grande diversité des configurations spatiales des réseaux simulés impactant la construction des voies à chaque réplification.

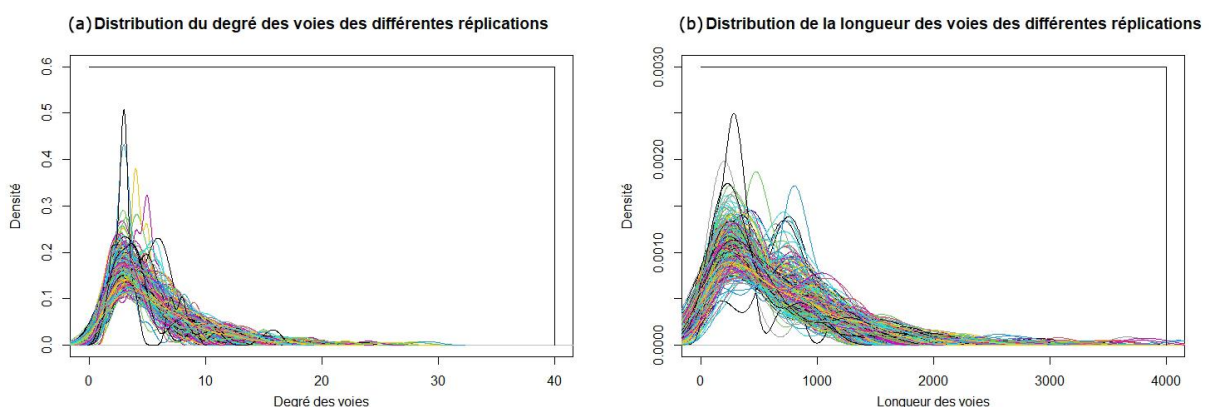


Figure 9.5. Courbes de densité (courbes de probabilité) estimant la distribution des valeurs (a) du degré des voies et (b) de la longueur des voies pour chaque réplification d'une simulation avec $P_e = 0.5$. Chaque courbe correspond à une réplification.

9.1.2.3 Quantification de la variabilité des résultats de simulation

L'évaluation des impacts de l'effet d'aléa sur les résultats de simulation implique la quantification de la variabilité entre les répliques d'une même simulation ainsi que l'analyse de son influence sur les valeurs des résultats simulés. En comprenant et mesurant cette variabilité, il est possible de mieux appréhender les incertitudes liées à l'aléa dans les simulations. Cette évaluation permet d'obtenir une vision plus précise des résultats.

Le tableau 9.1 présente les coefficients de variation de chaque indicateur au début et à la fin de la simulation. À l'étape de simulation $N = 25$, la quasi-totalité des coefficients de variation relatifs au graphe viaire est inférieur à 14 % de variation autour de la moyenne tandis que les propriétés relatives aux voies présentent des coefficients de variation plus élevés (Tableau 9.1). La médiane de la longueur des voies présente la plus grande variabilité avec un coefficient de variation $\approx 30\%$. En fin de simulation à $N=100$, tous les coefficients de variation sont plus bas qu'en début de la simulation, en général inférieurs à 10 %. Seule la médiane de la longueur des voies présente une valeur plus importante.

Echelle	Indicateur considéré	Coefficient de variation à N=25	Coefficient de variation à N=100
Graphe viaire	Nombre de voies	13.57	8.51
	Nombre de nœuds	8.56	4.85
	Nombre de segments	7.87	3.89
Voies	Médiane du degré des voies	19.11	10.65
	Médiane de la longueur des voies	30.18	16.99

Tableau 9.1. Coefficient de variation entre les 100 répliques de la simulation avec $P_e = 0.5$.

L'évolution de la variabilité au fil des itérations permet de vérifier si ces tendances sont ou pas susceptibles de varier dans le temps d'une simulation. Le coefficient de variation (CV) est une mesure relative de la dispersion d'une variable par rapport à sa moyenne. Plus précisément, il est calculé en divisant l'écart-type par la moyenne de la variable. Lorsque le CV diminue au fil des itérations, cela indique que la dispersion relative par rapport à la moyenne diminue, ce qui signifie que les valeurs deviennent plus cohérentes et convergent. D'autre part, les boîtes de dispersion représente l'intervalle interquartile (la différence entre le troisième quartile Q3

et le premier quartile Q1). La hauteur des boîtes présente la dispersion des valeurs centrales dans les données mais ne donne pas d'indication directe sur la dispersion par rapport à la moyenne.

A l'échelle du graphe viaire, la variabilité entre les 100 réplifications diminue de manière systématique d'une étape à une autre de la simulation pour l'ensemble des propriétés, mais en proportion différente (Figure 9.6 - (a)). Le coefficient de variation du nombre de voies présente une tendance globale à la diminution, entre $\approx 13,5\%$ à l'itération 25 et $\approx 8,5\%$ à l'itération 100, bien que les valeurs correspondantes restent supérieures à celles observées pour le nombre nœuds (entre $\approx 8,5\%$ à l'itération 25 et $\approx 5\%$ à l'itération 100), et le nombre de segments (entre $\approx 8\%$ à l'itération 25 et $\approx 4\%$ à l'itération 100). Les coefficients de variation de ces deux propriétés présentent également la même tendance à la diminution d'une étape à une autre de la simulation.

En outre, bien que le coefficient de variation pour chaque propriété diminue d'une étape à une autre de la simulation, leur variabilité respective (dispersion statistique) entre les réplifications augmente légèrement (Figure 9.6 - (a), (b) et (c)). Cela peut sembler paradoxal à première vue. Cependant, cette observation peut s'expliquer par des disparités dans la distribution des données, tout en prenant en compte que les nombres respectifs de voies, de nœuds et de segments augmentent d'une étape de la simulation à une autre.

Par exemple, le nombre de valeurs extrêmes augmente au fil des itérations, ce qui peut augmenter l'intervalle interquartile (hauteur des boîtes de dispersion) (voir Annexe 29). En parallèle, plusieurs valeurs de données résultant de l'étape la plus récente de la simulation se rapprochent de la moyenne, diminuant par conséquent le coefficient de variation.

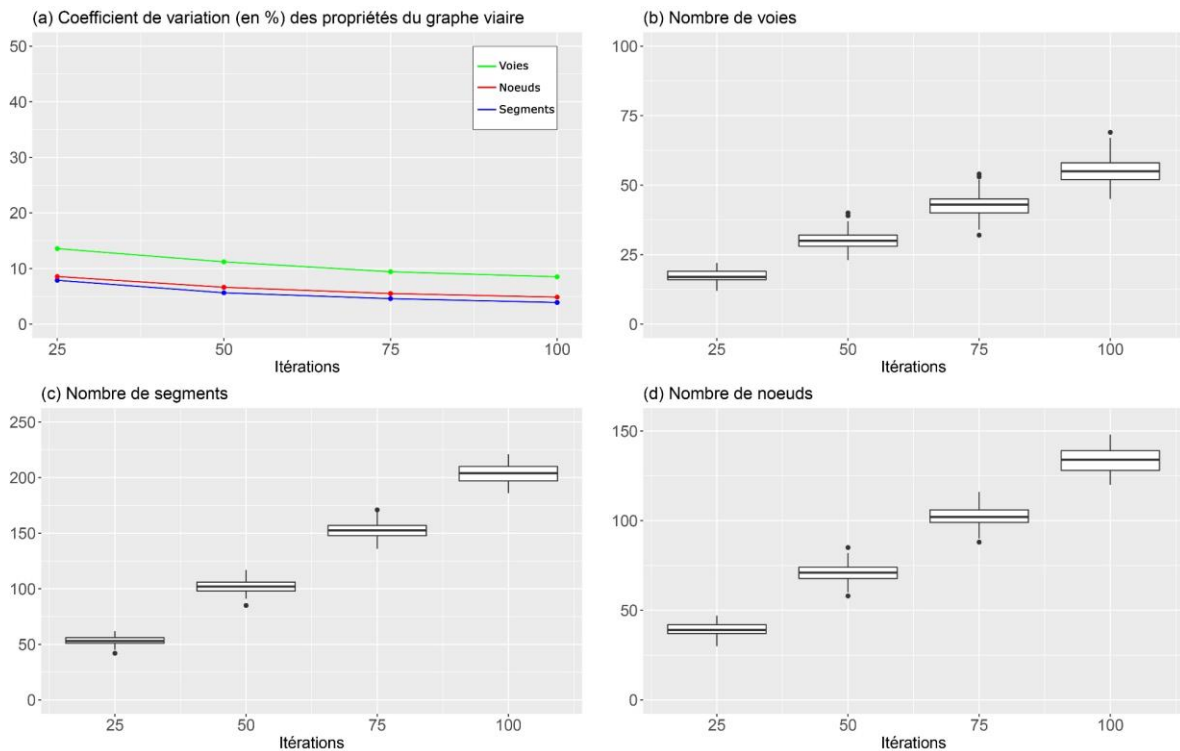


Figure 9.6. Variabilité des résultats entre les 100 répliques de la simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Coefficient de variation (en %) des propriétés du graphe. (b) Dispersion statistique du nombre de voies. (c) Dispersion statistique du nombre de segments. (d) Dispersion statistique du nombre de nœuds.

Pour les indicateurs calculés à l'échelle des voies, le coefficient de variation diminue également d'une étape à une autre de la simulation, la variation (dispersion statistique) elle, diminue ou stagne. En effet, les voies sont créées en agrégeant les arcs du graphe viaire, et leur construction constitue un résultat final du modèle. Si un nœud est tiré pour être ajouté au réseau existant, il est ensuite connecté à ce dernier par un ou plusieurs segments. À chaque itération, l'ajout de ces segments reconfigure la construction des voies en fonction des alignements entre les segments existants et les nouveaux segments ajoutés. C'est pourquoi les variables liées aux voies sont plus susceptibles de varier entre différentes répliques que d'autres variables (Figure 9.7).

Le coefficient de variation de la médiane du degré des voies présente une diminution considérable d'une étape à l'autre de la simulation, entre $\approx 19\%$ à l'itération 25 et $\approx 10\%$ à l'itération 100 (en bleu sur la figure 9.7). Les boîtes de dispersion associées à cette variable ont des amplitudes particulièrement réduites (Figure 9.7 (b)).

La médiane de la longueur des voies présente particulièrement des coefficients de variation plus élevés avec une tendance globale vers la diminution d'une étape à l'autre de la simulation, entre $\approx 30\%$ à l'itération 25 et $\approx 17\%$ à l'itération 100 (en rouge sur la figure 9.7 (a)). Les

intervalles interquartiles des boîtes de dispersion associées à cette variable diminuent aussi d'une étape à l'autre de la simulation (Figure 9.7. (c)).

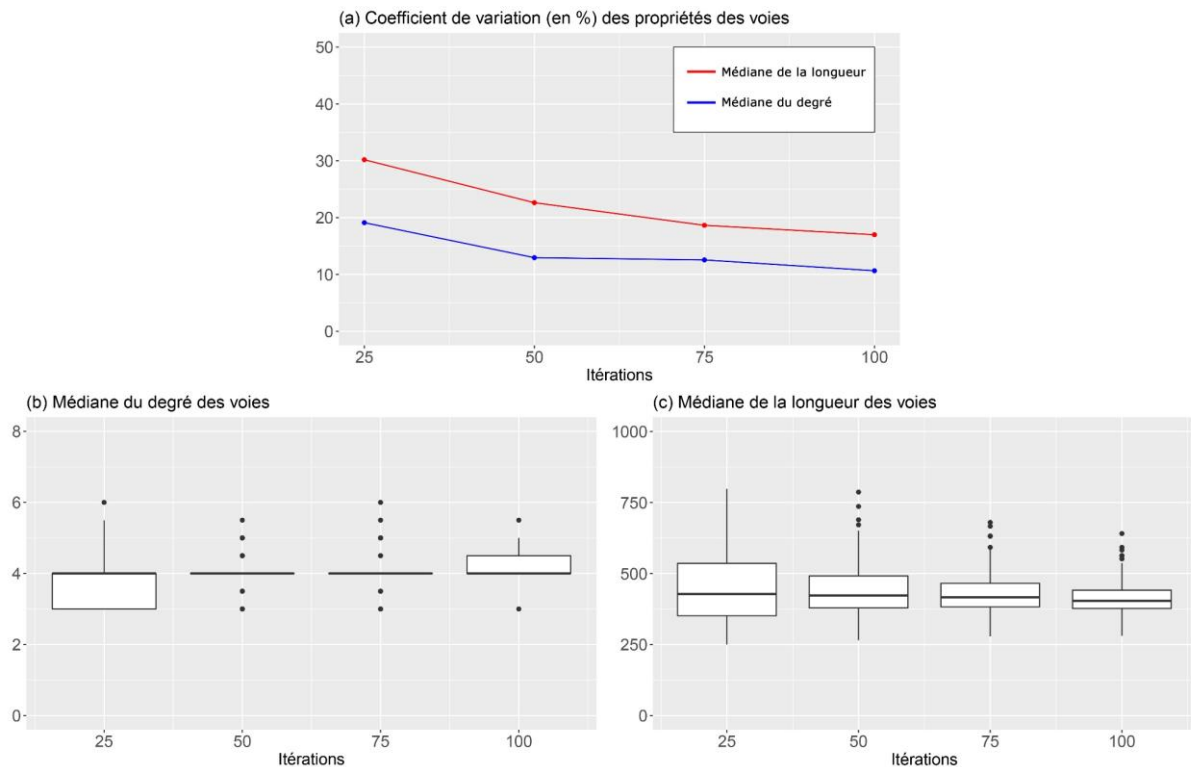


Figure 9.7. Variabilité des résultats entre les 100 répliques de la simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Coefficient de variation (en %) des médianes d'indicateurs caractérisant les voies. (b) Dispersion statistique de la médiane du degré des voies. (c) Dispersion statistique de la médiane de la longueur des voies.

En se basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que les résultats à l'échelle du graphe viaire montrent un niveau d'instabilité relativement faible. En effet, le coefficient de variation n'excède pas 10 % pour les propriétés du graphe à la fin de la simulation. Ce coefficient est en dessous de 20 % pour les propriétés des voies à l'itération 100 également. La variabilité des résultats de simulation étudiés est donc principalement observée à l'échelle des voies. Cette instabilité relative reflète principalement une variation des caractéristiques morphologiques locales des réseaux simulés. En revanche, les propriétés topologiques, structurales et globales (à l'échelle du graphe viaire) se stabilisent à mesure que le réseau évolue au cours de la simulation. Ces résultats sont cohérents avec l'objectif au modèle, qui est de simuler des réseaux dont les formes et les tracés de voies ne sont pas identiques, ce qui signifie qu'elles peuvent présenter des caractéristiques topo-géométriques différentes localement, tout en présentant des propriétés topologiques similaires à l'échelle du graphe viaire.

9.1.2.4 Détermination du seuil de stabilité

Effectuer 100 réplifications de chaque simulation est contraignant en raison de temps de calculs longs et d'un grand nombre de données de sortie nécessaires pour calculer les valeurs moyennes des résultats. Il importe donc de déterminer si un niveau de stabilité suffisant ne peut être atteint qu'à partir de 100 réplifications, ou si le modèle est suffisamment stable pour se fier aux résultats de quelques réplifications, auquel cas l'ajout de réplifications n'améliore pas significativement la stabilité des moyennes calculées. Pour ce faire, une approche par échantillonnage multiple est proposée, qui vise à évaluer la variabilité entre les valeurs de résultats issus d'échantillons de différentes tailles et à examiner visuellement l'évolution de cette variabilité au cours de la simulation.

À partir des 100 réplifications analysées précédemment et en considérant uniquement l'étape finale de la simulation (itération $N = 100$), des échantillons de tailles R différentes ont été créés en utilisant des tirages aléatoires en "bootstrap"⁵⁵. Plus le nombre de tirages est élevé, plus les résultats seront robustes mais cela augmentera également le temps de calcul. Les tirages aléatoires d'échantillons ont été reproduits 1000 fois pour chaque taille d'échantillon R .

Le coefficient de variation est utilisé pour mesurer la variabilité entre les valeurs de résultats à l'échelle du graphe viaire et à l'échelle des voies. Les résultats sont interprétés en se basant sur les valeurs de la médiane, du premier et du dernier décile des 1000 coefficients de variation des résultats pour chaque taille d'échantillon (R variant de 2, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 réplifications, soit un total de 11 tailles d'échantillons testées).

En analysant l'évolution de ces valeurs, on peut évaluer à quel point la stabilité des résultats est affectée par le nombre de réplifications effectué.

Les distributions des coefficients de variation pour l'ensemble des variables considérées présentent une forte homogénéité à partir des échantillons de taille $R = 10$ réplifications (Figure 9.8 et Figure 9.9). Les valeurs des premiers déciles et derniers déciles convergent fortement vers la valeur médiane des 1000 coefficients de variation à partir des échantillons de taille $R = 10$.

⁵⁵ Les tirages aléatoires en "bootstrap" sont une technique de rééchantillonnage statistique utilisée pour estimer la distribution d'échantillonnage d'une statistique d'intérêt. Cette méthode consiste à créer de multiples échantillons de la même taille que l'échantillon d'origine en prélevant des éléments de l'échantillon d'origine de manière aléatoire avec remplacement.

En ce qui concerne spécifiquement le nombre de voies, le nombre de nœuds et le nombre de segments, la variation entre les échantillons de taille $R = 2$ et ceux de taille $R = 10$ augmente de manière relativement faible à mesure que la taille de l'échantillon augmente (Figure 9.9). En revanche, pour les médianes du degré et de la longueur des voies, les valeurs des premiers déciles et derniers déciles s'éloignent davantage de la valeur médiane pour des échantillons de taille $R=2$ et $R=10$ (Figure 9.8).

À partir de 10 simulations, le gain de stabilité entre deux tailles d'échantillons est insignifiant pour les propriétés du graphe et négligeable pour les propriétés des voies. Le seuil de stabilité pour le calcul d'un résultat de simulation moyen se situe donc aux alentours de 10 réplifications.

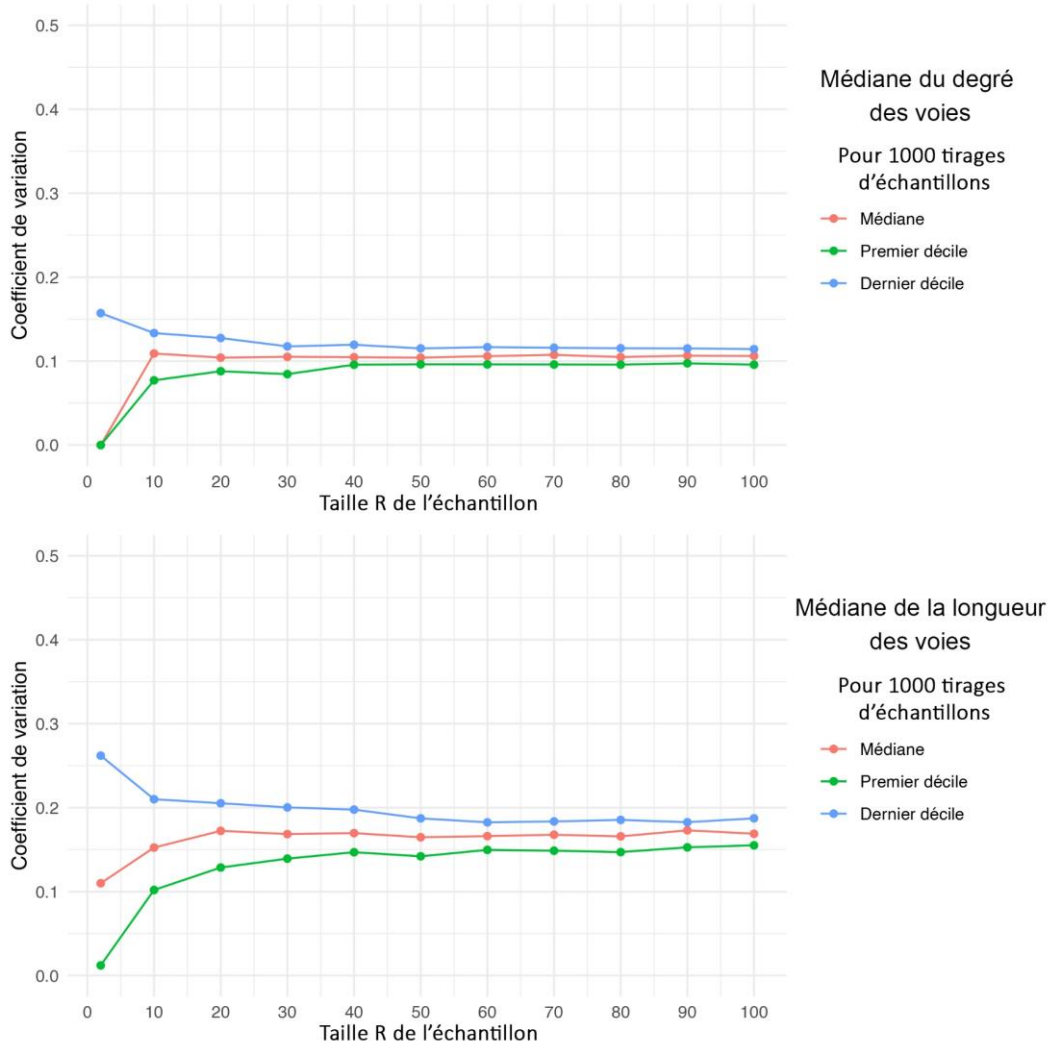


Figure 9.8. Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 tirages d'échantillons selon la taille R de l'échantillon - Propriétés des voies.

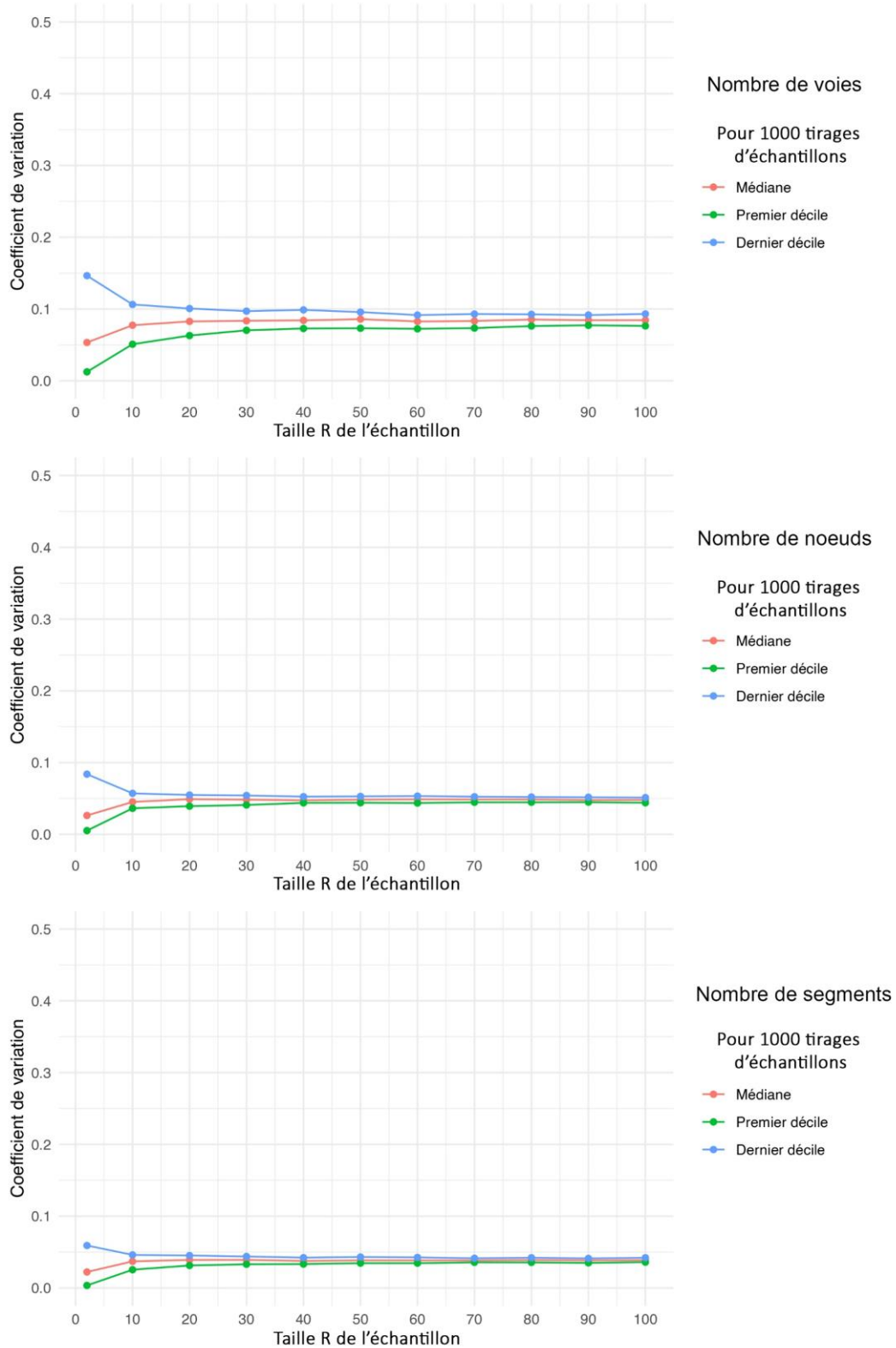


Figure 9.9. Evolution des valeurs de coefficients de variation pour les 1000 tirages d'échantillons selon la taille R de l'échantillon - Propriétés du graphe viaire.

9.1.2.5 Bilan de l'analyse de stabilité

Cette analyse met en évidence une certaine cohérence dans les résultats du modèle pour les 100 réplifications de simulation avec les valeurs de paramètres définies par défaut. Les coefficients de variation affichent des valeurs généralement faibles pour les résultats à l'échelle du graphe viaire, mais à l'échelle des voies ils présentent des valeurs plus importantes. En général, cette variabilité diminue au fil des itérations, démontrant la même tendance de comportement tout au long de la simulation.

Les simulations faites pour l'analyse de stabilité comportent un nombre d'itérations assez réduit (100 itérations), permettant de simuler la morphogénèse du réseau viaire d'un centre-ville historique tandis que la simulation de réseaux viaires de plus grande taille requerrait un nombre d'itérations bien plus élevé⁵⁶. La tendance à la diminution progressive de la variabilité au fil des itérations est un point positif car elle permet de supposer que la simulation de réseaux de plus grande taille présentera une stabilité accrue.

Les résultats pour déterminer le seuil de stabilité indique qu'idéalement, un minimum de 10 réplifications est requis, toutefois, un nombre moindre demeure également acceptable. Les coefficients de variation des valeurs de médiane des échantillons de réplifications de la taille R=2 et des échantillons de la taille R=10 ne présentent pas de grandes différences. La variabilité des résultats de simulation considérant un nombre de réplifications très faible (inférieur à 10) est donc acceptable.

Compte tenu du nombre relativement important de calculs nécessaires pour les analyses ultérieures que nous allons réaliser, en particulier pour l'analyse de sensibilité, et du grand nombre de tests manuels requis pour le calibrage et la validation du modèle, il est donc tout à fait envisageable de se limiter à une seule et unique simulation.

9.1.3 Analyse exploratoire de sensibilité de WayMorph

9.1.3.1 Protocole d'analyse de sensibilité adopté

L'analyse de sensibilité consiste à explorer le comportement du modèle à travers l'étude des effets de la variation des conditions initiales sur les résultats. Cela s'entend en termes de valeurs des paramètres et de réseau d'initialisation d'une simulation. Nous adoptons un

⁵⁶ À titre d'exemple le réseau viaire de Dijon en 2019, englobé dans une zone étendue d'environ 200 km² autour du centre-ville, comporte plus de 30 000 nœuds. Ainsi la simulation d'un réseau de la même taille en termes de nombre de nœuds nécessiterait jusqu'à 30 000 itérations.

protocole inspiré de l'analyse de sensibilité menée dans le cadre de la thèse de Hirtzel (2015), mais en se basant sur une seule simulation à la fois (sans réplication), ce qui se justifie au regard de l'objectif inhérent à la conception du modèle qui est d'atteindre des résultats thématiques cohérents avec les mécanismes de morphogénèse modélisés.

Dans un premier temps, l'objectif de cette analyse sera de décrypter **l'effet de chaque paramètre** sur le comportement du modèle indépendamment des interactions entre les paramètres. Pour ce faire, une analyse avec la méthode OAT (en modifiant les valeurs de chacun des paramètres les unes après les autres) combinée à une analyse graphique (de certains indicateurs de sorties par rapport aux valeurs d'un paramètre à la fois) nous semblent pertinentes. Ceci nous permettra d'évaluer qualitativement et quantitativement l'impact des valeurs de paramètres sur différents résultats de simulation.

Dans un second temps, la sensibilité aux conditions initiales sera étudiée, plus précisément la variation des résultats de simulation par rapport au **réseau d'initialisation du modèle**. Les propriétés topologiques et géométriques des réseaux à un moment donné peuvent être expliquées par la trajectoire historique particulière qui y a conduit (Louf et al., 2013). La dépendance des propriétés des réseaux à l'égard du chemin parcouru ("*path dependency*") est explorée dans plusieurs études de croissance et de modélisation de réseaux de transport (Barthélemy & Flammini, 2008; Black, 1971; Gastner & Newman, 2006b). Dans ces modèles, les graphes sont construits itérativement par le biais d'une optimisation. Pour le modèle WayMorph, cette optimisation est basée sur le potentiel d'attraction du réseau existant, c'est pourquoi il est particulièrement important d'explorer et d'évaluer les résultats par rapport au réseau d'initialisation. Pour répondre à ce deuxième objectif de l'analyse de sensibilité, nous adopterons une analyse graphique des distributions des indicateurs de sorties au regard de différents réseaux initiaux.

L'analyse des résultats repose sur deux aspects distincts. D'une part, une comparaison visuelle des réseaux simulés avec chaque valeur de paramètres est effectuée. Et d'autre part, une observation qualitative visuelle de graphiques présentant les 5 indicateurs considérés précédemment dans l'analyse de stabilité, à savoir le nombre de voies, le nombre de nœuds et le nombre de segments à l'échelle du graphe, ainsi que le degré et la longueur calculés à l'échelle des voies. Ces graphiques présentent les relations des données d'entrée ou des valeurs de paramètres avec les valeurs des indicateurs à l'échelle du graphe, d'une part, et les valeurs médianes pour les indicateurs calculés à l'échelle des voies, d'autre part. Les

distributions du degré et de la longueur des voies sont aussi présentées pour les différentes valeurs testées de chaque paramètre.

Pour l'analyse de l'impact des valeurs de paramètres, nous nous focalisons uniquement sur la compréhension des comportements de chaque paramètre, indépendamment des autres paramètres. Pour l'analyse de l'impact du réseau initiateur, nous nous concentrons simplement sur la variation de la forme globale du réseau d'initialisation, indépendamment des autres propriétés topologiques.

Nous proposons donc un protocole d'analyse de sensibilité qui comprend les étapes suivantes :

- **Sensibilité à la modification des valeurs de paramètres :**
 - Simulation en variant un seul paramètre à la fois
 - Comparaison visuelle des réseaux viaires simulés obtenus pour chaque valeur du paramètre testé.
 - Analyse graphique (visuelle) de l'effet de la variation de la valeur du paramètre sur les valeurs des trois indicateurs caractérisant le graphe viaire (nombre de segments, nombre de nœuds et nombre de voies) et sur les valeurs médianes et les distributions de deux indicateurs caractérisant les voies (médiane du degré et médiane de la longueur).
- **Sensibilité au réseau d'initialisation**
 - Simulation en variant l'initiateur du modèle
 - Comparaison visuelle de la différence entre chacun des résultats de simulation obtenus pour chaque initiateur
 - Analyse graphique de l'hétérogénéité des valeurs moyennes des indicateurs de sortie selon les valeurs de paramètres testées.
 - Analyse graphique des distributions des indicateurs de sortie selon les valeurs de paramètres testées.

Tests réalisés

L'analyse de la sensibilité globale permet d'explorer la sensibilité des résultats de simulation à des modifications des valeurs de chaque paramètre.

Cette analyse porte sur les principaux paramètres du modèle : le paramètre d'organisation P_e , le paramètre de construction ω , la distance de répulsion r_0 , le paramètre de compacité η et le facteur et la probabilité d'étalement k_{ext} et f_{ext} . Il convient de noter que le paramètre

d'amplitude α n'est pas pris en compte lors des tests, ainsi que le facteur de séparation c . Pour rappel, les paramètres de choix binaires ne sont pas inclus dans les tests.

Pour un même test de paramètre, les mêmes conditions initiales sont appliquées avec le même réseau d'initialisation et les mêmes valeurs des paramètres autres que celui qui est en cours de variation. Pour un même test de réseau d'initialisation les mêmes valeurs de paramètres sont fixées. Pour les deux tests les paramètres de choix binaires ne sont pas activés.

Pour chaque simulation, la valeur du paramètre à tester reste constante tout au long de la durée de la simulation, qui correspond à $N=100$ itérations. Chaque paramètre est ensuite varié en utilisant une valeur différente pour chaque simulation. Le nombre de valeurs à tester peut varier en fonction du paramètre considéré. Nous discuterons le choix des valeurs de paramètres à tester ultérieurement (voir sous-section 9.1.3.1).

- **Tests 1 :**

- Variation d'un seul paramètre à la fois
- Même nombre d'itérations $N = 100$
- Un seul et même réseau initial (initiateur) : un ensemble réduit de segments (le réseau initial est par défaut composé de 4 segments)
- Valeur par défaut pour les paramètres : $\alpha = 1$; $r_0 = 100$; $\eta = 0.5$; $\omega = 0.5$; $f_{\text{ext}} = 0.1$; $k_{\text{ext}}=3$; $l_{\text{max}} = 400$; $c = 0.3$; $W_{\text{op}} = 0$; $E_{\text{pp}} = 0$; $O_{\text{p}} = 0$; $A_s = 60$; $A_i = 60$.

- **Tests 2 :**

- Nombre d'itérations $N = 100$
- 12 réseaux initiaux (initiateurs) différents
- Valeur par défaut pour les paramètres : $\alpha = 1$; $r_0 = 100$; $\eta = 0.5$; $\omega = 0.5$; $f_{\text{ext}} = 0.1$; $k_{\text{ext}}=3$; $l_{\text{max}} = 400$; $c = 0.3$; $W_{\text{op}} = 0$; $E_{\text{pp}} = 0$; $O_{\text{p}} = 0$; $A_s = 60$; $A_i = 60$.

Pour mémoire, une seule simulation est effectuée pour chacun des tests. Les résultats de simulation présentés correspondent à l'itération 100 de cette simulation.

Présentation et lecture des résultats

L'analyse visuelle consiste à examiner visuellement les réseaux simulés, pour ensuite interpréter l'impact des valeurs des paramètres. Les résultats de l'analyse graphique se présente de deux manières :

- Une représentation graphique des valeurs du paramètre testé sur l'axe des abscisses en fonction des résultats de valeur unique (par exemple : le nombre de segments ou la médiane du degré des voies) sur l'axe des ordonnées (Figure 9.10 - (a)).
- Une représentation graphique des distributions des valeurs du résultat de simulation, avec les valeurs de chaque variable analysée en résultat (ex. le degré des voies) sur l'axe des abscisses. L'axe des ordonnées représente le nombre de voies. Chaque courbe représente la distribution des valeurs du résultats pour une valeur de paramètre testée (Figure 9.10 - (b)).

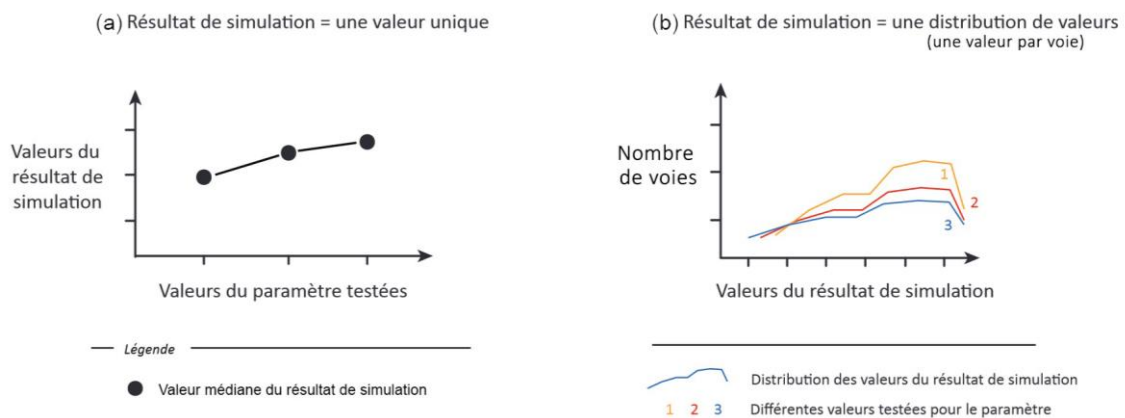


Figure 9.10. Présentation et lecture des résultats de l'analyse de sensibilité selon la nature du résultat de simulation analysé. Figure adaptée de (Hirtzel, 2015)

L'impact du réseau d'initialisation sur les valeurs d'une même variable est également étudié. Les résultats sont présentés et analysés de manière similaire à celle de la Figure 9.10 avec quelques modifications. Sur le graphique (a), les identifiants des réseaux d'initialisation sont représentés sur l'axe des abscisses, et sur le graphique (b), chaque courbe illustre la distribution des valeurs des résultats pour un réseau d'initialisation testé.

Choix des valeurs de paramètres à tester

La sélection des valeurs à tester joue un rôle crucial dans l'analyse de sensibilité locale. Étant donné que l'analyse de la sensibilité des résultats de simulation repose entièrement sur la variation indépendante des paramètres (Ginot & Monod, 2007; Hirtzel, 2015; Richiardi et al., 2006). Les valeurs de paramètres sont généralement testées à l'intérieur de l'intervalle d'incertitude généralement délimité (Schouten et al., 2014) et qui est compris dans un intervalle plus large qui correspond à l'ensemble des valeurs possibles pour un paramètre donné (Ginot & Monod, 2007). Il est courant d'utiliser une valeur centrale comme référence (ou valeur par défaut) et de la faire varier d'un écart-type équivalent à la distribution possible

(Hamby, 1994). D'autres études se limitent aux valeurs minimale et maximale que le paramètre peut prendre (Happe, 2005; Schouten et al., 2014).

Pour WayMorph, les valeurs à tester ont été choisies différemment pour chaque paramètre, et leur sélection résulte de certains objectifs que nous expliciterons comme suit :

Tout d'abord, le premier objectif est d'approcher des valeurs pertinentes permettant de reproduire certaines morphologies de réseaux. Ainsi certains paramètres, dont la conception est en relation directe avec la géométrie métrique du réseau, seront testés plus minutieusement par rapport à d'autres. L'écart entre les valeurs choisies n'est pas régulier et chaque valeur a été sélectionnée en fonction de chaque paramètre.

Ensuite, pour faciliter le calibrage des paramètres, nous avons accordé une attention particulière aux valeurs qui semblaient appropriées pour atteindre les objectifs de paramétrage du modèle. Par conséquent, le nombre de valeurs testées varie pour chaque paramètre.

Enfin, afin d'explorer de manière approfondie le comportement du modèle, des valeurs extrêmes sont aussi testées dans le but de déterminer ses limites et obtenir des résultats potentiellement plus tranchés.

Les valeurs utilisées pour l'analyse de sensibilité de WayMorph sont présentées dans le Tableau 9.2. Chaque test est réalisé en maintenant les autres paramètres à leurs valeurs par défaut. L'explication du choix des valeurs pour chaque paramètre sera donnée au fur et à mesure de la présentation des résultats.

Paramètre	Nom	Intervalle de variation possible	Valeur par défaut	Valeurs testées
P_e	Paramètre d'organisation	[0, 1]	0.5	0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 0.99
ω	Paramètre de construction	[0, 1]	0.5	0 ; 0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1
r_0	Distance de répulsion	[10, 1000]	100	10 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200
η	Paramètre de compacité	[0.2, 1.2]	0.6	0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1.2
k_{ext}	Facteur d'étalement	[1, 10]	3	1 ; 3 ; 5 ; 7 ; 10
f_{ext}	Fréquence d'étalement	[0, 1]	0.1	0.2 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.8
l_{max}	Longueur maximale	[100, 1200]	400	200 ; 400 ; 600 ; 800 ; 1000
A_i	Angle minimal d'intersection	[20°, 90°]	60	20 ; 30 ; 40 ; 60 ; 80
A_s	Angle minimal de séparation	[20°, 90°]	60	20 ; 30 ; 45 ; 60 ; 90

Tableau 9.2. Valeurs de paramètres testées dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle WayMorph

Choix des réseaux d'initialisation à tester

Afin de tester la sensibilité du modèle au réseau d'initialisation, différentes simulations ont été réalisées à partir de 12 initiateurs différents (Figure 9.11). Ces initiateurs peuvent correspondre à un segment unique, un ensemble de segments, ou au squelette initial des réseaux historiques de Dijon, Besançon ou Pontarlier (voir partie 1, sous-section 3.3.1).

Les 12 initiateurs différents correspondent à :

- 5 segments initiateurs : un segment horizontal, un segment vertical, deux segments croisés centralement, deux segments croisés en L, un ensemble de 4 segments.
- 4 initiateurs de voie(s) traversante(s) : deux voies croisées centralement, deux voies croisées en T, deux voies croisées en branchement Y, une voie radiale.
- 3 squelettes de réseaux historiques réels de Dijon, Besançon et Pontarlier.

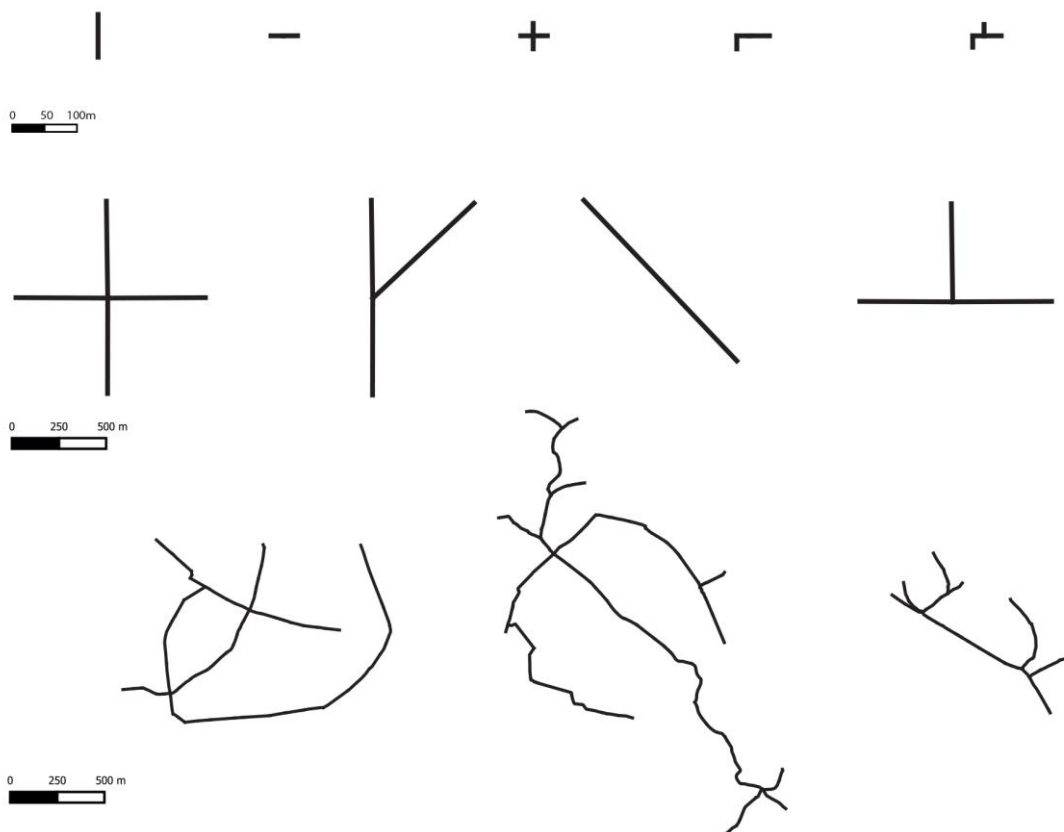


Figure 9.11. Réseaux d'initialisation testés.

9.1.3.2 Sensibilité à la modification des valeurs des paramètres

Sensibilité au paramètre d'organisation P_e

Le paramètre d'organisation P_e induit un effet d'aléa dans le modèle par, qui influence la sélection des nouveaux nœuds par rapport à la valeur de potentiel. L'ordre de grandeur des valeurs de ce paramètre est de 0 à 1. Visuellement, la variation des valeurs de ce paramètre n'influence pas la forme globale des réseaux simulés (Figure 9.12). Néanmoins, les différents tests révèlent que les valeurs influencent nettement le temps de calcul pour la sélection d'un nouveau nœud, une valeur de P_e élevée implique une durée de simulation plus importante.

L'analyse graphique des résultats de simulation en fonction des valeurs du paramètre testées démontre une stabilité des propriétés à l'échelle du graphe viaire, en particulier en ce qui concerne le nombre de nœuds et de segments (Figure 9.13 - (b) et (c)). Cependant, une légère augmentation du nombre de voies est remarquée entre les valeurs de $P_e = 0.4$ et $P_e = 0.8$ (Figure 9.13 - (a)), ce qui peut être interprété comme le résultat d'une favorisation de la continuité entre les segments créés par une valeur élevée du paramètre d'organisation P_e . En outre, les médianes du degré et de la longueur des voies ne sont pas impactées par la modification des valeurs de P_e (Figure 9.14), à l'exception d'une fluctuation à $P_e = 0.8$.

L'analyse graphique des résultats de simulation met aussi en évidence une stabilité des distributions du degré et de la longueur des voies (Figure 9.15). Toutefois, les valeurs les plus élevées de P_e se traduisent par des courbes de distribution présentant un pic plus élevé. Cela indique qu'une valeur élevée du paramètre P_e favorise la connectivité du réseau.

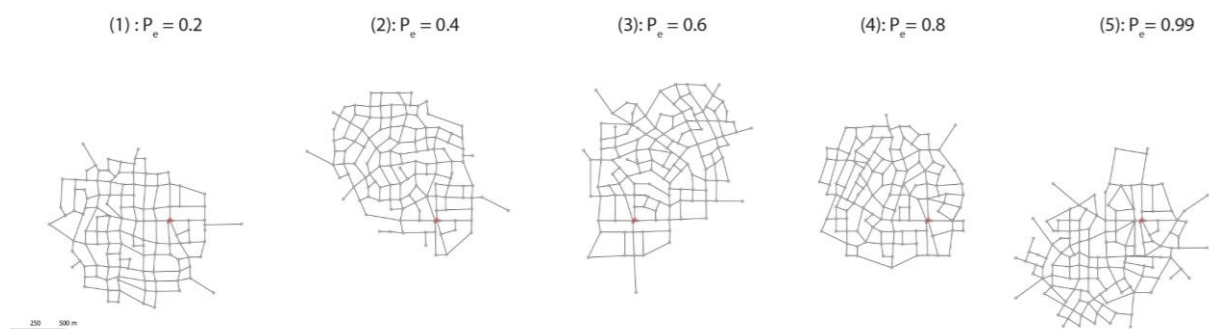


Figure 9.12. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre d'organisation P_e . (Les segments d'initialisation sont représentés en rouge).

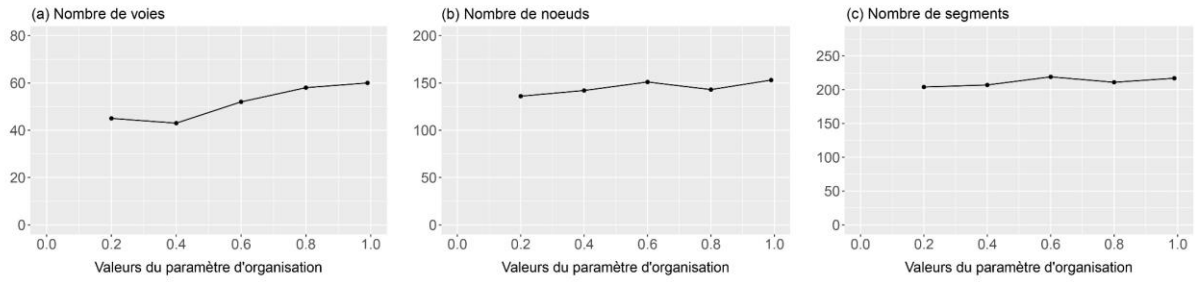


Figure 9.13. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

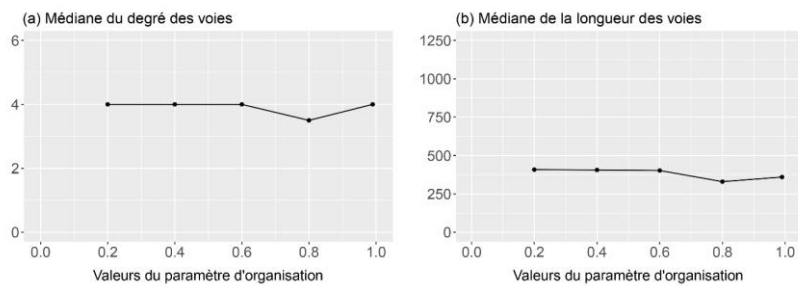


Figure 9.14. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e .

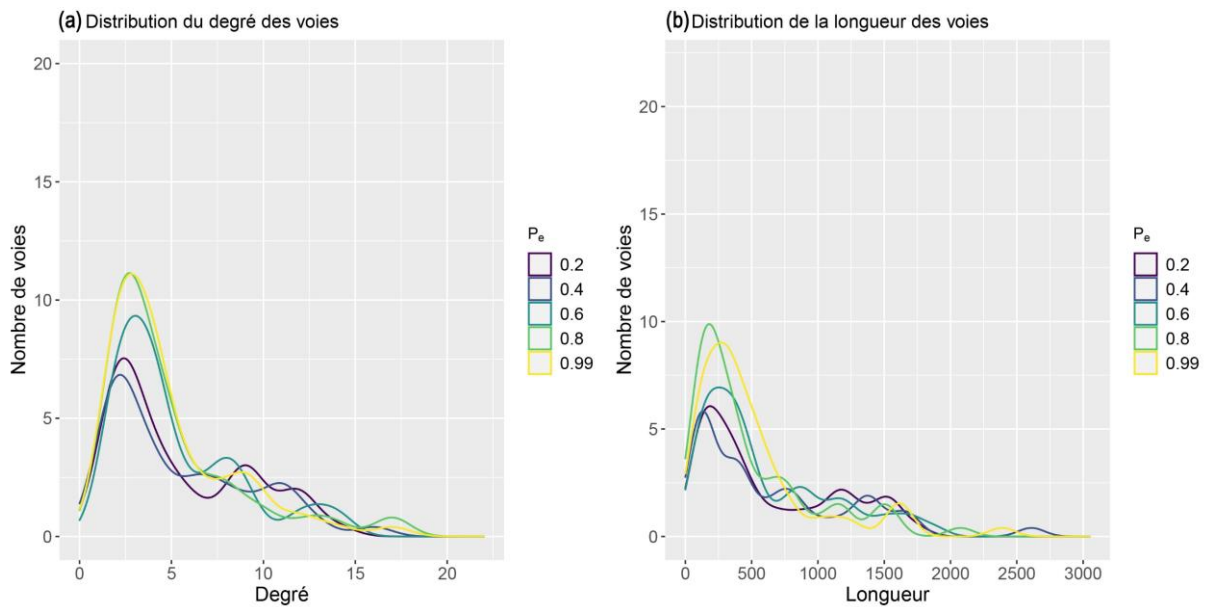


Figure 9.15. Sensibilité de la distribution (a) du degré (a) et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e .

Sensibilité au paramètre de construction ω

Le paramètre de construction ω influence la création de nouveau(x) segment(s) pour connecter le nouveau nœud au réseau existant à chaque itération de la simulation. L'ordre de grandeur des valeurs de ce paramètre est de 0 à 1. Une valeur de $\omega = 0$ induit une connexion du nouveau nœud au réseau existant avec seulement le segment le plus court ; une valeur de $\omega = 1$ induit connexion du nouveau nœud au réseau existant avec tous les segments réalisables. Les tests de sensibilité du modèle par rapport au paramètre de construction ω sont menés avec 6 valeurs différentes [0 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 0,8 ; 1].

La visualisation des graphes viaires démontre que les résultats des simulations sont cohérents avec les objectifs prédéfinis de la variation de ce paramètre. La variation des valeurs de ce paramètre permet de créer une variété de réseaux arborescents ou maillés (Figure 9.16).

Une évolution globale des propriétés à l'échelle du graphe viaire est mise en évidence par l'analyse graphique des résultats de simulation en fonction des valeurs du paramètre testées (Figure 9.17). En particulier, nous observons une nette augmentation du nombre de segments avec l'augmentation de la valeur du paramètre de construction (Figure 9.17 - (c)).

Une forte augmentation de la médiane du degré des voies est observée avec l'augmentation de la valeur de ω , mais celle-ci se stabilise à partir des valeurs moyennes de ω ($\omega = 0.4$ et $\omega = 0.6$) (Figure 9.18 - (a)). Parallèlement, une augmentation de la médiane de la longueur des voies est également constatée pour les valeurs les plus fortes ($\omega = 0.8$ et $\omega = 1$), bien que de manière moins marquée (Figure 9.18 - (b)), ce qui indique la présence de voies plus longues.

L'analyse graphique des résultats de simulation révèle une uniformité des formes globales des distributions du degré et de la longueur des voies (Figure 9.19). Cependant, les valeurs les plus faibles de ω sont associées à une prédominance de voies à degré 1, qui indique une prédominance d'impasses dans le réseau. Inversement les valeurs les plus élevées se traduisent par une prédominance de voies à degré 3, favorisant la connectivité du réseau (Figure 9.19 - (a)). Par ailleurs, la queue de la courbe des longueurs des voies est plus étirée pour les valeurs les plus élevées de ω , ce qui témoigne de la présence de quelques voies exceptionnellement longues (Figure 9.19 - (b)).

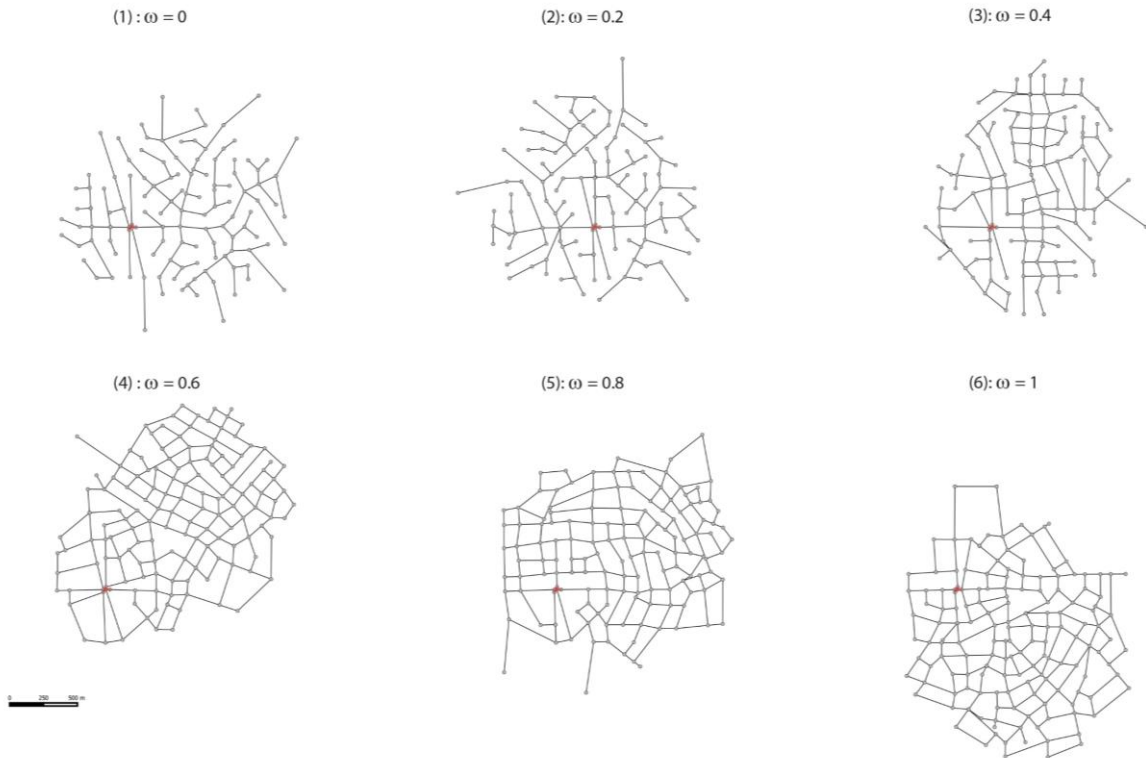


Figure 9.16. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre de construction ω .

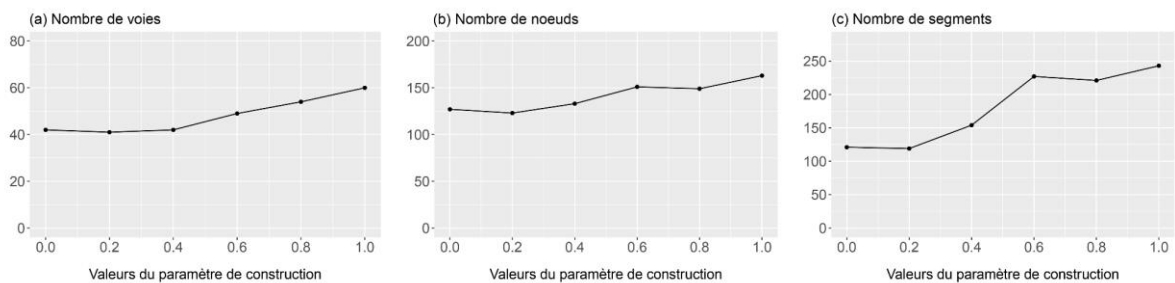


Figure 9.17. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre construction ω : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

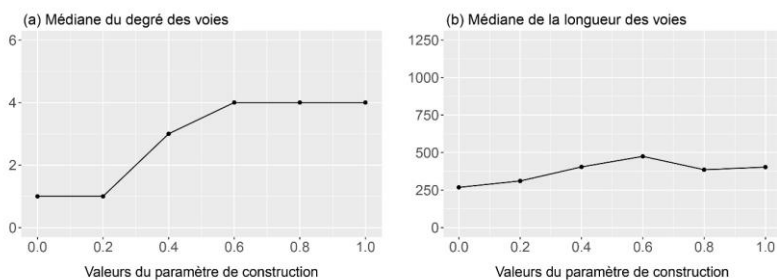


Figure 9.18. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre construction ω .

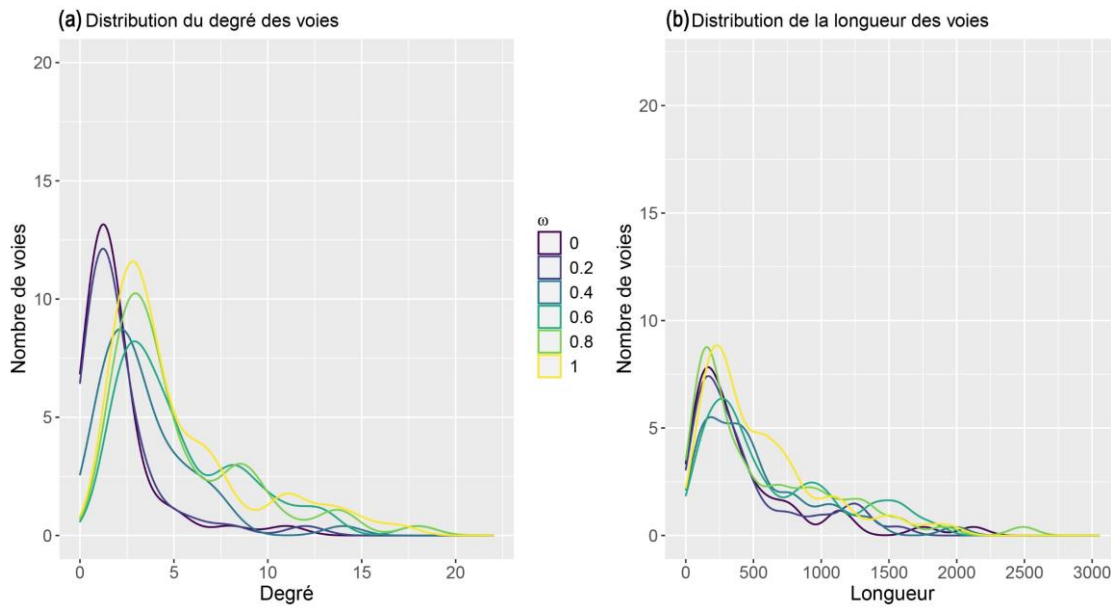


Figure 9.19. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre construction ω .

Sensibilité aux paramètres relatifs à la densification et l'étalement du réseau

Les tests des paramètres relatifs à la densification et l'étalement du réseau portent sur la variation respective des valeurs de cinq paramètres : la distance de répulsion r_0 , le paramètre de compacité η , la longueur maximale l_{max} , le facteur k_{ext} et la fréquence d'étalement f_{ext} .

- **Sensibilité à la distance de répulsion r_0**

Une simulation avec une valeur très faible de la distance de répulsion r_0 génère un graphe viaire d'une taille tellement petite qu'elle n'en est pas réaliste. Une distance de répulsion très faible ne respecte pas la largeur minimale d'un îlot urbain (qui dépassent généralement les 10 mètres). Une valeur intermédiaire permet de générer un réseau viaire délimitant des îlots de taille moyenne (avec un espacement approximatif de 50 à 100 mètres entre les intersections), ce qui est souvent le cas au niveau du centre historique. Tandis qu'une valeur élevée génère un réseau viaire délimitant des îlots de très grande taille, semblable à un tissu viaire en périphérie de la ville, de zonage industriel (avec un espacement approximatif qui dépassent 150 mètres entre les intersections).

Le choix des valeurs de ce paramètre pour chaque simulation dépendra donc de l'objectif de simulation lié à la densification ou à l'étalement du réseau. En modifiant les valeurs de ce paramètre, il sera possible de générer une diversité de réseaux viaires correspondant aux caractéristiques urbaines souhaitées (Figure 9.20).

Sur la représentation graphique des résultats de simulation, il apparaît globalement une tendance à la diminution des propriétés à l'échelle du graphe viaire lorsque la valeur de la distance de répulsion augmente (Figure 9.21). À l'inverse, les médianes du degré et de la longueur des voies augmentent à mesure que les valeurs augmentent (Figure 9.22). L'analyse graphique met en évidence une variation des distributions du degré et de la longueur des voies, avec des pics plus élevés pour la valeur la plus élevée de $r_0 = 200$ et la plus faible $r_0 = 10$ (Figure 9.23). En ce qui concerne le degré des voies, cela indique la prédominance de voies de degré 2 indiquant la présence de voies peu connectées. En ce qui concerne la distribution de la longueur des voies, les simulations avec des valeurs faibles impliquent principalement la création de voies courtes, entraînant un empilement rapide de la courbe avec une longueur maximale qui ne dépasse pas 1,5 km. En revanche, les réseaux simulés avec des valeurs élevées sont caractérisés à la fois par la présence de voies courtes et de voies continues très longues, dont la longueur maximale atteint les 3 km (Figure 9.23 - (b)).

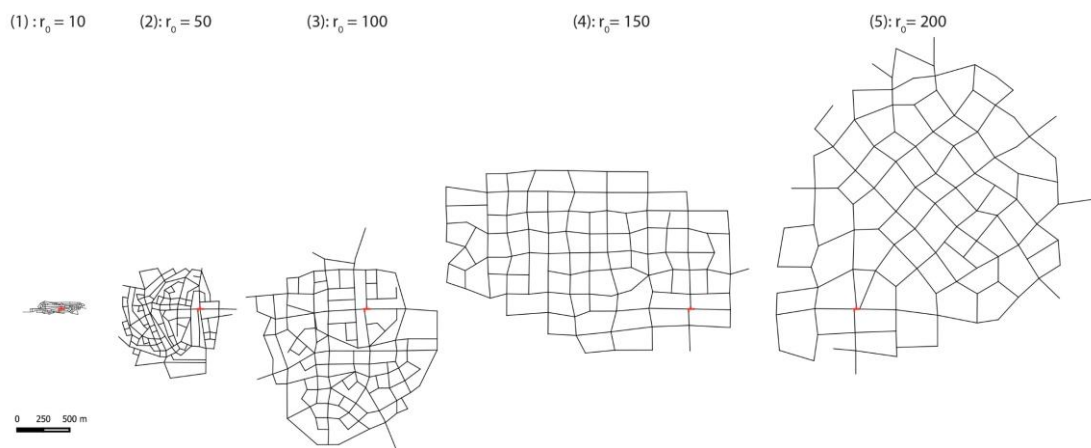


Figure 9.20. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la distance de répulsion (1) $r_0 = 10$; (2) $r_0 = 50$; (3) $r_0 = 100$; (4) $r_0 = 150$ et (5) $r_0 = 200$.

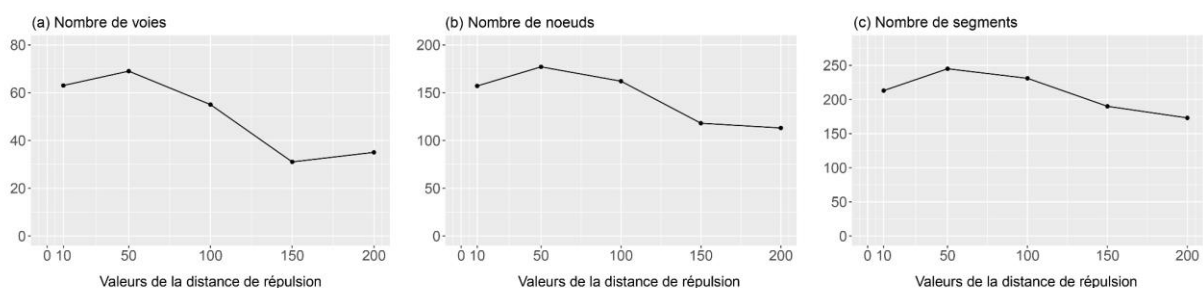


Figure 9.21. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0 : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

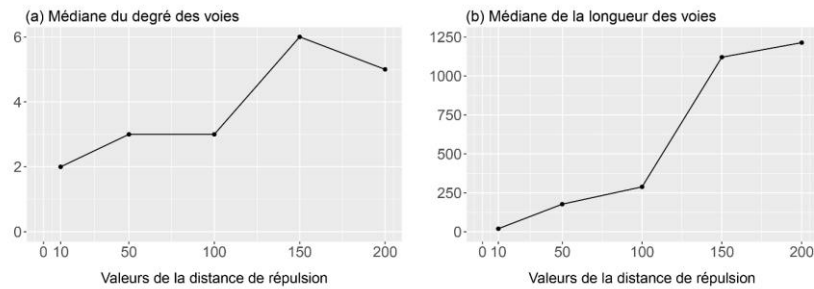


Figure 9.22. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0 .

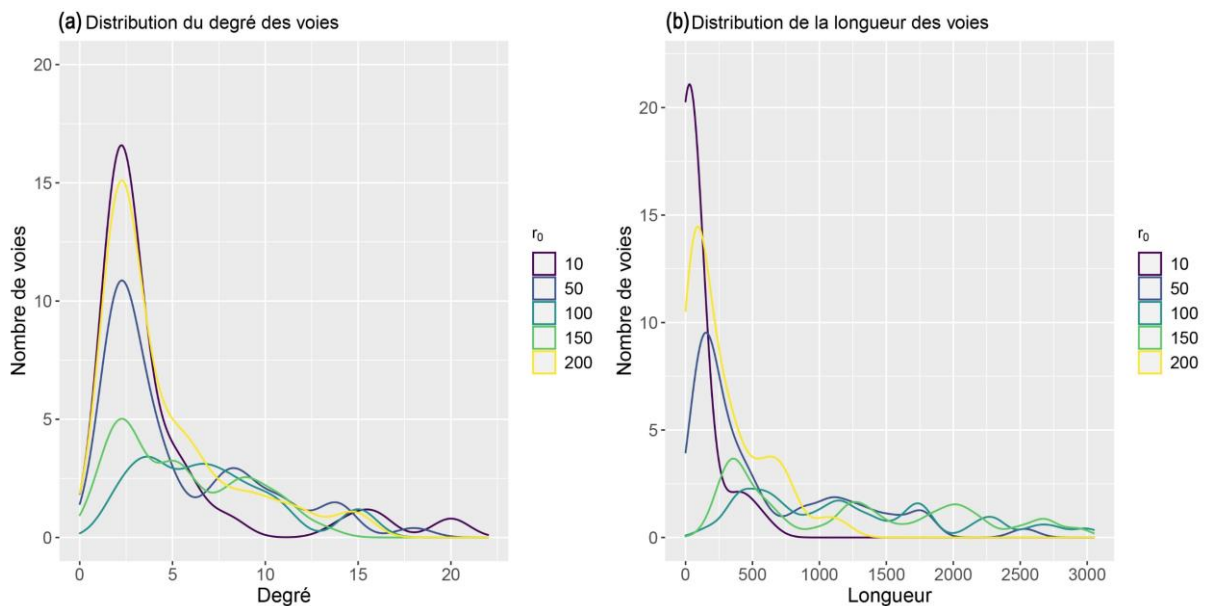


Figure 9.23. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0 .

- **Sensibilité au paramètre de compacité η**

Lors de la visualisation des graphes viaries simulés pour différentes valeurs du paramètre de compacité η , nous observons une variation relativement limitée des résultats de simulation (Figure 9.24). Le réseau simulé avec la valeur la plus élevée de η ($\eta = 1.2$) se révèle nettement plus compact que celui obtenu avec la valeur la plus faible ($\eta = 0.2$). Cependant, les résultats pour les valeurs intermédiaires sont simplement nuancés, sans présenter de changements aussi significatifs.

L'analyse graphique des résultats de simulation en fonction des valeurs du paramètre testées révèle une légère tendance à la diminution du nombre de segments, de nœuds et de voies, proportionnellement à l'augmentation de la valeur de η (Figure 9.25). Les médianes du degré et de la longueur des voies fluctuent avec la modification des valeurs, mais sans démontrer de tendance claire (Figure 9.26). De plus, les courbes des distributions du degré et de la longueur

des voies présentent des pics légèrement plus élevés pour les valeurs les plus faibles de η (avec $\eta = 0.2$ et $\eta = 0.4$) (Figure 9.27). La distribution du degré montre un nombre plus important de voies de degré 3 pour les valeurs les plus faibles de η . Cela indique qu'un réseau moins compact présente une prédominance d'intersection en T, ce qui est révélateur de la présence de voies ramifiées, comme on peut l'observer sur la périphérie du réseau (Figure 9.27 – 1). La distribution de la longueur montre également un nombre plus élevé de voies de longueur approximative de 100 m. Cela indique la prédominance de voies courtes.

En effectuant les tests de sensibilité, l'objectif est d'analyser l'impact spécifique de chaque paramètre de manière indépendante des autres. Toutefois, dans le cadre de l'analyse de la sensibilité au paramètre de compacité η (que nous avons testé ici en appliquant la méthode OAT), nous formulons une hypothèse selon laquelle l'effet de sa variation peut être influencé par les valeurs d'autres paramètres. Ces autres paramètres peuvent à leur tour impacter la surface W de la fenêtre dans laquelle de nouveaux nœuds peuvent être ajoutés. En d'autres termes, les interactions entre les différents paramètres pourraient avoir une incidence sur les résultats obtenus lors de la modification du paramètre de compacité. Ainsi, même avec un paramètre de compacité η relativement faible, la zone de potentiel reste délimitée par la fenêtre W , restreignant l'ajout de nouveaux nœuds uniquement à l'espace compris dans cette fenêtre. La taille de cette fenêtre dépend principalement du paramètre l_{max} , comme expliqué précédemment (voir sous-section 8.4.2). Par conséquent, la variation des valeurs du paramètre d'étalement est influencée de manière sensible par les variations des valeurs de la longueur maximale l_{max} .

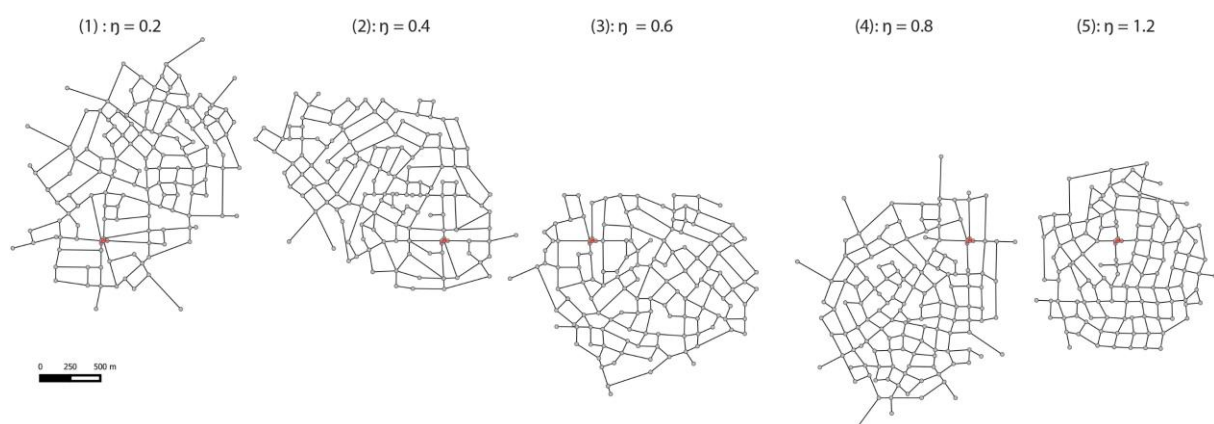


Figure 9.24. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre de compacité (1) $\eta = 0,2$, (2) $\eta = 0,4$; (3) $\eta = 0,6$; (4) $\eta = 0,8$ et (5) $\eta = 1,2$.

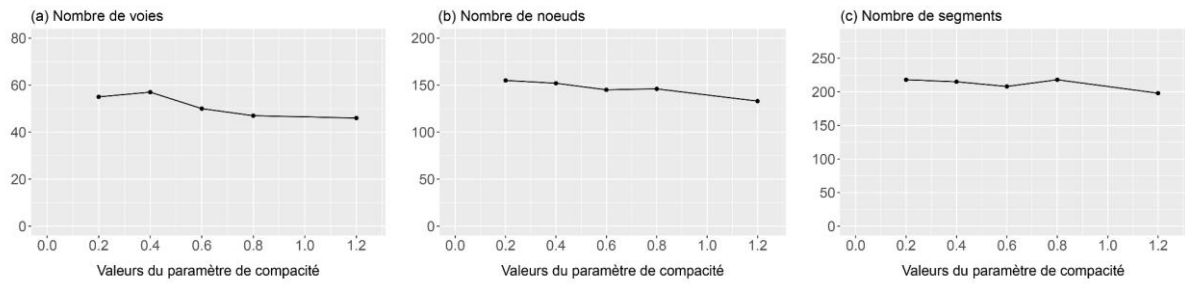


Figure 9.25. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre de compacité η : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

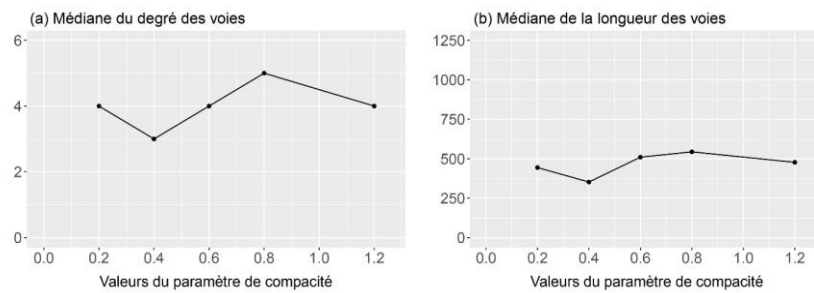


Figure 9.26. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre de compacité η .

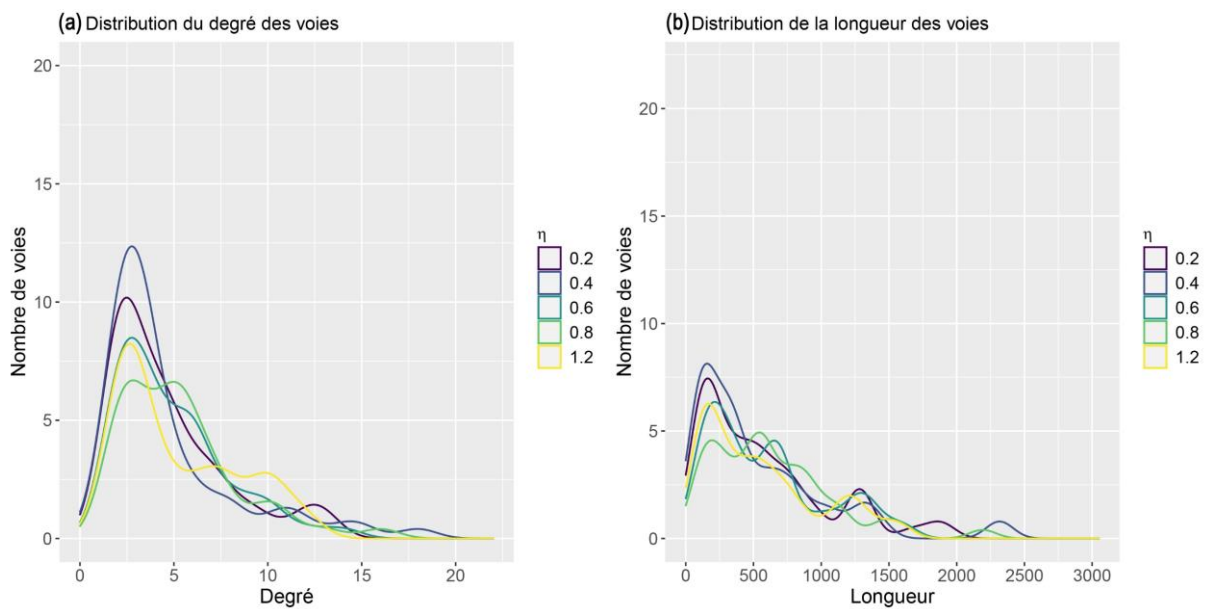


Figure 9.27. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre de compacité η .

- **Sensibilité à la longueur maximale l_{max}**

Les tests sont menés avec différentes valeurs de l_{max} . Cependant, le choix des valeurs les plus faibles à tester est contraint par la valeur par défaut de la distance de répulsion r_0 . Par exemple, il n'est pas possible de tester $l_{max} = 100$ puisque par défaut r_0 est fixée à 100. Il est impératif que l_{max} soit strictement supérieure à r_0 pour que le modèle puisse créer un nouveau nœud.

D'un point de vue visuel, la variation de la longueur maximale l_{max} a un impact sur les résultats des réseaux simulés. Des valeurs faibles génèrent des îlots de petite taille, tandis que des valeurs élevées permettent de simuler à la fois des îlots de grande taille et des îlots de taille moyenne (Figure 9.28).

L'analyse graphique des résultats de simulation en fonction des valeurs du paramètre étudié révèle généralement une croissance du nombre de voies, de nœuds et de segments à mesure que les valeurs de l_{max} sont plus élevées (Figure 9.29). Toutefois, cette tendance est interrompue par la valeur maximale de l_{max} , qui entraîne une diminution de toutes les propriétés du graphe. Cela suggère qu'une augmentation de l_{max} au-delà d'un certain seuil favorise la création de segments alignés plus longs, ce qui conduit à des voies plus longues et donc à une réduction du nombre total de voies dans le graphe. Cette observation est confirmée par l'évolution de la médiane de la longueur des voies (Figure 9.30). En général, la médiane du degré reste relativement stable pour toutes les valeurs de l_{max} , à l'exception d'une diminution observée à $l_{max} = 800$. Cette baisse ponctuelle pourrait être simplement attribuée à l'effet d'aléa du modèle, étant donné que les autres valeurs du paramètre montrent une stabilité globale.

L'analyse graphique des distributions du degré et de la longueur des voies révèle que les valeurs les plus élevées de l_{max} sont associées à des courbes de distribution présentant des pics plus élevés (Figure 9.31). Les valeurs maximales du degré et de la longueur des voies se rapportent à la valeur la plus élevée de l_{max} . Une valeur élevée de l_{max} favorise à la fois la création de voies plus longues de degré élevé traversant l'ensemble de réseau, ainsi que des voies courtes de degré 3 assurant le remplissage interstitiel. Par conséquent, nous pouvons conclure que la variation de l_{max} tout en maintenant une valeur fixe du paramètre de compacité η a une influence sur les résultats, notamment sur la compacité et l'étalement du réseau.

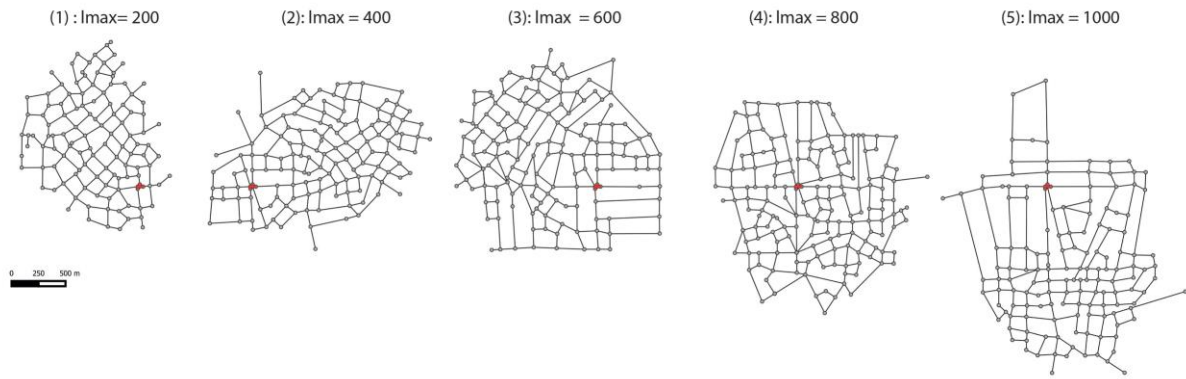


Figure 9.28. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la longueur maximale avec (1) $l_{max} = 200$; (2) $l_{max} = 400$; (3) $l_{max} = 600$; (4) $l_{max} = 800$ et (5) $l_{max} = 1000$.

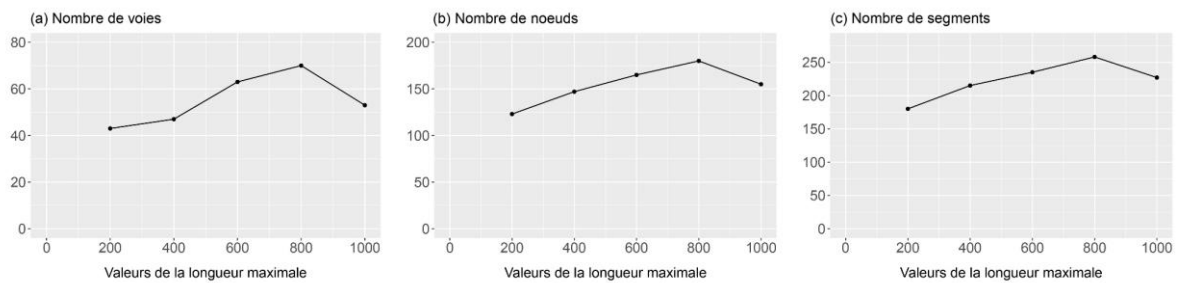


Figure 9.29. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

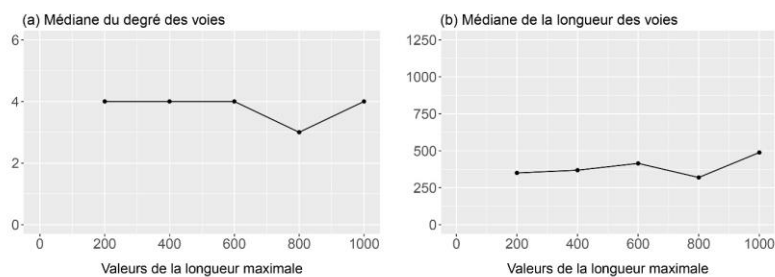


Figure 9.30. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max} .

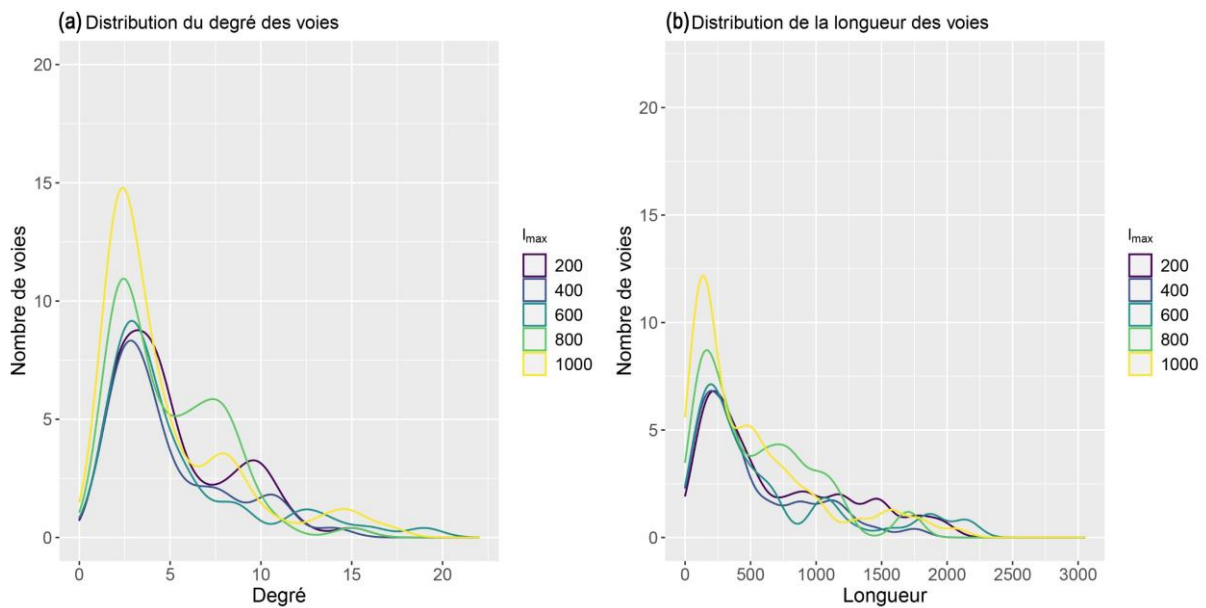


Figure 9.31. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max} .

- **Sensibilité au facteur d'étalement k_{ext}**

L'observation des graphes viaires simulés révèle une sensibilité relativement faible des résultats de simulation à la modification des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} . Le réseau simulé avec la valeur la plus faible de k_{ext} est plus compact que celui simulé avec la valeur la plus élevée (Figure 9.32). Toutefois, les résultats pour les valeurs intermédiaires ne présentent pas de changements aussi marquants.

Le facteur d'étalement k_{ext} modifie le rayon de rejet ($\beta = k_{ext} \times r_0$) avec une probabilité f_{ext} pour forcer un développement extérieur de manière ponctuelle. L'impact de ce paramètre est donc fortement influencé par les valeurs de deux autres paramètres : la distance de répulsion r_0 et la probabilité d'étalement f_{ext} . La valeur par défaut de f_{ext} lors des simulations est de 0.1, ce qui signifie que le facteur d'étalement n'est pas considérablement appliqué sur les 100 itérations, apportant ainsi un faible impact sur les résultats.

Sur la représentation graphique des résultats de simulation, les propriétés des graphes (Figure 9.33) et les médianes (Figure 9.34) fluctuent avec la modification des valeurs, mais sans démontrer de tendance claire. De plus, les courbes des distributions du degré et de la longueur des voies sont globalement stables tout en présentant des pics légèrement plus élevés pour les valeurs les plus fortes de k_{ext} (Figure 9.35), ce qui indique la présence de voies plus longues et mieux connectées.

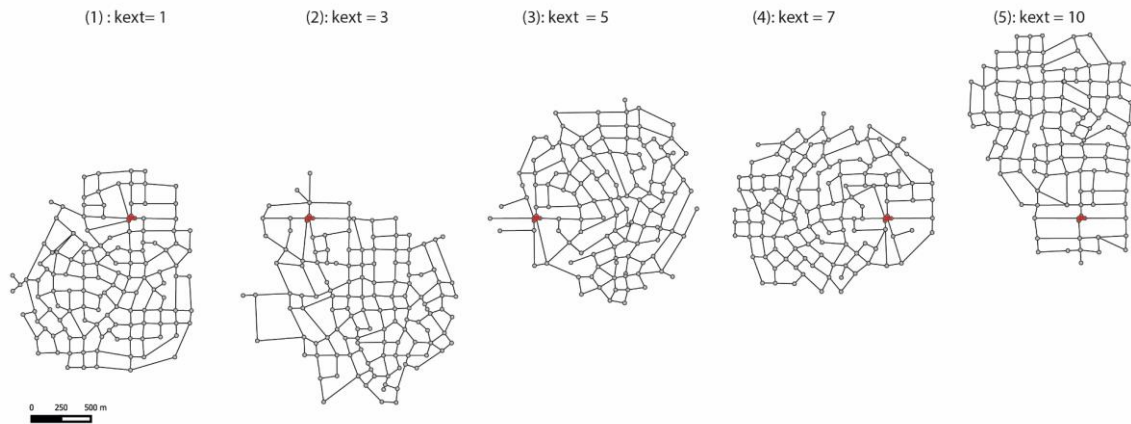


Figure 9.32. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} avec (1) $k_{ext} = 1$; (2) $k_{ext} = 3$; (3) $k_{ext} = 5$; (4) $k_{ext} = 7$ et (5) $k_{ext} = 10$.

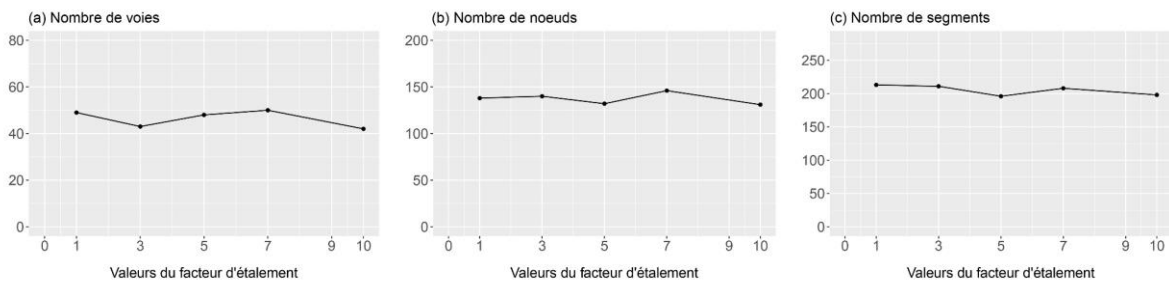


Figure 9.33. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

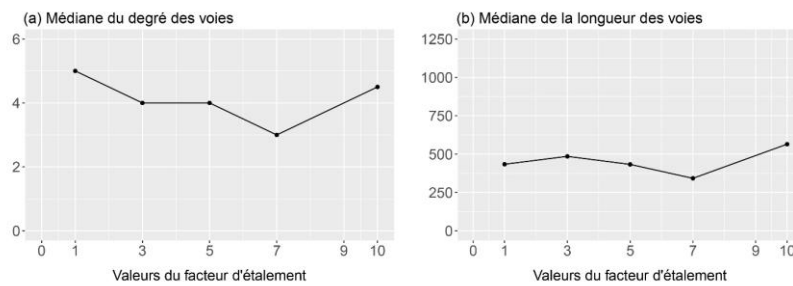


Figure 9.34. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} .

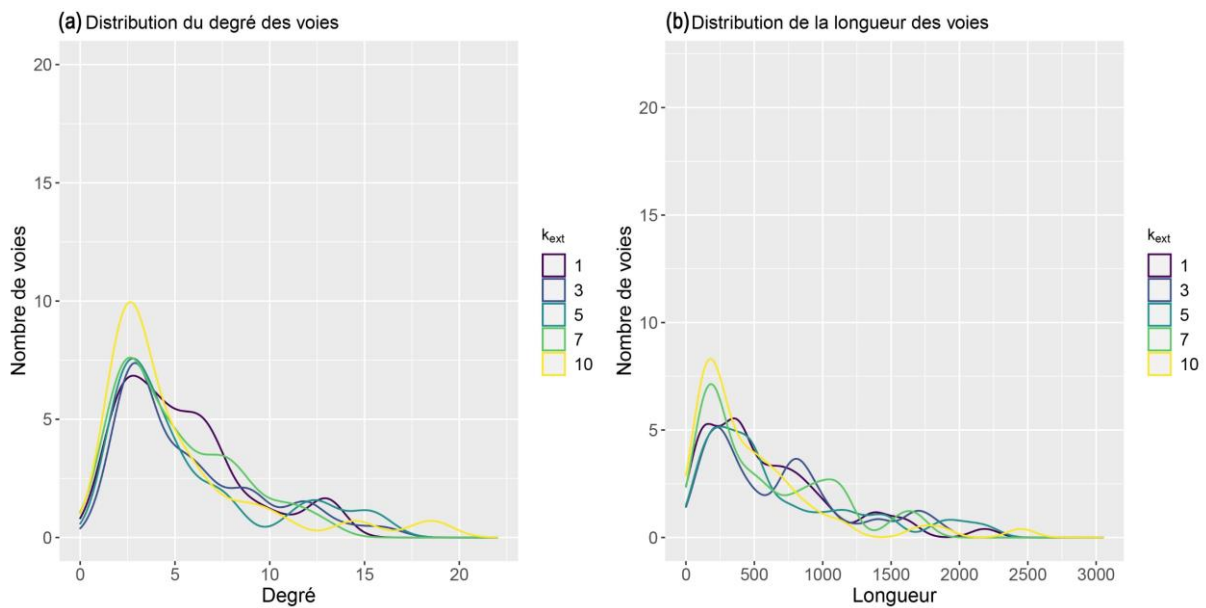


Figure 9.35. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'étalement k_{ext} .

- **Sensibilité à la probabilité d'étalement f_{ext}**

Une simulation avec une probabilité d'étalement f_{ext} très faible génère un graphe viaire compact. Les valeurs intermédiaires génèrent des réseaux qui délimitent des îlots de tailles petites à moyennes. En revanche, une valeur élevée de f_{ext} génère un réseau viaire délimitant des îlots de tailles variées, avec de petits îlots au centre et de très grands îlots principalement en périphérie (Figure 9.36).

Les résultats de simulation montrent généralement une tendance à la diminution du nombre de voies lorsque la valeur de f_{ext} augmente (Figure 9.37 - (a)), tandis que le nombre de nœuds et de segments ne montre aucune tendance claire avec la modification des valeurs (Figure 9.37 - (b) et (c)). Les médianes du degré et de la longueur des voies augmentent proportionnellement à l'augmentation des valeurs de f_{ext} , à l'exception de la diminution observée pour la valeur maximale testée (Figure 9.38). En outre, l'analyse graphique révèle une stabilité globale des distributions du degré et de la longueur des voies, avec des pics de courbes légèrement plus élevés pour les valeurs les plus faibles (Figure 9.39). La valeur la plus élevée de probabilité d'étalement f_{ext} induit la création d'un réseau plus étalé. Ce réseau se caractérise par peu de voies longues et bien connectées qui forment la structure principale du réseau. De plus, il est caractérisé par une prédominance de voies courtes et moins connectées, qui correspondent à des voies de remplissage interstitiel (cellulaires) au centre, et des voies ramifiées en périphérie.

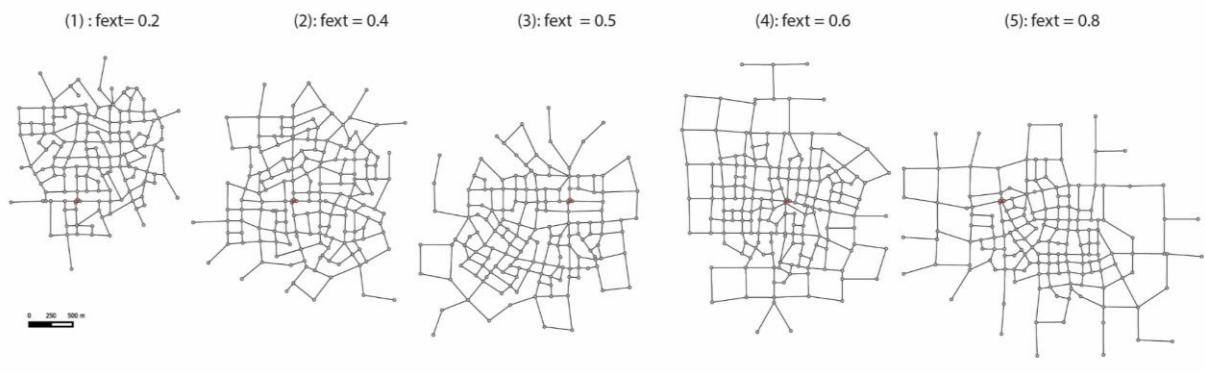


Figure 9.36. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} avec (1) $f_{ext} = 1$; (2) $f_{ext} = 3$; (3) $f_{ext} = 5$; (4) $f_{ext} = 7$ et (5) $f_{ext} = 10$.

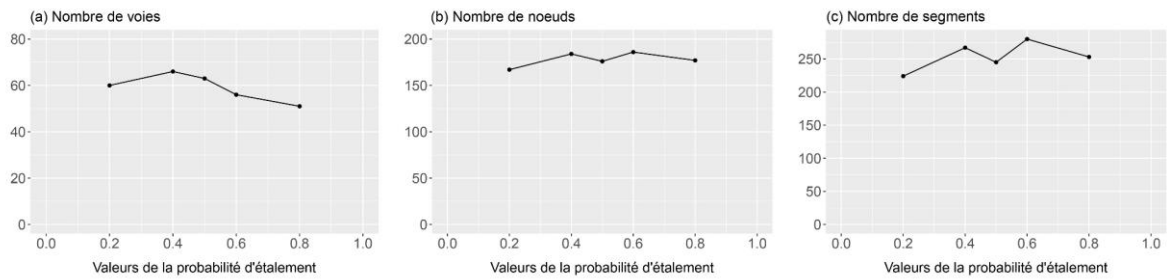


Figure 9.37. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

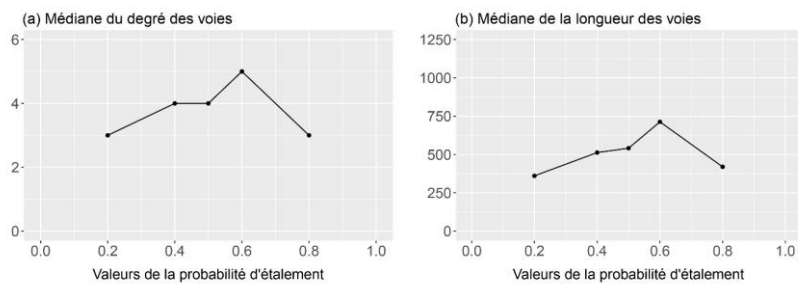


Figure 9.38. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} .

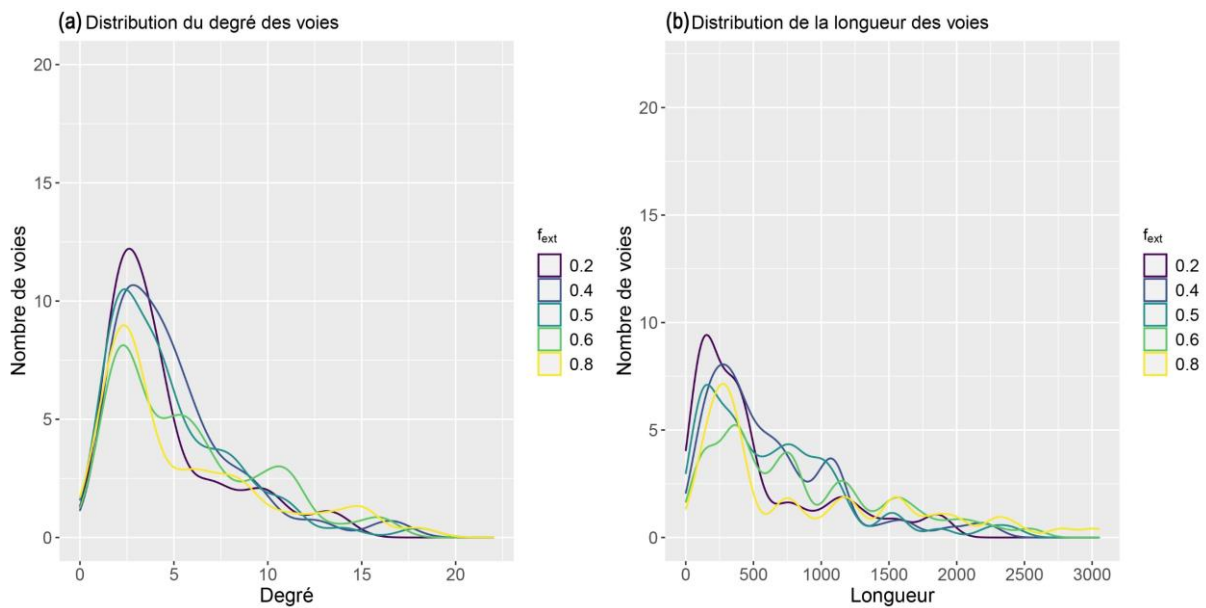


Figure 9.39. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} .

Sensibilité aux paramètres angulaires

- **Sensibilité à l'angle minimum d'intersection A_i**

L'angle minimum d'intersection A_i est l'angle minimal entre un segment possible (pour connecter le nouveau nœud créé) et tous les segments du réseau. Les valeurs de l'angle A_i impactent la forme du réseau (Figure 9.40), les valeurs faibles génèrent des réseaux avec des angles aigus entre les segments. En revanche les valeurs les plus élevées favorisent la création de réseaux viaires en grille. Par ailleurs, les valeurs de l'angle A_i impactent également l'alignement des nouveaux segments avec ceux déjà existants. En théorie, une valeur de $A_i = 90^\circ$ associé à une valeur de l'angle d'intersection $A_s \geq 60^\circ$ contraint l'évolution du réseau uniquement par un prolongement des voies. Cependant, dans le cadre de cette analyse, la valeur $A_i = 90^\circ$ n'a pas été testée, puisque la valeur par défaut $A_s = 60^\circ$, ce qui nécessitera un temps de calcul considérable pour prolonger les voies sur 100 itérations.

Avec l'augmentation de la valeur de l'angle A_i , le nombre de voies diminue car la contrainte imposée par un angle presque droit favorise l'alignement des segments sur les croisements en X, ce qui réduit le nombre de voies dans le réseau (Figure 9.41 - (a)). En revanche, le nombre de nœuds augmente avec l'augmentation de la valeur de A_i , car une valeur élevée de l'angle A_i implique la création d'un segment par une projection orthogonale qui entraîne la création d'un nœud sur les segments existants (Figure 9.41 - (b)). Quant au nombre de segments, il reste relativement stable, car il n'est pas directement influencé par la valeur de l'angle A_i .

(Figure 9.41 - (c)). À partir d'une valeur seuil de $A_i = 40^\circ$, les médianes du degré et de la longueur des voies commencent à diminuer ((Figure 9.42).

Les valeurs les plus élevées favorisent la création de voies continues, ce qui permet d'établir une hiérarchie au sein du réseau. En revanche, les valeurs faibles génèrent des réseaux qui ne sont pas hiérarchisés, avec des segments moins alignés les uns par rapport aux autres.

L'analyse de la distribution du degré des voies révèle que les valeurs les plus élevées de l'angle A_i sont associées à une prédominance de voies ayant un degré 2, tandis que les valeurs les plus faibles conduisent à une prédominance de voies ayant un degré 4 (Figure 9.43 - (a)). La distribution de la longueur des voies présente une faible sensibilité à la modification des valeurs du paramètre (Figure 9.43 - (b)).

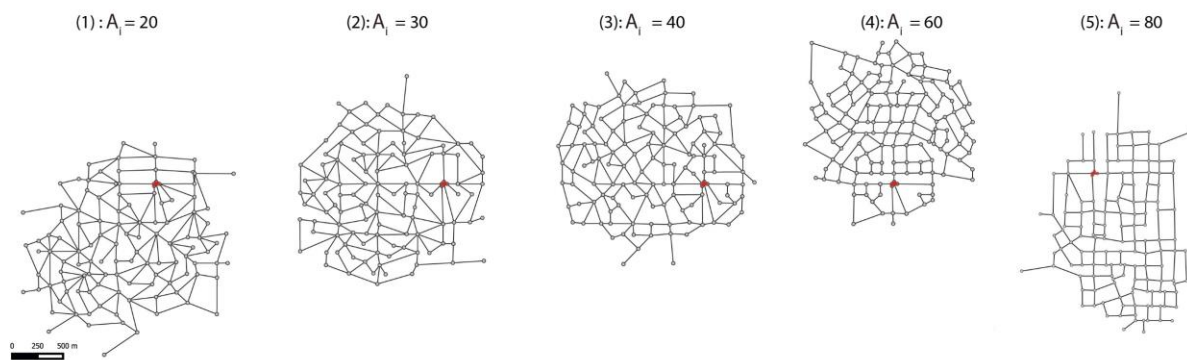


Figure 9.40. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i avec (1) $A_i = 20$; (2) $A_i = 30$; (3) $A_i = 40$; (4) $A_i = 60$ et (5) $A_i = 80$.

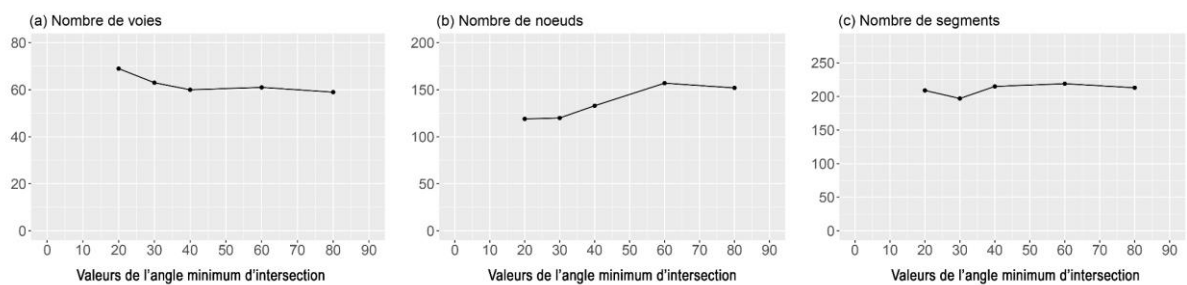


Figure 9.41. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

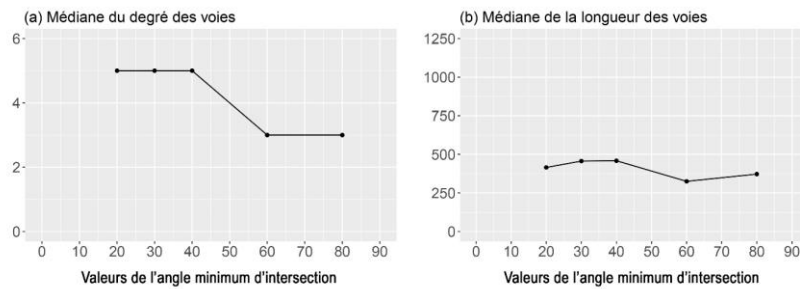


Figure 9.42. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i .

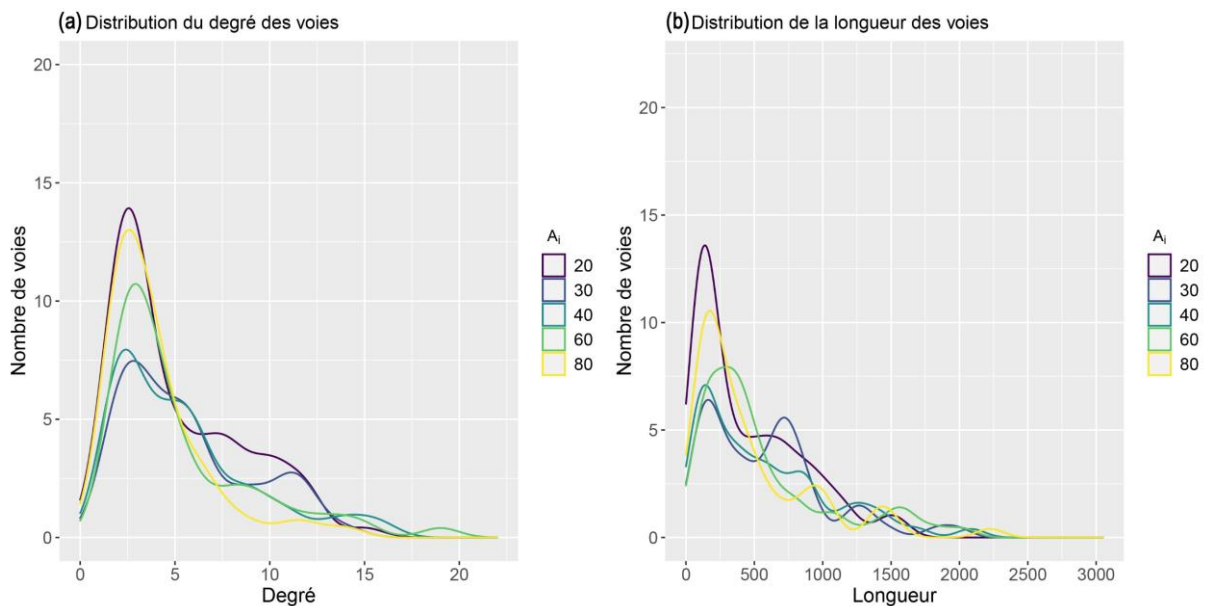


Figure 9.43. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i .

- **Sensibilité à l'angle minimum de séparation A_s**

L'angle minimum de séparation A_s est l'angle minimal entre deux segments possibles. Les valeurs de l'angle A_s impactent principalement la forme des îlots délimités par le réseau, les valeurs faibles générant des îlots de forme triangulaire ou irrégulière et les valeurs les plus élevées favorisant la création d'îlots de forme polygonale plus réguliers avec des intersections principalement perpendiculaires (Figure 9.44).

Avec l'augmentation des valeurs de l'angle A_s , les nombres de voies, de nœuds et de segments diminuent jusqu'à atteindre une valeur seuil à $A_s = 45^\circ$, où ils se stabilisent (Figure 9.45). Concernant les médianes du degré et de la longueur des voies, elles augmentent entre $A_s = 20^\circ$ et $A_s = 30^\circ$, mais la tendance s'inverse par la suite (Figure 9.46).

Les distributions du degré et de la longueur des voies montrent une forme globale uniforme (Figure 9.47). Les simulations avec des valeurs faibles d'angle A_s entraînent principalement la création de voies courtes, ce qui se traduit par un empilement rapide des courbes correspondantes à ces valeurs. En revanche, les réseaux simulés avec des valeurs élevées d'angle A_s présentent à la fois des voies courtes et des voies continues très longues.

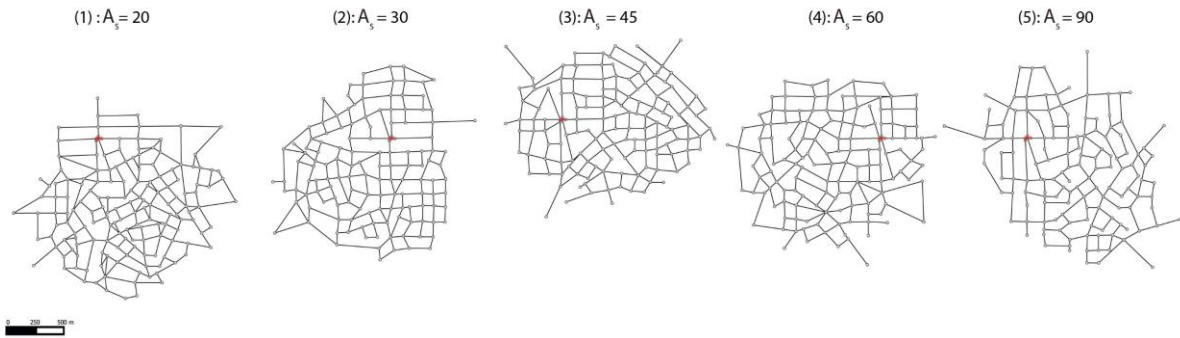


Figure 9.44. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s avec (1) $A_s = 20$; (2) $A_s = 30$; (3) $A_s = 45$; (4) $A_s = 60$ et (5) $A_s = 90$.

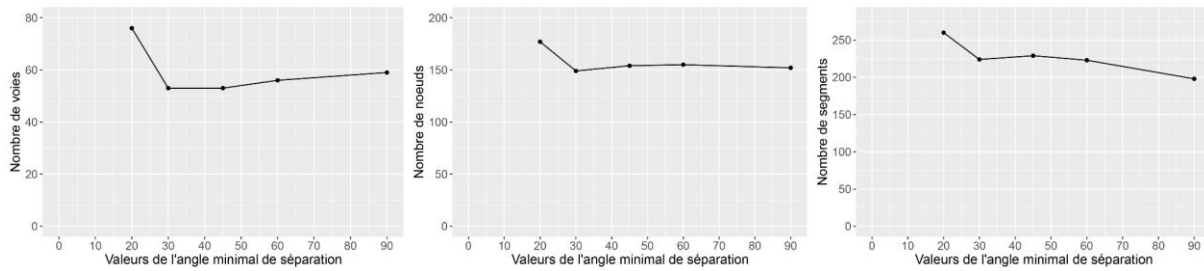


Figure 9.45. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.

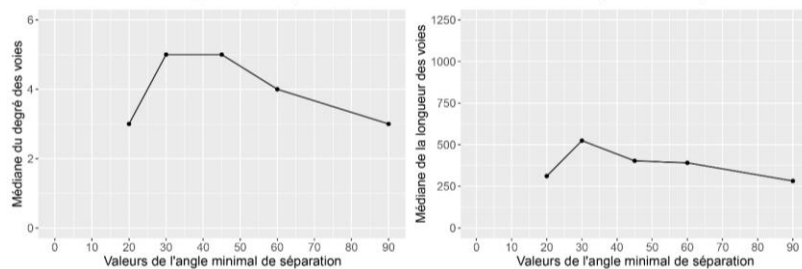


Figure 9.46. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s .

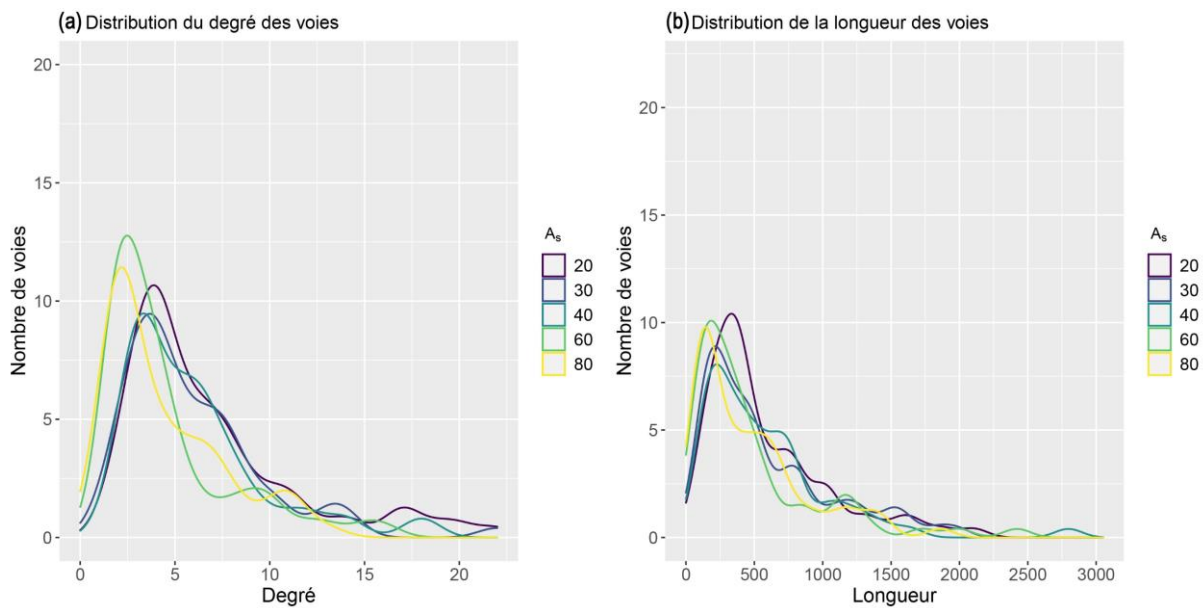


Figure 9.47. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s .

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation des paramètres

L'objectif des tests de sensibilité est de mieux comprendre l'influence des valeurs des différents paramètres sur les résultats des simulations, ainsi que leur impact sur le fonctionnement global du modèle.

Les variations observées des résultats de simulation, à partir des analyses visuelles et graphiques, mettent en évidence l'impact spécifique de chaque paramètre sur les caractéristiques des réseaux viaires obtenus. Ces analyses révèlent que les résultats du modèle à l'échelle des graphes viaires et des voies sont sensibles aux paramètres testés. Aucun résultat ne semble contre-intuitif par rapport à la signification des paramètres testés.

La modification des valeurs de certains paramètres peut contribuer de manière directe ou indirecte à la variation des résultats. En effet, l'impact de certains paramètres est contraint par les valeurs par défaut d'autres paramètres. En particulier, nous supposons à partir des résultats que les paramètres relatifs à la densification et l'étalement du réseau sont dépendants les uns des autres. Ainsi certains résultats ne sont atteignables que par la combinaison de certaines valeurs pour différents paramètres.

Certains paramètres semblent avoir des impacts assez similaires, mais le rôle de chacun reste indispensable, comme c'est le cas pour l'angle minimum de séparation A_s et l'angle minimum d'intersection A_i . Tous deux produisent à une échelle globale des réseaux de formes plutôt orthogonales, mais des observations plus minutieuses montrent que l'angle minimum

d'intersection A_i impacte principalement la continuité des voies tandis que l'angle minimum de séparation A_s impacte principalement la régularité des îlots délimités par le réseau, avec des motifs orthogonaux pour les valeurs élevées.

De plus, certaines valeurs extrêmes de paramètres peuvent être contraignantes :

- soit parce qu'elles sont strictement contraintes par la valeur d'un autre paramètre, par exemple la longueur maximale l_{max} et la distance de répulsion r_0 ;
- soit parce que leur combinaison avec la valeur par défaut d'un autre paramètre restreint considérablement le modèle. Par exemple, le choix de valeurs élevées pour les deux paramètres angulaires peut entraîner des cas où le modèle ne trouve aucune option possible pour connecter le nouveau nœud au réseau existant tout en respectant toutes les contraintes ;
- soit parce que des valeurs élevées entraînent un temps de calcul important, comme c'est le cas pour le paramètre P_e .

9.1.3.3 Sensibilité au réseau d'initialisation

Les analyses de sensibilité se focalisent principalement sur l'étude des effets des variations des paramètres. Néanmoins, dans le contexte des modèles géographiques, les conditions spatiales initiales sont souvent traitées comme des données immuables, laissant ainsi totalement inexploré l'impact des motifs spatiaux initiaux sur les résultats de simulation. Une analyse des résultats est explorée dans le but d'évaluer l'influence de différents initiateurs du modèle et éventuellement de différentes configurations spatiales initiales sur les résultats des simulations.

L'objectif de cette étape de l'analyse est de déterminer si le réseau d'initialisation influence les résultats. Nous souhaitons explorer si l'émergence du réseau viaire est fortement tributaire de sa trajectoire historique, de manière similaire à de nombreuses autres structures spatiales. Plus spécifiquement, nous cherchons à déterminer si les propriétés d'un réseau à un moment donné peuvent être expliquées par ses particularités lors de son émergence (ou de sa création). L'application du modèle à un ensemble d'initiateurs variés permettra de déterminer dans quelle mesure les mécanismes généraux modélisés conduisent à des réseaux simulés présentant des propriétés structurelles similaires (absence d'effet des spécificités du réseau initial) ou bien des propriétés particulières (effet des spécificités du réseau initial).

Pour toutes les simulations, les valeurs de l'ensemble des paramètres sont les mêmes, en utilisant les valeurs par défaut (Tableau 8.7). Seul l'initiateur diffère d'une simulation à l'autre.

La visualisation des graphes viaires met en évidence deux schémas d'évolution distincts pour les réseaux simulés (Figure 9.48). D'une part, lorsque les réseaux sont créés à partir d'un squelette d'un réseau historique réel, ils tendent principalement à évoluer autour de leur structure initiale (Figure 9.48 - (10), (11) et (12)), suggérant une forte dépendance à la trajectoire historique. D'autre part, pour les réseaux générés à partir d'autres initiateurs, leur évolution peut se produire soit autour de l'initiateur lui-même (Figure 9.48 - (1), (2), (3), (4) et (5)), soit dans une direction éloignée de celui-ci (Figure 9.48 - (6), (7), (8) et (9)). Ces observations suggèrent que la formation et le développement du réseau viaire peuvent être influencés par la trajectoire historique spécifique qui a donné naissance à ces réseaux.

L'analyse graphique de l'évolution des propriétés des graphes confirme également la présence de deux schémas distincts (Figure 9.49). Quand les initiateurs sont de forme simple (des segments ou des voies), nous observons une forte uniformité dans les propriétés de graphes. En revanche, les réseaux simulés à partir de squelettes de réseaux historiques réels se distinguent par une fluctuation considérable de leurs propriétés.

Les médianes du degré et de la longueur des voies présentent de légères fluctuations entre les différents initiateurs, mais celles-ci sont peu significatives (Figure 9.50). Cependant, on observe une uniformité plus marquée au sein de chaque catégorie d'initiateurs (segment(s), voie(s) ou squelette).

L'analyse graphique des résultats de simulation révèle une uniformité des formes globales des distributions du degré et de la longueur des voies (Figure 9.51). Toutefois, les réseaux simulés à partir d'initiateurs en segment(s) montrent des courbes de distribution présentant un pic plus élevé.

Une réponse préliminaire à la question "est-ce que la forme du réseau à l'initialisation de la simulation a vraiment de l'importance ?" est que cela ne semble être le cas que lorsque l'initiateur est un squelette avec une structure spécifique. Cependant, il est important de noter qu'à partir de l'analyse de sensibilité, les valeurs par défaut des paramètres favorisent principalement l'évolution du réseau par densification. Dans ce contexte, en simulant une évolution du réseau par étalement (avec les valeurs de paramètres correspondantes), les initiateurs de segment(s) et de voie(s) pourraient influencer davantage la structure finale du réseau simulé.

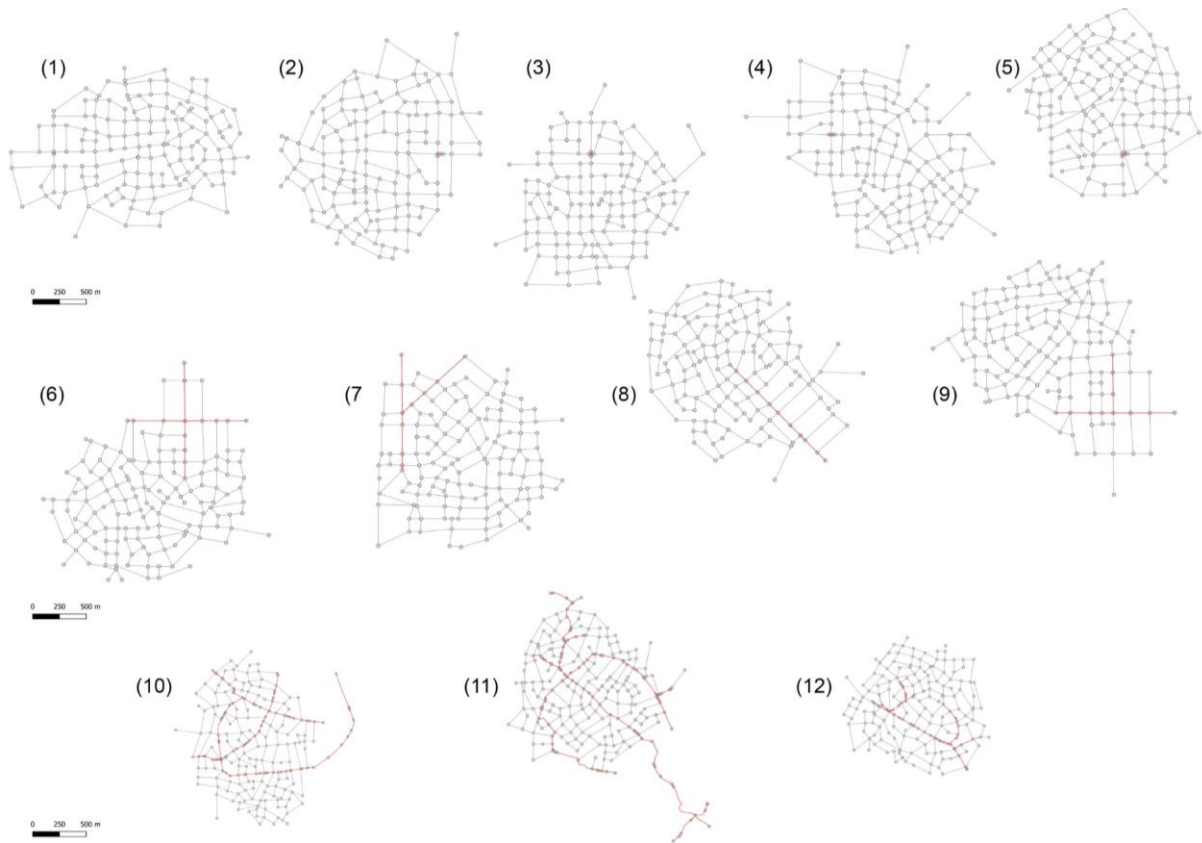


Figure 9.48. Graphes viaires simulés avec différents initiateurs pour le modèle.

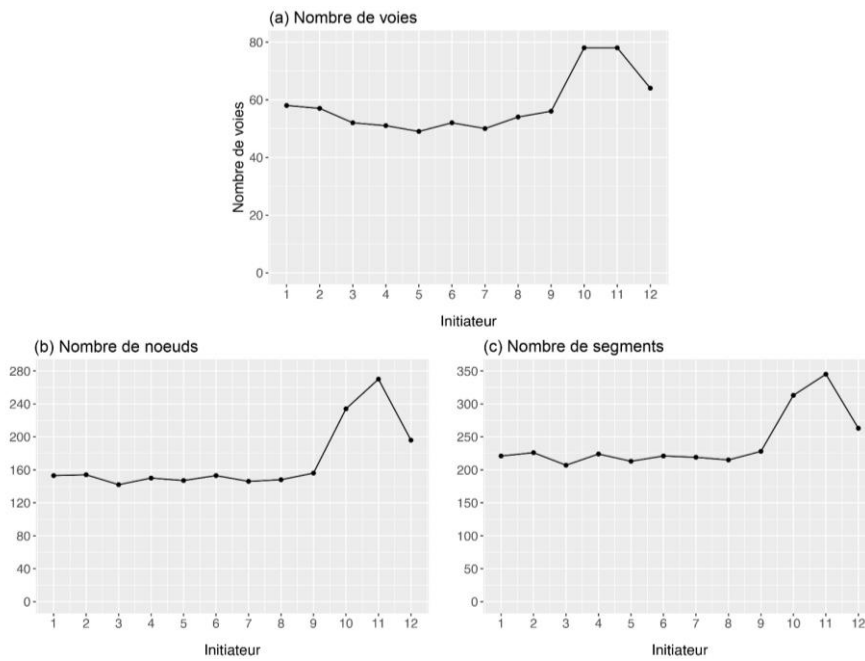


Figure 9.49. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés au réseau d'initialisation du modèle.

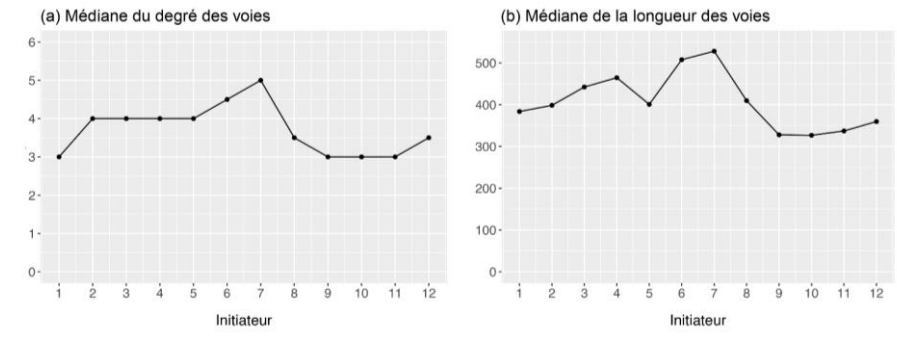


Figure 9.50. Sensibilité des médianes du degré (a) et de la longueur (b) des voies au réseau d'initialisation du modèle.

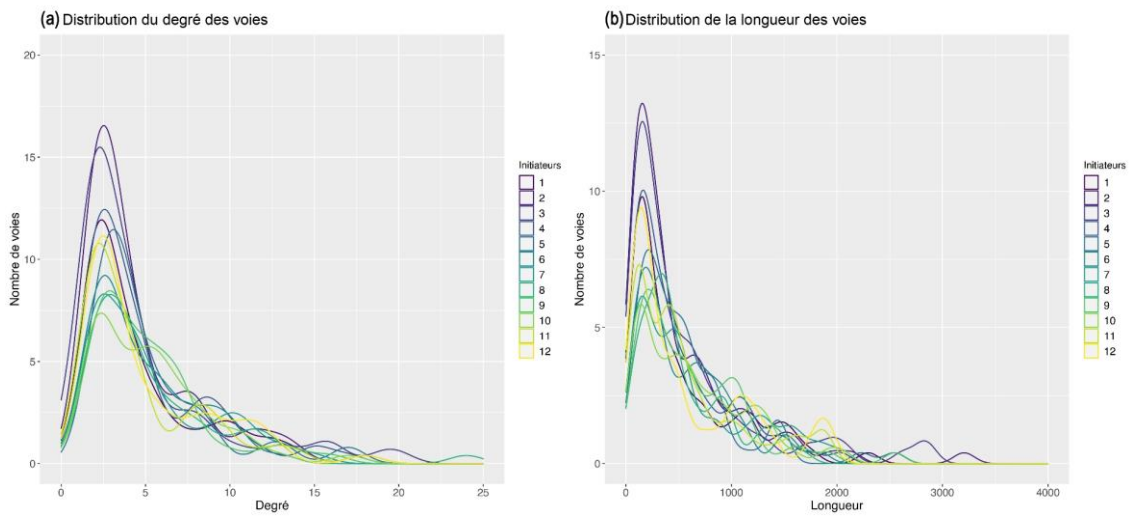


Figure 9.51. Sensibilité de la distribution du degré (a) et de la longueur (b) des voies au réseau d'initialisation du modèle.

9.1.4 Synthèse de l'évaluation du modèle

L'évaluation du modèle à travers l'analyse des résultats des répliques d'une même simulation a été réalisée à partir des valeurs centrales, de dispersion et de distribution statistique des résultats de simulation. Ces résultats comprennent un ensemble d'indicateurs synthétiques à l'échelle du graphe viaire, ainsi qu'à l'échelle des voies. L'évaluation du modèle a permis de vérifier que les résultats sont cohérents par rapport aux hypothèses présidant à sa formalisation.

Les coefficients de variation entre les résultats des simulations ne sont pas très élevés. Cela suggère que le modèle est suffisamment stable par rapport aux objectifs de sa conception, qui sont de simuler les différents morphotypes de voies et de produire des réseaux présentant des propriétés structurelles similaires à celles des réseaux réels. L'évaluation de sa stabilité est basée sur les 100 répliques effectuées avec les valeurs par défaut des paramètres. Il est donc possible que cette stabilité varie avec d'autres valeurs de paramètres. En résumé, l'évaluation du modèle démontre des résultats globalement stables, mais il convient d'être conscient de l'influence potentielle des valeurs de paramètres sur cette stabilité.

L'analyse de sensibilité effectuée a démontré la sensibilité du modèle à la modification des valeurs de paramètres, ainsi que le rôle de chaque paramètre dans la configuration spatiale du réseau simulé et la variation de ses propriétés structurelles. Cette analyse aidera au calibrage des paramètres, en déterminant à la fois l'amplitude de variation et les intervalles de confiance des valeurs de résultats en fonction des paramètres. De plus, elle permet d'identifier les zones de transition des valeurs de paramètres (où les résultats changent de manière significative), ou de montrer que la combinaison de certaines valeurs permet d'obtenir des résultats spécifiques. La valeur de certains paramètres produit l'effet escompté uniquement lorsque la valeur d'un autre paramètre se situe dans un intervalle spécifique.

9.2 Calibrage et validation empirique du modèle

Les protocoles de calibrage et de validation empirique du modèle, présentés dans cette section, se concentrent sur la capacité du modèle à reproduire les morphotypes de voies. La validation du modèle, en ce qui concerne sa capacité à saisir certaines propriétés structurelles à l'échelle du réseau, ne sera pas abordée dans le cadre de cette section. Cela sera plutôt abordée en relation avec les résultats de simulations de différents types de réseaux viaires qui seront présentés ultérieurement, dans le chapitre 10.

9.2.1 Positionnements et protocoles

9.2.1.1 Protocole de calibrage du modèle WayMorph

Un bref aperçu des protocoles de calibrage existants

Le calibrage d'un modèle consiste à tester et identifier un ensemble de paramètres et l'ajustement de leurs valeurs respectives afin d'atteindre des objectifs spécifiques (Schmitt et al., 2015). Ces objectifs peuvent concerner la cohérence des données simulées avec des données réelles observées ou le fait que les résultats de simulation soient les plus proches possibles d'un objectif prédéfini. L'objectif est également de déterminer si certaines valeurs de paramètres permettent d'obtenir des résultats particuliers qui ne se manifestent que lorsque ces valeurs sont combinées (Hirtzel, 2015; Schmitt et al., 2015; Schouten et al., 2014; Tannier, 2017). Il est également possible de déterminer l'importance relative de chaque paramètre sur les résultats de simulation (Monod et al., 2006; Richiardi et al., 2006; Saltelli et al., 2005). Le calibrage n'est pas indispensable si les valeurs de paramètres initialement attribuées permettent d'atteindre les objectifs du modélisateur (Hirtzel, 2015).

Le calibrage peut être effectué en examinant les résultats des mécanismes génératifs qui se manifestent sous la forme d'une distribution ou d'un indicateur statistique, ou encore en observant une configuration spatiale identifiable (Tannier, 2017). Pour ce faire, un calibrage automatique est souvent recommandé (Ngo & See, 2012). Les algorithmes génétiques sont souvent utilisés (Rey-Coyrehourcq, 2015). Par exemple, l'algorithme PSE (Pattern Space Exploration) (Chérel et al., 2015) vise à découvrir l'ensemble des résultats possibles d'un modèle, dans l'idée d'une recherche de l'ensemble des comportements possibles. L'algorithme Calibration Profile (Reuillon et al., 2015) vise à déterminer la contribution individuelle d'un paramètre pour atteindre un objectif, indépendamment des autres paramètres.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif n'est pas de découvrir tous les résultats possibles du modèle. Ainsi il n'est pas nécessaire de déterminer de manière exhaustive l'espace faisable, ce qui correspondrait, dans le cas du modèle WayMorph, à un diagramme des possibilités ou à un espace des formes possibles ("*Morphospace*"). En outre, la contribution individuelle d'un paramètre pour atteindre un objectif prédéfini indépendamment des autres paramètres peut être déduite de l'analyse de sensibilité présentée préalablement. Les tests de sensibilité effectués ont aussi montré que globalement les paramètres ne nécessitent pas de calibrage pour ce qui est de leurs ordres de grandeur. Les résultats de cette analyse ont également permis d'identifier les zones de transition des valeurs de paramètres.

Protocole de calibrage proposé pour le modèle WayMorph

Un calibrage du modèle WayMorph est nécessaire pour identifier les valeurs de paramètres permettant de générer chaque morphotype de voies. Un calibrage manuel est choisi pour le modèle WayMorph en vue d'analyser les interactions entre chaque sous-ensemble spécifique de paramètres en testant différentes combinaisons de valeurs. Ce calibrage portera également sur les paramètres de choix binaires qui n'ont pas été évalués lors de l'analyse de sensibilité, puisqu'ils ont été délibérément conçus pour atteindre des objectifs prédéfinis. Leur importance relative sur les résultats de simulation est inhérente à la conception du modèle. L'objectif est de vérifier si une valeur d'un paramètre a l'effet escompté uniquement quand elle est comprise dans un certain intervalle.

9.2.1.2 Protocole de validation du modèle WayMorph

Un bref aperçu des protocoles de validation existants

La validation de modèles de simulation implique de valider la cohérence des résultats obtenus avec la réalité empirique connue. Il est donc nécessaire de mener des comparaisons entre les résultats simulés et des données réelles, ou des comparaisons entre les résultats de deux simulations différentes en cas d'indisponibilité de données empiriques ((Perret, Boffet Mas, et al., 2009)). Ces comparaisons sont menées au moyen de tests visuels et/ou statistiques en fonction de certains critères (ou indicateurs).

Classiquement, la validation de modèles statistiques consiste à comparer les données simulées à des données empiriques considérant une échelle spatiale identique (Tannier, 2017). D'autres approches consistent à décaler délibérément les niveaux de modélisation et ceux de l'évaluation et de la validation (Mathian & Tannier, 2015; Tannier, 2017).

La cohérence des résultats du modèle WayMorph avec des données empiriques peut être vérifiée par une comparaison visuelle (un contrôle visuel du réalisme des résultats), étant donné que les données et les résultats sont géométriques (spatialisés) et que leur forme est porteuse d'information. Les données empiriques à notre disposition permettront la réalisation de comparaisons statistiques avec un minimum d'indicateurs.

À l'échelle des voies, il est possible d'identifier visuellement les morphotypes mais il n'est pas possible d'effectuer une comparaison entre les résultats de simulation et des données empiriques, au moyen d'indicateurs quantitatifs, sans tenir compte de l'ensemble du réseau. De plus, certains indicateurs topologiques sont normalisés et leur valeur pour chaque voie dépend alors de la topologie de l'ensemble du réseau. À l'échelle du réseau dans son ensemble, un contrôle visuel pour comparer les réseaux simulés à des réseaux réels n'est pas assez fiable car de réseaux de formes visuellement différentes, peuvent avoir des propriétés structurelles comparables ou similaires. Ainsi, la validation du modèle doit être effectuée à différentes échelles.

Protocole de validation proposé pour le modèle WayMorph

Le protocole proposé se concentre sur la capacité du modèle à reproduire (i) la forme des morphotypes de voies et (ii) les mécanismes sous-jacents à leur émergence et évolution. Il vise à répondre aux objectifs suivants :

- Fixer les dernières valeurs de certains paramètres du modèle en fonction du réseau d'initialisation.
- Vérifier visuellement que chaque morphotype de voies est correctement simulé.
- S'assurer que les mécanismes génératifs sont effectivement reproduits au-delà de la forme du réseau.

9.2.2 Calibrage et validation empirique de la simulation des morphotypes de voies

Le calibrage du modèle WayMorph consiste à tester plusieurs jeux de valeurs de paramètres possibles et choisir ceux qui sont adaptés à la simulation de l'émergence de chaque morphotype de voies. Les morphotypes représentent des résultats particuliers du modèle obtenus uniquement pour une certaine combinaison de paramètres.

Dans le cadre du calibrage, le modèle est initié par un réseau d'initialisation composé deux segments croisés centralement, pour la simulation des morphotypes de voies correspondant à une échelle macroscopique, notamment les voies radiales/linéaires et les voies

concentriques. Pour les morphotypes qui ne peuvent être simulés de manière isolée, le modèle est initialisé par un autre morphotype de voie représentant la structure initiale à laquelle se rattache le morphotype cible de la simulation.

Le calibrage du modèle a impliqué de nombreux tests manuels, des essais et des erreurs qu'il est inutile de présenter ici. À partir de ces tests, le nombre d'itérations a été également choisi (calibré) pour chaque morphotype. Pour certains morphotypes, les simulations doivent être réalisées avec un nombre limité d'itérations, tandis que pour d'autres, il n'y a pas de contrainte quant au nombre d'itérations, qui doit toutefois excéder un certain seuil minimum. Nous présentons ici uniquement les calibrages, parmi tous ceux testés, qui permettent d'obtenir visuellement les meilleurs résultats.

La validation empirique des résultats est menée en effectuant des simulations de morphotypes, initialisées à partir des squelettes des réseaux historiques des trois villes de notre étude (Dijon, Besançon et Pontarlier). L'objectif est de valider le fait que même si les résultats de l'analyse de sensibilité ont mis en évidence un impact possible de l'initiateur sur la forme du réseau simulé, l'initiateur ne contraint pas la simulation des morphotypes.

Les simulations seront effectuées avec les valeurs de paramètres définies préalablement pour le calibrage du modèle. Les valeurs respectives de la distance de répulsion r_0 et de la longueur maximale l_{max} seront définies pour chaque simulation, selon le réseau d'initialisation et la taille (étendue) du morphotype considéré.

9.2.2.1 Voies radiales/linéaires

Calibrage pour la simulation de voies radiales/linéaires

La simulation des voies radiales/linéaires suivant un mécanisme d'extension par création et/ou par prolongement, nécessite principalement une connexion du nouveau nœud à des nœuds d'extrémité du réseau existant et de favoriser la continuité des voies. Les paramètres de choix binaires de rattachement aux nœuds d'extrémité et d'attachement préférentiel selon le degré des voies doivent être respectivement activés avec $E_{pp} = 1$ et $W_p = 1$. La continuité des voies est également impactée par la valeur de l'angle minimum d'intersection A_i . À la suite des tests de différentes valeurs, ce paramètre est calibré avec une amplitude de $60 \leq A_i \leq 90$ pour assurer la continuité des voies. La variation des valeurs de l'angle A_i permet de simuler des voies radiales/linéaires strictement linéaires avec $A_i = 90^\circ$ ou légèrement sinueuses avec par exemple $A_i = 60^\circ$.

La modification des valeurs de certains paramètres peut également contribuer de manière indirecte à atteindre le résultat escompté. Cela concerne le paramètre de construction : une valeur faible de $\omega = 0$ sera plus adaptée puisque l'objectif est de faire évoluer le réseau par étalement. Une valeur élevée de la distance de répulsion r_0 favorise le processus de prolongement. De même, une valeur élevée de la longueur maximale l_{max} permet d'élargir la fenêtre de simulation dans laquelle un nouveau nœud peut être ajouté. Les valeurs de ces deux paramètres peuvent être adaptées selon le réseau d'initialisation et la taille du morphotype visé, avec un rapport de $l_{max} \approx 5 \times r_0$. Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut. Les simulations doivent être réalisées pour un petit nombre d'itérations (Figure 9.52).

Validation de la simulation de voies radiales

Le modèle est capable de simuler les voies radiales/linéaires par création (Figure 9.52) et par prolongement des voies d'un réseau existant (Figure 9.53, figure 9.54 et figure 9.55).

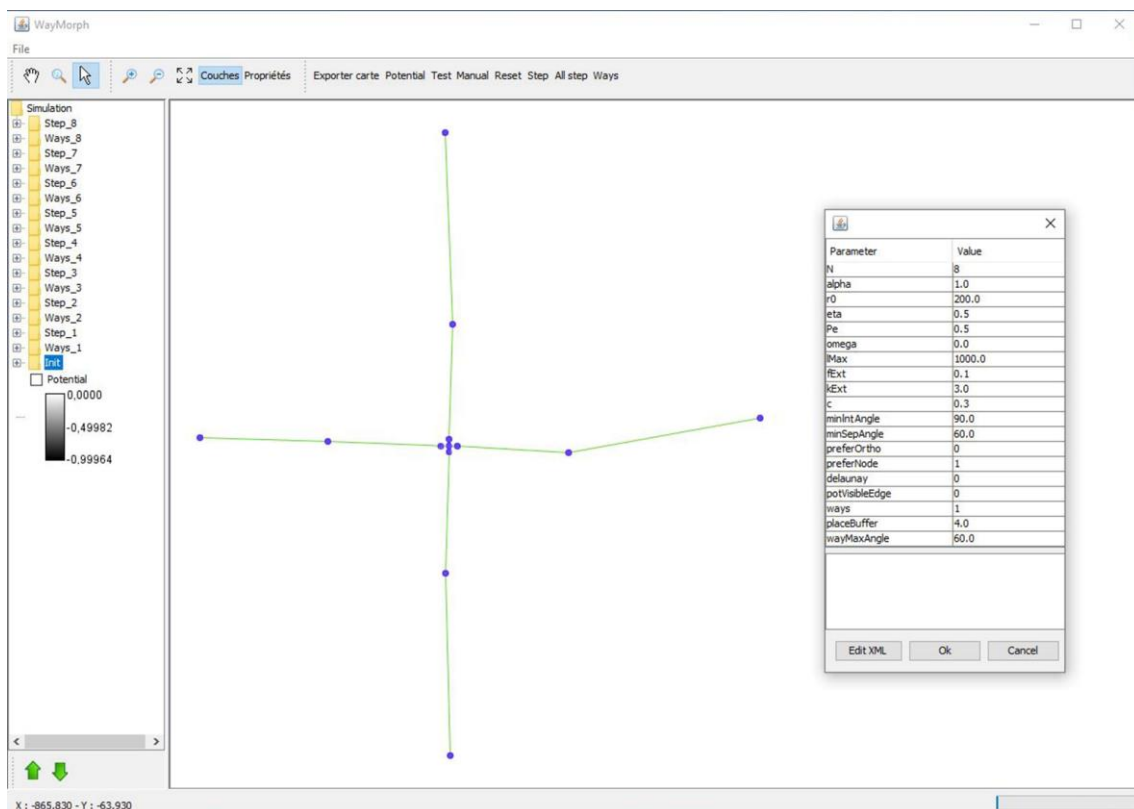


Figure 9.52. Illustration de la simulation de voies radiales/linéaires (à partir d'un réseau d'initialisation composé de deux segments croisés) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

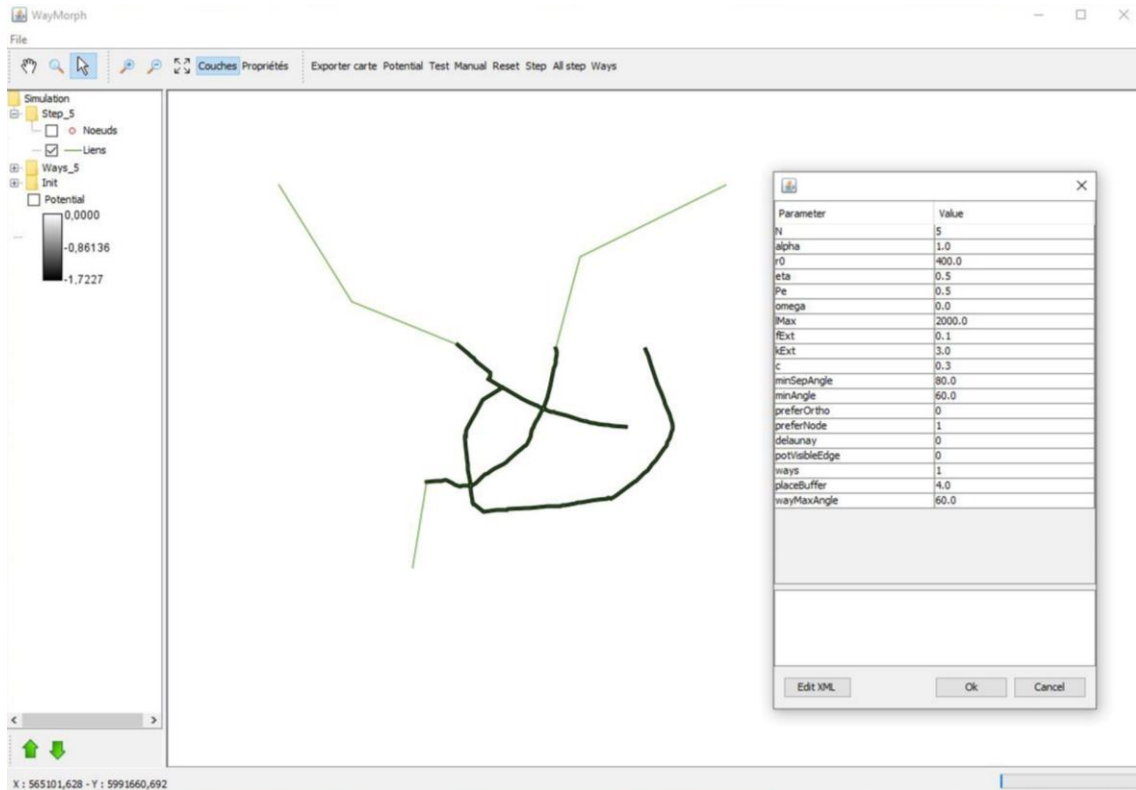


Figure 9.53. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$.

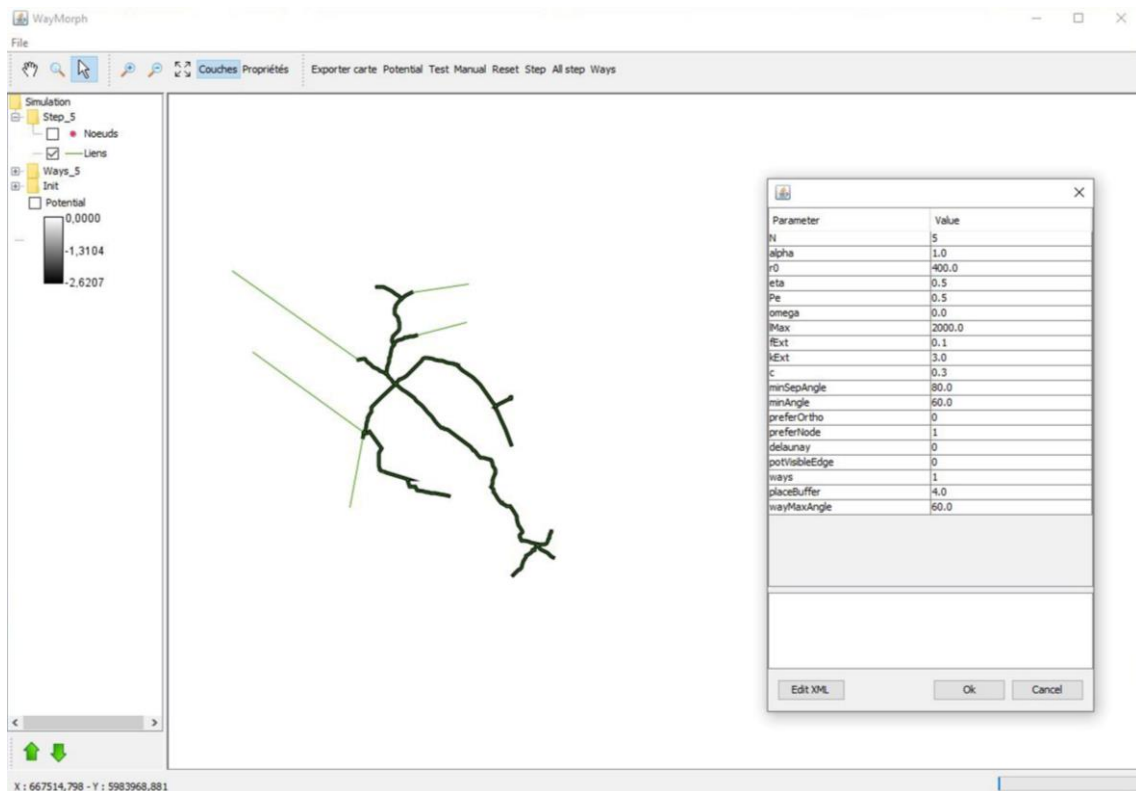


Figure 9.54. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$.

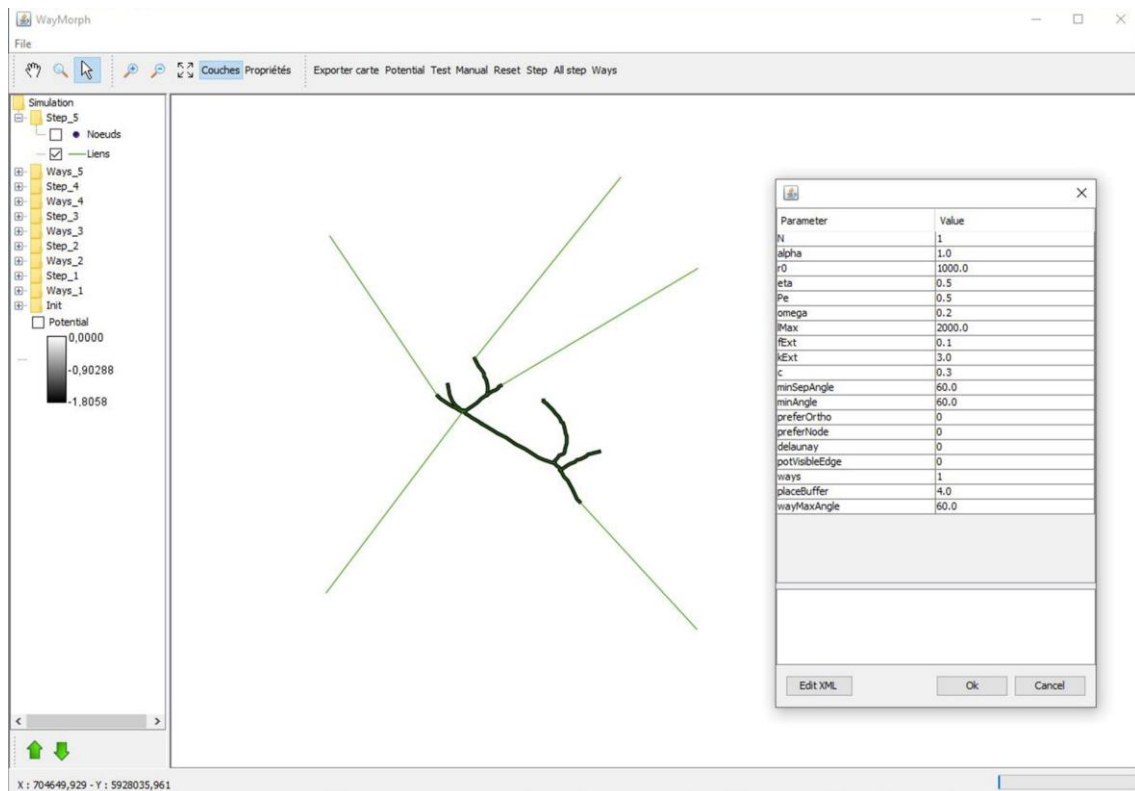


Figure 9.55. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$.

9.2.2.2 Voies concentriques

Calibrage pour la simulation de voies concentriques

La simulation des voies concentriques se base sur un processus de réticulation et la délimitation (contournement) de structures viaires existantes, associés à un mécanisme de prolongement et une sinuosité des voies. Le mécanisme de prolongement des voies nécessite un attachement préférentiel du nouveau nœud aux voies ayant le degré le plus important, en assurant la continuité des voies.

Le calibrage de paramètres pour simuler les voies concentriques présente de nombreuses similitudes avec celui des voies radiales. En fait, les voies concentriques ne peuvent être simulées de manière isolée ; le processus du modèle implique d'abord l'émergence des voies radiales, qui sont ensuite entourées par les voies concentriques.

Pour ce faire, il est essentiel d'activer le paramètre d'attachement préférentiel selon le degré de voie avec $W_p = 1$. De plus, la simulation des voies concentriques dépend également de la valeur de l'angle minimum d'intersection, qui est calibré à une valeur de $A_i = 60^\circ$. Cette valeur

permet d'assurer la continuité des voies sans les contraindre à une extension linéaire, favorisant ainsi l'obtention d'une forme circulaire.

L'impact de ces paramètres est conditionné par le rapport entre les valeurs de deux autres paramètres : la distance de répulsion r_0 et la longueur maximale l_{max} . En effet, pour simuler des voies concentriques, il est nécessaire de définir une valeur élevée de r_0 . D'autre part, la valeur l_{max} doit être supérieure à r_0 , mais sans être excessive, de manière à restreindre suffisamment l'espace d'évolution du réseau. Ainsi, un rapport de $l_{max} \approx 2 \times r_0$ est approprié pour obtenir une simulation correcte des voies concentriques.

Pour le paramètre de construction, les valeurs doivent être limitées à un intervalle compris entre 0 et 0.4 ($0 \leq \omega \leq 0.4$). Les variations des valeurs à l'intérieur de cet intervalle n'ont aucun impact significatif sur les résultats obtenus. Cependant, dès que la valeur seuil de $\omega = 0.5$ est atteinte, les résultats correspondent plutôt à une structure d'enceinte rectangulaire (les résultats des simulations avec différentes valeurs de ω sont illustrés en Annexe 32).

Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.56). Les simulations doivent être réalisées pour un petit nombre d'itérations.

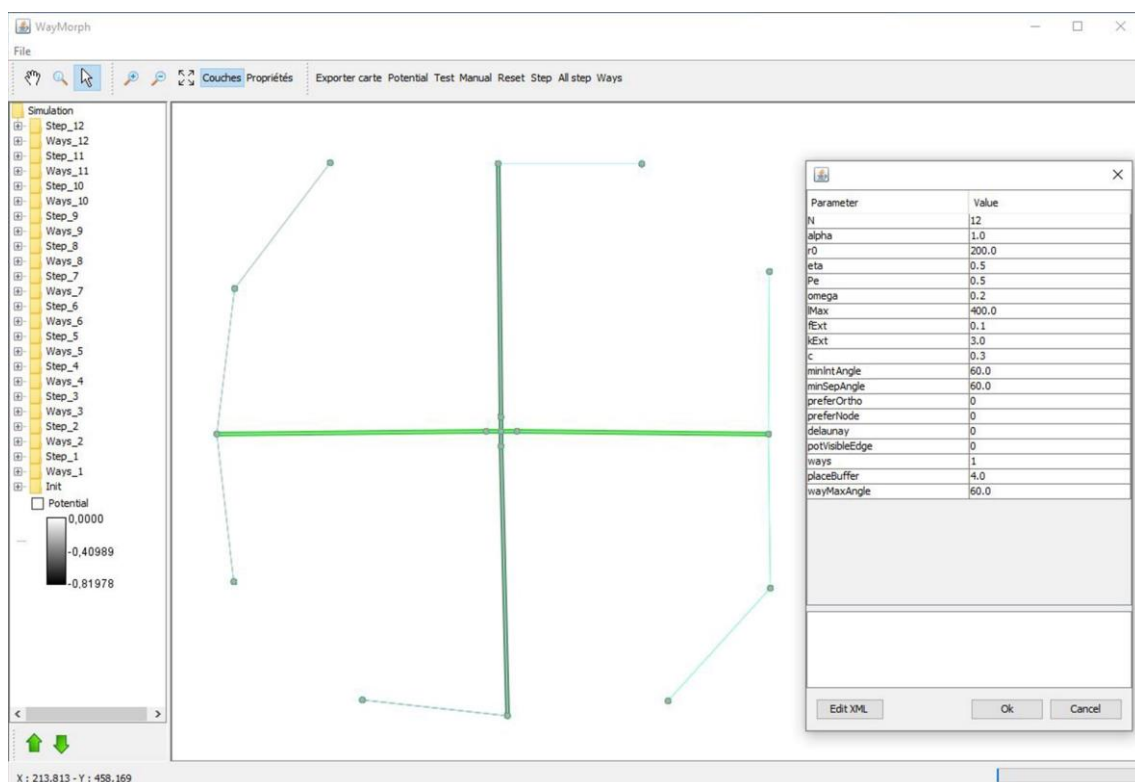


Figure 9.56. Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir d'un réseau d'initialisation composé de deux segments croisés), avec les valeurs de paramètres correspondantes.

Validation de la simulation de voies concentriques

Le modèle WayMorph parvient à approcher le processus de création des voies concentriques (Figure 9.56). Toutefois leur simulation complète est impossible, ce qui constitue une des limites du modèle. Cette limite provient de l'impossibilité de connecter deux nœuds existants.

9.2.2.3 Voies convergentes/divergentes

Calibrage pour la simulation de voies convergentes/divergentes

La génération des voies convergentes/divergentes consiste à reproduire un processus de réticulation par subdivision d'un espace délimité, en assurant la connexion entre les voies principales du réseau, c'est-à-dire celles ayant les degrés les plus élevés. Les voies convergentes/divergentes ne peuvent être simulées de manière indépendante, et la simulation est initialisée par un réseau composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires et d'une voie concentrique (Figure 9.57).

La création et le développement de voies convergentes/divergentes sont favorisés par un attachement préférentiel du nouveau nœud selon le degré des voies, ce paramètre de choix binaire est donc activé avec $W_p = 1$. L'objectif est de lier le nouveau nœud aux voies ayant les degrés les plus élevés sans les prolonger davantage. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'établir une forte restriction d'angle pour contraindre le prolongement. Les paramètres angulaires sont donc maintenus à leurs valeurs intermédiaires par défaut avec $A_i = 60^\circ$ et $A_s = 60^\circ$.

La distance de répulsion r_0 est ajustée à une valeur intermédiaire de manière à établir une simuler un morphotype de taille intermédiaire (moyennement étendu). La valeur de la longueur maximale l_{max} est adaptée pour limiter l'expansion périphérique du réseau. Le rapport entre les valeurs de r_0 et l_{max} est fixé à $l_{max} \approx 2 \times r_0$.

Le paramètre de construction ω est calibré dans une plage comprise entre 0.2 et 0.4 afin d'éviter une forte densification ainsi qu'une ramification excessive du réseau. Le paramètre d'organisation P_e est calibré avec une valeur $P_e = 0.8$ pour assurer une sélection optimale de nœuds candidats. Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut.

Validation de la simulation de voies convergentes/divergentes

Le modèle est capable de simuler les voies convergentes/divergentes par subdivision de l'espace délimité par les voies existantes, en connectant les nouvelles voies à ces dernières (Figure 9.58, figure 9.59 et figure 9.60).

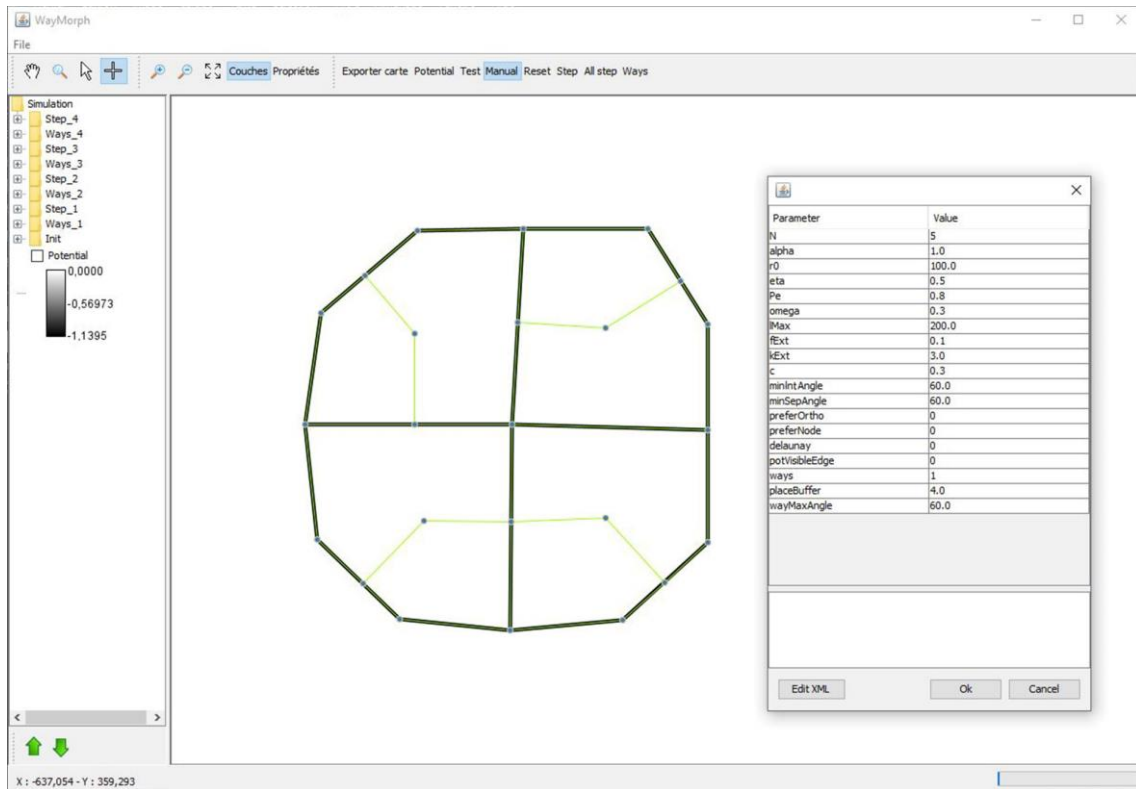


Figure 9.57. Illustration de la simulation de voies convergentes/divergentes (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires et une voie concentrique), avec les valeurs de paramètres correspondantes.

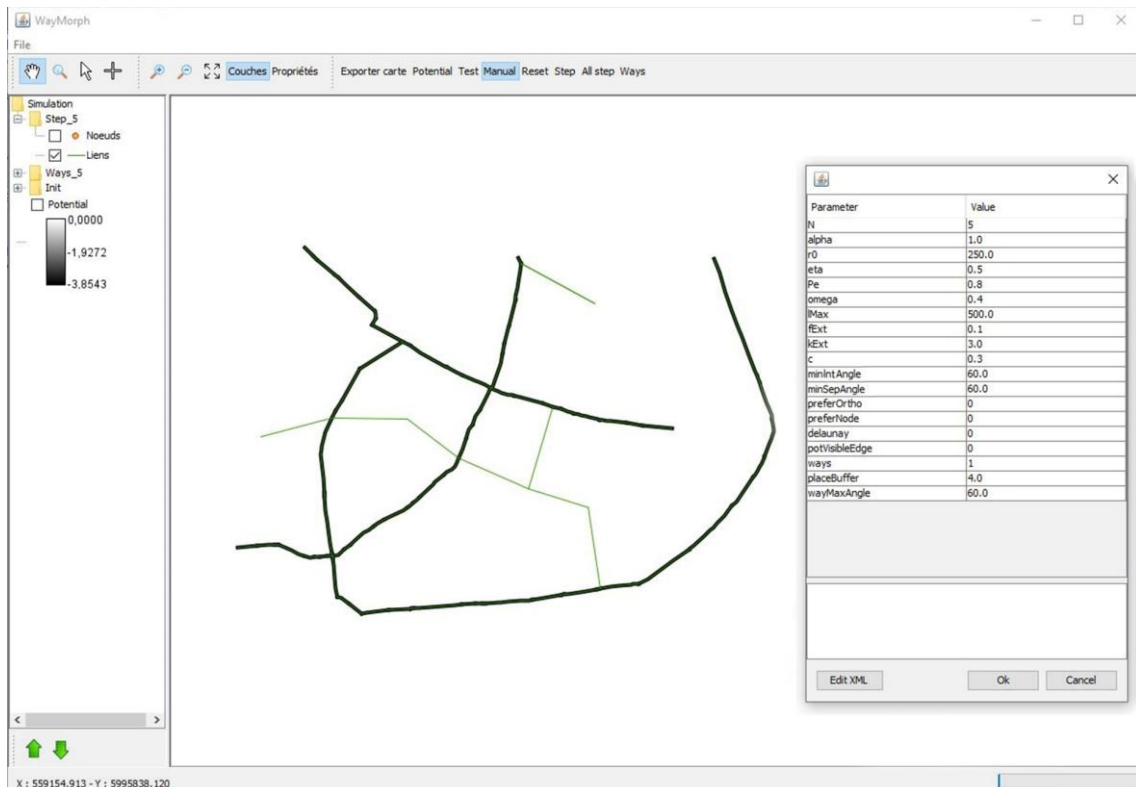


Figure 9.58. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$.

Partie 3 - Simulation de la morphogénèse des réseaux viaires

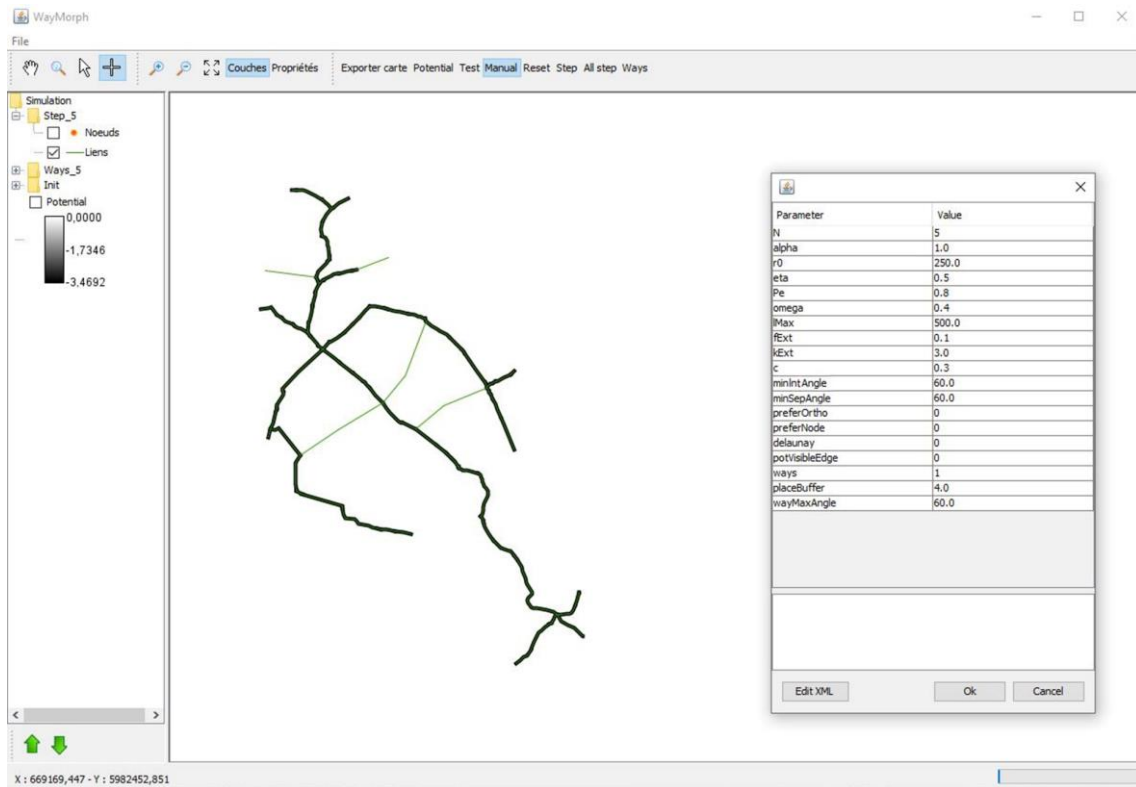


Figure 9.59. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$.

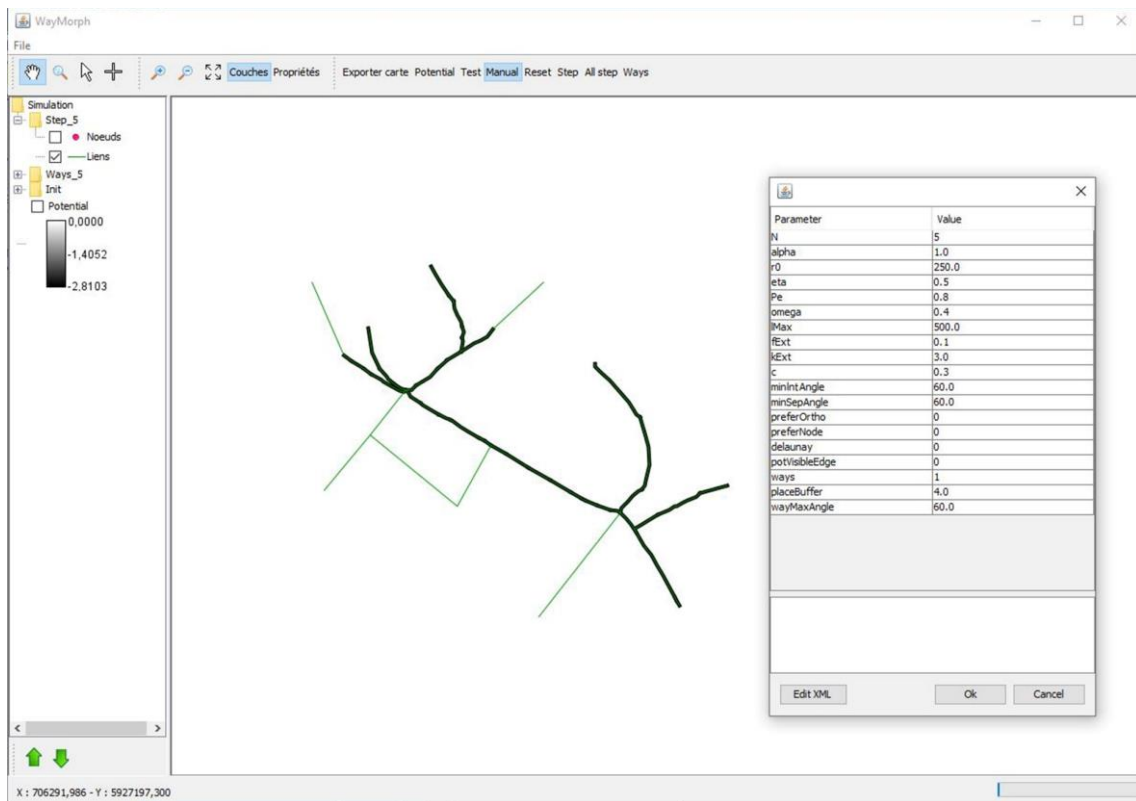


Figure 9.60. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$.

9.2.2.4 Voies ramifiées

Calibrage pour la simulation de voies ramifiées

La simulation des voies ramifiées nécessite principalement un calibrage du paramètre de construction ω avec une valeur $\omega = 0$ pour connecter le nouveau nœud au réseau par un seul segment.

Les valeurs respectives de la distance de répulsion r_0 et la longueur maximale l_{max} peuvent être ajustées en fonction de la taille souhaitée du morphotype simulé. Leur calibrage permettra par exemple de simuler des structures ramifiées de petite taille (faible étendue) au centre du réseau (densification), ou des structures ramifiées plus larges en périphérie du réseau (extension). Les voies ramifiées ne peuvent pas être simulées de manière indépendante puisqu'elles émergent par rattachement à une structure initiale. Leur simulation est initiée à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (Figure 9.61).

Les paramètres de choix binaires de rattachement aux nœuds d'extrémité E_{pp} et d'attachement préférentiel selon le degré de voie W_p peuvent également être ajustés selon les structures souhaités :

- Des valeurs respectives de $E_{pp} = 1$ et $W_p = 0$ permettent de simuler des structures ramifiées faiblement connectées au réseau existant.
- Des valeurs respectives de $E_{pp} = 0$ et $W_p = 1$ permettent de simuler des structures ramifiées davantage connectées au réseau existant et hiérarchisées, en favorisant la continuité des voies.
- Des valeurs respectives de $E_{pp} = 1$ et $W_p = 1$ permettent de simuler des structures arborescentes fortement hiérarchisées et faiblement connectées au réseau existant.

Les résultats de simulations de ces combinaisons de valeur sont illustrés en Annexe 33.

Une variation de l'angle minimum d'intersection est également possible dans un intervalle de $30 \leq A_i \leq 60$ (des résultats de simulations avec des valeurs de $A_i = 30^\circ$ et $A_i = 60^\circ$ sont illustrés Annexe 33.). Comme la valeur choisie pour le paramètre de construction implique que le nouveau nœud est connecté par un seul segment à la fois, aucun calibrage de la valeur de l'angle minimum de séparation A_s est nécessaire.

Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.61). Les simulations peuvent être réalisées pour n'importe quel nombre d'itérations.

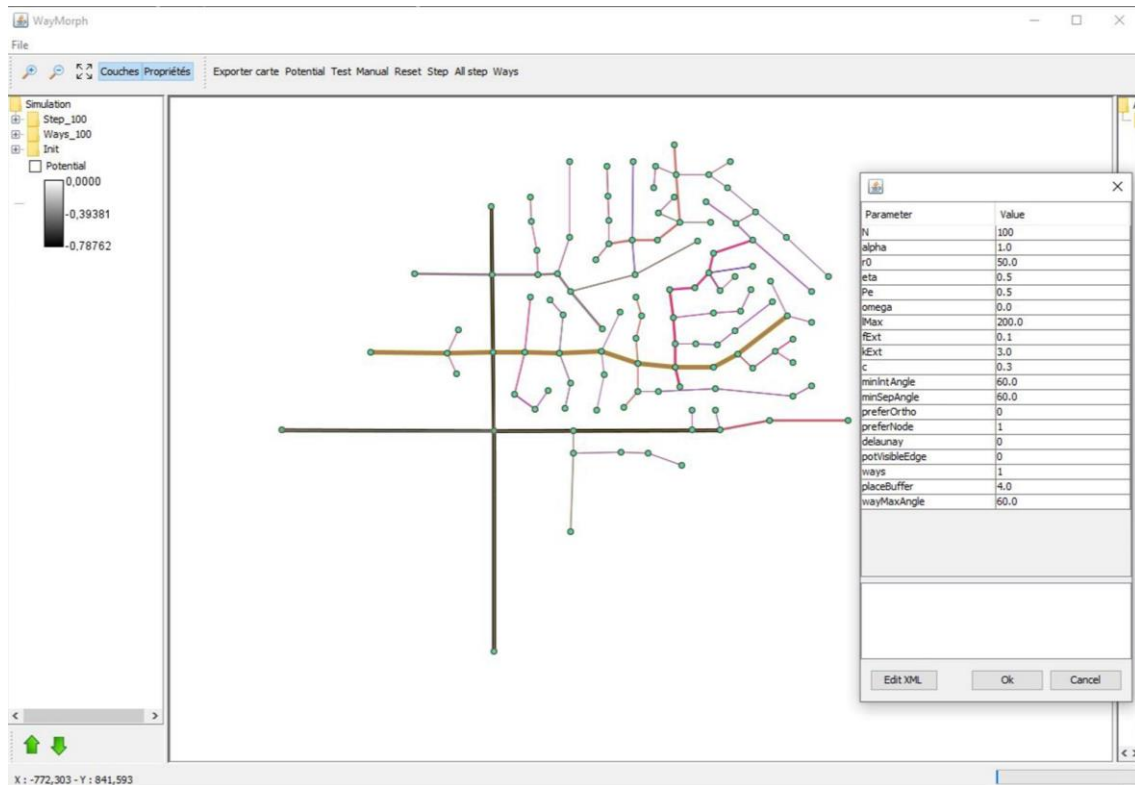


Figure 9.61. Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

Validation de la simulation de voies ramifiées

Le modèle est capable de simuler les voies ramifiées à partir d'un réseau existant (Figure 9.62, figure 9.63 et figure 9.64).

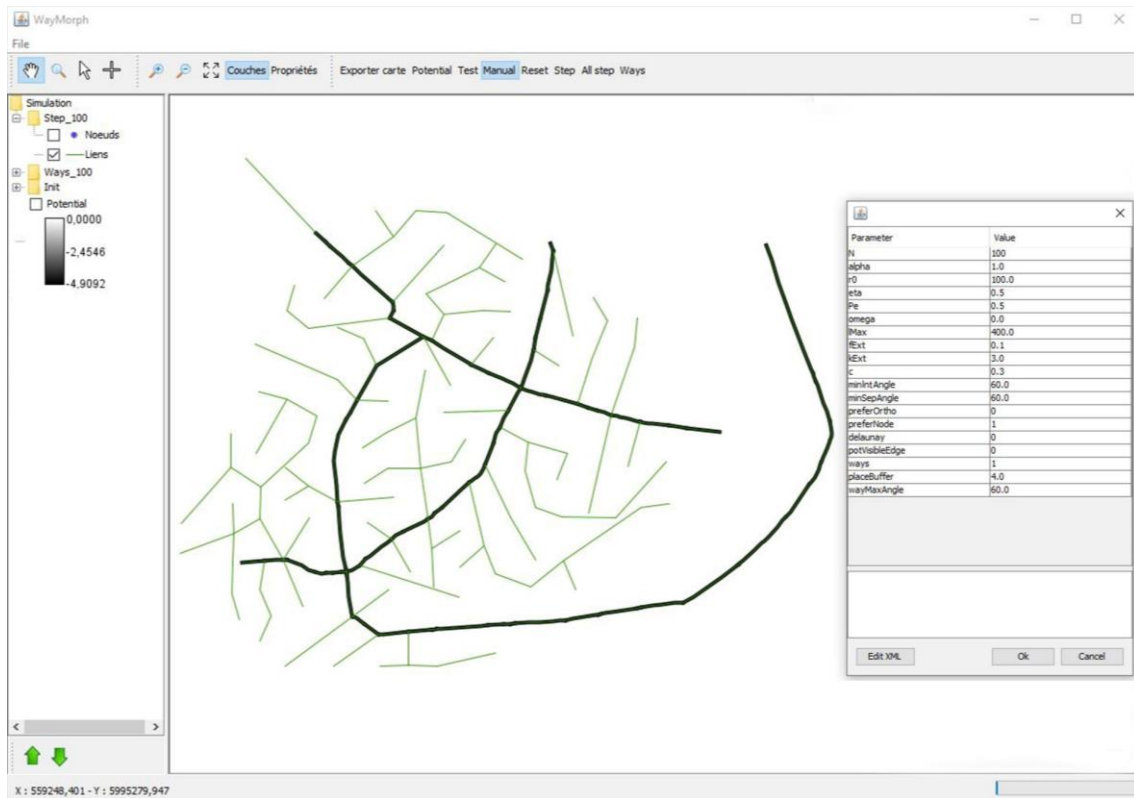


Figure 9.62. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$

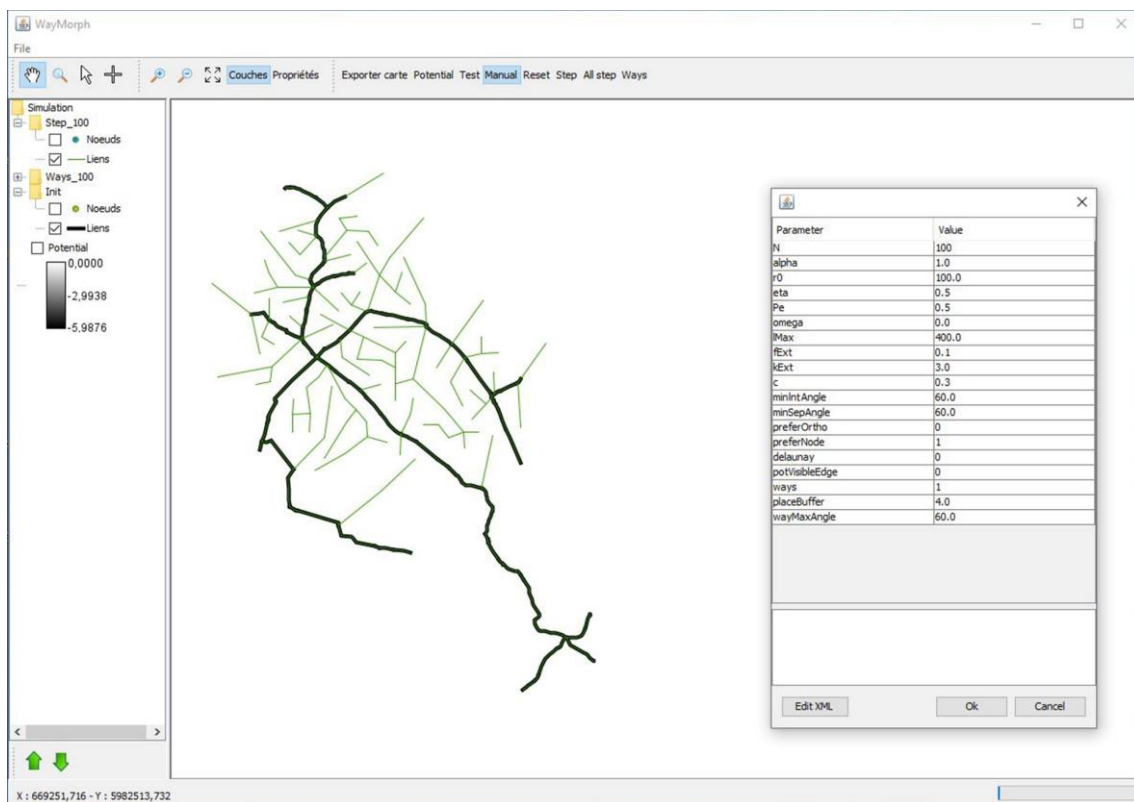


Figure 9.63. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$.

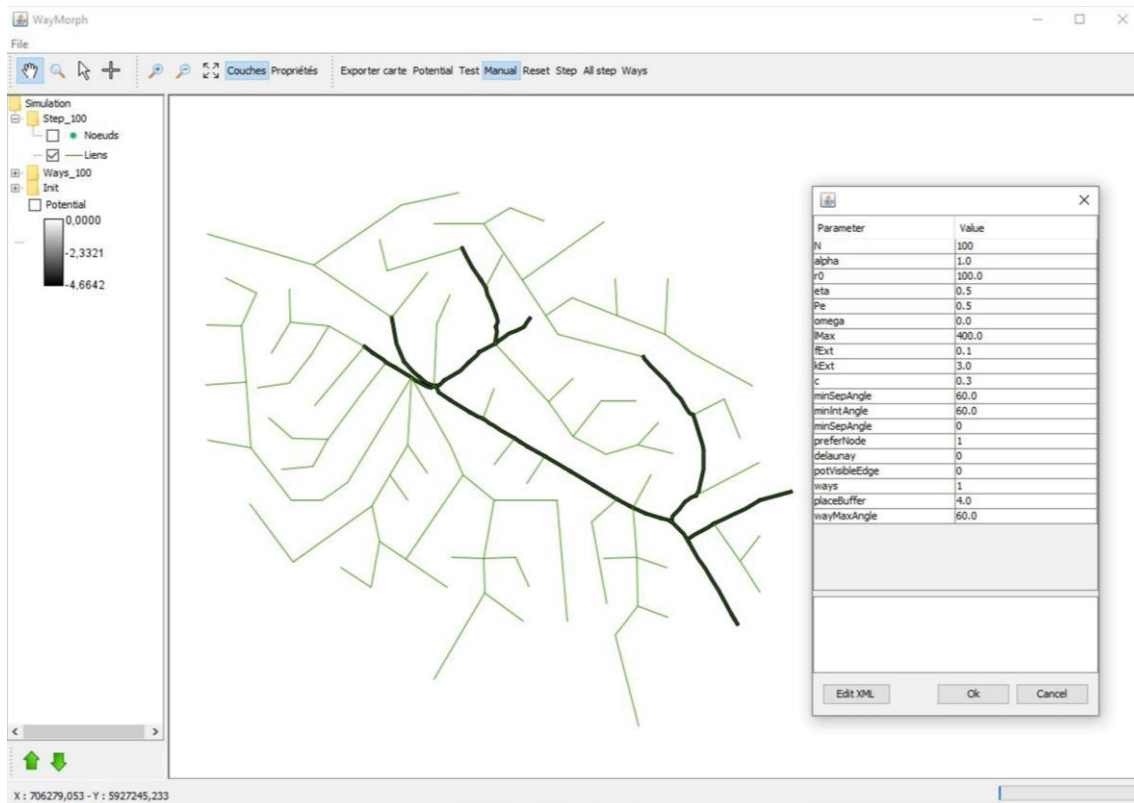


Figure 9.64. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$.

9.2.2.5 Voies orthogonales/diagonales

Calibrage pour la simulation de voies orthogonales/diagonales

La simulation des voies orthogonales/ diagonales consiste à reproduire un mécanisme de réticulation par une subdivision d'un espace délimité par les voies convergentes/divergentes. Cela nécessite principalement de connecter le nouveau nœud par projection orthogonale, tout en favorisant la continuité des voies. Les paramètres de rattachement par projection orthogonale et de l'attachement préférentiel selon le degré des voies sont donc activés avec $O_p = 1$ et $W_p = 1$.

En outre, les voies orthogonales/diagonales ne peuvent être simulées de manière isolée, la simulation est initiée à partir d'un réseau composé deux voies radiales/linéaires, une voie concentrique et des voies convergentes/divergentes (Figure 9.65).

La distance de répulsion r_0 est ajustée à une valeur intermédiaire de manière à simuler des morphotypes de taille intermédiaire. Le rapport entre les valeurs l_{max} et r_0 est fixée à $l_{max} \approx 2 \times r_0$. Dans l'exemple de la simulation illustrée par la Figure 9.67, la valeur de l_{max} a été définie à 160 et la valeur de r_0 à 80.

La valeur de l'angle minimum d'intersection A_i est choisie proche de 30° si on veut simuler la création de segments en diagonale, et proche de 60° si on veut simuler la création de structures orthogonales.

Le paramètre de construction ω est calibré dans une plage comprise entre 0.5 et 1 afin de favoriser la densification du réseau. Le facteur d'étalement est calibré à une valeur de $k_{\text{ext}} = 1$ pour n'induire aucun étalement du réseau si la probabilité d'étalement est appliquée. La valeur du facteur de séparation des rues c est choisie de manière à assurer une continuité des voies au niveau des intersections. Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.65).

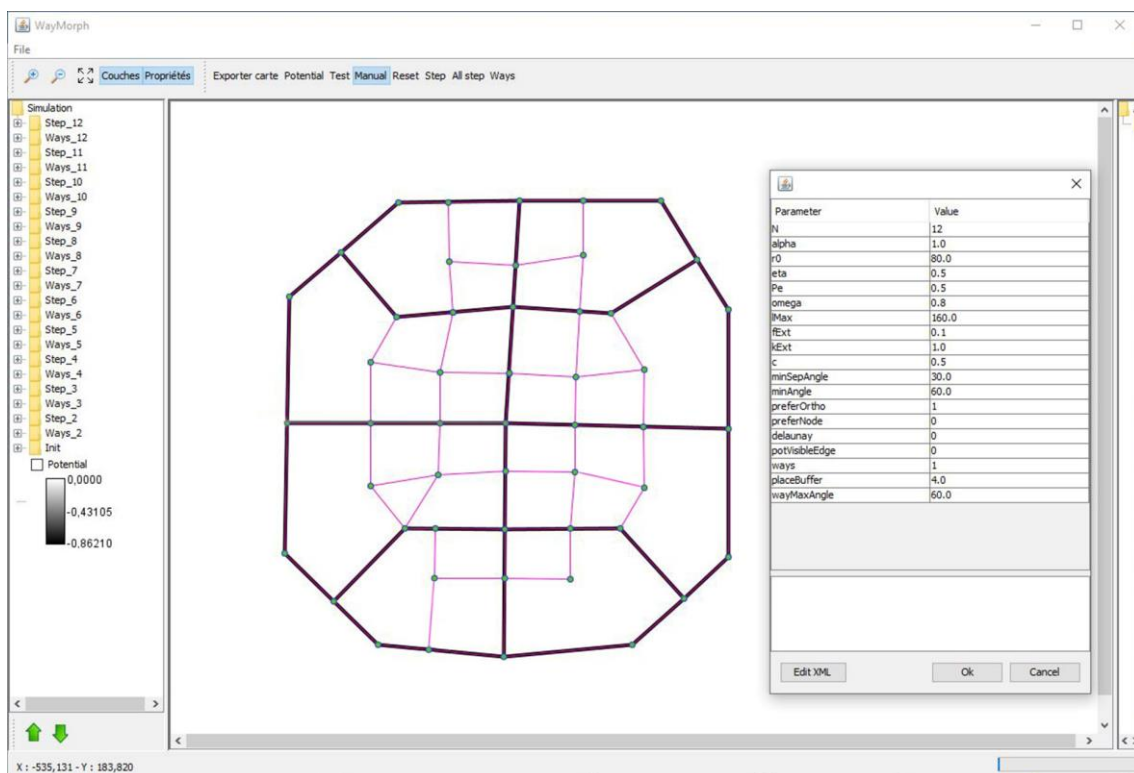


Figure 9.65. Illustration de la simulation de voies orthogonales/diagonales (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

Validation de la simulation de voies orthogonales/diagonales

Le modèle est capable de simuler les voies orthogonales et diagonales à partir d'un réseau existant (Figure 9.66, figure 9.67 et figure 9.68).

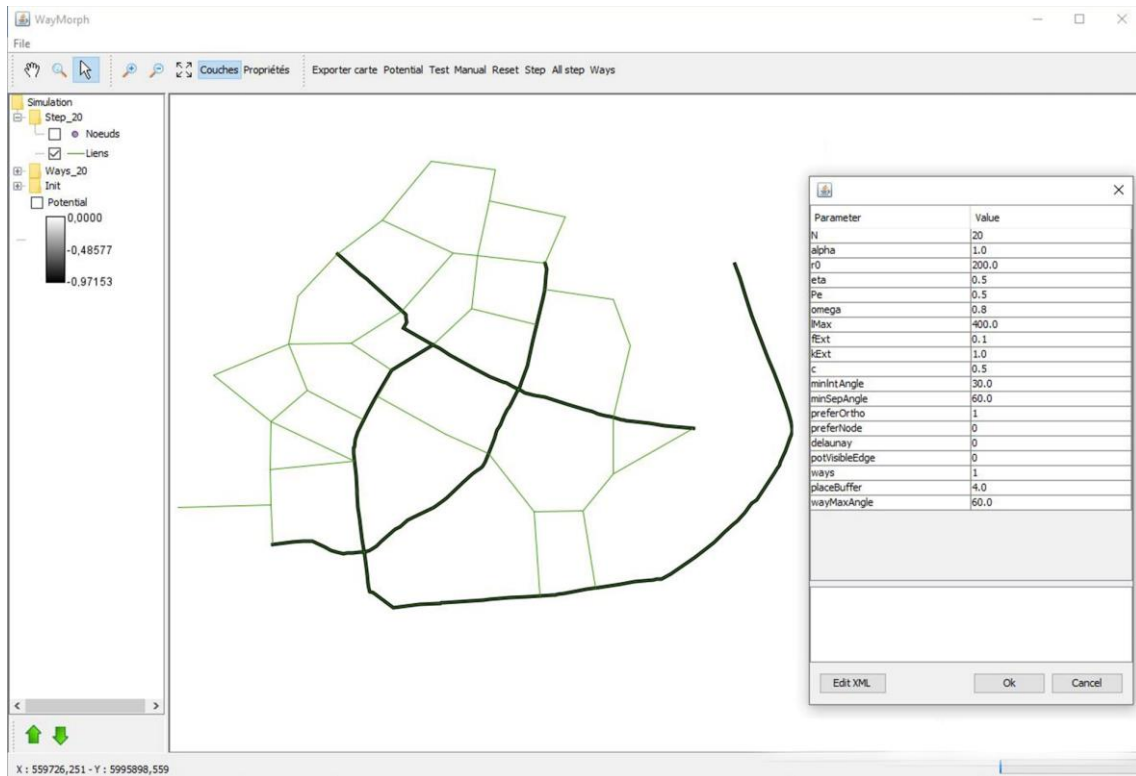


Figure 9.66. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$.

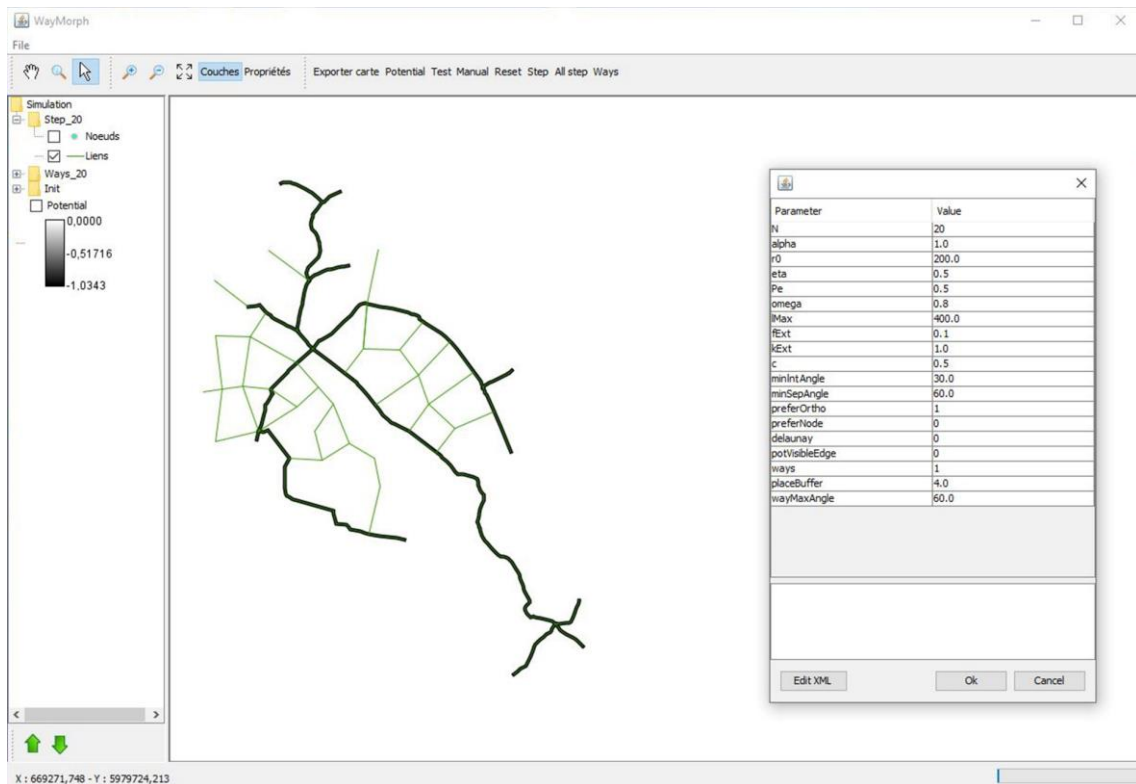


Figure 9.67. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$.

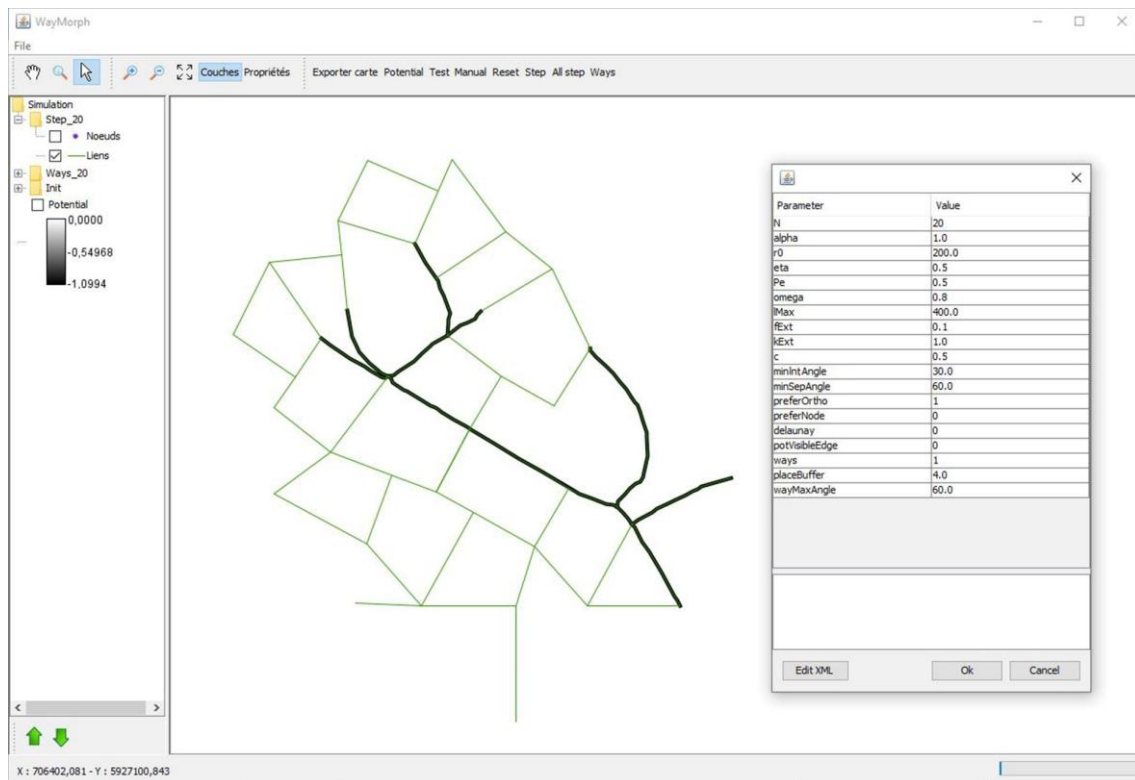


Figure 9.68. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$.

9.2.2.6 Voies transversales

Calibrage pour la simulation de voies transversales

La simulation des voies transversales reproduit un processus de densification favorisant la continuité des voies au niveau des intersections. Cela nécessite d'activer l'attachement préférentiel selon le degré des voies et le rattachement par projection orthogonale ($W_p = 1$ et $O_p = 1$). La distance de répulsion r_0 est fixée à une valeur intermédiaire de manière à simuler des morphotypes de taille intermédiaire. Le rapport de r_0 et l_{max} est fixé à $l_{max} \approx 4 \times r_0$.

Les valeurs du paramètre de construction sont calibrées dans un intervalle compris entre 0,2 et 0,4 ($0.2 \leq \omega \leq 0.4$). Les variations des valeurs à l'intérieur de cet intervalle n'ont pas d'impact significatif sur les résultats obtenus. Cependant, lorsque les valeurs deviennent très faibles, des voies intercalaires sont générés. Dès que la valeur seuil de $\omega = 0.5$ est atteinte, les résultats correspondent à des structures en grille.

Le facteur d'étalement est calibré à une valeur de $k_{ext} = 1$ pour n'induire aucun étalement du réseau si la probabilité d'étalement est appliquée. La valeur du facteur de séparation des rues c doit être élevée pour forcer la continuité des voies au niveau des intersections : $c = 0.8$.

Les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.69). Les simulations peuvent être réalisées pour n'importe quel nombre d'itérations.

Validation de la simulation de voies transversales

Le modèle WayMorph parvient à approcher au mieux la simulation des voies transversales (Figure 9.70, figure 9.71 et figure 9.72). Néanmoins, la simulation des voies transversales est entravée par deux limitations majeures, d'une part, l'incapacité de connecter deux nœuds déjà existants, et d'autre part, l'impossibilité de relier deux nœuds du réseau en traversant un segment existant. En raison de ces contraintes, certaines voies se retrouvent bloquées sous une forme intercalaire, sans avoir la possibilité de se prolonger au-delà de leur intersection avec un segment existant.

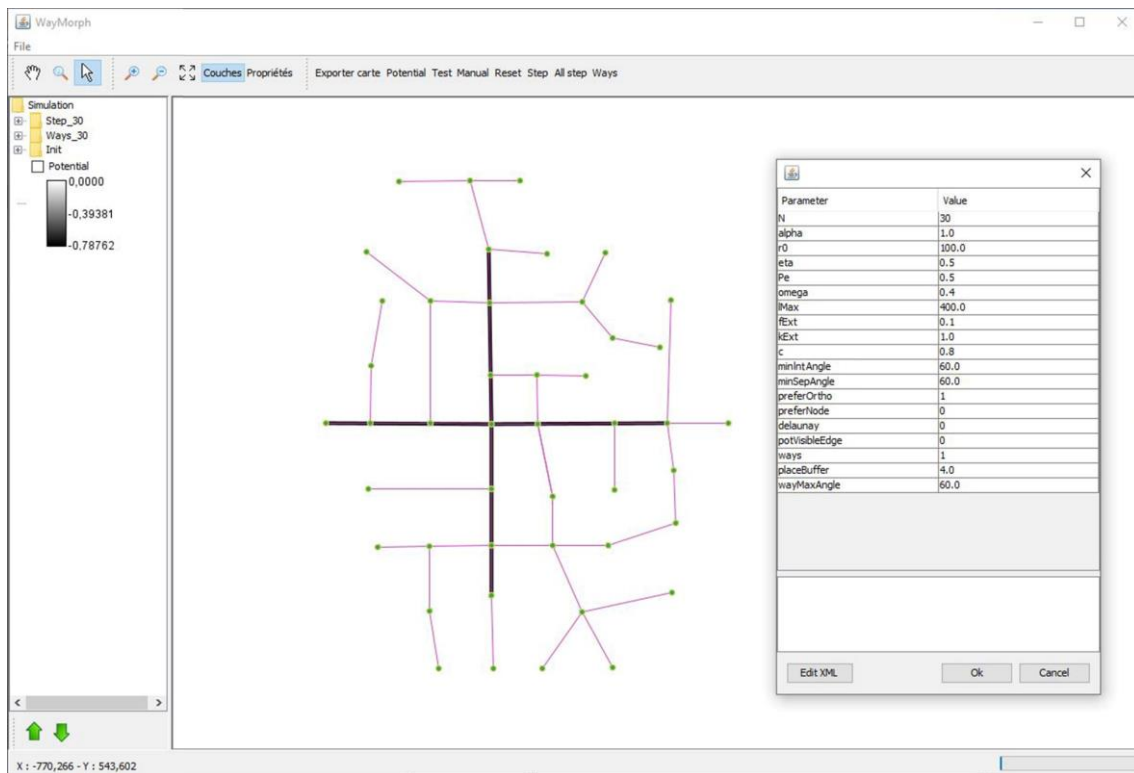


Figure 9.69. Illustration de la simulation de voies transversales (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

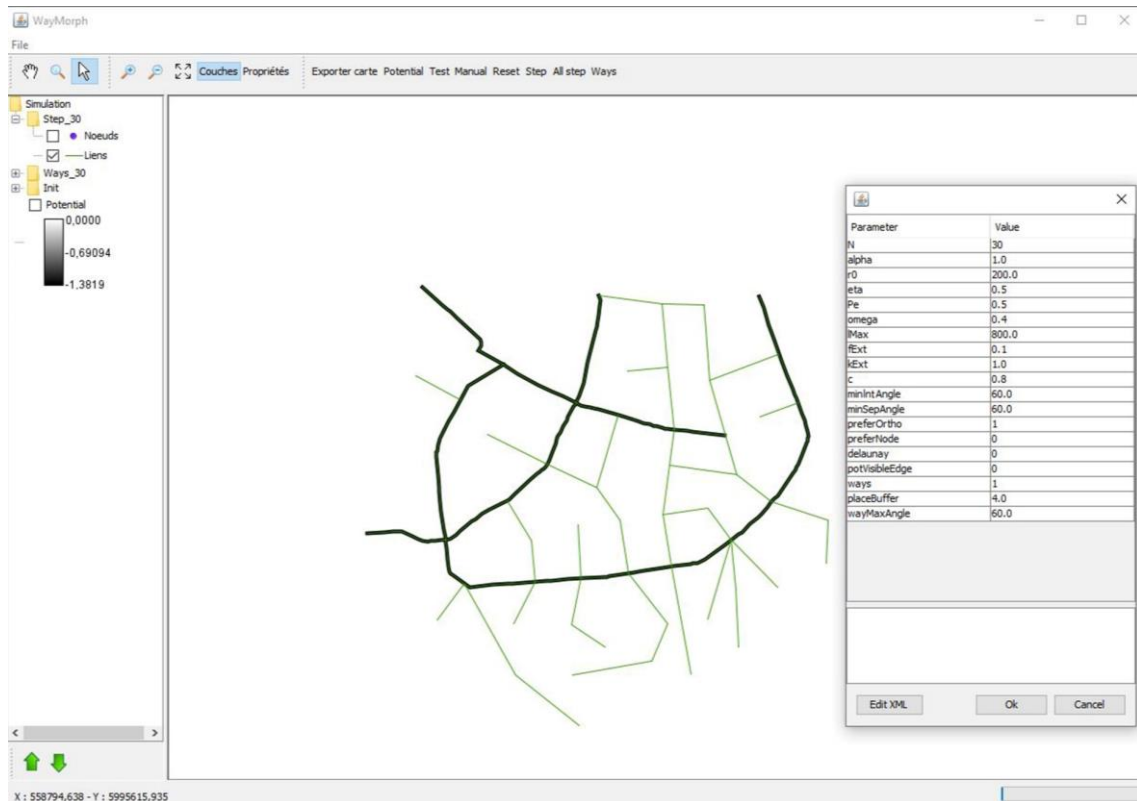


Figure 9.70. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$.

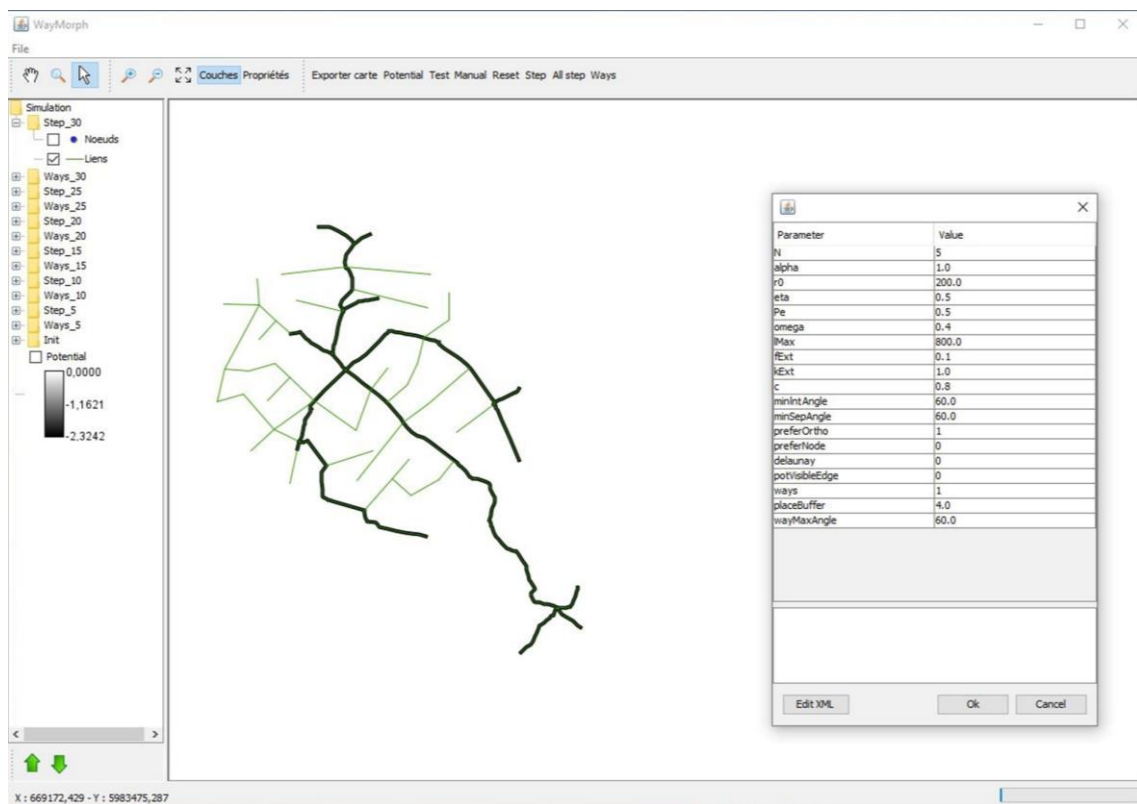


Figure 9.71. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$.

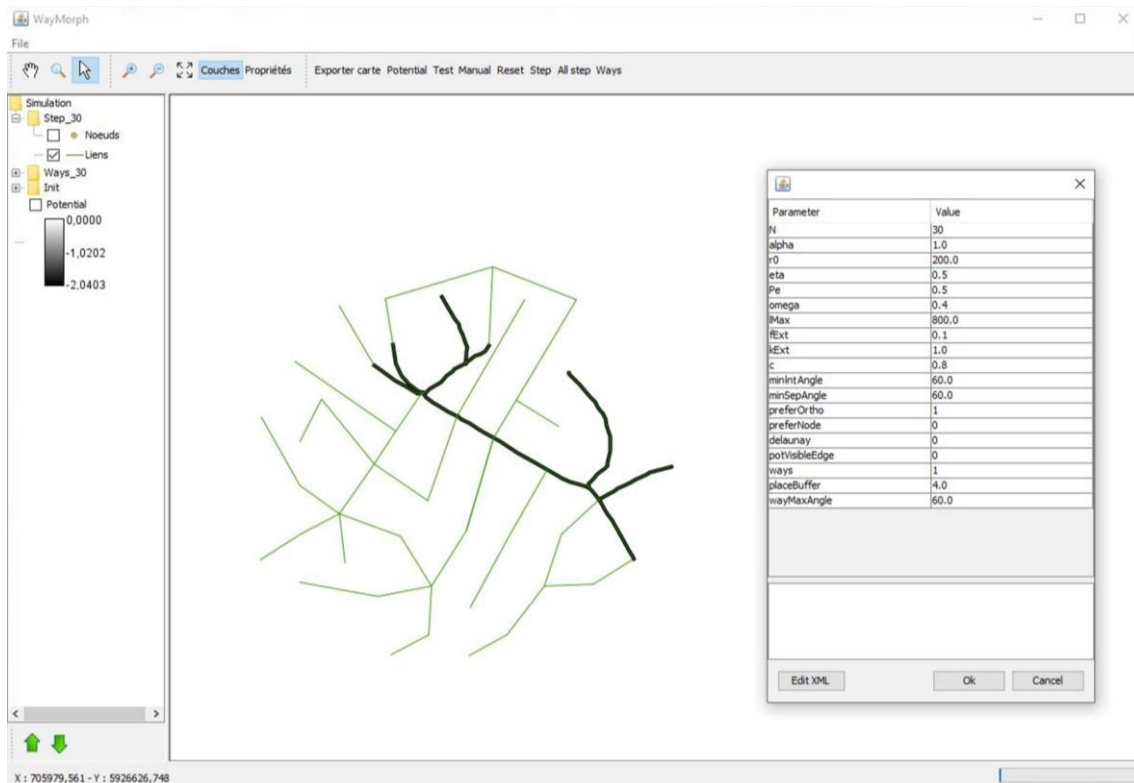


Figure 9.72. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{\max} = 800$

9.2.2.7 Voies Intercalaires

Calibrage pour la simulation de voies intercalaires

Le calibrage de paramètres pour simuler les voies intercalaires présente quelques similitudes avec celui des voies transversales. La simulation des voies intercalaires nécessite en effet un attachement préférentiel selon le degré des voies et le rattachement par projection orthogonale ($W_p = 1$ et $O_p = 1$). Toutefois les voies intercalaires sont des morphotypes de petite taille. La distance de répulsion r_0 est donc ajustée à une valeur de $r_0 = 50$. L'emprise spatiale du réseau simulé est contrainte par une valeur de la longueur maximale $l_{\max} = 200$.

La simulation de voies intercalaire nécessite également un calibrage du paramètre de construction avec une valeur $\omega = 0$. Cela oblige de connecter le nouveau nœud par un seul segment, assurant ainsi la création de segments parallèles aux segments existants et limitant la connexion entre eux. Le facteur d'étalement est calibré à une valeur de $k_{\text{ext}} = 1$ pour n'induire aucun étalement du réseau si la probabilité d'étalement est appliquée.

Les autres paramètres peuvent être maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.73). Les simulations peuvent être réalisées pour n'importe quel nombre d'itérations.

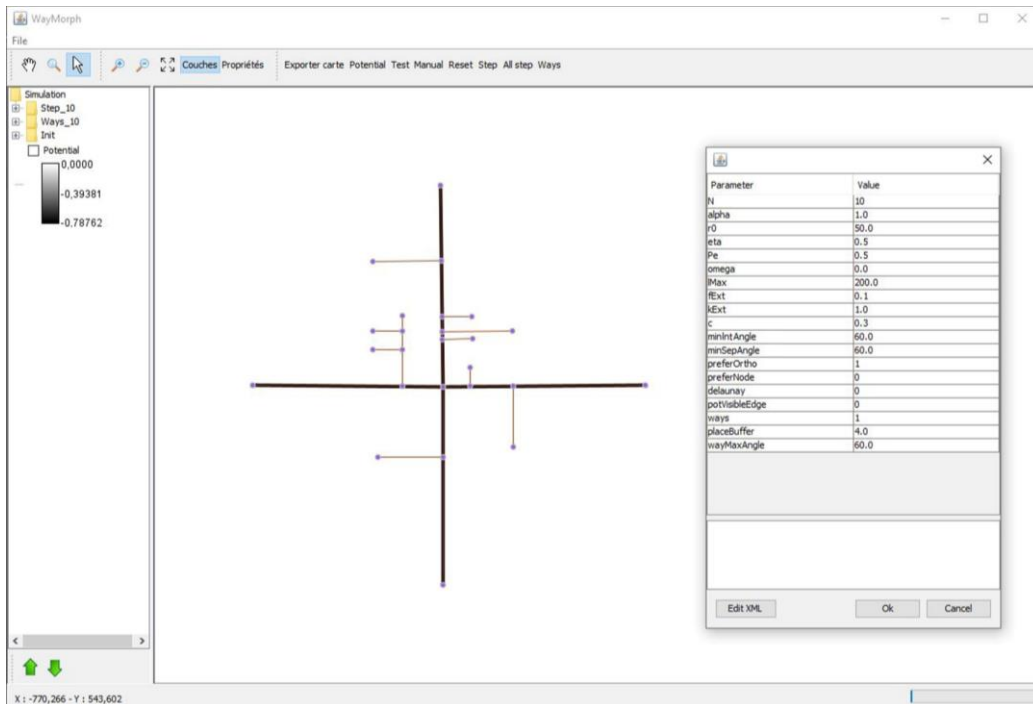


Figure 9.73. Illustration de la simulation de voies intercalaires (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

Validation de la simulation de voies intercalaires

Le modèle est capable de simuler les voies intercalaires à partir de réseau existant (Figure 9.74, figure 9.75 et figure 9.76).

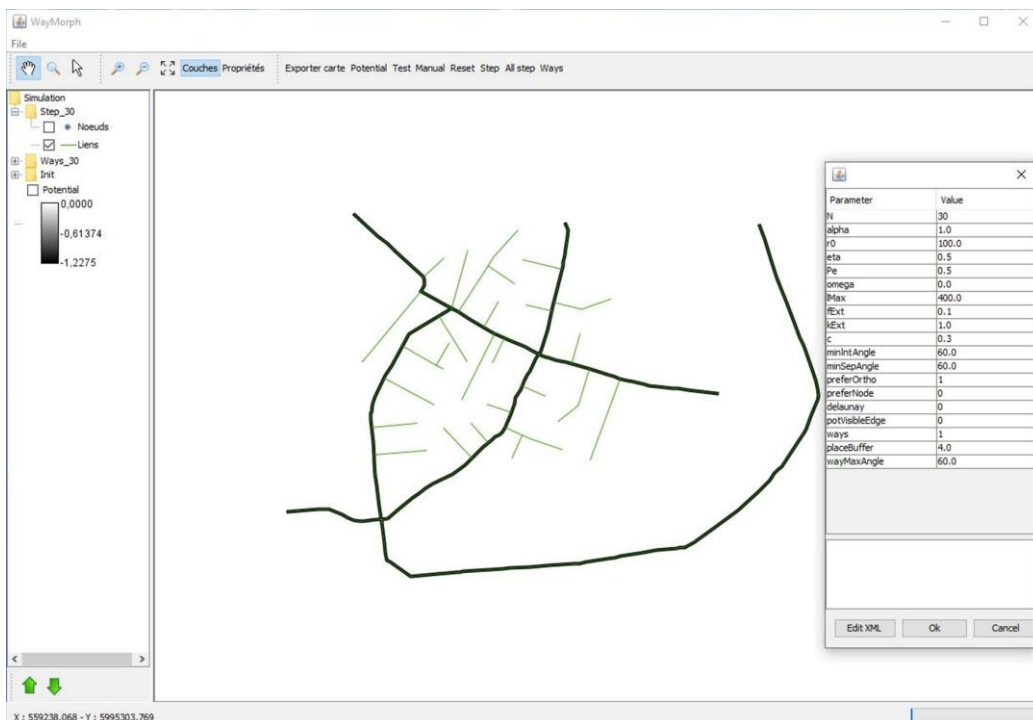


Figure 9.74. Simulation de voies transversales (à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$).

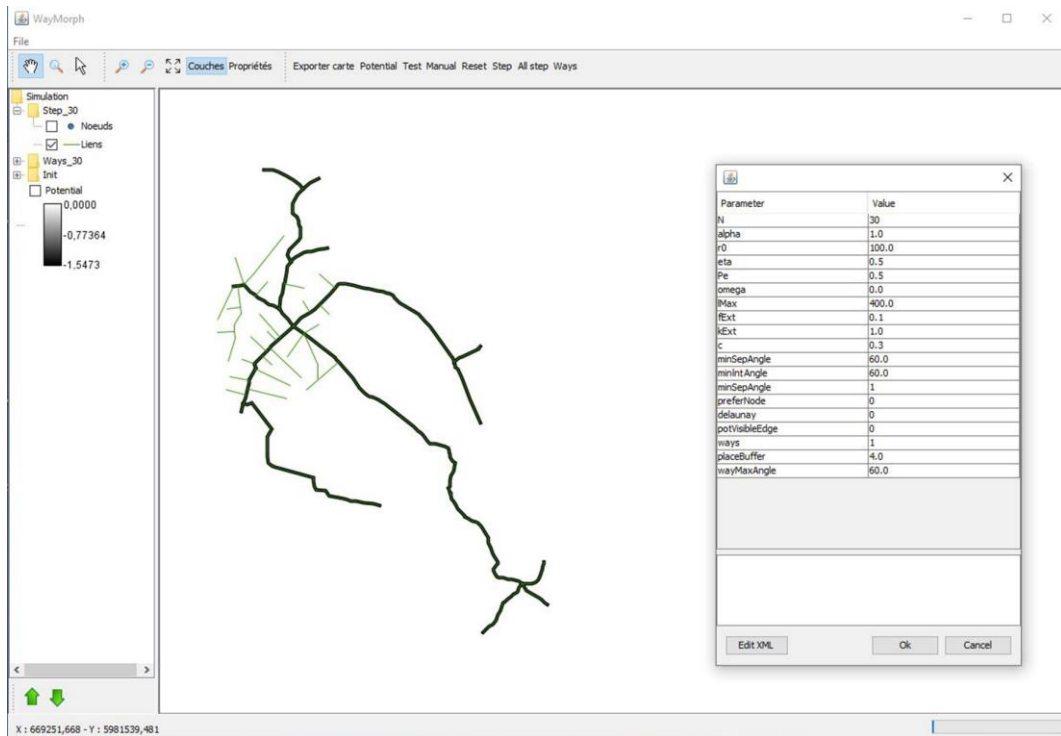


Figure 9.75. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$.

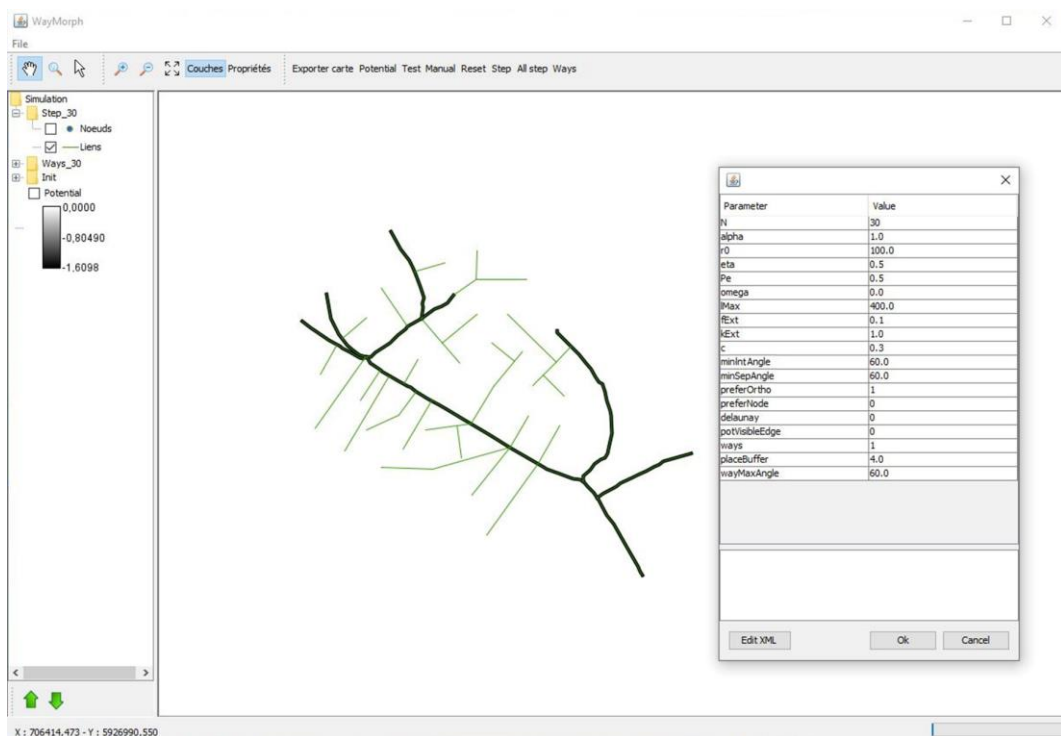


Figure 9.76. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$.

9.2.2.8 Voies cellulaires

Calibrage pour la simulation de voies cellulaires

La simulation des voies cellulaires nécessite principalement de connecter le nouveau nœud par projection orthogonale et de modéliser une forte densification du réseau en reliant le nouveau nœud au réseau existant par plusieurs segments. Le rattachement par projection orthogonale est donc activé avec $O_p = 1$ et le paramètre de construction est fixée à $\omega = 1$. Les morphotypes simulés sont de petite taille avec une distance de répulsion de $r_0 = 50$ et une valeur de $l_{max} = 200$. Une adaptation de la valeur du facteur de séparation des rues $c = 0.4$ permet de favoriser une continuité des segments au niveau des intersections.

Les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut (Figure 9.77). Les simulations peuvent être réalisées avec n'importe quel nombre d'itérations.

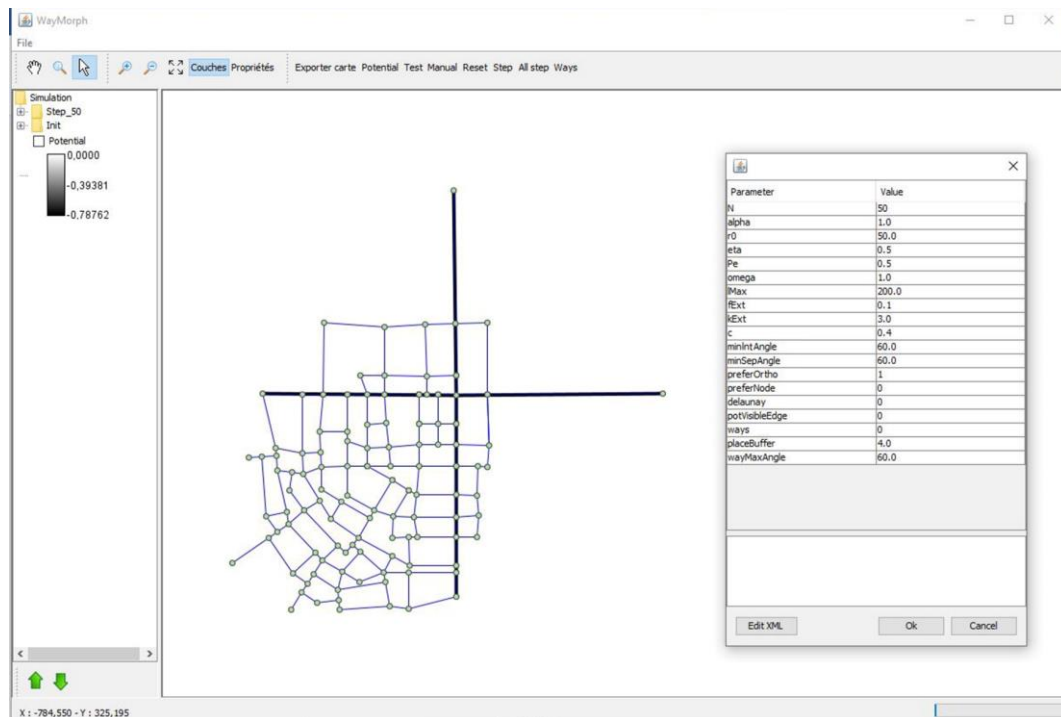


Figure 9.77. Illustration de la simulation de voies cellulaires (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.

Validation de la simulation de voies cellulaires

Le modèle est capable de simuler les voies cellulaires à partir d'un réseau existant (Figure 9.78, figure 9.79 et figure 9.80).

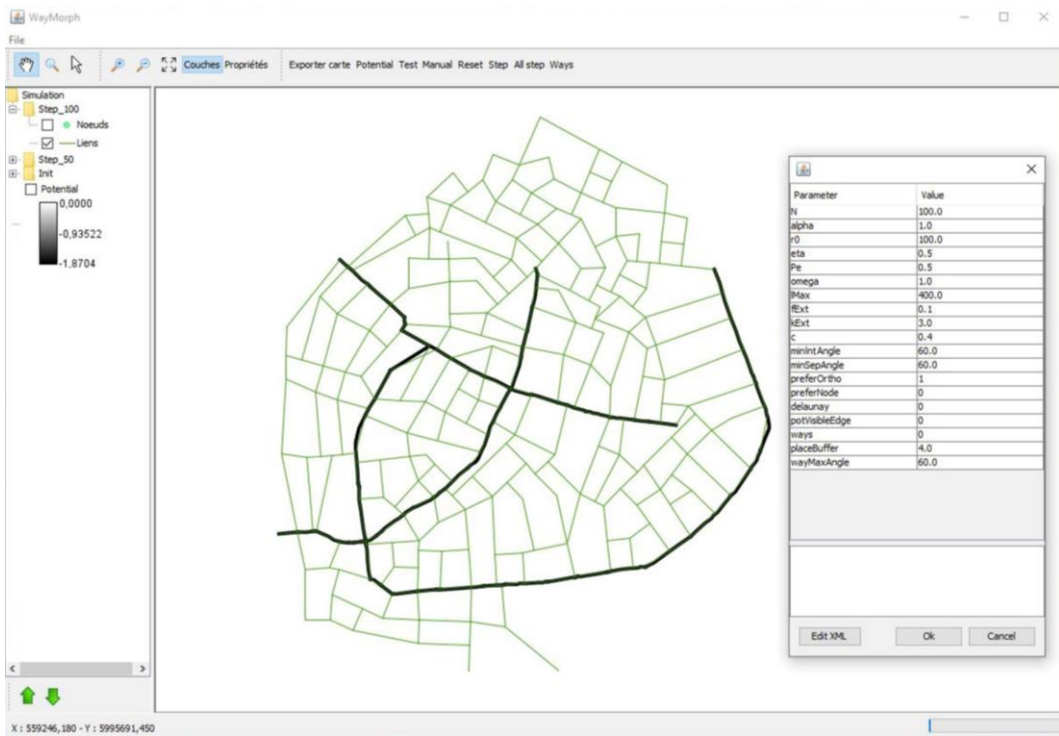


Figure 9.78. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$.

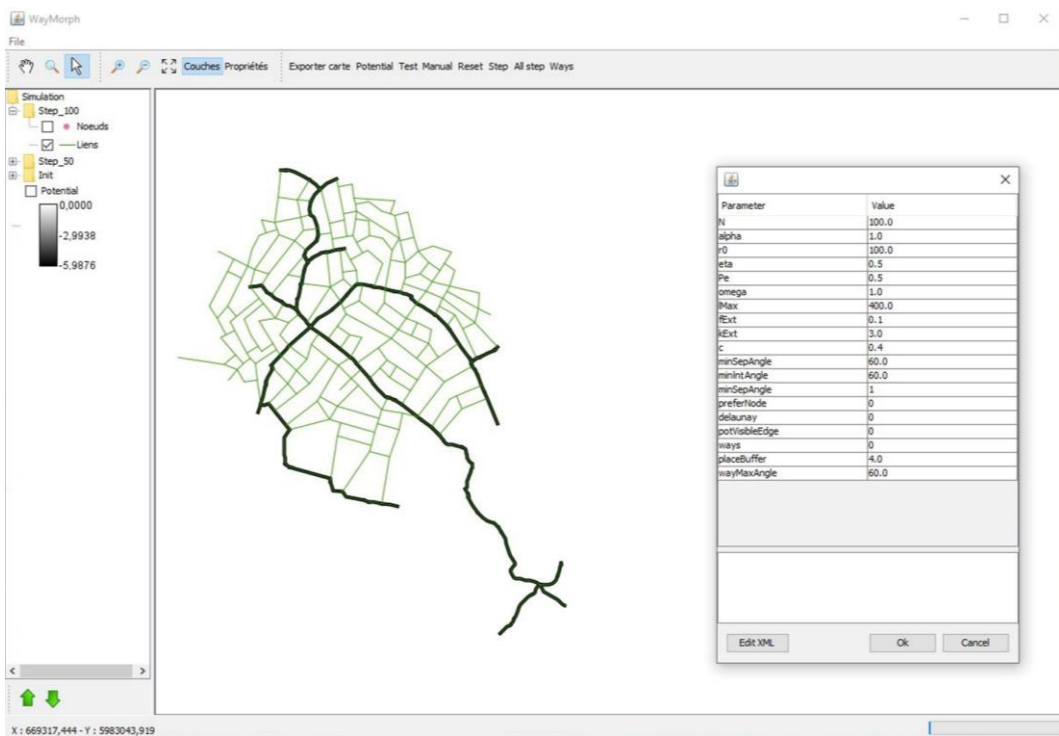


Figure 9.79. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$.

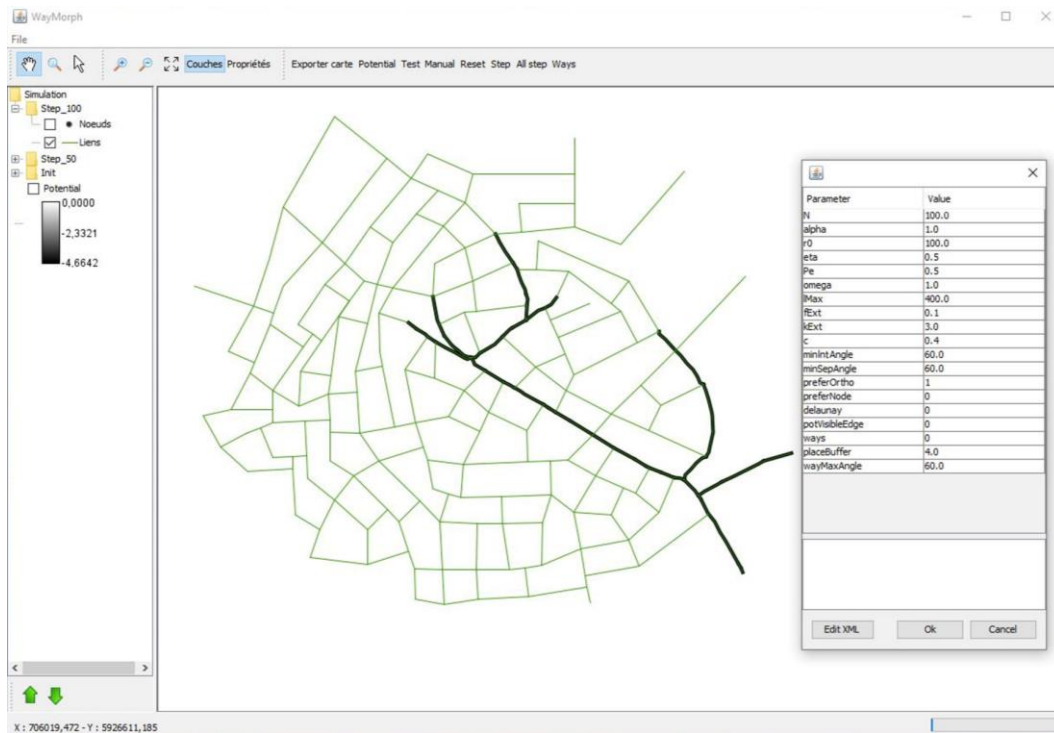


Figure 9.80. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{\max} = 400$.

9.2.3 Synthèse du calibrage et de la validation empirique du modèle

La simulation des morphotypes nécessite des combinaisons spécifiques de valeurs de paramètres. Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif du paramétrage du modèle pour simuler chaque morphotype de voies.

Morphotype de voies	Concentrique	Radiale/ linéaire	Convergente/ divergente	Ramifiée	Orthogonale/ diagonale	Transversale	Intercalaire	Cellulaire
W_p	1	1	1	{0 ; 1}	1	1	1	0
E_{pp}	0	1	0	{0 ; 1}	0	0	0	0
O_p	0	0	0	0	1	1	1	1
α	1	1	1	1	1	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ω	[0 , 0.4]	0	[0.2 , 0.4]	0	[0.5,1]	[0.2 , 0.4]	0	1
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
r_0	varie	varie	varie	varie	varie	varie	varie	varie
k_{ext}	3	3	3	3	1	1	1	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
l_{max}	$l_{max} \approx 2 r_0$	$l_{max} \approx 5 r_0$	$l_{max} \approx 2 r_0$	$l_{max} \approx 4 r_0$	$l_{max} \approx 2 r_0$	$l_{max} \approx 4 r_0$	$l_{max} \approx 4 r_0$	$l_{max} \approx 4 r_0$
A_i	60	90	60	[30 , 60]	[30 , 60]	60	60	60
A_s	60	[60 , 90]	60	30	60	60	60	60
c	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.8	0.3	0.4

Tableau 9.3. Récapitulatif des valeurs ou de l'amplitude des paramètres pour la simulation de chaque morphotype de voies avec le modèle WayMorph. Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

9.3 Synthèse de chapitre 9

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'évaluation, le calibrage et la validation empirique du modèle WayMorph. Les conclusions que nous tirons de ces résultats nous permettent de formuler les premiers retours sur le modèle, son potentiel et ses limites.

L'évaluation du modèle au moyen de l'analyse de stabilité a démontré qu'en effet le modèle est relativement stable à l'échelle du graphe viaire, et moins stable à l'échelle des voies. Ces résultats sont cohérents avec l'approche et les objectifs de conception du modèle WayMorph, qui visent à simuler une variété de réseaux viaires de manière manuelle et délibérée, intégrant des disparités locales tout en exhibant des propriétés globales communes.

L'analyse de sensibilité a permis de déterminer l'amplitude de variation et les intervalles de confiance des valeurs des paramètres, d'une part, et de vérifier les effets de la variation des valeurs de paramètres sont cohérents par rapport aux hypothèses de leur formalisation, d'autre part. Le modèle est sensible au réseau d'initialisation uniquement lorsque ce dernier a une structure spécifique. Cette analyse de sensibilité permet également de mettre en évidence que la valeur de certains paramètres produit l'effet escompté uniquement lorsque la valeur d'un autre paramètre se situe dans un intervalle spécifique. Cela a aidé au calibrage des paramètres pour la simulation de chaque morphotype de voies.

Selon les morphotypes que l'on souhaite simuler, certains paramètres doivent prendre une valeur spécifique, tandis que d'autres, il suffit de fixer un intervalle de valeurs. Ce deuxième cas de figure permet de générer les morphotypes souhaités avec quelques variations locales. Le nombre d'itérations doit être limité pour la simulation des morphotypes de grande taille (large étendue) à savoir les voies radiales/linéaires et les voies concentriques. La simulation de morphotypes de taille petite ou intermédiaire n'est pas contrainte par le nombre d'itérations.

La validation empirique du modèle a consisté en un contrôle visuel du réalisme des morphotypes de voies simulés à partir de différents réseaux d'initialisation. Les réseaux présentés illustrent certains résultats possibles du modèle. D'autres résultats avec des segments différents localement peuvent être obtenus en utilisant les mêmes valeurs de paramètres et réseaux d'initialisation puisque le modèle induit une certaine stochasticité. Toutefois, dans l'ensemble, les résultats de simulation de chaque morphotype sont visuellement similaires.

Au regard des différentes caractéristiques attendues des réseaux simulés, le modèle est validé pour ce qui concerne la simulation de la plupart des morphotypes de voies. Deux morphotypes font exception à savoir les voies concentriques et les voies transversales pour lesquelles les résultats de simulation sont peu satisfaisants.

La validation du modèle nécessite également de vérifier qu'il est capable de reproduire, en plus de la forme, des propriétés structurelles de réseaux viaires réels (identifiées dans la partie 1, chapitre 4). Cela implique l'analyse des caractéristiques morphologiques et topologiques des réseaux simulés et la comparaison de leur propriété structurelle à celles identifiées pour les réseaux réels, en tenant compte de l'ensemble du réseau. Ceci fait l'objet du chapitre 10.

Chapitre 10

Simulation des réseaux viaires de différentes formes de villes

Ce chapitre est dédié la simulation de différents types de réseaux viaires avec le modèle WayMorph. Nous partons de l'hypothèse que la forme urbaine globale est principalement déterminée par la trame viaire correspondante, qui est construite selon des séquences d'évolution successives. Cette évolution implique une juxtaposition et une imbrication de différents morphotypes de voies à différentes échelles spatiales.

Nous simulons deux catégories de scénarios, les uns concernant des formes de villes simples à partir d'une typo-morphologie "statique", les autres concernant des formes de villes plus complexes en partant d'une typo-morphologie associée aux processus évolutifs.

Dans la section 10.1, nous présentons brièvement des formes de villes simples qui sont considérées pour la définition de huit scénarios. La simulation de chacune de ces formes simples de réseau viaire implique un paramétrage spécifique du modèle en différentes séquences.

Dans la section 10.2, nous présentons d'abord de manière succincte des formes de villes plus complexes pour sélectionner ensuite deux scénarios que nous simulons. Ensuite, chaque scénario simulé est associé à un paramétrage défini pour différentes séquences, elles-mêmes correspondant à différentes phases d'évolution urbaine. Les deux scénarios sont appliqués pour simuler une évolution partant du réseau viaire historique de Dijon au 17^{ème} siècle.

Pour la première catégorie de scénarios (formes de villes simples), l'accent est particulièrement mis sur l'appréciation de la forme globale à partir des indicateurs calculés sur les voies. La méthodologie adoptée et l'apport de chaque indicateur ont été présentés dans la partie 1 (chapitre 2 de la thèse). Pour la deuxième catégorie (formes de villes plus complexes), l'accent est mis sur la comparaison des propriétés structurelles des réseaux simulés avec celles des réseaux réels. Ces propriétés structurelles, invariantes dans le temps et l'espace, ont été identifiées dans le Chapitre 4.

10.1 Simulation de formes de villes simples

10.1.1 Typo-morphologie de formes de villes considérées

Dans le cadre de l'équipe de recherche Morphocity, une typo-morphologie de formes de villes, à partir de la caractérisation de leur réseau viaire, a été développée à travers un projet tuteuré⁵⁷, mené en parallèle à notre thèse. Cette typo-morphologie est initialement proposée par Philippe Bonnin⁵⁸, en guise de synthèses d'études des formes urbaines (Guidoni, 1981; Lagesse, 2015; Lavedan, 1926, 1959; Pawlowski, 1992). Un atlas de 62 villes et de leur réseau viaire correspondant à cette typo-morphologie a été construit et intégré dans une base de données (Dubois & Meister, 2022). La typo-morphologie comprend 14 formes de villes (Figure 10.1), dont le réseau viaire est caractérisé par une analyse morphologique à l'échelle des voies (à partir des mêmes indicateurs morphologiques que ceux présentés dans la partie 1 de la thèse). Ces formes ont été également regroupées pour former des familles qui partagent des similitudes (Figure 10.2).

La simulation de chaque forme de ville nécessite de l'associer, à partir de sa représentation schématique, au(x) morphotype(s) de voies. Cette association permet de distinguer des formes basées sur un nombre réduit de morphotypes (entre un et trois), et des formes basées sur un nombre plus important (supérieur à trois) (Tableau 10.1).

Huit formes de villes simples ont été sélectionnées pour être simulées, en se basant sur les similitudes et/ou les limites que certaines formes peuvent présenter (Figure 10.2).

⁵⁷ "Création d'un atlas des formes urbaines, et mise en relation avec leurs contextes géohistoriques". Projet tuteuré en Master 2 Aide à la Décision en Aménagement Urbain et Régional (ADAUR) à l'Université de Franche-Comté ; réalisé par Guillaume Dubois et Anthony Meister en 2022 et encadré par Claire Lagesse et Philippe Bonnin.

⁵⁸Philippe Bonnin : Directeur de recherches émérite au CNRS, UMR 7218 - LAVUE (Laboratoire Architecture, Ville, Urbanisme, Environnement) de l'Université Paris-8. Anthropologue spécialisé dans l'analyse des villes et de l'habitat japonais. S'intéressant à la conception géohistorique des villes, il a proposé une typo-morphologie de formes de villes selon différents motifs. Ce travail est dans la continuité des recherches effectuées par l'équipe Morphocity dans le cadre du projet de recherche MoNuMoVi (Modélisation Numérique de la Morphogénèse Viaire).

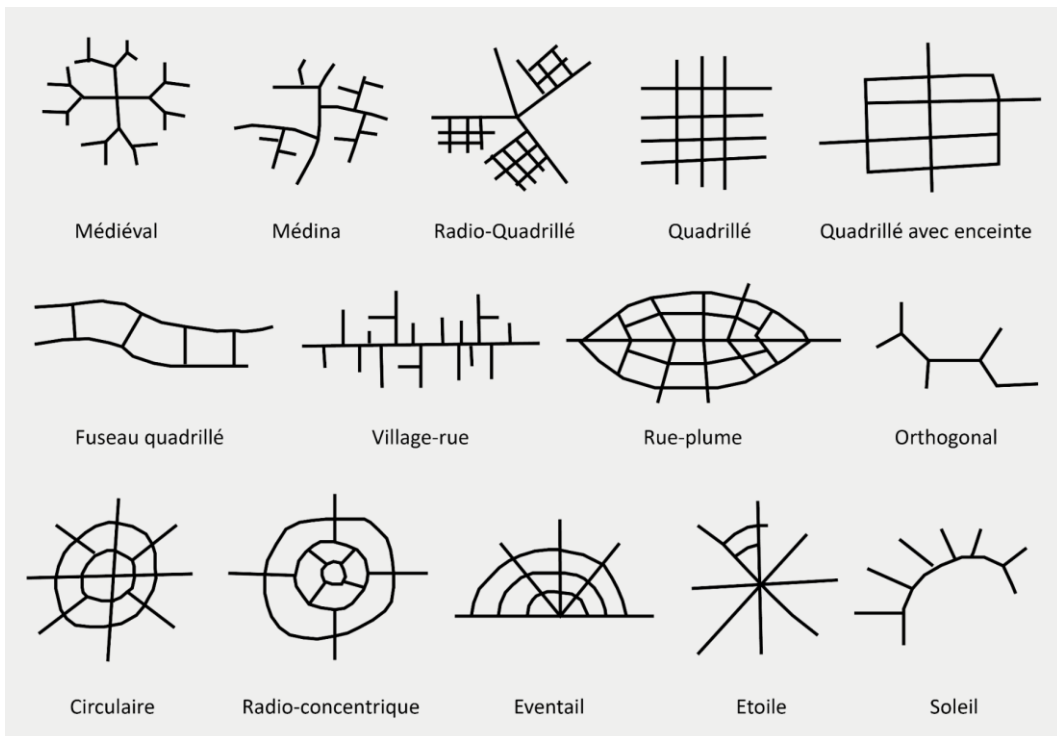


Figure 10.1. Formes de villes simples définies par Philippe Bonnin.
Source : Dubois & Meister (2022).

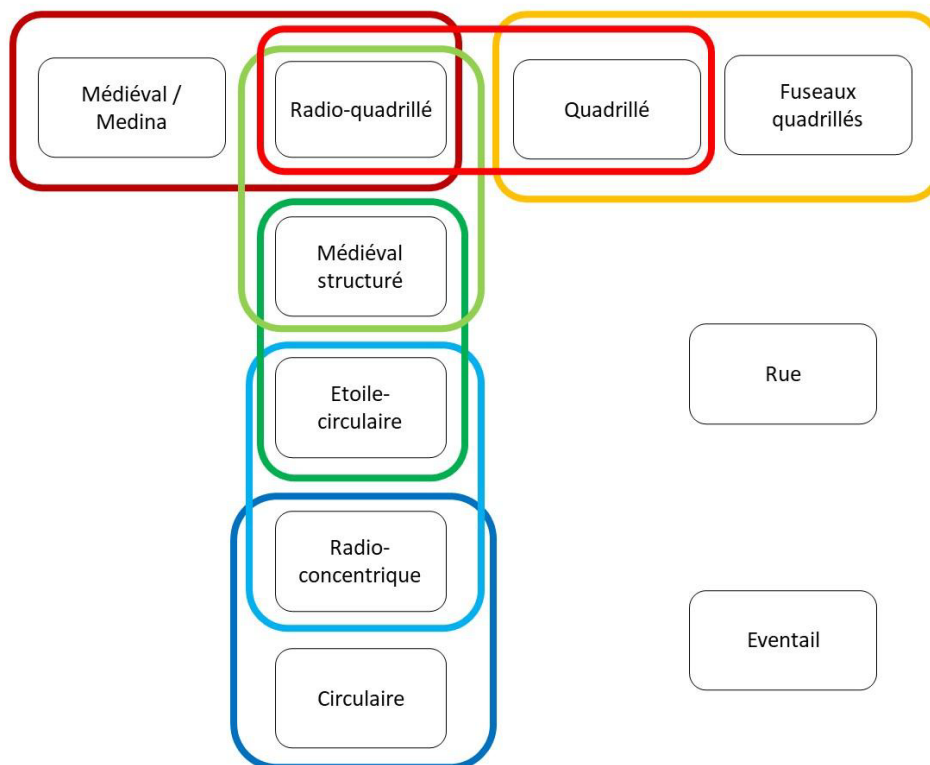


Figure 10.2. Association des formes de villes selon leur similitudes.
Source : Dubois & Meister (2022).

- Les formes "**Médina**" et "**Médiévale**" sont regroupées dans la même catégorie car elles correspondent à des motifs viaires arborescents. Parmi les deux, seule la forme "Médina" est sélectionnée pour la simulation puisqu'elle constitue l'unique cas d'une forme basée sur un seul morphotype.

- Pour la forme "**Soleil**", sa simulation requiert la création des morphotypes de voies concentriques et intercalaires, mais elle implique aussi de simuler une demi-forme circulaire que le modèle ne peut pas générer de manière indépendante.

- La forme "**Orthogonale**" représente des similitudes avec la forme "**Village-rue**", les deux étant associées aux morphotypes de voies radiales/linéaires et intercalaires. La forme "Orthogonale" peut être considérée comme une variation géométrique de la forme "Village-rue". Par simplicité, seule la forme "Village-rue" est sélectionnée parmi les deux.

- La forme "**Radioconcentrique**" présente des similitudes avec les formes "**Circulaire**" et "**Etoile**". En effet, la forme "Etoile" peut être considérée comme un cas particulier ou un stade précoce de la forme "Radioconcentrique". Parmi les trois, seule la forme "Radioconcentrique" est sélectionnée pour la simulation. En effet, les formes "Circulaire" et "Etoile" peuvent présenter des contraintes pour leur simulation.

- La forme "**Eventail**" peut être simulé à partir des morphotypes de voies concentriques et radiales, mais elle nécessite aussi de contraindre l'évolution dans une direction spécifique, ce qui n'est pas possible avec le modèle.

- Les formes "**Rue plume**", "**Fuseau quadrillée**", "**Quadrillée**", "**Quadrillée avec enceinte**" et "**Radio-quadrillée**" se caractérisent par des motifs viaires principalement maillés et font partie des formes de villes simulées.

Ainsi, les formes de villes sélectionnées pour les scénarios de simulation sont les suivantes :

- **Médina**
- **Village-rue**
- **Rue plume**
- **Fuseau quadrillée**
- **Quadrillée**
- **Quadrillée avec enceinte**
- **Radio-quadrillée**
- **Radioconcentrique**

Chaque forme de ville simple peut être générée par une succession de séquences de simulation, chacune correspondant à un paramétrage spécifique pour la simulation d'un morphotype de voies. De cette manière, l'ordre d'émergence des morphotypes d'une simulation est prédéfini. Les valeurs des paramètres et le nombre d'itérations associés à chaque séquence seront présentés ultérieurement pour chaque forme de ville.

Morphotype de voie Forme de ville	Concentrique	Radiale/ linéaire	Convergente/ divergente	Ramifiée	Orthogonale/ diagonale	Transversale	Intercalaire	Cellulaire
<i>Médiéval</i>		✓		✓				
Médina				✓				
Radio-quadrillée		✓		✓	✓		✓	
Quadrillée		✓			✓			
Quadrillée avec enceinte	✓				✓			✓
Fuseau quadrillée		✓			✓			
Village-rue		✓					✓	
Rue plume		✓			✓	✓		
<i>Orthogonale</i>		✓					✓	
<i>Circulaire</i>	✓	✓		✓	✓			✓
Radioconcentrique	✓	✓		✓	✓			✓
<i>Eventail</i>	✓	✓	✓					✓
<i>Etoile</i>		✓	✓					✓
<i>Soleil</i>	✓						✓	

Tableau 10.1. Association des formes de villes aux morphotypes de voies.

Les formes de villes sélectionnées pour les scénarios de simulation sont notées en gras.

Dans la suite de cette section Nous adoptons une structure définie pour la présentation de chaque scénario de simulation. Tout d'abord, le paramétrage de chaque scénario est présenté. Le réseau viaire simulé issus des séquences de la simulation sont présentés avec une visualisation (à la même échelle) d'un exemple de réseau réel correspondant à la même forme. Ensuite, les analyses morphologiques des réseaux viaires simulés sont présentées. Les valeurs des indicateurs pour chaque réseau simulé sont discrétisées de manière indépendante. L'objectif de ces analyses n'est pas de comparer les différents réseaux simulés, mais plutôt d'examiner la hiérarchie des différentes voies par rapport à chaque indicateur, ainsi que de lire certaines valeurs absolues qui sont pertinentes pour les interprétations (cf. partie 1, chapitre 2). Enfin, les propriétés structurelles des réseaux simulés sont étudiées au regard de celles identifiées pour les réseaux réels (cf. partie 1 chapitre 4).

10.1.2 Médina

10.1.2.1 Paramétrage

La forme "Médina" correspond à un morphotype de **voies ramifiées** fortement hiérarchisées. Le morphotype de voies ramifiées est simulé, avec deux paramétrages différents (Tableau 10.2).

Pour les deux séquences, le paramètre de construction est défini avec une valeur de $\omega = 0$. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 50$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 200$.

La séquence 1 simule des **voies ramifiées** avec un rattachement aux nœuds d'extrémité $E_{pp} = 1$ et un attachement préférentiel selon le degré de voie $W_p = 1$. Cela induit la création de motifs arborescents fortement hiérarchisés et des faiblement connectées au réseau préexistant (c'est-à-dire, le réseau simulé lors des itérations précédentes, par rapport à une itération donnée). Le nombre d'itérations est fixé à $N = 50$.

La séquence 2 simule de **voies ramifiées** avec un rattachement aux nœuds d'extrémité activé $E_{pp} = 1$ et un attachement préférentiel selon le degré de voie désactivé $W_p = 0$. Ce choix permet de simuler des structures ramifiées faiblement connectées au réseau existant et ce, uniquement au niveau de ces extrémités. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 30$.

Les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

10.1.2.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le réseau résultant de la séquence 1 (Figure 10.3 - (1)) correspond au réseau viaire principal de la forme "Médina". Les structures viaires générées par la séquence 2 correspondent principalement à des rues d'accès local.

La comparaison visuelle du réseau viaire simulé (Figure 10.3 - (2)) au réseau réel de la Médina de Marrakech (Maroc) (Figure 10.3 - (3)) révèle des similitudes structurelles, notamment en termes de leur structure arborescente et la forte présence des impasses. Les deux réseaux viaires sont composés de rues principales reliées à des rues secondaires qui permettent l'accès à différents lieux du tissu urbain. Ces rues secondaires sont connectées à leur tour à des rues d'accès local, souvent en impasse.

Médina	Séquence 1	Séquence 2
Morphotype de voie	Ramifiée	Ramifiée
Nombre d'itérations	50	30
W_p	1	0
E_{pp}	1	1
O_p	0	0
α	1	1
P_e	0.5	0.5
ω	0	0
η	0.5	0.5
r_0	50	50
k_{ext}	3	3
f_{ext}	0.1	0.1
l_{max}	200	200
A_i	60	60
A_s	60	60
c	0.3	0.3

Tableau 10.2. Paramétrage pour la simulation de la forme "Médina".
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

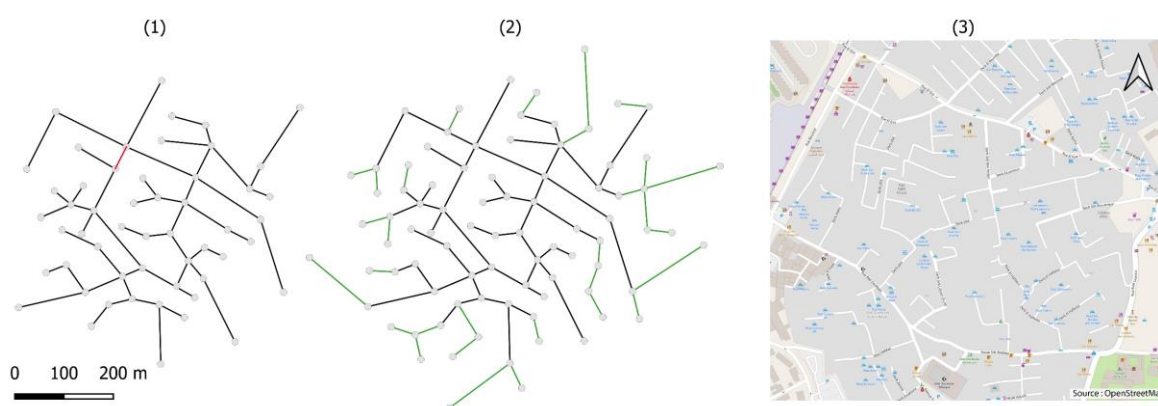


Figure 10.3. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Médina". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de la Médina de Marrakech (Maroc).

10.1.2.3 Analyses morphologiques

Le degré des voies (Figure 10.4 - (1)), calculé sur le réseau simulé correspondant à la forme "Médina", met en évidence les voies les plus connectées (en rouge). Ces voies représentent les voies ramifiées issues des premières itérations de la simulation, auxquelles se rattachent hiérarchiquement d'autres voies de degré intermédiaire (en vert et en orange). Les voies de degré 1 (en bleu) correspondent aux voies générées lors des dernières itérations. Elles sont situées en périphérie du réseau et faiblement connectées. Le réseau dans son ensemble présente une faible connectivité. En effet, la majorité des voies du réseau simulé intersectent moins de quatre autres voies (avec un degré inférieur à 4).

Les voies les plus connectées se caractérisent par un espacement élevé (en rouge sur la figure 10.4 - (2)). Cela traduit la faible densité des intersections le long des voies principales de la forme "Médina". Les voies avec les valeurs les plus faibles d'espacement correspondent aux extrémités ramifiées du réseau, où la densité est élevée.

Le réseau généré se caractérise par une légère variation de l'orthogonalité des voies, avec des valeurs généralement élevées (entre ≈ 0.78 et 1) pour l'ensemble des classes (Figure 10.4 - (3)). Cela peut être expliqué par les valeurs des paramètres angulaires fixées à 60° pour les deux séquences de la simulation.

Les voies caractérisées par une centralité de proximité élevée sont aussi les voies principales du réseau, auxquelles se greffent progressivement les autres voies à mesure que le réseau évolue, assurant ainsi un accès facile (en rouge sur la figure 10.4 - (4)). Par ailleurs, La voie principale, traversant le réseau de manière longitudinale, est caractérisée par la valeur la plus élevée (par rapport à l'ensemble des voies du réseau) en termes de centralité d'intermédiarité. Elle permet ainsi un déplacement efficace au sein du réseau (en rouge sur la figure 10.4 - (5)). Les voies à usage limité comme les impasses présentent les valeurs les plus faibles (en vert et en bleu sur la figure 10.4 - (5)).

Sur le réseau correspondant à la forme "Médina", les voies structurant la forme globale sont celles caractérisées par les valeurs de degré de desserte les plus élevées (rouge et orange sur la figure 10.4 - (6)). Elles se croisent l'une à l'autre et représentent aussi les voies les plus longues, permettant ainsi de traverser le réseau. Les valeurs moyennes et faibles caractérisent les voies assurant une desserte locale ou des impasses.

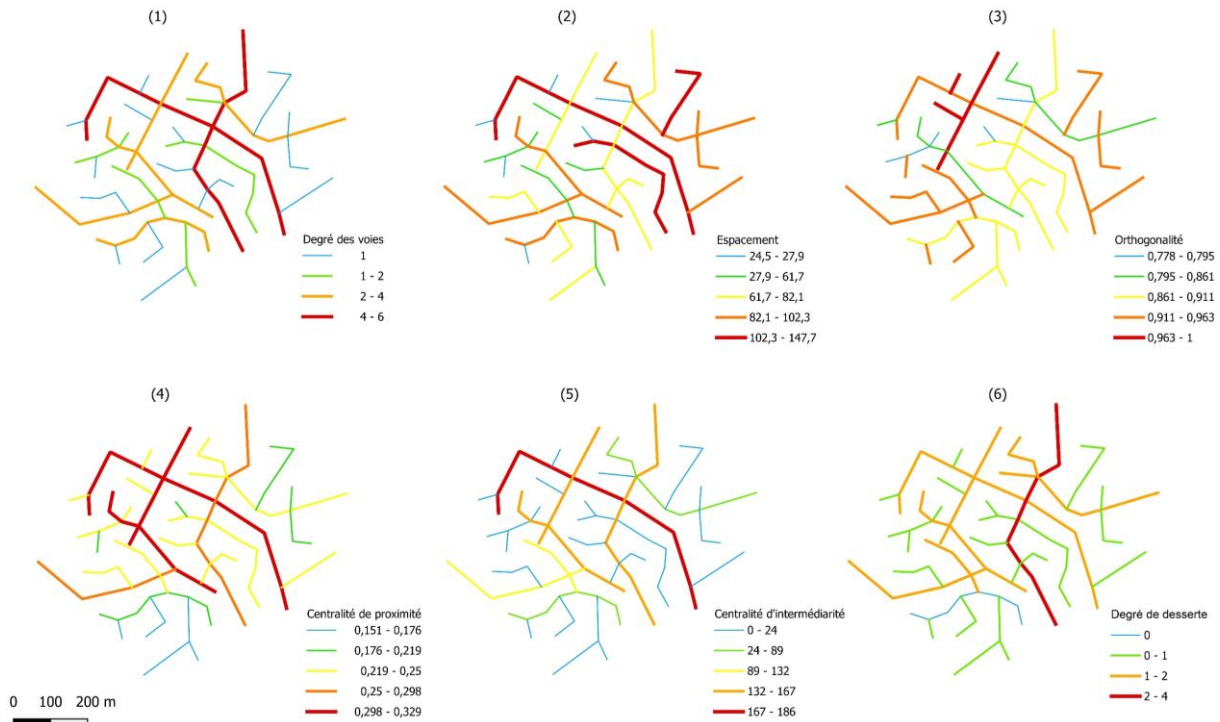


Figure 10.4. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Médina".

10.1.3 Village-Rue

10.1.3.1 Paramétrage

La forme "Village-Rue" correspond à une **voie linéaire** à laquelle s'attachent des **voies intercalaires**. Ainsi la simulation est réalisée en deux séquences correspondant à ces deux morphotypes de voies (Tableau 10.3).

La séquence 1 simule une **voie linéaire** en prolongeant un segment d'initialisation. Une seule itération est réalisée avec un rattachement aux nœuds d'extrémité et un attachement préférentiel selon le degré de voie activités : $E_{pp} = 1$ et $W_p = 1$. La distance de répulsion est fixée à $r_0 = 200$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 1000$. L'angle minimum d'intersection est fixé à une valeur de $A_i = 90^\circ$ pour assurer le prolongement.

La séquence 2 simule des **voies intercalaires** avec un attachement préférentiel selon le degré de voie et un rattachement par projection orthogonale activés : $W_p = 1$ et $O_p = 1$. Ce choix permet de simuler des voies qui se connectent à la voie linéaire et ce, uniquement par projection orthogonale. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 80$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 320$. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 10$.

Pour les deux séquences le paramètre de construction est défini avec une valeur de $\omega = 0$ et les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

10.1.3.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le résultat de la séquence 1 (Figure 10.5 - (1)) correspond à une voie linéaire. Les voies intercalaires générées lors de la séquence 2 correspondent principalement à des rues ou des allées d'accès local. Des similitudes, des patrons de rattachement entre les voies et de la forme globale, sont observables lorsqu'on compare visuellement le réseau viaire simulé (représenté dans la Figure 10.5 - (2)) avec le réseau réel du village de Diane-Capelle (Grand-Est, France) (voir Figure 10.5 - (3)). Toutefois ce village représente un cas particulier de la forme "Village-Rue" avec des voies intercalaires unilatérales puisqu'il est délimité par un canal.

<i>Village rue</i>	Séquence 1	Séquence 2
Morphotype de voie	Radiale/ Linéaire	Intercalaires
Nombre d'itérations	1	10
W_p	1	1
E_{pp}	1	0
O_p	0	1
α	1	1
P_e	0.5	0.5
ω	0	0
η	0.5	0.5
r_0	200	80
k_{ext}	3	1
f_{ext}	0.1	0.1
l_{max}	1000	320
A_i	90	60
A_s	60	60
c	0.3	0.3

Tableau 10.3. Paramétrage pour la simulation de la forme "Village-rue".
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

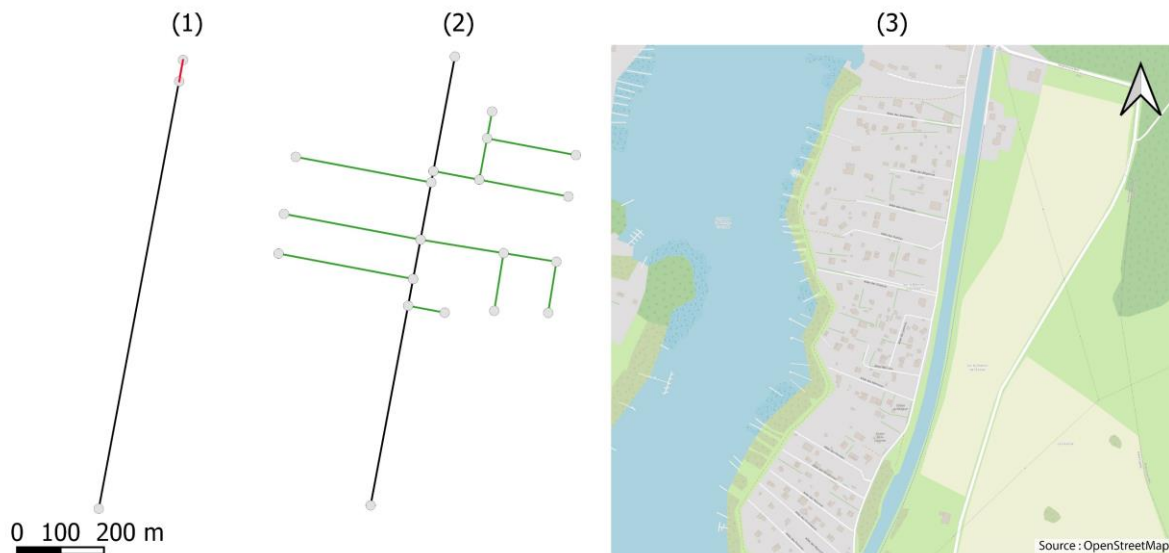


Figure 10.5. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme " Village rue". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Diane-Capelle (France).

Analyses morphologiques

La voie linéaire, du réseau simulé de la forme "Village rue", est caractérisée par les valeurs les plus élevées, hiérarchiquement, en termes de degré, de centralité de proximité et de centralité d'intermédiarité (Figure 10.6 - (1), (4) et (5)). Cela en fait la voie la plus connectée dans le réseau qui dessert l'ensemble du réseau.

En outre, les voies intercalaires unilatérales présentent des valeurs d'espacement plus réduites (Figure 10.6 - (2)). En termes d'orthogonalité des voies, le réseau généré est caractérisé par des valeurs très élevées (entre 0,99 et 1), ce qui est inhérent au paramétrage pour la simulation des voies intercalaires (Figure 10.6 - (3)). En ce qui concerne le degré de desserte à l'échelle du réseau, il met en évidence les deux voies qui se croisent centralement (Figure 10.6 - (6)).

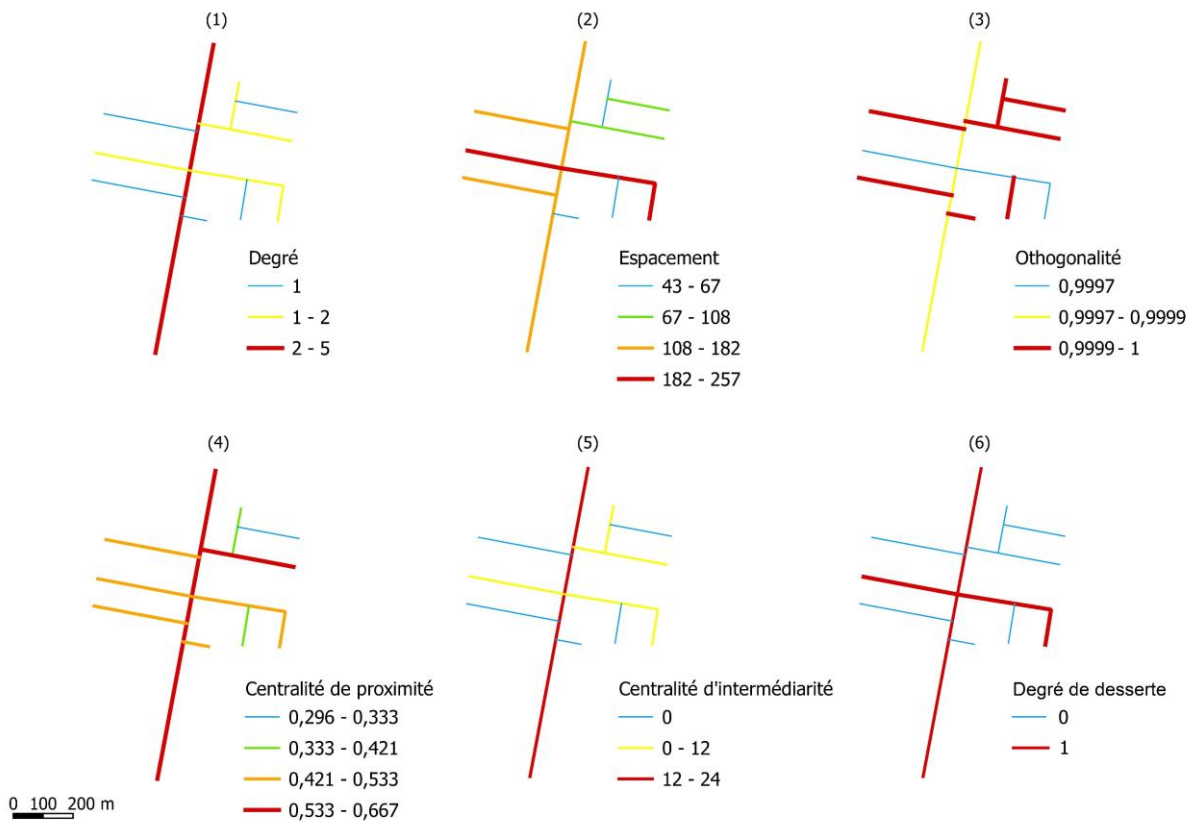


Figure 10.6. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Village-rue".

10.1.4 Rue-plume

10.1.4.1 Paramétrage

La forme "Rue-plume" correspond à un réseau structuré par une voie linéaire traversée par des voies transversales, le tout donnant naissance à une structure en grille. Ainsi la simulation est réalisée en trois séquences correspondant à trois morphotypes de voies (Tableau 10.4) : **radiales/linéaires, transversales et orthogonales/diagonales.**

La séquence 1 simule une **voie linéaire** avec le **même paramétrage** présenté précédemment. Deux itérations sont réalisées pour prolonger davantage la voie.

La séquence 2 génère des **voies transversales** avec un attachement préférentiel selon le degré des voies et un rattachement par projection orthogonal activés : $\mathbf{W}_p = 1$ et $\mathbf{O}_p = 1$. Le paramètre de construction est défini avec une valeur de $\omega = 0,4$. La distance de répulsion est définie à $\mathbf{r}_0 = 80$ et la longueur maximale est définie à $\mathbf{l}_{\max} = 340$ pour assurer une taille intermédiaire du morphotype. Le facteur de séparation de rue est défini avec une valeur de $\mathbf{c} = 0,8$ pour forcer continuité des voies transversales au-delà de leur intersection avec la voie linéaire. Le nombre d'itérations est fixé à $\mathbf{N} = 10$.

La séquence 3 permet de simuler les **voies orthogonales/diagonales**. La taille du morphotype lors de la simulation est adaptée par une distance de répulsion de valeur $r_0 = 50$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 100$. L'ajustement de ces valeurs permet d'assurer une émergence de ces voies autour des voies transversales générées par la séquence précédente. Le paramètre de construction est défini avec une valeur de $\omega = 1$. Le facteur de séparation de rue est défini avec une valeur de $c = 0,5$ pour favoriser la continuité des voies orthogonales/diagonales. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 30$.

Pour les séquences 1 et 2, le facteur d'étalement est défini avec une valeur de $k_{ext} = 1$ pour éliminer l'effet de la probabilité d'étalement lorsque cette dernière est appliquée. Pour les trois séquences, les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

Rue plume	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3
Morphotype de voie	Radiale/ Linéaire	Transversale	Orthogonale/ Diagonale
Nombre d'itérations	2	10	30
W_p	1	1	1
E_{pp}	1	0	0
O_p	0	1	1
α	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5
ω	0	0.4	1
η	0.5	0.5	0.5
r_0	200	80	50
k_{ext}	3	1	1
f_{ext}	0.1	0.1	0.1
l_{max}	1000	340	100
A_i	90	60	60
A_s	60	60	60
c	0.3	0.8	0.5

Tableau 10.4. Paramétrage pour la simulation de la forme "Rue-plume".

Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.1.4.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le résultat de la séquence 1 (Figure 10.7 - (1)) correspond à une voie linéaire. Les voies transversales générées par la séquence 2 (Figure 10.7 - (2)) traversent perpendiculairement la voie linéaire. Les voies orthogonales/diagonales simulées par la séquence 3 délimitent des îlots urbains de taille moyenne (d'une largeur ou longueur ne dépassant pas approximativement les 100 mètres), qui sont représentatifs des configurations observées dans les centres historiques.

La comparaison visuelle du réseau viaire simulé (Figure 10.7 - (3)) à un réseau réel, celui du centre historique de Bénévent (Italie) (Figure 10.7 - (4)), révèle des similitudes en termes de forme globale et de taille des îlots délimités par le réseau. Cet exemple de réseau réel représente toutefois un stade d'évolution plus avancé que la forme "Rue-plume". Les deux réseaux viaires sont structurés par une voie principale linéaire, traversée par des rues secondaires perpendiculaires assurant l'accès au tissu urbain. Des structures orthogonales se rattachent à ces rues, délimitant ainsi les îlots urbains.

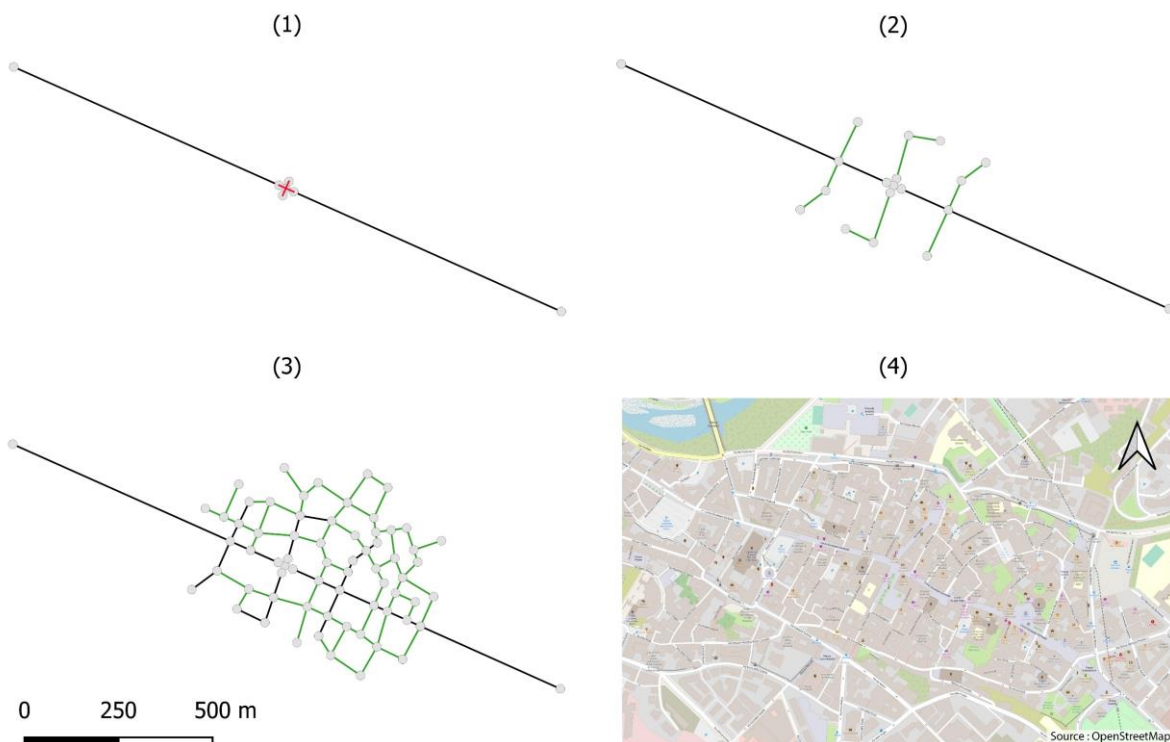


Figure 10.7. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Rue-Plume". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la séquence 2 de la simulation (les nouveaux segments sont représentés en vert). (3) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 3 sont représentés en vert. (4) Réseau réel du centre historique de Bénévent (Italie).

Analyses morphologiques

La voie linéaire est caractérisée par les valeurs les plus élevées (par rapport à l'ensemble des voies du réseau) en termes d'espacement et d'orthogonalité (Figure 10.8 - (2) et (3)). Cela est lié au fait que les voies générées lors des séquences 2 et 3 se sont rattachées à cette voie linéaire de manière perpendiculaire, au centre de celle-ci, tandis qu'elle s'étend de part et d'autre.

Les voies présentant des valeurs intermédiaires en termes de degré et de centralité de proximité correspondent aux voies orthogonales, assurant la connexion et l'accès des tissus urbains (représentées en orange sur la figure 10.8 - (1) et (4)). Le réseau dans son ensemble présente une forte connectivité.

Les voies transversales (qui coupent la voie radiale), du réseau simulé de la forme "Rue-plume", sont caractérisées par des valeurs élevées en termes de degré, de centralité de proximité, de centralité d'intermédiarité et de degré de desserte (représentées en rouge sur la figure 10.8 - (1), (4), (5) et (6)). Ces voies sont les plus connectées, assurant une desserte facile, efficace, et directe à l'ensemble du réseau.

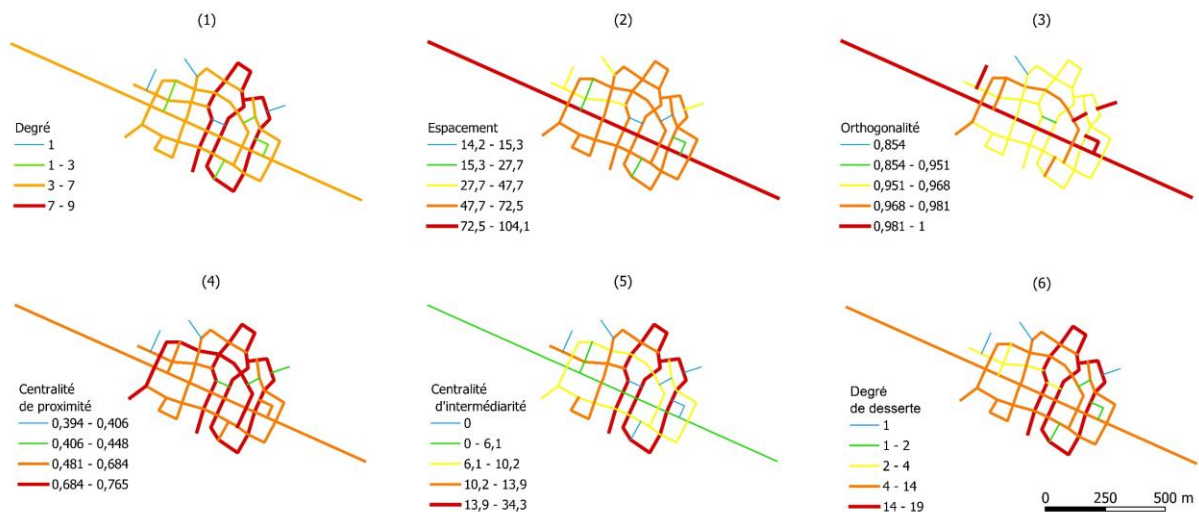


Figure 10.8. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Rue-plume".

10.1.5 Ville fuseau-quadrillée

10.1.5.1 Paramétrage

La forme "Fuseau quadrillé" correspond à une configuration où des motifs maillés (en grille) se développent en parallèle à une voie linéaire. Ainsi la simulation est réalisée en deux séquences correspondant à deux morphotypes de voies : **radiales/linéaires** et **orthogonales/diagonales** (Tableau 10.5).

La séquence 1 simule une **voie linéaire** avec le même paramétrage présenté précédemment. Deux itérations sont réalisées pour prolonger davantage la voie : **N = 2**.

La séquence 2 permet de simuler des **voies orthogonales** qui se connectent au réseau existant uniquement par projection orthogonale. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 50$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 100$. Le paramètre de construction est défini avec une valeur de $\omega = 1$. Le facteur de séparation de rue est configuré avec une valeur de $c = 0,5$ pour favorisant ainsi la continuité des voies orthogonales. Le facteur d'étalement est défini avec une valeur de $k_{ext} = 1$ pour éliminer l'effet de la probabilité d'étalement lorsque cette dernière est appliquée. Le nombre d'itérations est fixé à **N = 25** et les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

Fuseau quadrillé	Séquence 1	Séquence 2
Morphotype de voie	Radiale/ Linéaire	Orthogonale/ Diagonale
Nombre d'itérations	2	25
W_p	1	1
E_{pp}	1	0
O_p	0	1
α	1	1
P_e	0.5	0.5
ω	0	1
η	0.5	0.5
r_0	200	50
k_{ext}	3	1
f_{ext}	0.1	0.1
l_{max}	1000	100
A_i	90	60
A_s	60	60
c	0.3	0.5

Tableau 10.5. Paramétrage pour la simulation de la forme "Fuseau quadrillée".
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

Appréciation qualitative de la forme globale

La Figure 10.9 illustre le résultat de la séquence 1 qui correspond à une voie linéaire (Figure 10.9 - (1)), et celui de la séquence 2 qui correspond aux voies orthogonales (Figure 10.9 - (2)).

Lorsqu'on compare visuellement le réseau viaire simulé (Figure 10.9 - (2)) avec le réseau réel de Monségur (France) (Figure 10.9 - (3)), les deux réseaux se distinguent par des motifs viaires maillés. Une voie linéaire traverse le territoire et des voies orthogonales s'y connectent de manière perpendiculaire, en étant parallèles les unes aux autres. Ces voies délimitent des îlots urbains de petites tailles, rectangulaires dans le cas de Monségur.

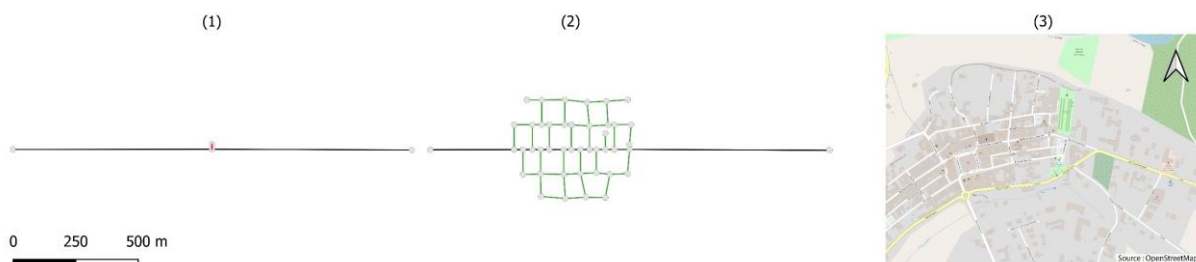


Figure 10.9. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Fuseau quadrillée". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Monségur (France).

Analyses morphologiques

Sur le réseau simulé de forme "Fuseau-quadrillée", les voies les plus connectées identifiées par le degré, correspondent à la voie linéaire principale ainsi qu'aux voies parallèles les plus proches de celle-ci (Figure 10.10 - (1)). Ces voies (formant une structure rectangulaire) sont aussi caractérisées par les valeurs les plus élevées, hiérarchiquement, en termes de centralité de proximité, de centralité d'intermédiarité et de degré de desserte (Figure 10.10 - (4), (5) et (6)). Elles assurent ainsi un accès facile, efficace et direct à l'ensemble de réseau.

Les voies orthogonales présentent des valeurs d'espacement faibles (Figure 10.10 - (2)). En termes d'orthogonalité des voies, le réseau généré est caractérisé par des valeurs élevées (entre 0,98 et 1), ce qui est cohérent avec les morphotypes et le paramétrage choisis pour simuler la forme de ville considérée (Figure 10.10 - (3)).

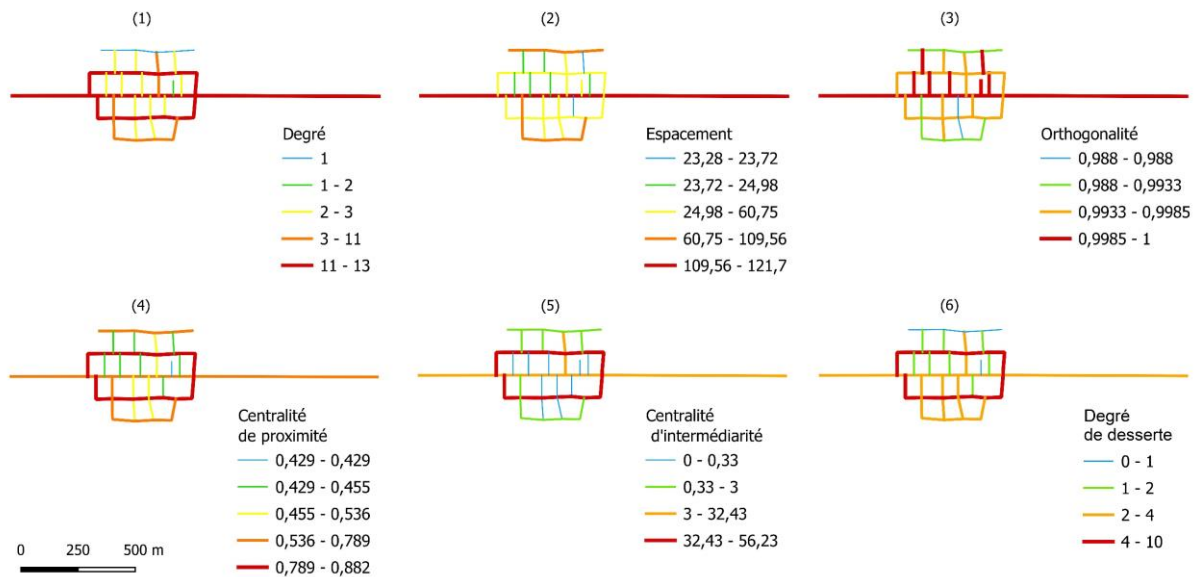


Figure 10.10. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Fuseau-quadrillée".

10.1.6 Ville quadrillée

10.1.6.1 Paramétrage

La forme "Quadrillée" correspond à un croisement de voies radiales qui structurent un réseau en grille. Ainsi la simulation est réalisée en deux séquences correspondant aux morphotypes de **voies radiales/linéaires** et **orthogonales/diagonales** (Tableau 10.6).

La séquence 1 simule deux **voies radiales** à partir d'un réseau d'initialisation d'un croisement de deux segments. Pour parvenir à simuler des voies radiales plutôt que linéaires, le nombre d'itérations est fixé à **N = 4**. La distance de répulsion est définie à **r₀ = 100** et la longueur maximale est définie à **l_{max} = 500** pour ajuster l'échelle des voies.

La séquence 2 permet de simuler les **voies orthogonales**. La taille des morphotypes simulés est adaptée avec une distance de répulsion de valeur **r₀ = 80** et une longueur maximale de valeur **l_{max} = 160**. Le paramètre de construction est défini avec une valeur de **ω = 1**. Le facteur de séparation de rue est défini avec une valeur de **c = 0,5** pour favoriser la continuité des voies orthogonales/diagonales. Le facteur d'étalement est défini avec une valeur de **k_{ext} = 1** pour éliminer l'effet de la probabilité d'étalement lorsque cette dernière est appliquée. Le nombre d'itérations est fixé à **N = 40**.

Pour les deux séquences les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

10.1.6.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le résultat de la séquence 1 (Figure 10.11 - (1)) correspond à deux voies radiales. Les voies orthogonales simulées par la séquence 2 délimitent des îlots urbains de taille moyenne à grande taille (d'une largeur ou longueur entre 50 et 150 mètres). (Figure 10.11 - (2)).

La forme globale du réseau viaire simulé de forme "Quadrillée", représente les mêmes caractéristiques du réseau réel du centre de Carthagène (Espagne) (Figure 10.11 - (3)). Les deux réseaux viaires se caractérisent par des motifs maillés, en grille régulière.

Quadrillé	Séquence 1	Séquence 2
Morphotype de voie	Radiale/ Linéaire	Orthogonale/ Diagonale
Nombre d'itérations	4	40
W_p	1	1
E_{pp}	1	0
O_p	0	1
α	1	1
P_e	0.5	0.5
ω	0	1
η	0.5	0.5
r_0	100	80
k_{ext}	3	1
f_{ext}	0.1	0.1
l_{max}	500	160
A_i	90	60
A_s	60	60
c	0.3	0.5

Tableau 10.6. Paramétrage pour la simulation de la forme "Quadrillée".
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

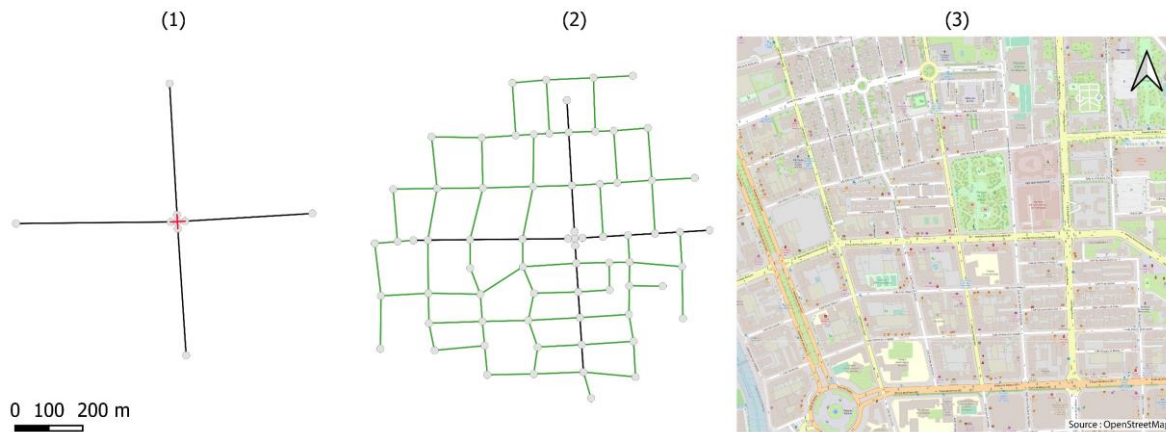


Figure 10.11. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Quadrillée". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Carthagène (Espagne).

10.1.6.3 Analyses morphologiques

Les voies radiales, du réseau simulé de forme "Quadrillée", sont caractérisées par des valeurs intermédiaires en termes de degré (entre 7 et 9) et de centralité de proximité (représentées en orange sur la figure 10.12 - (1) et (4)). La connectivité et la centralité des voies sont équilibrées à l'échelle du réseau en raison de sa configuration en grille régulière.

Toutefois, des voies continues qui délimitent partiellement la structure en grille se distinguent par des valeurs élevées (par rapport aux autres voies du réseau) de degré, de centralité de proximité, de centralité d'intermédierité et de degré de desserte (Figure 10.12 - (1), (4), (5) et (6)). Ces voies connectent les tissus urbains et assurent une meilleure accessibilité à l'échelle du réseau.

L'espacement des voies est plus marqué en périphérie, tandis qu'une densité plus forte (un espacement plus faible) est mise en évidence au centre du réseau (Figure 10.12 - (2)).

Dans l'ensemble, les valeurs d'orthogonalité sont élevées (entre 0.96 et 1), ce qui est conforme au paramétrage de la simulation (Figure 10.12 - (3)). Les valeurs faibles correspondent à des voies incluant des segments qui sont légèrement en diagonale par rapport à la structure en grille.

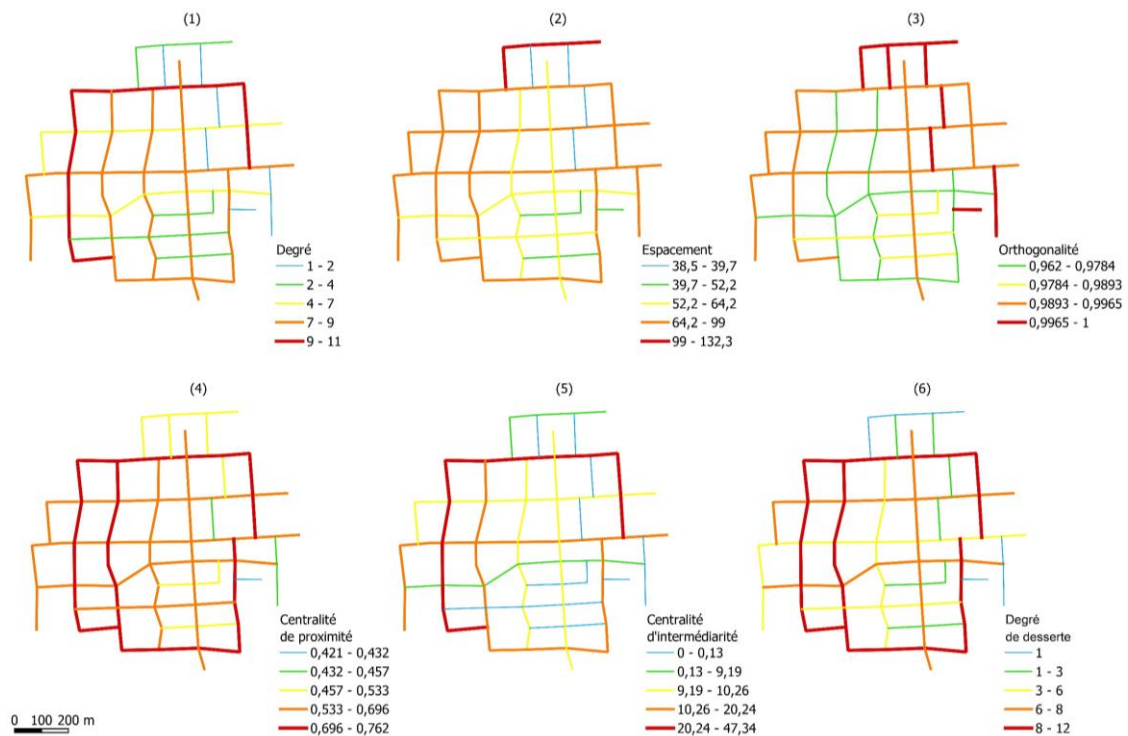


Figure 10.12. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Quadrillée".

10.1.7 Ville quadrillée avec enceinte

10.1.7.1 Paramétrage

La forme "Quadrillée avec enceinte" représente une trame en grille délimitée par des voies suivant le tracé d'une enceinte. La simulation de la forme "Quadrillée avec enceinte" est réalisée en trois séquences, chacune correspondant à un morphotype de voie spécifique (Tableau 10.7).

La séquence 1 simule les voies suivant le tracé de l'enceinte, qui est approchée par le morphotype de **voies concentriques** (avec une adaptation de paramétrage). Lors du calibrage des paramètres (présenté dans la section 9.2, du chapitre 9), il a été démontré que la simulation de ce morphotype ne peut être réalisée de manière indépendante. Le processus du modèle implique d'abord l'émergence des voies radiales. En outre, un paramétrage avec un paramètre de construction de $\omega = 0,5$ génère une structure d'enceinte rectangulaire à de grande taille. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 8$. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 200$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 400$ pour ajuster la taille du morphotype.

La séquence 2, simule des **voies orthogonales** formant le motif maillé (en grille). La taille du morphotype simulé est adaptée avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 80$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 160$. Le paramètre de construction est défini avec une

valeur de $\omega = 1$. Le facteur d'étalement est défini avec une valeur de $k_{ext} = 1$ pour éliminer l'effet de la probabilité d'étalement lorsque cette dernière est appliquée. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 4$.

Au cours de la séquence 3, la simulation de **voies cellulaires** reproduit le processus de densification du réseau par redécoupage interstitiel à l'intérieur de cette grille. Le choix d'un rattachement par projection orthogonale permet de simuler des voies qui se connectent à la structure en grille principale et ce, uniquement par projection orthogonale. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 55$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 220$ pour ajuster la taille du morphotype. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 5$.

Les valeurs du facteur de séparation de rue c sont ajustées pour les séquences 2 et 3 pour favoriser la continuité au niveau des intersections. Pour les trois séquences les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

Quadrillé avec enceinte	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3
Morphotype de voie	Concentrique	Orthogonale/ Diagonale	Cellulaire
Nombre d'itérations	8	4	5
W_p	1	1	0
E_{pp}	0	0	0
O_p	0	1	1
α	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5
ω	0.5	1	1
η	0.5	0.5	0.5
r_0	200	80	55
k_{ext}	3	1	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1
l_{max}	400	160	220
A_i	60	60	60
A_s	60	60	60
c	0.3	0.5	0.4

Tableau 10.7. Paramétrage pour la simulation de la forme "Quadrillée avec enceinte".

Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.1.7.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le réseau résultant de la séquence 1 (Figure 10.13 - (1)) correspond à la structure principale de la forme "Quadrillée avec enceinte", avec deux voies croisées centralement et des voies qui les contournent, délimitant une structure rectangulaire. Les voies générées lors de la séquence 2 (Figure 10.13 - (2)) correspondent aux rues secondaires à l'intérieur de cette zone délimitée. Les voies résultantes de la séquence 3 (Figure 10.13 - (3)) représentent les rues tertiaires d'accès local délimitant des îlots de petites tailles.

La comparaison visuelle entre le réseau viaire simulé (Figure 10.13 - (3)) et le réseau réel du centre historique d'Aigues-Mortes (France) (Figure 10.13 - (4)) met en évidence plusieurs similarités. Les deux réseaux viaires présentent une configuration globale rectangulaire délimitée, avec seulement quelques voies d'accès depuis l'extérieur, et une structure viaire quadrillée avec une grille irrégulière à l'intérieur de l'enceinte. En conséquence, le réseau viaire à l'intérieur de l'enceinte est fortement interconnecté, tandis que sa connectivité avec l'extérieur de l'enceinte est limitée.



Figure 10.13. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Quadrillée avec enceinte". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la séquence 2 de la simulation (les nouveaux segments sont représentés en vert). (3) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 3 sont représentés en vert. (4) Réseau réel du centre historique d'Aigues-Mortes (France).

10.1.7.3 Analyses morphologiques

Le degré des voies, calculé sur le réseau simulé correspondant à la forme "Quadrillée avec enceinte", met en évidence que les voies les plus connectées sont celles qui suivent un tracé d'enceinte (représentées en rouge sur la figure 10.14 - (1)). Ces voies sont notamment caractérisées par les valeurs les plus élevées (par rapport à l'ensemble des voies du réseau) pour l'ensemble des indicateurs, assurant un rôle indispensable au sein du réseau.

À ces voies, se rattachent hiérarchiquement des voies parallèles et perpendiculaires qui représentent des valeurs intermédiaires en termes de degré, de centralité de proximité, de centralités d'intermédierité et de degré de desserte (représentées en orange et en jaune sur la figure 10.14 - (1), (2), (4), (5) et (6)),

Les voies cellulaires sont caractérisées par les valeurs d'espacement et de centralité d'intermédierité les plus faibles, en raison de leur association à la densification du réseau à une étendue très étroite.

Globalement, le réseau est caractérisé par une très forte orthogonalité (avec des valeurs supérieures à 0,99) pour l'ensemble des voies (Figure 10.14 - (3)), ce qui est en accord avec le paramétrage de simulation défini.

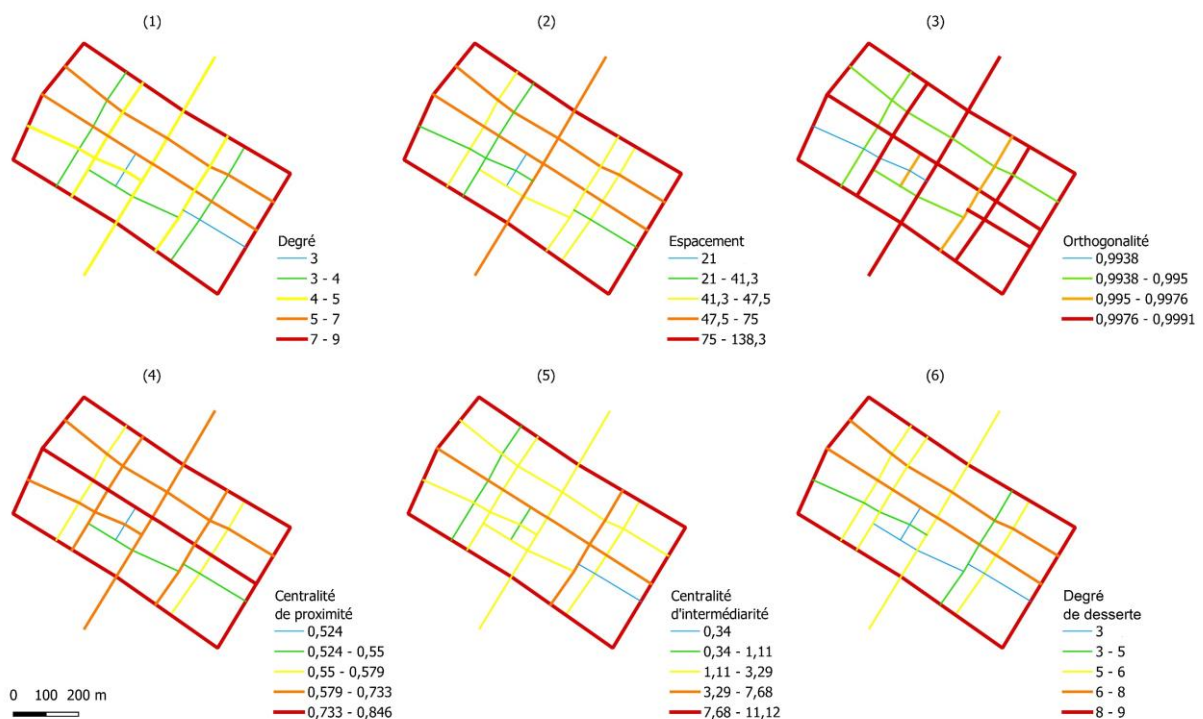


Figure 10.14. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Quadrillée avec enceinte".

10.1.8 Ville radio-quadrillée

10.1.8.1 Paramétrage

La forme "Radio-quadrillée" est principalement structurée par les voies radiales. Au cours de l'émergence de cette forme des voies intercalaires se rattachent perpendiculairement aux voies radiales, pour assurer un accès local. Ensuite ces voies intercalaires se développent par ramification, assurant ainsi un accès local à une échelle spatiale plus fine. Ces structures se rattachent pour former des motifs maillés (en grille) à différentes étendues. Ainsi la simulation est réalisée en six séquences correspondant à quatre morphotypes de voies (Tableau 10.8) : **radiales/linéaires, intercalaires, ramifiées et orthogonales/diagonales.**

La séquence 1 porte sur la simulation de deux **voies radiales** avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 240$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 1200$.

La séquence 2 porte sur la simulation de **voies intercalaires** avec un attachement préférentiel selon le degré de voie et un rattachement par projection orthogonale. Ce choix permet de simuler des voies qui se connectent aux voies radiales uniquement par projection orthogonale. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 200$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 800$. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 4$.

La séquence 3 génère des **voies ramifiées**, sans activation le rattachement aux nœuds d'extrémité activé et de l'attachement préférentiel selon le degré de voie désactivé. Ce choix permet de simuler des motifs ramifiés connectés aux voies intercalaires et radiales simulées par les séquences précédentes. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 10$. La même taille du morphotype est maintenue par rapport à la séquence 2.

Les séquences 4, 5 et 6 permettent de simuler les **voies orthogonales/diagonales** en alternant entre deux étendues du morphotype. La première étendue est adaptée avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 200$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 400$. L'ajustement de ces valeurs pour la séquence 4 permet d'assurer une émergence de voies délimitant des îlots de grandes tailles. La deuxième étendue est plus petite avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 80$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 160$. L'application de cette étendue pour la séquence 5 permet un re-morcellement des îlots de grandes tailles au niveau du centre du réseau. La séquence 6 est ajusté à nouveau avec la première étendue ($r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$) permettant de générer des voies orthogonales délimitant des îlots de grandes tailles à la périphérie du réseau. Le nombre d'itérations varie selon la séquence.

Radio-quadrillé	Séquence 1	Séquence 2	Séquences 3	Séquence 4	Séquence 5	Séquence 6
Morphotype de voie	Radiale/ Linéaire	Intercalaire	Ramifiée	Orthogonale/ Diagonale	Orthogonale/ Diagonale	Orthogonale/ Diagonale
Nombre d'itérations	4	4	10	10	10	30
W_p	1	1	0	1	1	1
E_{pp}	1	0	0	0	0	0
O_p	0	1	0	1	1	1
α	1	1	1	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ω	0	0	0	1	1	1
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
r_0	240	200	200	200	80	200
k_{ext}	3	1	3	1	1	1
f_{ext}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
l_{max}	1200	800	800	400	160	400
A_i	90	60	60	60	60	60
A_s	60	60	60	60	60	60
c	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5

Tableau 10.8. Paramétrage pour un scénario de simulation de la forme "Radio-quadrillée".

Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.1.8.2 Appréciation qualitative de la forme globale

Le résultat de la séquence 1 (Figure 10.15 - 1)) correspond à deux voies radiales. Les voies intercalaires et ramifiées simulées respectivement par la séquence 2 et 3 (Figure 10.15 - (2) et (3)), représentent des morphotypes à une étendue spatiale plus petite par rapport aux voies radiales. Les voies orthogonales/diagonales générées par les séquences 4, 5 et 6 délimitent des îlots urbains de différentes tailles (Figure 10.15 - (4), (5) et (6)).

La forme globale du réseau viaire simulé de forme "Radio-Quadrillée", représente quelques caractéristiques similaires à celle du réseau réel de Vitry-le-François (France) (Figure 10.15 - (7)). Les deux réseaux viaires présentent des motifs maillés (en grille) de différentes tailles, qui

se structurent autour de voies radiales, avec une densité de réseau plus forte au centre qu'à la périphérie. Toutefois le réseau de Vitry-le-François représente une forme en grille plus régulière, ainsi qu'un contournement plus marqué de cette grille, ce qui présente également des similitudes avec la forme "Quadrillée".



Figure 10.15. Simulation d'un réseau viaire correspondant) la forme "Radio-quadrillée". (1), (2), (3), (4) et (5) Graphes vaires résultants respectivement des séquences 1, 2, 3, 4 et 5 de la simulation. Les segments d'initialisation sont représentés en rouge sur le premier réseau (1), et les nouveaux segments sont représentés en vert. (6) Graphe viaire résultant de la simulation. (7) Réseau réel de Vitry-le-François (France).

10.1.8.3 Analyses morphologiques

Le degré des voies, calculé sur le réseau simulé correspondant à la forme "Radio-quadrillée", met en évidence les voies les plus connectées dans le réseau qui correspondent aux voies radiales (représentées en rouge sur la figure 10.16 - (1)). Ces voies présentent également des valeurs élevées en termes de centralité de proximité, de centralité d'intermédiarité et de degré de desserte (Figure 10.16 - (4), (5) et (6)).

Les voies orthogonales, délimitant des tissus regroupant plusieurs îlots, sont caractérisées par des valeurs élevées de centralité de proximité (en rouge et en orange sur la figure 10.16 - (4)). Elles permettant de connecter l'ensemble du réseau par des chemins topologiques simples.

Le réseau représente globalement des valeurs d'espacement élevées pour les voies à sa périphérie (Figure 10.16 - (2)). Cela indique une diminution progressive de la densité depuis le centre vers la périphérie. En outre, les valeurs d'orthogonalité sont plus élevées pour les voies situées délimitant des îlots de plus petites tailles (Figure 10.16 - (3)), qui délimitent les îlots de petites tailles. Dans l'ensemble le réseau est caractérisé par une forte orthogonalité (des valeurs en 0.95 et 1).

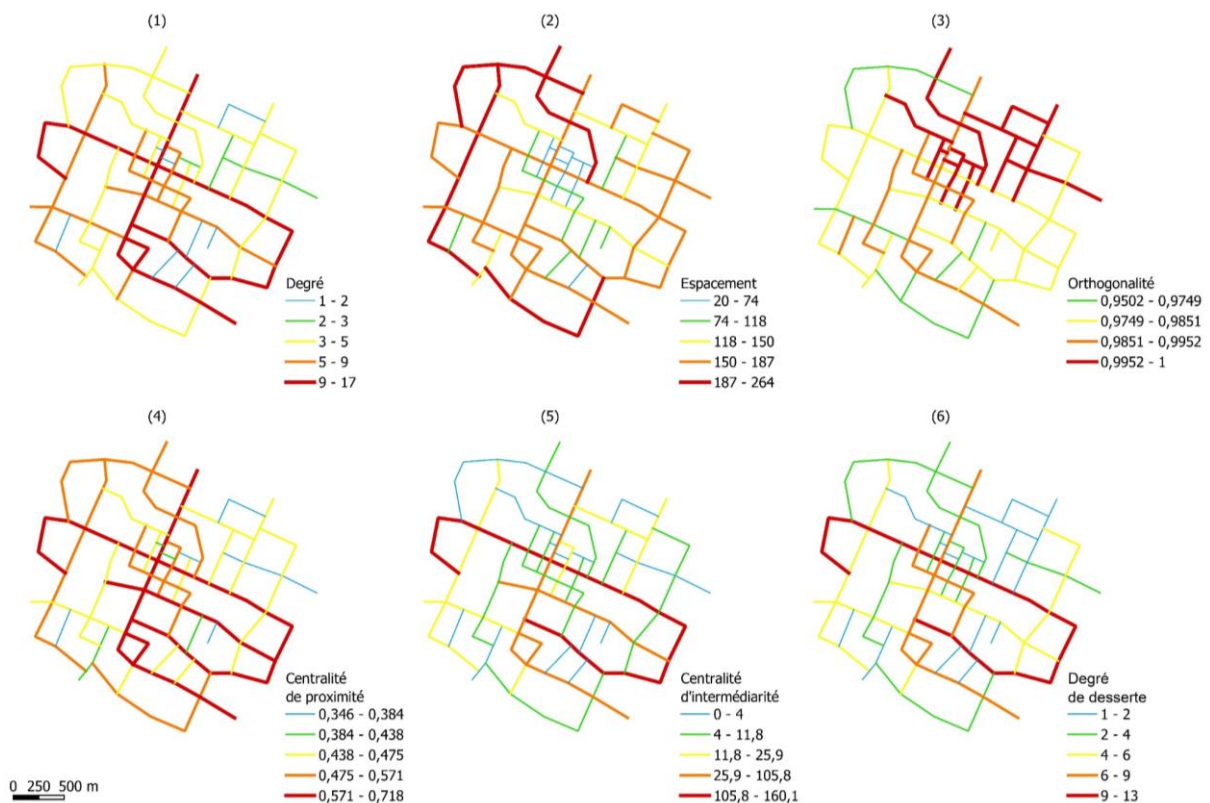


Figure 10.16. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Radio-quadrillée".

10.1.9 Ville radioconcentrique

10.1.9.1 Paramétrage

La forme "Radioconcentrique" est caractérisée par un réseau viaire structuré par deux voies radiales, qui sont connectées par une voie concentrique. Sa forme globale est ensuite façonnée par une densification du réseau au centre et son extension en périphérie. Ainsi la simulation de cette forme est réalisée en cinq séquences correspondant à cinq morphotypes de voies (Tableau 10.9) : **radiales/linéaires**, **concentriques**, **orthogonales/diagonales**, **cellulaires** et **ramifiées**.

La séquence 1 simule deux **voies radiales** avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 200$ et une longueur maximale définie à $l_{max} = 1000$. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 4$.

La séquence 2 simule une **voie concentrique** avec un attachement préférentiel selon le degré de voie. La valeur de la distance de répulsion est définie à $r_0 = 400$ et la valeur de la longueur maximale est définie à $l_{max} = 800$. L'ajustement de ces valeurs permet d'adapter la taille du morphotype simulée à une large étendue, tout en contraignant l'espace d'évolution du réseau. Cela favorise l'émergence d'une voie continue de forme circulaire, délimitant l'espace disponible. Toutefois, la forme circulaire de la voie concentrique reste incomplète à l'issue de la séquence 2, puisqu'il s'agit d'une limite du modèle.

La séquence 3 simule les voies **orthogonales/diagonales** d'une taille intermédiaire, avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 80$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 160$. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 50$. Cette séquence permet principalement de simuler des voies qui se connectent aux voies radiales uniquement par projection orthogonale. Elle permet aussi de compléter la forme circulaire de la voie concentrique, en connectant les segments générés par la séquence 2 aux voies radiales.

La séquence 4 simule des **voies cellulaires** pour densifier le réseau viaire de à une échelle spatiale locale (avec des voies peu étendues). La distance de répulsion est définie à $r_0 = 60$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 240$ pour ajuster la taille du morphotype. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 5$.

La séquence 5 génère des **voies ramifiées**, avec activation du rattachement aux nœuds d'extrémité. Ce choix permet de simuler des motifs ramifiés à la périphérie du réseau. Le nombre d'itérations est fixé à $N = 30$. La taille du morphotype est ajustée avec une distance de répulsion de valeur $r_0 = 150$ et une longueur maximale de valeur $l_{max} = 600$.

Les valeurs du paramètre de construction ω et du facteur de séparation de rue c sont ajustées selon les séquences. Les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut.

Radio-concentrique	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4	Séquence 5
Morphotype de voie	Radiale	Concentrique	Orthogonale /Diagonale	Cellulaire	Ramifiée
Nombre d'itérations	4	8	50	5	30
W_p	1	1	1	0	0
E_{pp}	1	0	0	0	1
O_p	0	0	1	1	0
α	1	1	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ω	0	0.2	0.8	1	0
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
r_0	200	400	80	60	150
k_{ext}	3	3	1	3	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
l_{max}	1000	800	160	240	600
A_i	90	60	60	60	60
A_s	60	60	60	60	60
c	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3

Tableau 10.9. Paramétrage pour un scénario de simulation de la forme "Radioconcentrique".
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.1.9.2 Appréciation de la forme globale

Le résultat de la séquence 1 (Figure 10.17 - (1)) correspond à deux voies radiales. Le résultat de la séquence 2 (Figure 10.17 - (2)) représente des sections d'une voie concentrique. Les voies orthogonales/diagonales (Figure 10.17 - (3)) délimitent les îlots urbains au centre. Les voies cellulaires (Figure 10.17 - (4)) délimitent les îlots de plus petites tailles. En outre, les voies ramifiées générées par la séquence 5 représentent l'extension périphérique du réseau (Figure 10.17 - (5)).

La forme globale du réseau viaire simulé représente les mêmes caractéristiques d'un réseau réel de motif "Radioconcentrique" (Figure 10.17 - (6)), tel que celui de Brive-la-Gaillarde

(France). Toutefois cet exemple présente un réseau viaire plus développé autour du motif "Radioconcentrique".

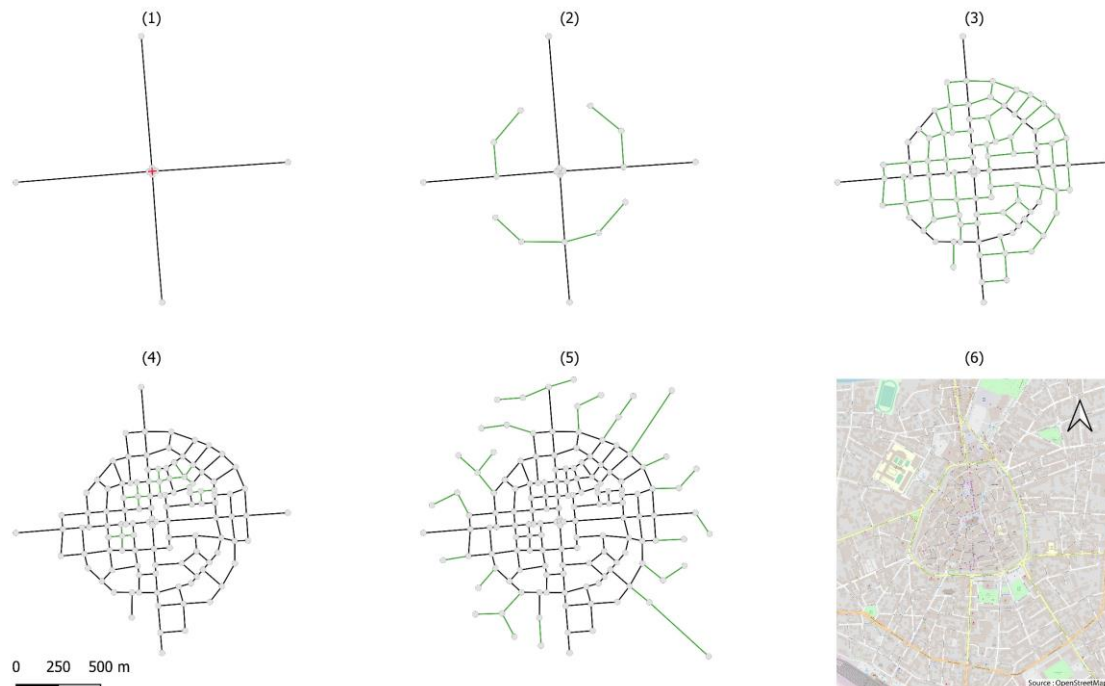


Figure 10.17. Simulation d'un réseau viaire de forme "Radioconcentrique". (1), (2), (3), (4) et (5) Graphes viaires résultants respectivement des séquences 1, 2, 3, 4 et 5 de la simulation. Les segments d'initialisation sont représentés en rouge, et les nouveaux segments sont représentés en vert. (6) Graphe viaire résultant de la simulation. (7) Réseau réel de Brive-la-Gaillarde (France).

10.1.9.3 Analyses morphologiques

La voie concentrique sur le réseau simulé, correspondant à la forme "Radioconcentrique", est caractérisée par les valeurs les plus élevées en termes de degré, de centralité de proximité, de centralité d'intermédiarité et de degré de desserte (Figure 10.18 - (1), (4), (5) et (6)). Les voies radiales présentent également des valeurs élevées pour ces indicateurs, bien que légèrement inférieures à celles de la voie "Radioconcentrique". Ainsi, ces voies constituent la structure principale du réseau, garantissant un accès facile, efficient et direct à l'intégralité de la trame viaire.

Sur le réseau simulé, les voies avec les valeurs les plus faibles correspondent principalement aux voies cellulaires, délimitant les îlots de petites tailles au niveau du centre. En revanche, les voies ramifiées, à la périphérie du réseau, se caractérisent par des valeurs importantes d'espacement par rapport aux autres voies du réseau (Figure 10.18 - (2)). Ces voies ramifiées sont caractérisées par les valeurs les plus faibles d'orthogonalité. Les valeurs les plus élevées

(par rapport à l'ensemble des voies du réseau) sont observées pour les voies cellulaires et radiales (Figure 10.18 - (3)), qui se rattachent les unes aux autres de manière perpendiculaire.

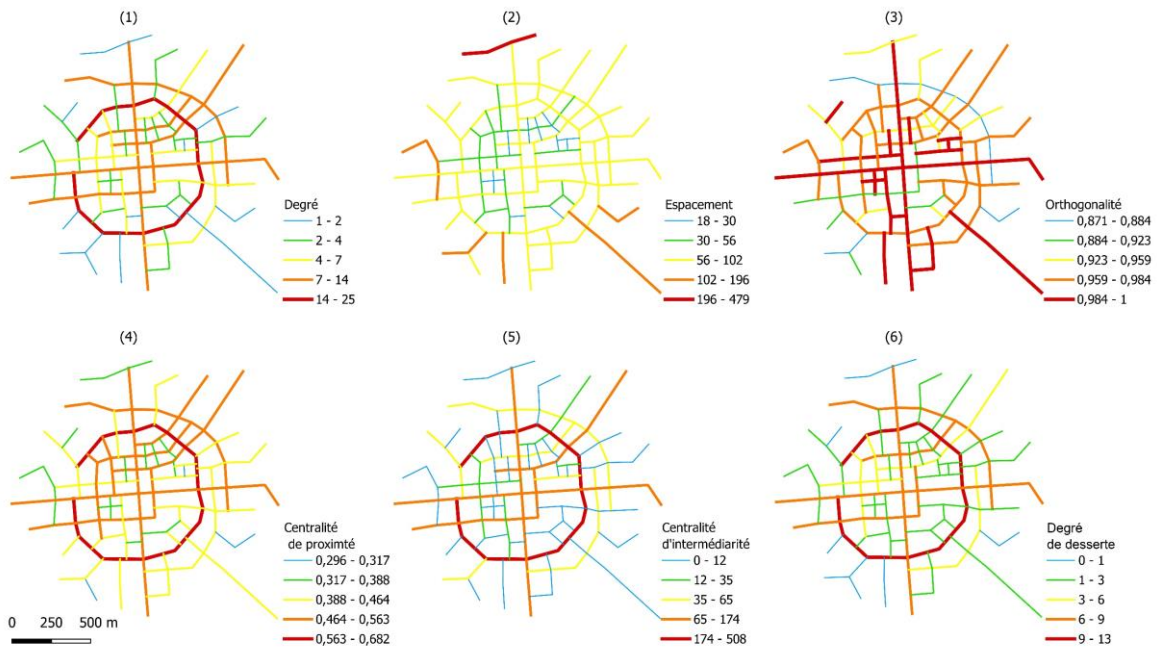


Figure 10.18. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Radioconcentrique".

10.1.10 Etude des propriétés structurelles des réseaux simulés

Dans la présente section l'objectif est d'étudier les propriétés structurelles des réseaux simulés. Il s'agit d'une lecture exploratoire des résultats sans considérer l'évolution de ces réseaux (lors de chaque séquence de simulation).

Pour les analyses menées à l'échelle des nœuds et des voies, les histogrammes de distribution des indicateurs considérés sont présentés à la même échelle pour l'ensemble des réseaux, afin de faciliter l'analyse visuelle et la comparaison des graphiques. Les histogrammes ne sont pas présentés à une échelle logarithmique, contrairement à l'approche adoptée dans la partie 1 (chapitre 4), en raison de la nature des réseaux simulés qui impliquent un nombre relativement réduit de nœuds et de voies.

Pour les analyses menées à l'échelle du graphe viaire, les résultats des propriétés des graphes sont synthétisés par des nuages de points, regroupant l'ensemble des réseaux afin d'identifier d'éventuelles similitudes.

10.1.10.1 À l'échelle des nœuds et des voies

Degré des nœuds

Les distributions des valeurs du degré des nœuds présentent une forme de distribution qui présente des similarités avec une courbe gaussienne pour certains des réseaux simulés. Néanmoins, elles révèlent une différenciation claire entre les formes caractérisées par des motifs arborescents (avec des courbes relativement planes) et ceux présentant des motifs maillés (avec des courbes en forme de cloche plus marquée) (Figure 10.19).

Les réseaux simulés pour les formes "Médina" et "Village-rue" sont caractérisés par une prédominance de nœuds ayant un degré de 1. Cette propriété est commune aux motifs arborescents ou ramifiés, et témoigne de la présence fréquente d'impasses.

Les réseaux simulés pour les formes "Rue-plume", "Fuseau-quadrillée", "Quadrillée", "Quadrillée avec enceinte" et "Radio-quadrillée", sont caractérisées par une prédominance de nœuds ayant un degré de 3. Cette propriété révèle la présence de structures marquées par des croisements en forme de T.

Le réseau simulé de forme "Radioconcentrique" se distingue particulièrement par une prédominance des nœuds de degré 4, en raison de la présence de motifs maillés marqués par des croisements en forme de X.

Degré des voies

Les réseaux simulés pour l'ensemble des formes considérées se distinguent par une distribution en longue queue des valeurs du degré des voies (Figure 10.20). Cette caractéristique est une propriété de "petit-monde" identifiée pour des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4).

Toutefois, certains réseaux, tels que ceux correspondant aux formes "Rue-plume" et "Quadrillée", sont caractérisées par des distributions bimodales, avec la présence de deux pics distincts dans la courbe de distribution, le deuxième pic étant moins prononcé que le premier. Cette différence peut être interprétée par l'opposition entre un nombre élevé de voies peu connectées (premier pic), qui sont généralement de petite taille, et un nombre considérable, quoique moins élevé (deuxième pic), de voies traversantes très connectées.

Longueur des voies

Pour la plupart des réseaux simulés, les distributions des valeurs de la longueur des voies présentent des caractéristiques similaires (Figure 10.21). Ils affichent une distribution en

longue queue, avec un pic de la courbe marqué aux valeurs moyennes. Ces caractéristiques correspondent à une propriété d'invariance d'échelle identifiée pour des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4). Cette invariance d'échelle indique la présence de peu de voies très courtes, peu de voies très longues et une grande majorité des voies de longueur moyenne.

Néanmoins, les distributions pour certains réseaux, tels que ceux correspondant aux formes "Rue-plume" et "Radio-quadrillée", présentent une bimodalité avec un deuxième pic moins accentué que le premier. Ce résultat rejoint le constat par rapport à la distribution du degré des voies, indiquant la présence d'un nombre plus important de voies de petites tailles, peu connectées. En ce qui concerne le réseau de forme "Radio quadrillée", la distribution présente également un pic à des valeurs inférieures à la moyenne et à la médiane, ce qui est notamment observable pour le réseau de forme "Quadrillée".

Espacement des voies

Les distributions des valeurs de l'espacement des voies présentent des caractéristiques similaires pour l'ensemble des réseaux simulés à l'exception de ceux correspondant aux formes "Village-rue" et "Radio-quadrillée" (Figure 10.22). Les réseaux viaires correspondant respectivement à ces formes se distinguent par un espacement plus hiérarchisé des voies.

Les réseaux qui présentent à la fois des distributions en longue queue et un pic bien défini aux valeurs moyennes montrent des caractéristiques semblables aux propriétés d'invariance d'échelle identifiées pour des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4). Cette invariance d'échelle indique qu'il existe une distance moyenne entre les nœuds du réseau, même lorsque la taille et/ou la forme du réseau varient.

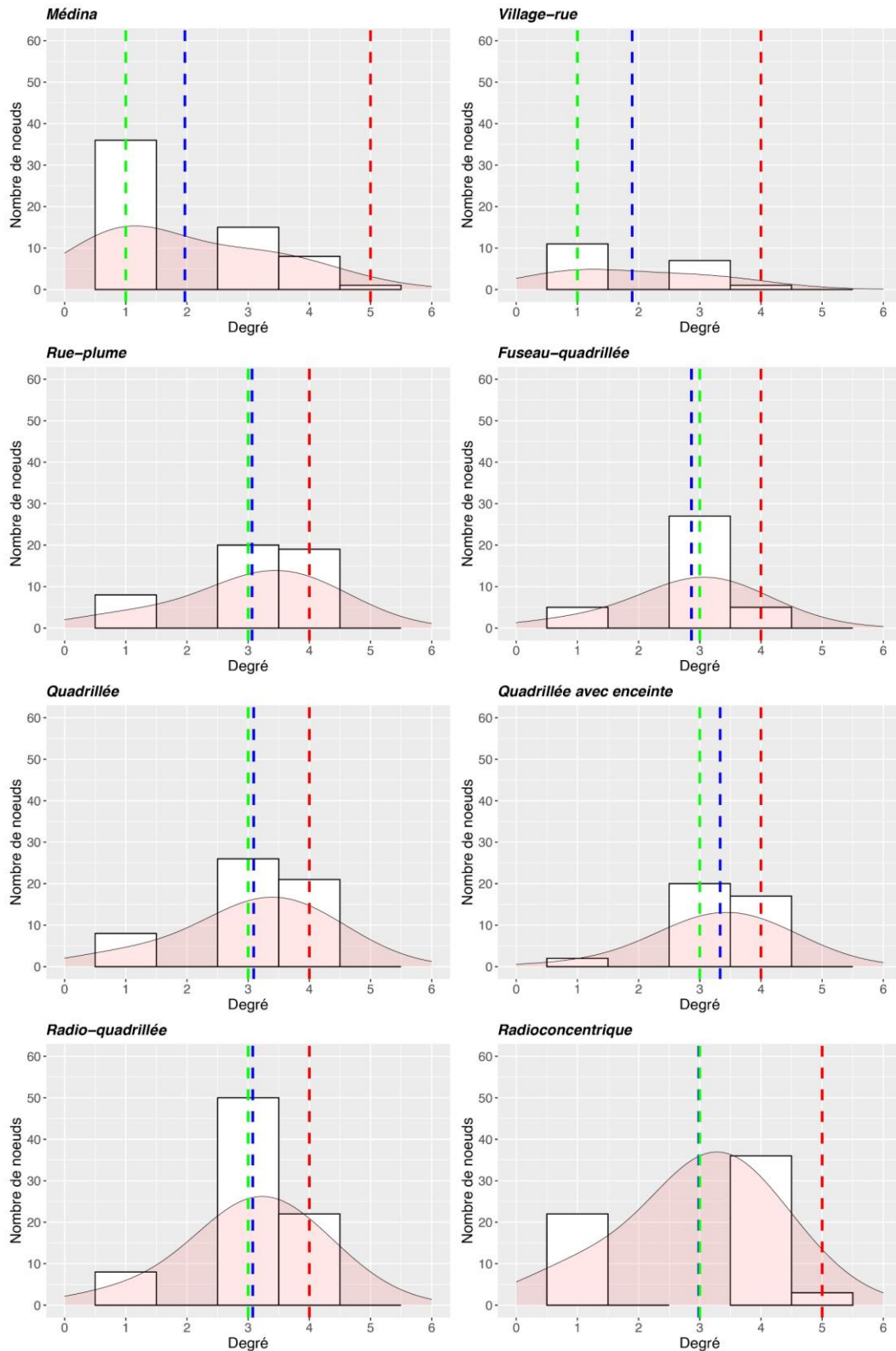


Figure 10.19. Histogrammes de la distribution du degré des nœuds calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

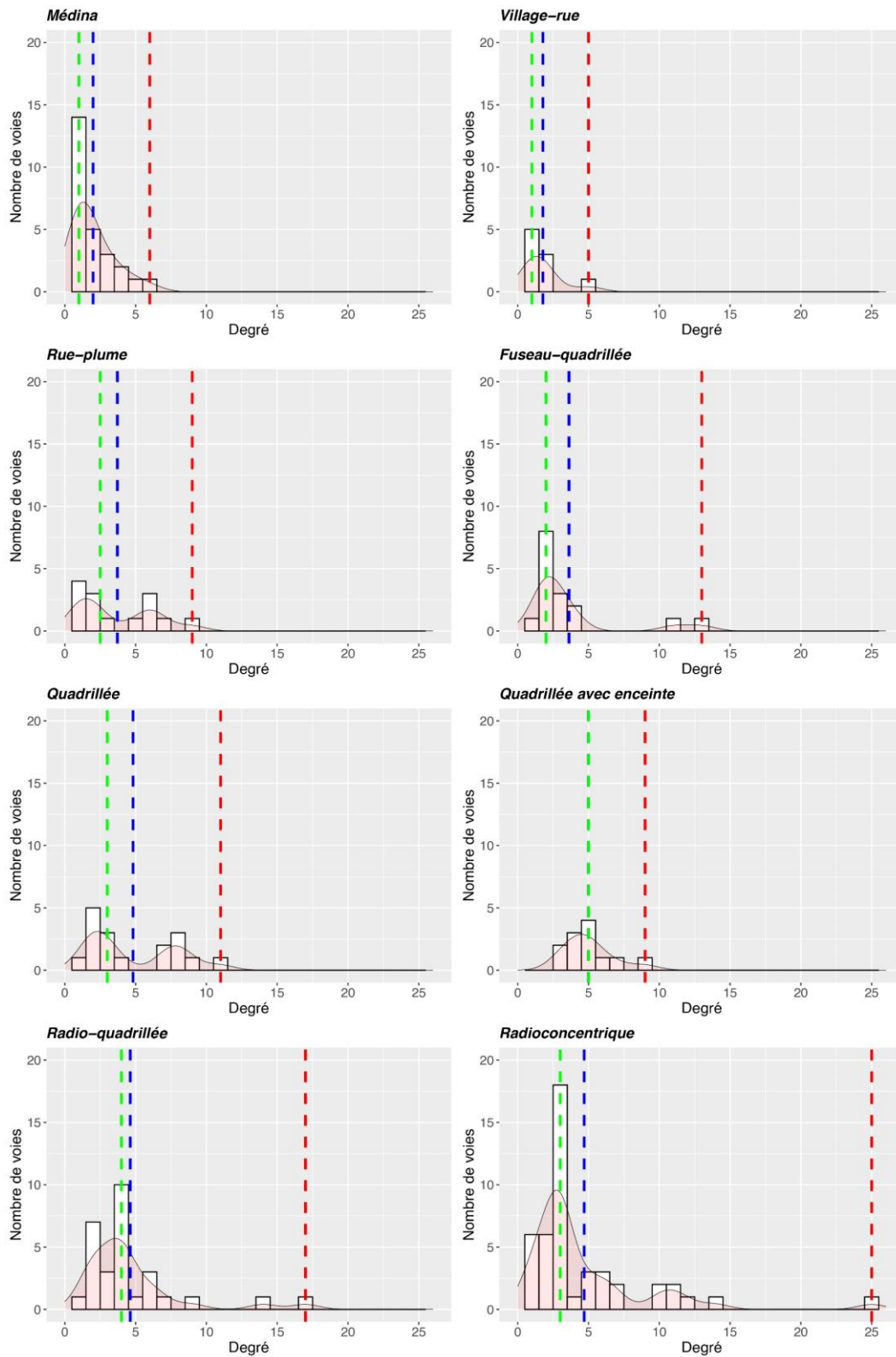


Figure 10.20. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

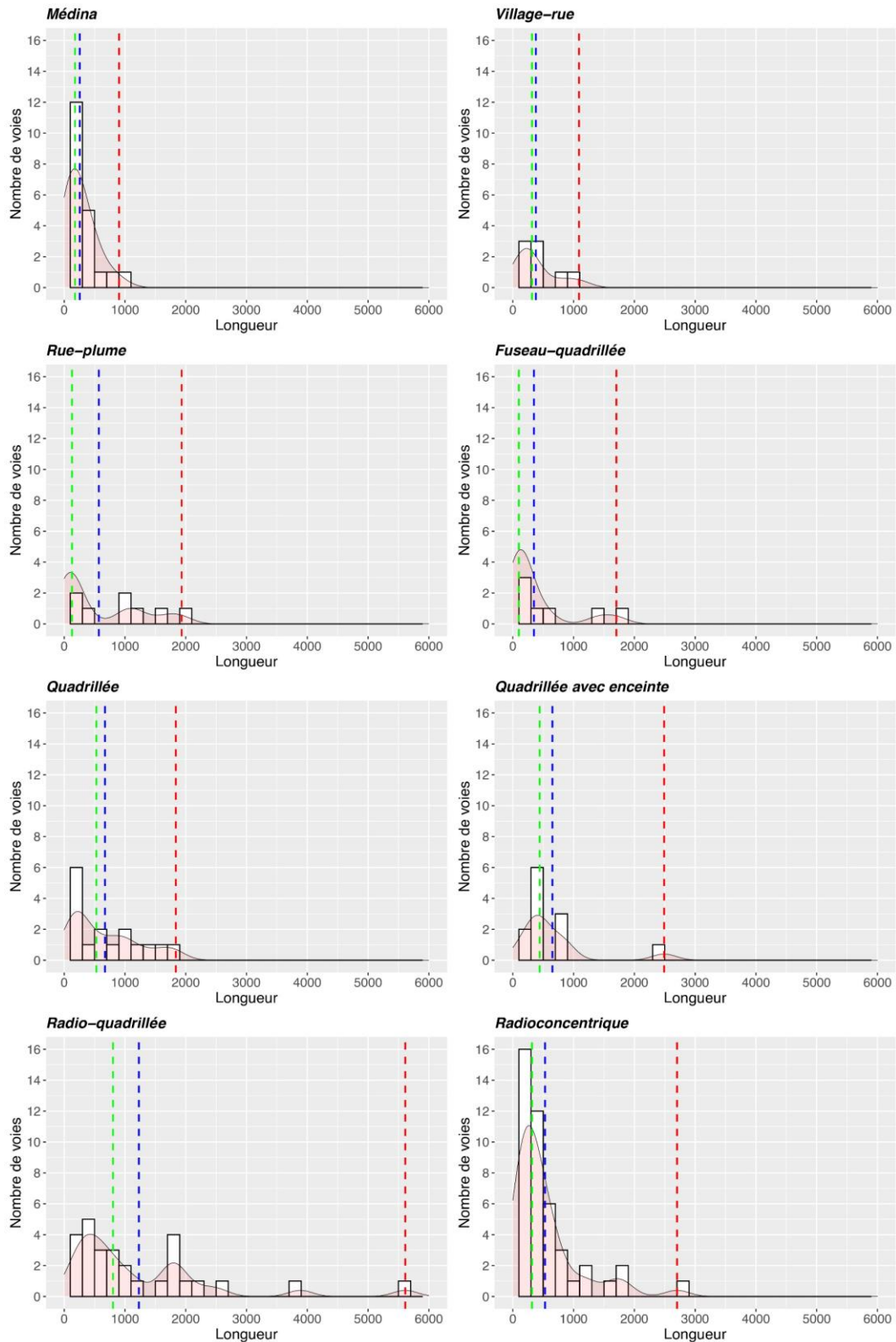


Figure 10.21. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

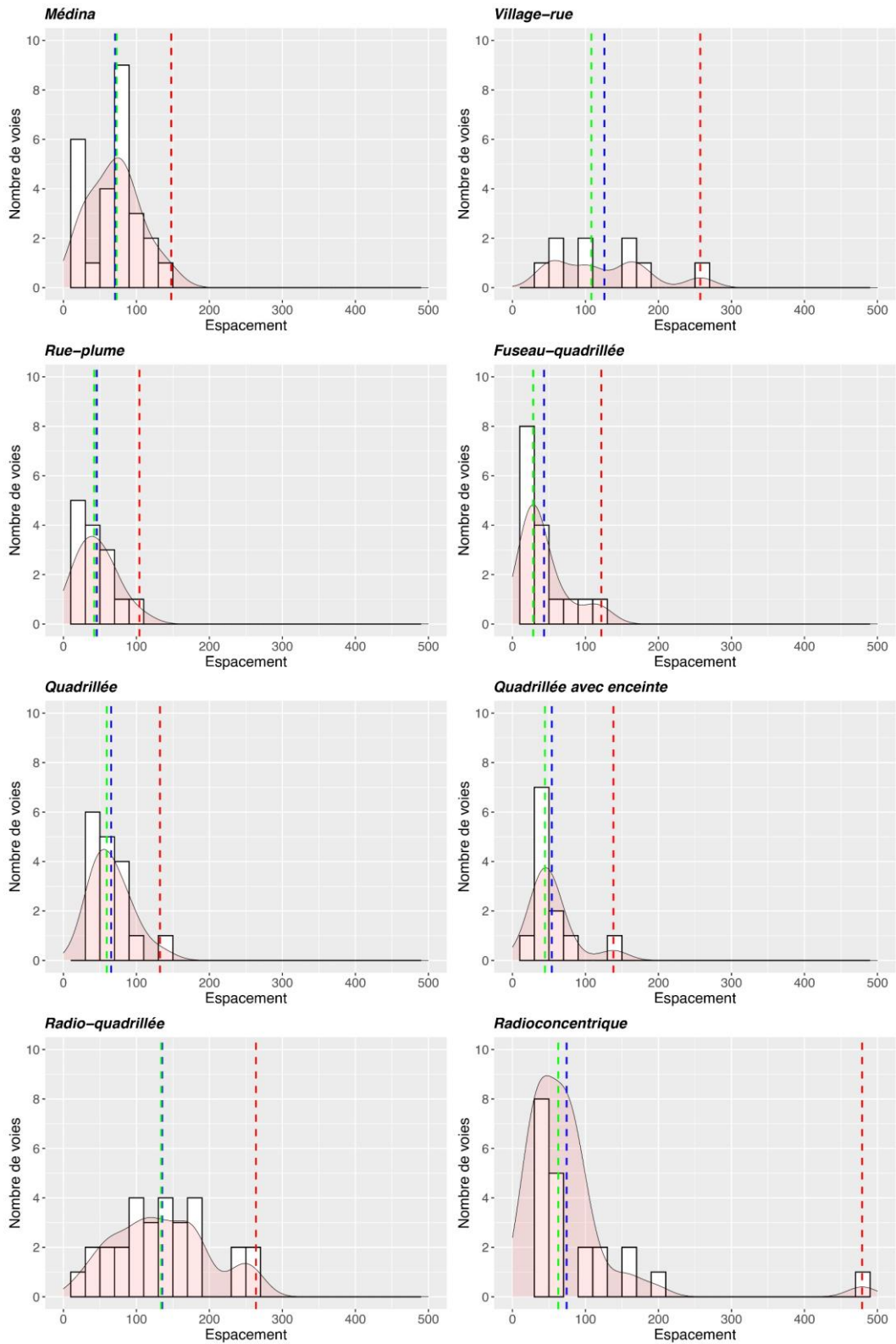


Figure 10.22. Histogrammes de la distribution de l'espaceement calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

10.1.10.2 À l'échelle des graphes viaires

Nous vérifions sur les réseaux simulés la présence de propriétés structurales, identifiées à l'échelle du graphe viaire, pour des réseaux réels. Ces propriétés sont relatives aux valeurs médianes du degré des nœuds et du degré des voies, ainsi qu'aux relations scalantes (deux à deux) entre les propriétés du graphe viaire.

Valeurs médianes

En comparant les valeurs médianes du degré (Figure 10.23 - (1)), les réseaux simulés pour les formes "Médina" et "Village-rue" se distinguent par une valeur médiane de degré égale à 1. En revanche, les réseaux simulés pour les formes "Rue-plume", "Fuseau-quadrillée", "Quadrillée", "Quadrillée avec enceinte", "Radio-quadrillée" et "Radioconcentrique" sont caractérisés par une valeur médiane de degré égale à 3. Cette observation confirme la différenciation identifiée précédemment entre les réseaux avec des formes marquées par des motifs arborescents et celles marquées par des motifs maillés (cf. partie 2, chapitre 6).

La valeur médiane du degré des voies représente une variation plus marquée d'un réseau simulé à l'autre (Figure 10.23 (2)). Seuls les réseaux simulés pour les formes "Médina" et "Village-rue" représentent la même valeur médiane égale à 1. Ce qui est conforme à la faible connectivité de ces réseaux. Les réseaux simulés pour les formes "Rue-plume", "Fuseau-quadrillée", "Quadrillée" et "Radioconcentrique" représentent des valeurs médianes du degré des voies assez proches. Les réseaux simulés de formes "Quadrillée avec enceinte" et "Radio-quadrillée" représentent particulièrement les valeurs médianes du degré des voies les plus élevées. Ce qui reflète la forte connectivité de ces réseaux.

Des similitudes structurales sont identifiées entre les réseaux simulés de différentes formes, malgré la variation de la taille du réseau en termes de nombres de nœuds et de voies. Les résultats présentent également des caractéristiques semblables aux graphes viaires de réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4).

Relations scalantes (deux à deux)

La relation scalante entre la longueur totale du réseau et le nombre de voies est quasi-identique pour les réseaux simulés correspondant respectivement aux formes "Village-rue", "Rue-plume", "Fuseau quadrillée", "Quadrillée" et "Quadrillée avec enceinte". Cependant, trois cas atypiques de réseaux se distinguent de cette relation, correspondant aux formes "Médina", "Radio-quadrillée" et "Radioconcentrique". Cela peut s'expliquer par la structure intégralement arborescente de la forme "Médina" et par la structure fortement maillée des

formes "Radio-quadrillée" et "Radioconcentrique". Une relation scalante quasi-uniforme est observé entre le nombre de nœuds et le nombre de voies pour l'ensemble des réseaux simulés.

Ces résultats montrent des caractéristiques semblables aux lois d'échelle identifiées pour les propriétés des graphes de réseaux viaires réels (cf. partie 1, chapitre 4).

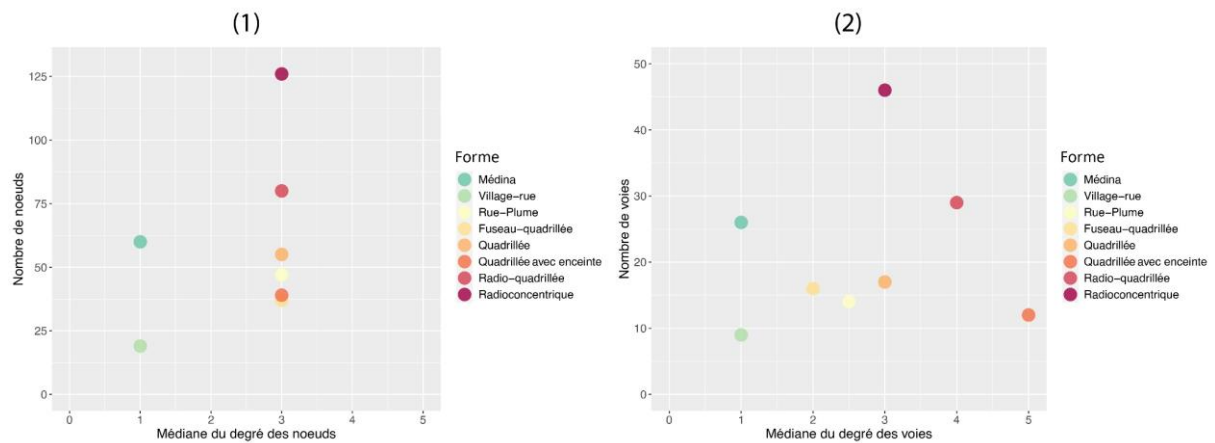


Figure 10.23. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur les réseaux simulés de différentes formes de villes⁵⁹. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.

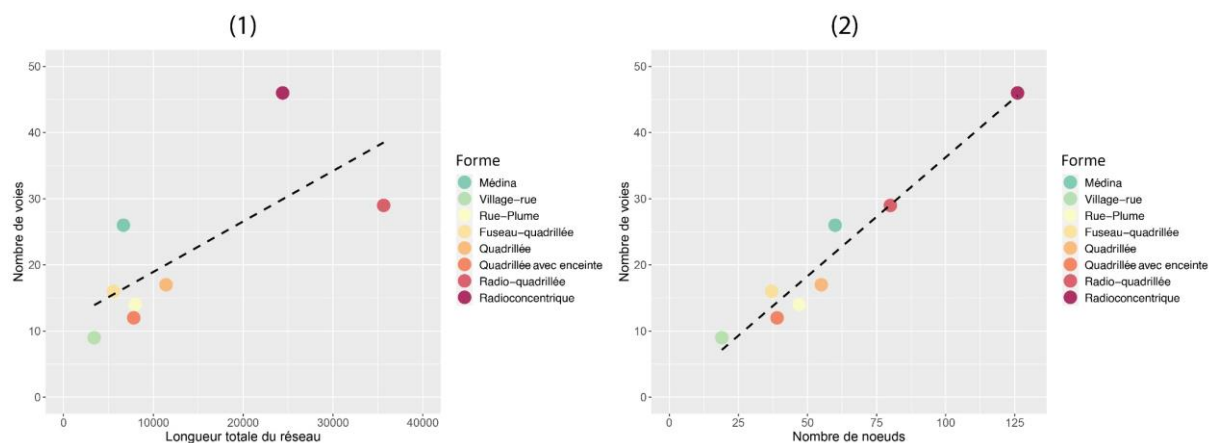


Figure 10.24. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale des hypergraphes associés aux réseaux simulés de différentes formes de villes, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (2) Le nombre de voies en fonction du nombre de nœuds.

⁵⁹ La sémiologie progressive est choisie pour illustrer les similitudes et les différences entre les formes marquées par des motifs arborescents (nuances de vert), celles mixtes (nuances de jaune) et celles marquées par des motifs maillés (nuances d'orange et de rouge).

10.2 Simulation de formes de villes plus complexes

Cette section présente la simulation de deux formes de villes plus complexes à partir d'un réseau viaire réel.

10.2.1 Présentation des scénarios

La configuration finale de la forme d'une ville est porteuse d'information sur les multiples séquences de son processus de formation et de transformation au travers le temps (Allain, 2004; Baumont et al., 1996; Racine, 1971) (cf. partie, chapitre 3 ; et partie 2, chapitre 6). Les concepts de concentration (Burgess et al., 1925), de centralité (Baumont et al., 1996), et de linéarité (Hoyt, 1939), sont généralement considérées pour décrire ces formes en relation avec les dynamiques d'évolution urbaine. Par ailleurs, pour la caractérisation de formes de villes contemporaines, qui sont plus complexes, le caractère monocentrique ou polycentrique d'une ville (Adolphson, 2009; Le Néchet, 2015), ainsi que son caractère compacte ou étalé (Kasanko et al., 2006; Tsai, 2005) sont principalement mis avant.

Dans un cadre conceptuel similaire, Borrego et al. (2006) définissent une typo-morphologie de formes de villes complexes. En considérant quatre catégories de zones (zone verte inhabitée, zone rurale, zone périurbaine et zone urbaine) et en analysant la manière dont les déplacements sont organisés à l'intérieur de l'espace habité, ils identifient trois formes de villes :

- La ville diffuse (figure 10.26 - (a)) caractérisée par une zone urbaine étendue mais avec une faible densité entourée d'une zone périurbaine également étendue et peu dense.
- La ville couloir (figure 10.26 - (b)) structuré le long d'axes de déplacement principaux, composée d'un centre urbain situé à la jonction des axes, ainsi que de plusieurs zones urbanisées réparties le long de ces axes, entraînant un étalement considérable de la ville.
- La ville compacte (figure 10.26 - (c)) caractérisée par une concentration de la densité de la population au centre.

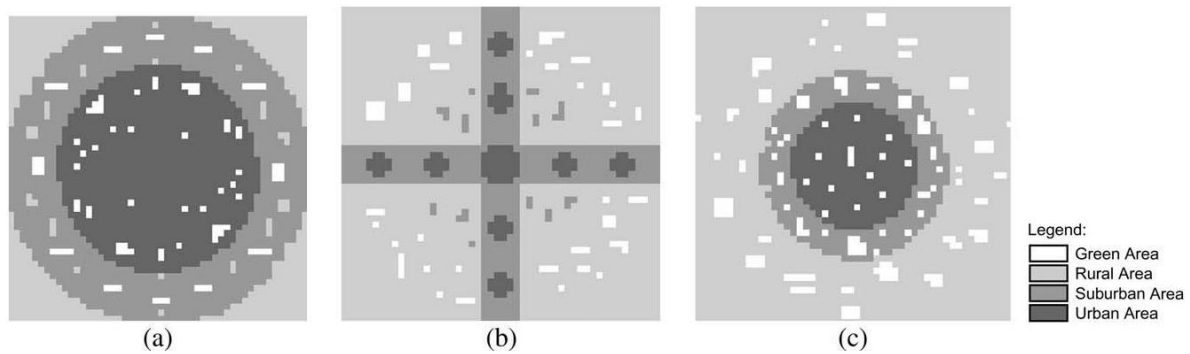


Figure 10.25. (a) Ville diffuse, (b) Ville couloir et (c) Ville compacte.

Source : Borrego et al., (2006).

En considérant les caractéristiques adoptées dans la typo-morphologie de Borrego et al.(2006), deux formes de villes plus complexes ont été choisies pour être simulées : une forme monocentrique compacte et une forme monocentrique axialisée. Les formes monocentriques compactes sont caractérisées par une urbanisation compacte autour d'un seul centre. Les formes monocentriques axialisés sont marquées par une urbanisation linéaire tout au long d'axes routiers qui se connectent au niveau d'un centre principal.

La définition de ces scénarios de simulation en partant d'un réseau viaire réel nécessite une réflexion au-delà de la forme globale finale, en considérant les différentes phases d'évolution. Ainsi, chaque scénario est défini par différentes phases d'évolution, elles-mêmes correspondant à une ou plusieurs séquences de simulation (Tableau 10.10). Chaque séquence permet la simulation d'un morphotype de voie spécifique.

Le réseau viaire de Dijon au 17^{ème} siècle est choisi pour l'initialisation des deux scénarios de simulation⁶⁰. Ce choix de réseau d'initialisation peu développé permet la simulation d'une évolution en différentes phases et une meilleure visualisation des résultats. + l'importance de garder le même pour les 2 tests est de pouvoir illustrer qu'il est possible de simuler deux formes de villes différentes. De plus, l'importance de garder le même réseau initial pour les deux scénarios réside dans l'objectif de démontrer qu'il est possible de simuler deux formes de villes différentes à partir d'un même réseau.

Le paramétrage est présenté pour chaque scénario d'évolution. Ensuite les réseaux viaires résultant de chaque séquence de la simulation sont présentés et analysés au moyen d'indicateurs morphologiques et topologiques. Enfin, les propriétés structurelles des réseaux

⁶⁰ D'un point de vue technique, les simulations sont initialisées par le graphe du réseau viaire choisi, en considérant les arcs et les nœuds du graphe pour le calcul du potentiel. Cela permet d'éviter des perturbations éventuelles qui pourraient être engendrées par les points annexes des segments du réseau.

résultant des différentes phases de la simulation sont analysées et comparées à celles de réseaux réels.

Morphotype de voie Forme de ville	Concentrique	Radiale/ linéaire	Convergente/ divergente	Ramifiée	Orthogonale/ diagonale	Transversale	Intercalaire	Cellulaire
<i>Monocentrique compacte</i>			✓	✓	✓			✓
<i>Monocentrique axialisée</i>		✓		✓	✓		✓	✓

Tableau 10.10. Association des deux formes de villes complexes considérées aux morphotypes de voies.

10.2.2 Simulation d'une ville monocentrique compacte

10.2.2.1 Paramétrage

Un scénario de simulation d'une forme de ville **monocentrique compact** est défini par deux phases d'évolution. La première phase consiste en une **densification autour du centre** existant. Elle est suivie par une deuxième phase d'**émergence et de densification d'une couronne** autour du centre. Ainsi ces deux phases aboutissent en un développement compact du réseau autour d'un seul centre.

La **phase 1** inclut trois séquences correspondant aux morphotypes de **voie ramifiée, orthogonale/diagonale** et **cellulaire**. La **phases 2** inclut quatre séquences correspondant aux morphotypes de voie **convergente/divergente, orthogonale/diagonale, cellulaire** et **ramifiée** (Tableau 10.11).

Pour la **phase 1**, la séquence 1 porte sur la simulation de **voies ramifiées** à partir du réseau d'initialisation. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 200$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 400$, afin d'ajuster la taille du morphotype aux objectifs du scénario. Ces voies ramifiées sont supports pour la densification du réseau autour du centre, qui est réalisée durant la séquence 2 par la simulation de **voies orthogonales/diagonales**. La séquence 3 permet de simuler les **voies cellulaires** pour densifier le réseau par un redécoupage interstitiel à l'intérieur des îlots délimités par les voies orthogonales/diagonales.

Pour la **phase 2**, la séquence 4 permet de simuler les voies **convergentes/divergentes** pour initier l'émergence d'une couronne autour du centre. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 300$ et la longueur maximale est définie à $l_{max} = 600$, afin d'étendre l'espace d'expansion du réseau. Au cours de la séquence 5, la simulation des voies **orthogonales/diagonales** permet de connecter les voies convergentes/divergentes pour former une couronne autour du centre. Les séquences 6 et 7 permettent respectivement de densifier le réseau de la couronne, par des **voies cellulaires** (séquence 6) remorcelant les îlots de grande taille, et des **voies ramifiées** (séquence 7) assurant un accès local.

Pour les deux phases les autres paramètres sont maintenus à leur valeur calibrée pour la simulation de chaque morphotype respectif.

Phase	Phase 1 : Densification au niveau du centre			Phase 2 : Emergence et densification d'une couronne			
Séquence	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4	Séquence 5	Séquence 6	Séquence 7
Morphotype de voie	Ramifiée	Orthogonale /Diagonale	Cellulaire	Convergente /divergente	Orthogonale /Diagonale	Cellulaire	Ramifiée
Nombre d'itération	20	20	20	10	150	50	50
W_p	1	1	0	1	1	0	0
E_{pp}	1	0	0	0	0	0	1
O_p	0	1	1	0	1	1	0
α	1	1	1	1	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5
ω	0	1	1	0.2	1	1	0
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
r_0	200	200	140	300	250	140	150
k_{ext}	3	1	3	3	1	3	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
l_{max}	400	400	560	600	500	560	600
A_i	60	60	60	60	60	60	60
A_s	60	60	60	60	60	60	60
c	0.3	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3

Tableau 10.11. Paramétrage pour la simulation d'une forme de ville monocentrique compacte. Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.2.2.2 Résultats de simulation et analyses morphologiques

La visualisation du réseau simulé aux différentes séquences est cohérente avec la formalisation des différentes phases d'évolution prédéfinies (Figure 10.26). Le réseau d'initialisation (Figure 10.26 - (0)), et les réseaux issus de chaque séquence de la simulation (Figure 10.26 - (1) à (7)) sont analysés à partir des indicateurs caractérisant leurs voies.

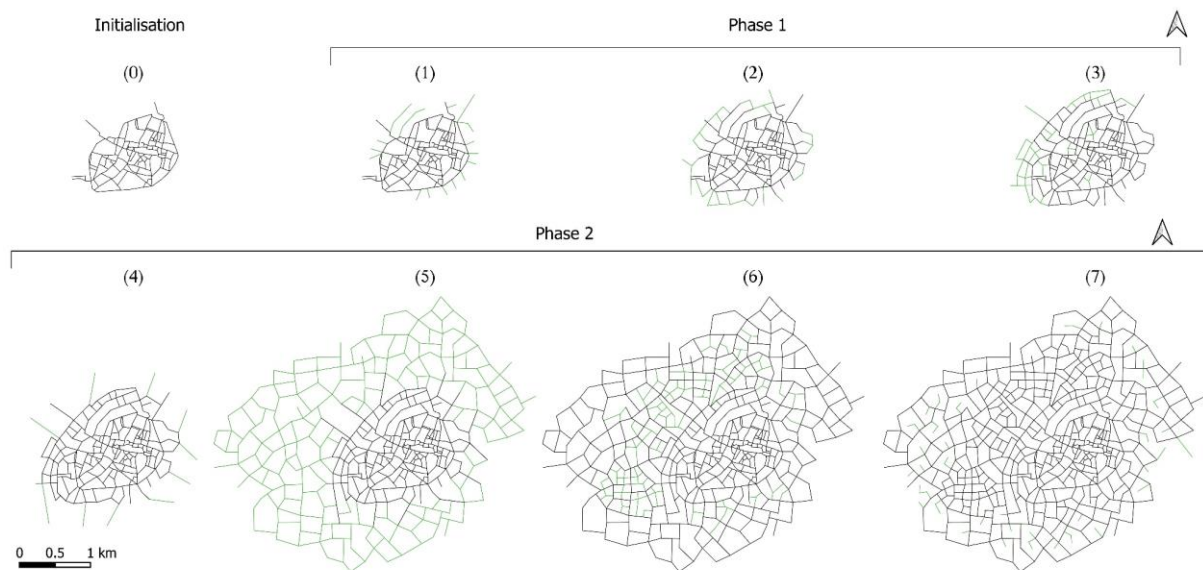


Figure 10.26. Simulation du réseau viaire d'une ville monocentrique compacte. Les segments générés lors de chaque séquence sont représentés en vert.

Degré

Pour rappel, le degré des voies met en évidence les voies les plus connectées, caractérisées par les valeurs les plus élevées (en rouge sur la figure 10.27). Les structures principales du réseau d'initialisation préservent la hiérarchie liée au degré dans le réseau tout au long des séquences de simulation. Ainsi, cela correspond aux voies les plus anciennes du réseau simulé à la fin de l'ensemble des séquences.

En outre les voies ramifiées initient l'émergence de structures très connectées autour du centre (avec des valeurs élevées de degré) à l'issue de la première séquence de simulation (en rouge sur la figure 10.27 -(1)). À ces voies se rattachent ensuite durant la simulation des voies orthogonales/diagonales et cellulaires pour former des voies plus continues avec des valeurs de degré plus élevées (Figure 10.27 - (2) et (3)). Dans le réseau final, ces voies renforcent la structure monocentrique (Figure 10.27 - (7)), et peuvent correspondre aux artères principales de circulation (avenue, boulevard, etc.).

Les voies convergentes divergentes initient l'émergence de structures, auxquelles se rattachent les voies orthogonales/diagonales, pour former des voies connectant le centre à la première couronne, et reliant les différentes zones de cette dernière (en rouge sur la figure 10.27 - (5) et (6)).

Ces résultats permettent également de constater que les voies ayant des valeurs de degré élevées forment une structure continue en prolongement des voies du centre, et en

connectant ces voies par des axes périphériques. C'est cette continuité entre les entités viaires, formant des voies plus longues, qui induit une meilleure connectivité du réseau.

Espacement

L'espacement des voies révèle un gradient centre-périphérie de la densité du réseau. Les voies avec les valeurs plus faibles d'espacement sont principalement au niveau du centre, ce qui traduit la forte densité du réseau (Figure 10.28). Ces voies assurent un accès local et facilitent les déplacements piétons au sein du centre-ville. Tandis qu'en périphérie les voies avec les valeurs les plus élevées d'espacement indiquent une densité plus faible (en rouge sur la figure 10.28). Ces voies assurent une transition rapide entre différents secteurs de la ville et permettent l'extension du réseau.

Cette observation est valable pour le réseau à l'issue des différentes séquences de la simulation. Ainsi la structure compacte du réseau est renforcée au cours de son évolution.

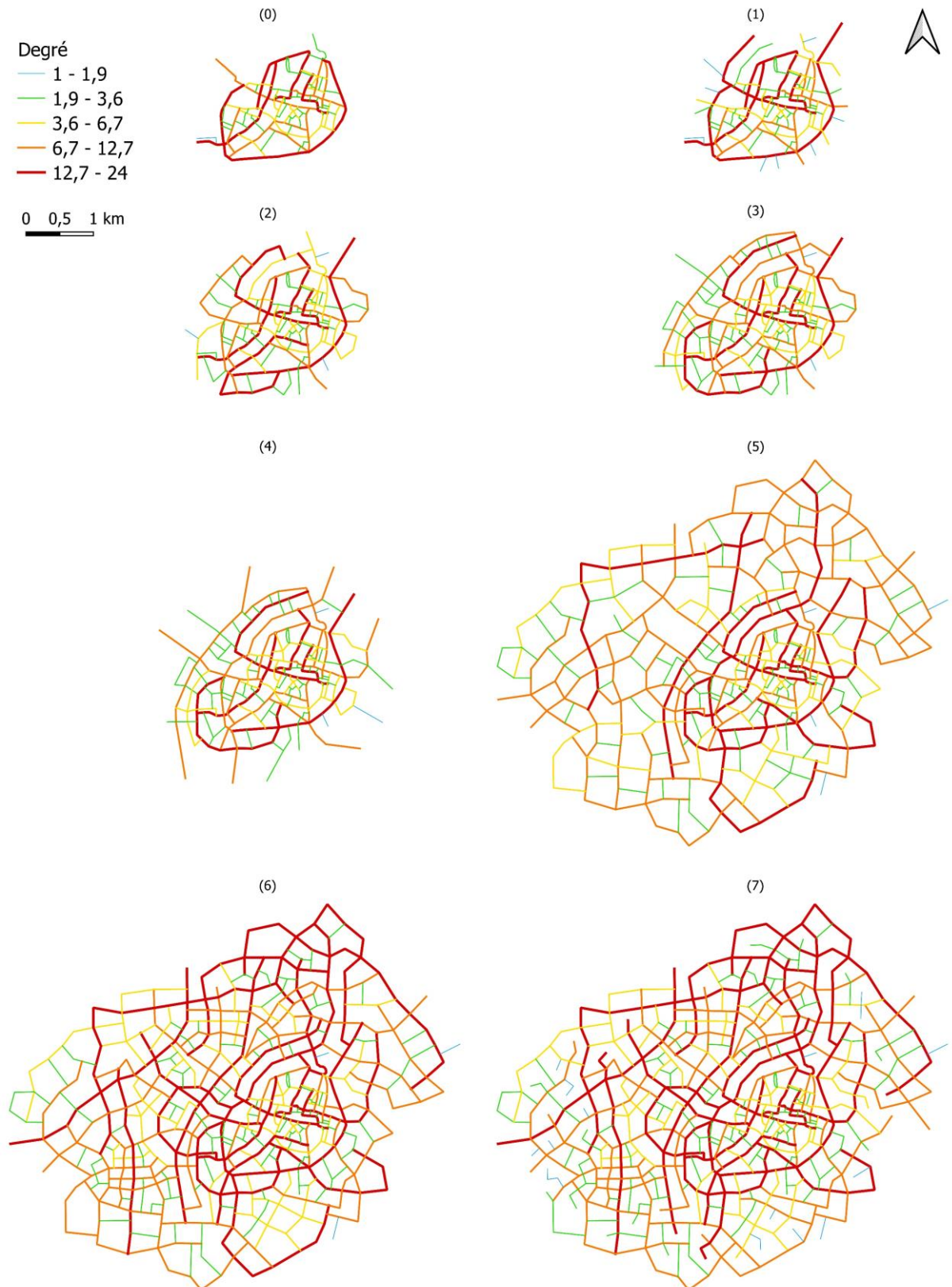


Figure 10.27. Degré des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

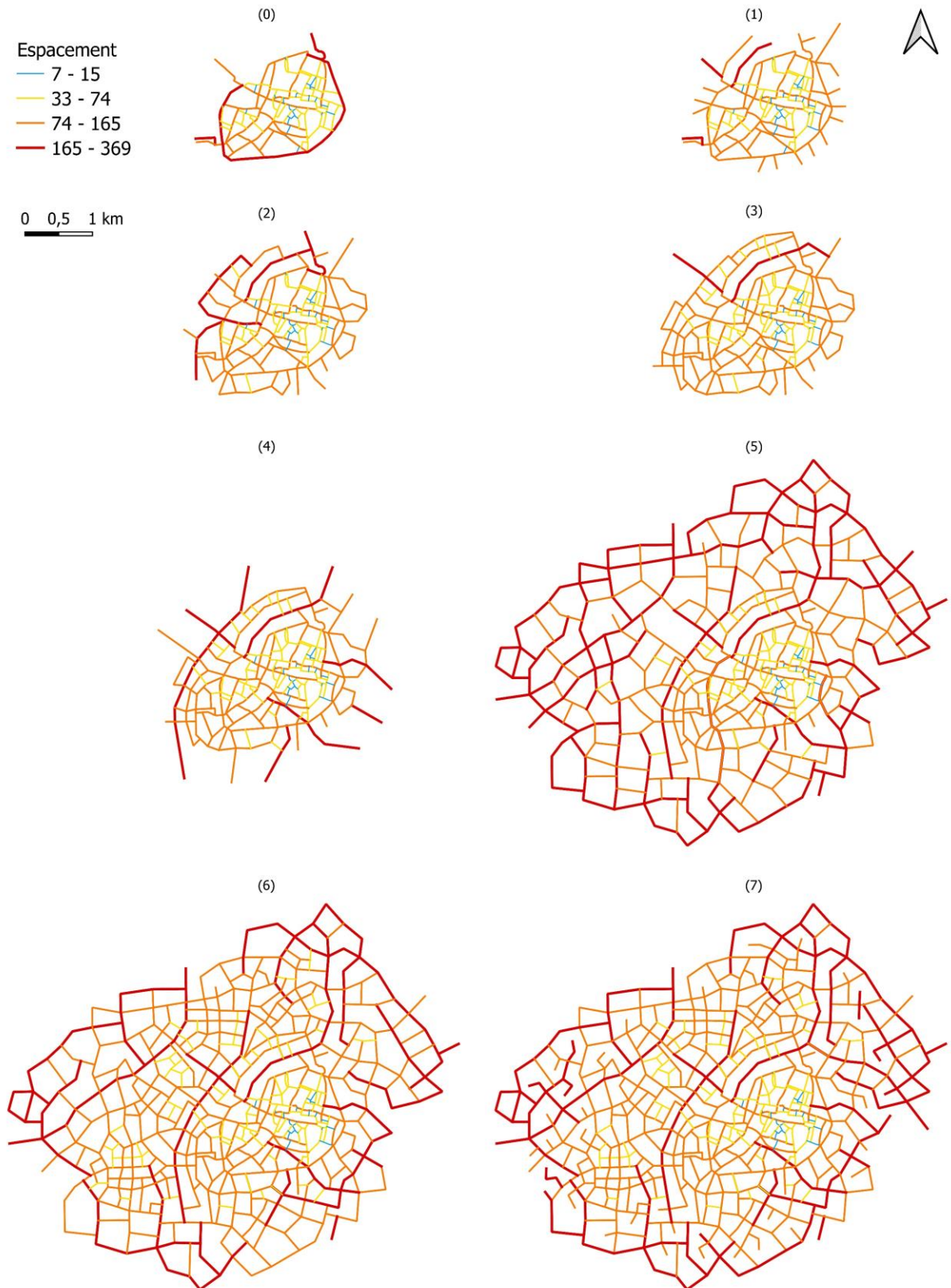


Figure 10.28. Espacement des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

Orthogonalité

L'orthogonalité des voies révèle les valeurs les plus élevées pour les voies cellulaires au niveau du centre pour les premières séquences de la simulation (représentées en rouge sur la figure 10.29 - (3)). Ensuite, les voies orthogonales/diagonales forment une structure principalement maillée avec des valeurs modérées en termes d'orthogonalité (représentées en orange sur la figure 10.29 - (5)).

Pour les dernières séquences de la simulation, les voies cellulaires de la première couronne ainsi que les voies ramifiées affichent les valeurs d'orthogonalité les plus élevées (représentées en orange sur la figure 10.29 - (6) et (7)).

Dans l'ensemble, le réseau conserve une structure principalement orthogonale au cours de son évolution, ce qui est cohérent avec le paramétrage du scénario de simulation.

Centralité de proximité

À l'état initial du réseau et à l'issue de la première séquence de la simulation, les voies caractérisées par des valeurs de centralité de proximité élevées correspondent aux deux voies croisées centralement au niveau du centre historique, ainsi que la voie contournant ce dernier (représentées en rouge sur la figure 10.30 - (1) et (2)).

Les voies convergentes/divergentes qui sont dans le prolongement des voies du centre présentent également des valeurs élevées (représentées en rouge sur la figure 10.30 - (2), (3) et (4)). En outre les voies orthogonales/diagonales qui ont émergées autour du centre, à sa périphérie immédiate, sont caractérisées par des valeurs moyennes (représentées en orange sur la figure 10.30 - (5)).

La centralité de proximité des voies présente une diminution globale à mesure que le réseau évolue au cours de la simulation. Plus il y a de voies, plus il devient difficile de parcourir tout le réseau. Les voies du centre maintiennent leur hiérarchie selon cet indicateur pour les dernières séquences de la simulation (représentées en orange sur la figure 10.30 - (6) et (7)). Les voies du réseau connectées directement à ces voies présentent également des valeurs élevées à la fin de la simulation. Ces voies sont connectées à l'ensemble du réseau via des chemins topologiques simples, assurant un accès facile (représentées en orange sur la figure 10.30 - (7)), renforçant ainsi la structure monocentrique.

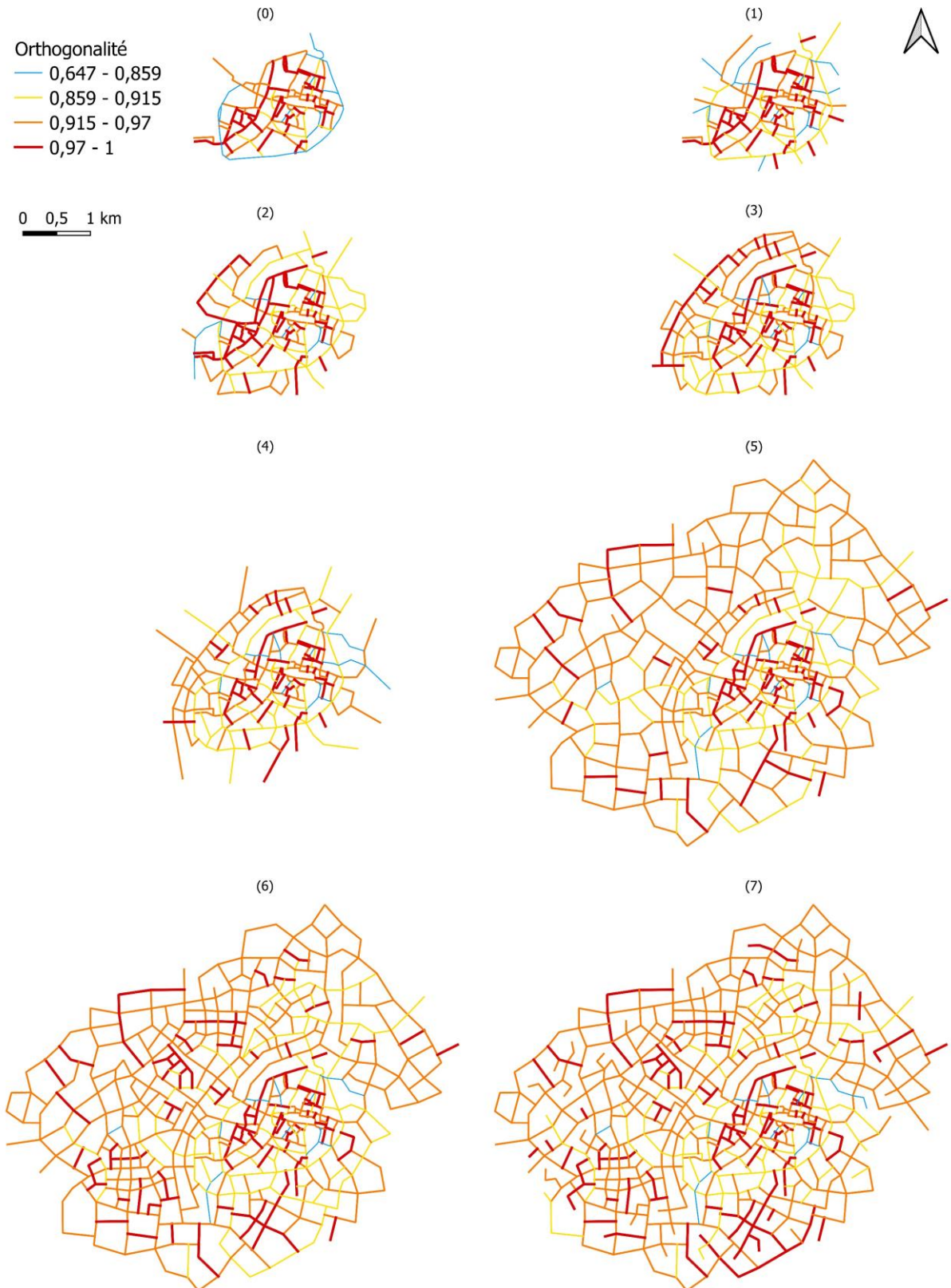


Figure 10.29. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

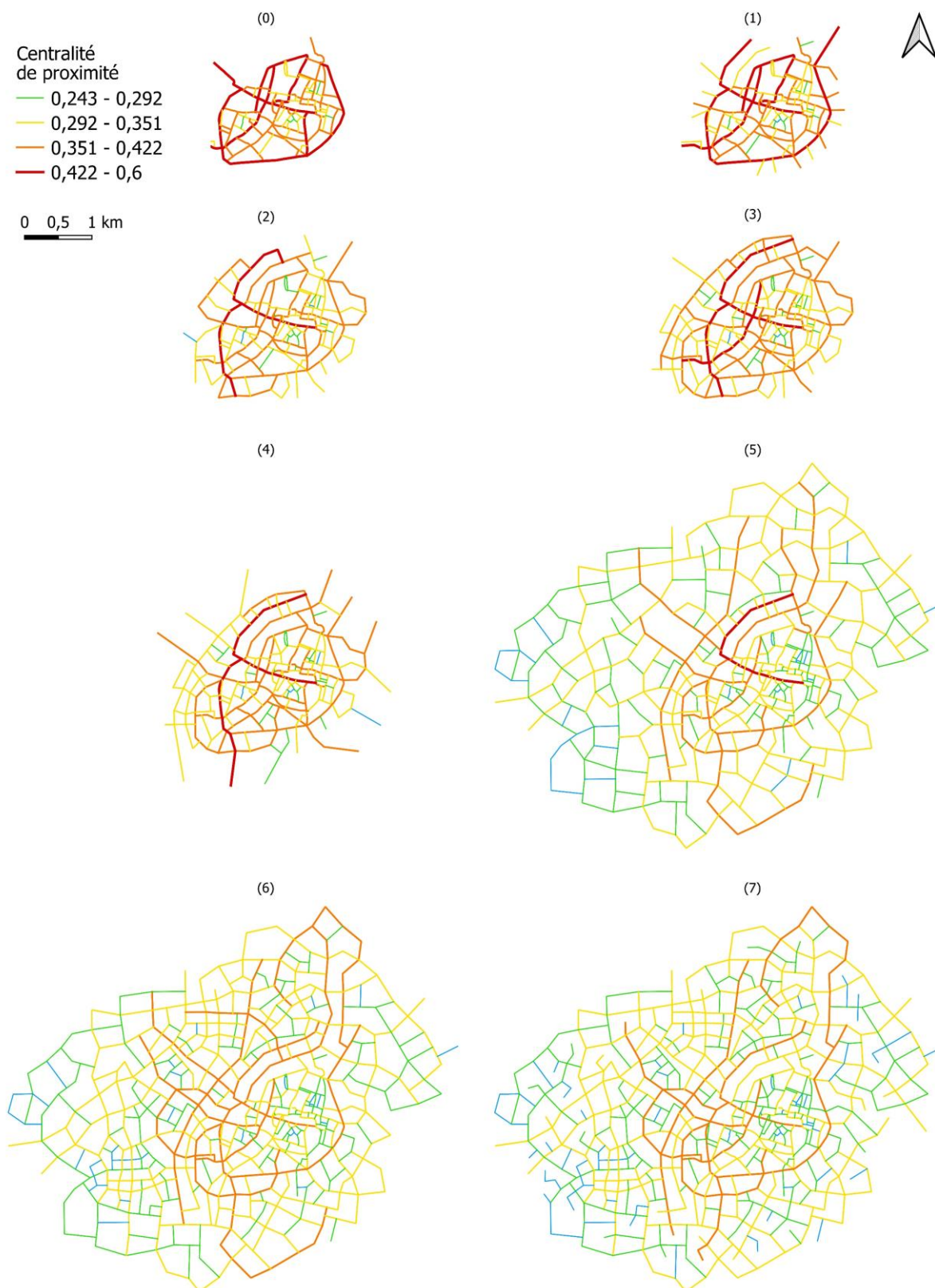


Figure 10.30. Centralité de proximité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

Centralité d'intermédiarité

La centralité d'intermédiarité révèle les valeurs les plus élevées pour les voies les plus utilisées le long des chemins les plus courts entre toutes les paires de voies du graphe viaire, permettant ainsi un déplacement efficace au sein du réseau (en rouge sur la figure 10.31).

Durant les premières séquences de simulation, ces voies correspondent aux voies principales du centre historique (Figure 10.31 - (1), (2), et (3)). À mesure que le réseau se densifie au niveau de la première couronne au cours des dernières séquences, la centralité d'intermédiarité des voies orthogonales/diagonales se renforce (Figure 10.31 - (5), (6), et (7)), puisqu'elles sont utilisées sur les chemins les plus courts entre les voies cellulaires et ramifiées.

Au cours de la simulation, le réseau s'est développé en renforçant la centralité des voies du centre et de la couronne, résultant ainsi en une forte centralité bien répartie sur l'ensemble du réseau (Figure 10.31 - (7)). Les voies avec les valeurs de centralité d'intermédiarité les plus faibles (en vert et en bleu sur la figure 10.31.) correspondent aux voies cellulaires à l'échelle des petits îlots et aux impasses caractérisées par un usage limité à l'échelle du réseau. Ces résultats révèlent que le réseau présente une structure compacte, bien connectée, et une centralité topologique bien équilibrée entre le centre et la périphérie.

Degré de desserte

À l'état initial du réseau et à l'issue des premières séquences de la simulation, les valeurs relativement élevées de degré de desserte correspondent aux deux voies croisées centralement au niveau du centre historique, ainsi que la voie contournant ce dernier (en orange et en rouge sur la figure 10.32 - (1) et (2)).

Au cours de l'évolution du réseau, le degré de desserte se renforce pour des voies au niveau de la périphérie immédiate du centre et de la première couronne, formant plusieurs intersections en X (en rouge sur la figure 10.32 - (5) et (6)).

Les voies du réseau final représentant les valeurs de degré de desserte les plus élevées sont celles reliant le centre historique à la première couronne, ainsi que celle reliant les différentes zones urbaines de cette même couronne. Ces voies correspondent aux artères principales qui permettront une desserte rapide et directe au sein de la structure urbaine. Les valeurs moyennes correspondent aux routes assurant une desserte à une échelle locale, et les plus faibles valeurs correspondent à des impasses (Figure 10.32 - (7)).

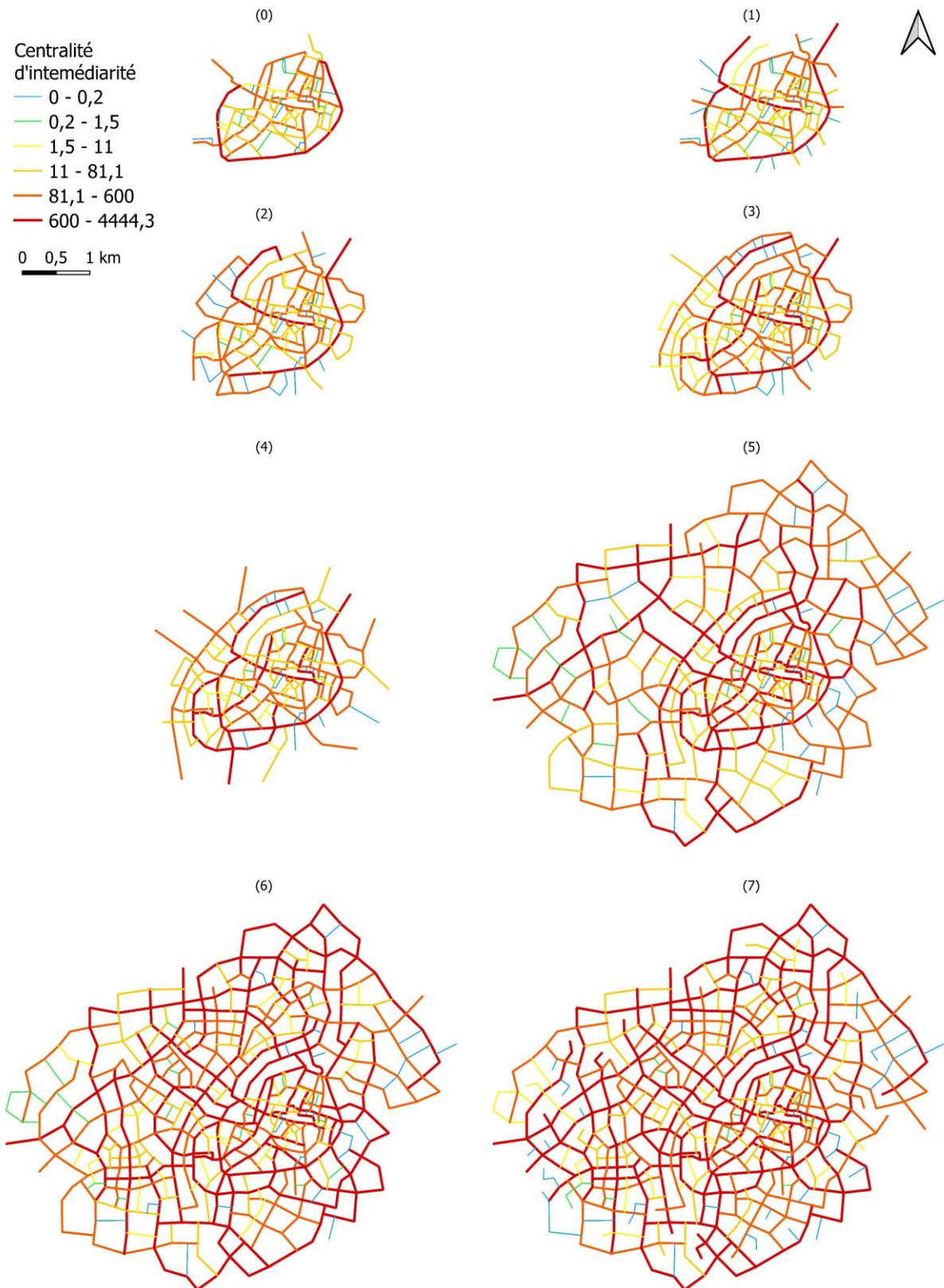


Figure 10.31. Centralité d'intermédierité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

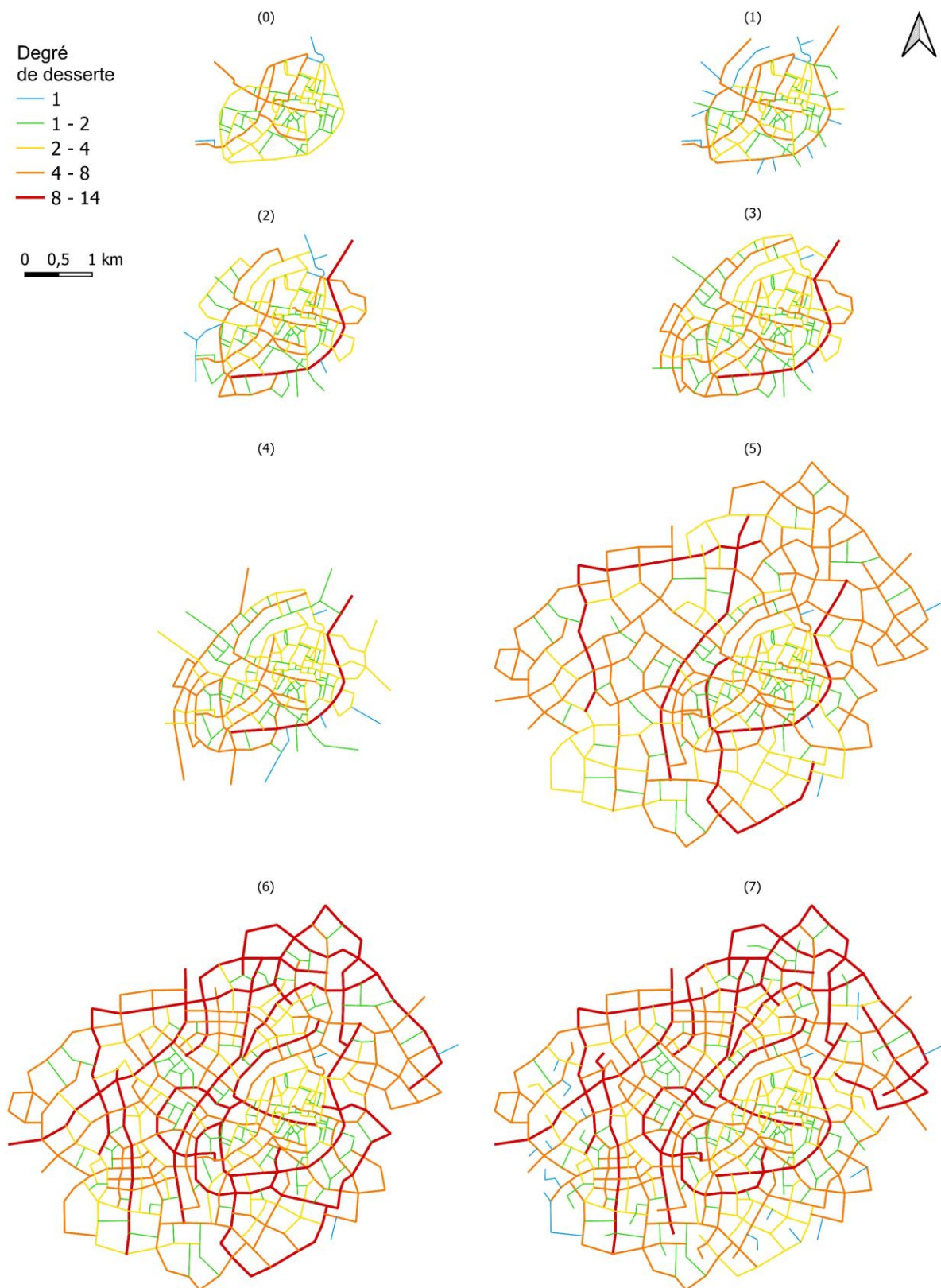


Figure 10.32. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.

10.2.2.3 Etude des propriétés structurelles

Dans la présente section, les propriétés structurelles du réseau simulé sont étudiées et comparées à celles identifiées pour les réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4). De plus, puisque la simulation est réalisée en plusieurs séquences, il est possible de suivre l'évolution de ce réseau (au cours de la simulation). Les propriétés structurelles sont ainsi étudiées pour le réseau à l'initialisation et à l'issue de chaque séquence de la simulation.

Pour les analyses menées à l'échelle des nœuds et des voies, les histogrammes de distribution des indicateurs considérés sont présentés à la même échelle pour le réseau issu de chaque séquence de la simulation. Les histogrammes sont présentés à une échelle logarithmique, conformément à l'approche adoptée dans la partie 1 (chapitre 4), à l'exception des distributions du degré des nœuds⁶¹. Ces choix de représentation facilitent l'analyse visuelle et la comparaison des graphiques. Pour les analyses menées à l'échelle du graphe viaire, les résultats concernent l'évolution des propriétés de l'hypergraphe du réseau viaire résultant de chaque séquence de simulation.

À l'échelle des nœuds et des voies

- **Degré des nœuds**

Les valeurs du degré des nœuds présentent une forme de distribution similaire pour le réseau à l'issue des différentes séquences de simulation. Le réseau est plus particulièrement caractérisé par une prédominance de nœuds ayant un degré $k=3$ par rapport aux nœuds de degré $k=1$ (Figure 10.33). Cette propriété est constante tout au long de son évolution, et révèle la présence de motifs maillés caractérisés par la prédominance de croisements en forme de T (Figure 10.34). Cette observation est conforme à la conceptualisation du scénario appliqué pour simuler un réseau compact et aux propriétés de réseaux réels.

⁶¹ Les distributions du degré des nœuds ne sont pas présentées dans la première partie (chapitre 4), car elles sont considérées comme intuitives pour les réseaux viaires réels. Cependant, il est pertinent de les présenter pour les réseaux simulés.

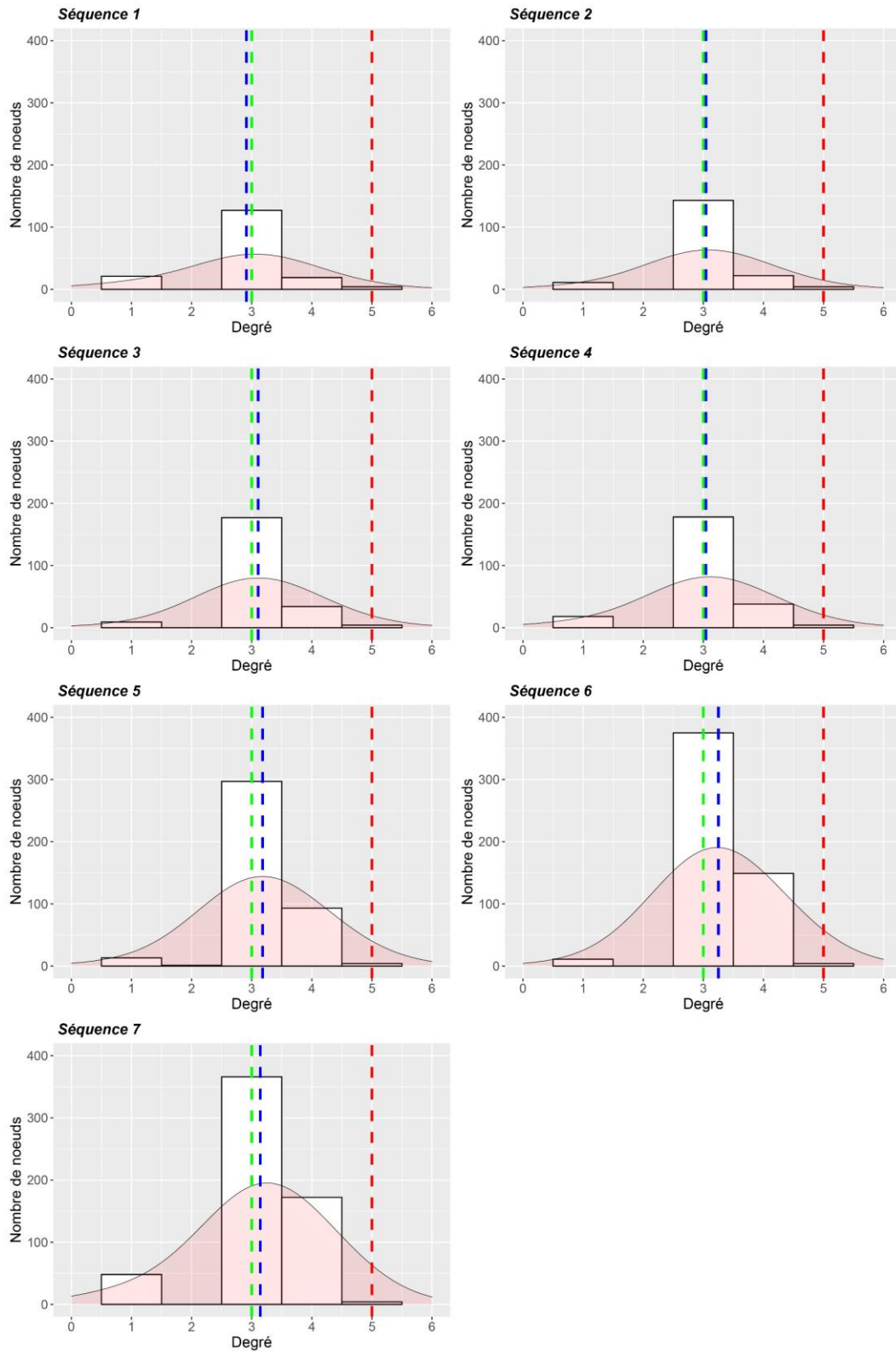


Figure 10.33. Histogrammes de la distribution du degré des nœuds calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

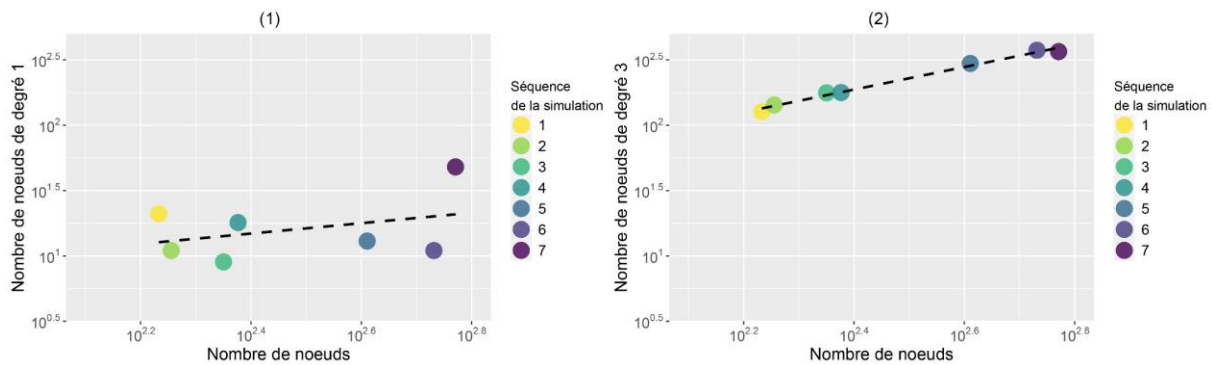


Figure 10.34. (1) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (2) nombre de nœuds de degré $k=3$, par rapport nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. La droite (en trait discontinu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

- **Distribution du degré des voies**

Le réseau simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation représente une distribution en longue queue des valeurs du degré des voies (sur une échelle normale (voir Annexe 34)). Sur une échelle logarithmique, la forme des distributions suggère que les degrés des voies s'échelonnent suivant une loi de puissance (Figure 10.35). Cette caractéristique est une propriété de "petit-monde" identifiée pour les réseaux réels étudiés (cf. partie 1, chapitre 4).

- **Longueur des voies**

Pour toutes les séquences, le réseau simulé respectif présente une distribution des valeurs de la longueur des voies avec des caractéristiques similaires aux réseaux réels. Ces distributions sont en longue queue (sur une échelle normale (voir Annexe 34)). En échelle logarithmique, l'ajustement des données à une courbe de densité présente une forme qui suggère une loi log-Normale (Figure 10.36). Cette caractéristique est une propriété d'invariance d'échelle identifiée pour des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4). Cette invariance d'échelle indique la présence de peu de voies très courtes, ainsi que peu de voie très longue, tandis que la grande majorité des voies sont de longueur moyenne.

- **Espacement des voies**

Une invariance d'échelle est également identifiée pour l'espacement des voies du réseau simulé, dont les valeurs se caractérisent par une forme de distribution similaire qui suggère une loi log-Normale (Figure 10.37). Cela indique la persistance d'une distance moyenne réduite entre les intersections (nœuds) du réseau tout au long de son évolution.

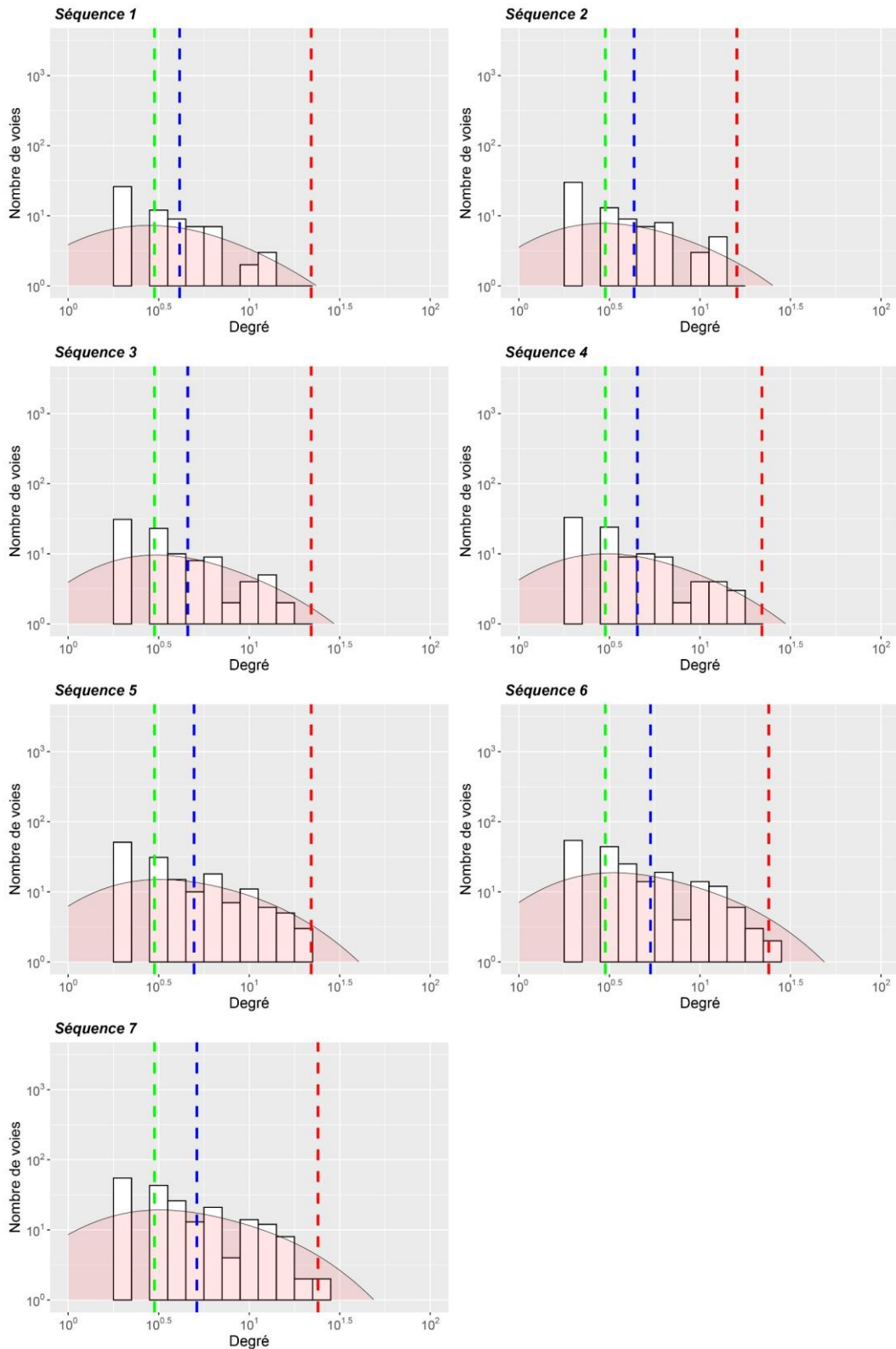


Figure 10.35. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

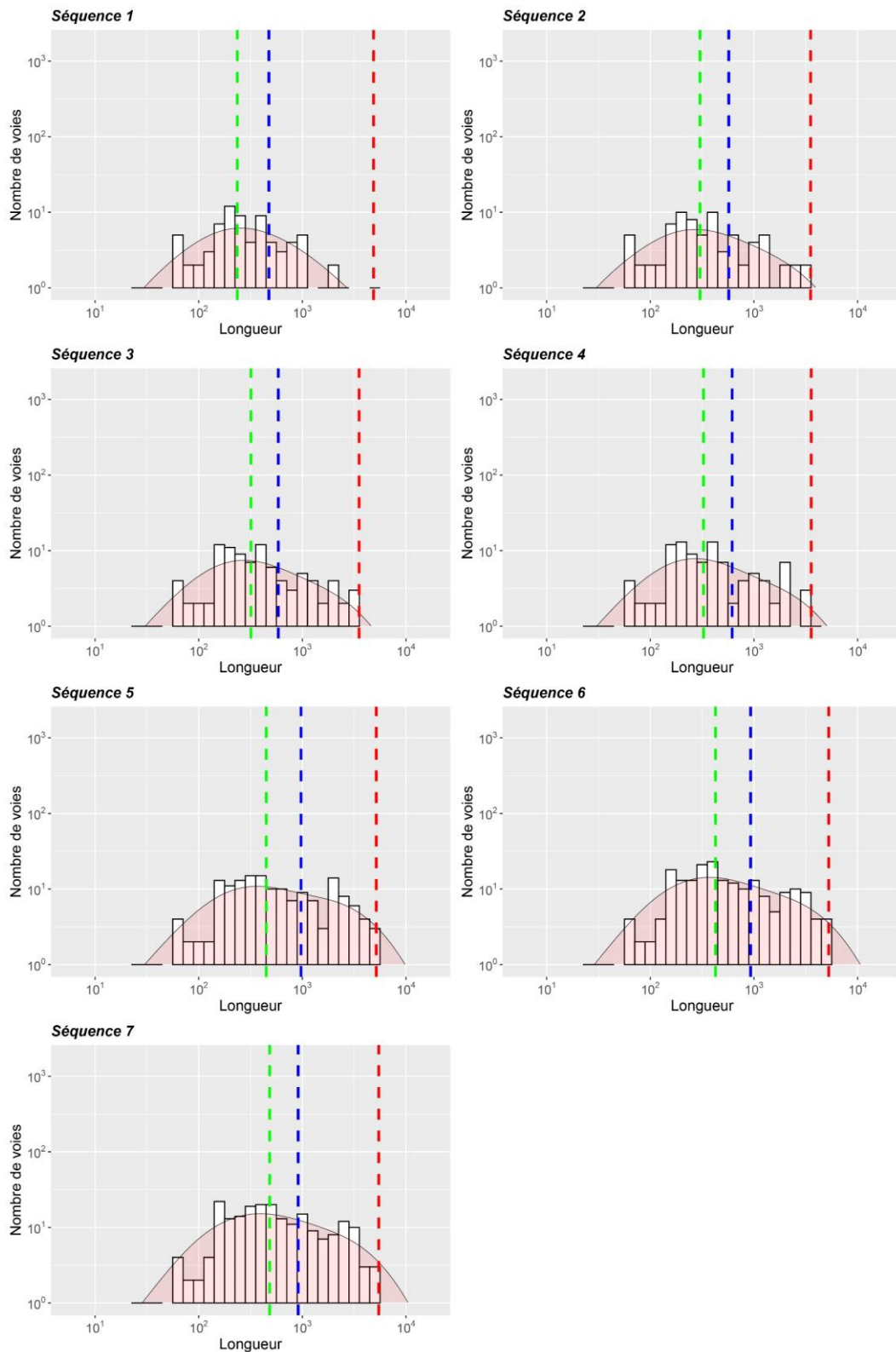


Figure 10.36. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

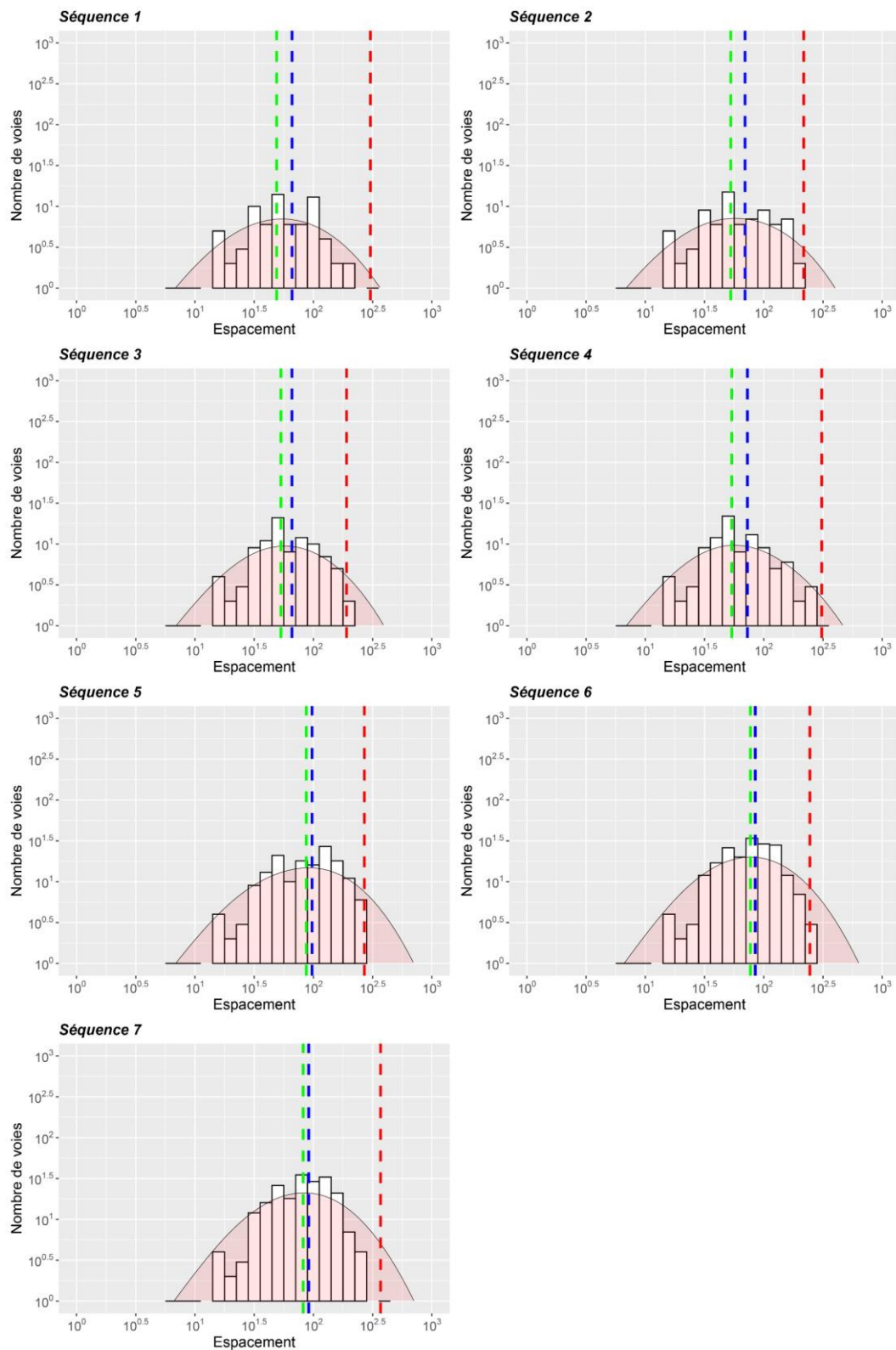


Figure 10.37. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

À l'échelle des graphes viaires

Nous vérifions sur les réseaux simulés la présence de propriétés structurales à l'échelle du graphe viaire au regard de celles identifiées pour les réseaux réels. Pour ce faire, nous examinons les valeurs médianes, du degré des nœuds et du degré des voies, et les relations scalantes (deux à deux) entre les propriétés du graphe viaire.

- **Valeurs médianes**

Les valeurs médianes respectives du degré des voies et des nœuds restent constantes pour le réseau simulé à l'issue des différentes séquences de la simulation, avec une valeur médiane égale à 3 (Figure 10.38). Ce résultat est cohérent avec la forte connectivité du réseau et à sa structure maillée.

Ainsi des similitudes structurales sont identifiées entre le réseau simulé à différentes séquences de la simulation et les réseaux réels à différentes étapes de leur évolution.

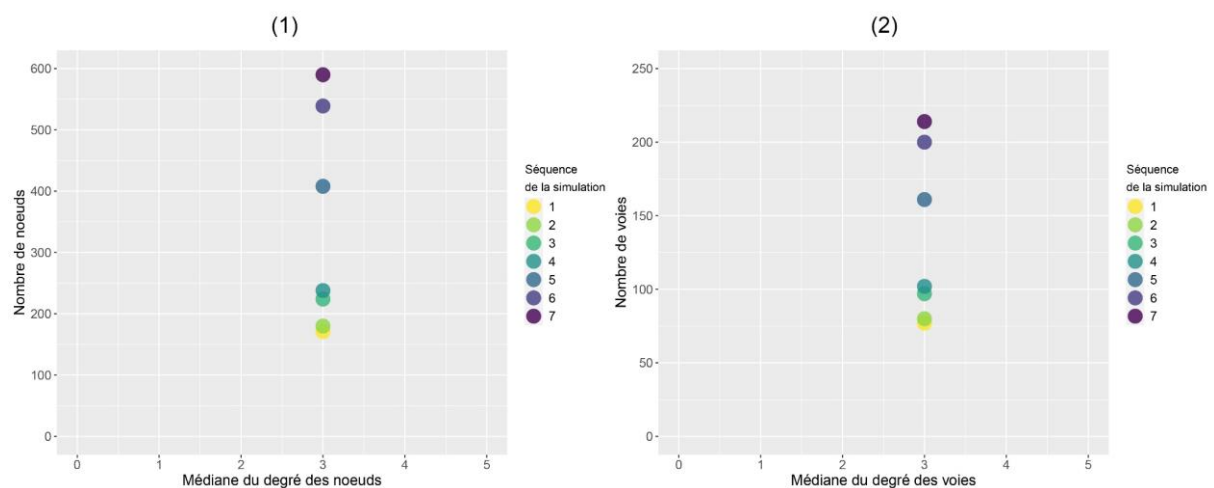


Figure 10.38. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.

- **Relations scalantes**

Des lois d'échelle peuvent être identifiées pour la coévolution des propriétés considérées du réseau simulé. Ces lois d'échelle portent sur la relation respective entre : (1) le nombre de nœuds et le nombre de voies, (2) la longueur totale du réseau et le nombre de voies, et (3) la longueur totale du réseau et le nombre de nœuds. L'ajustement de la relation entre les données correspond à un modèle de régression linéaire en échelle logarithmique (Figure 10.39).

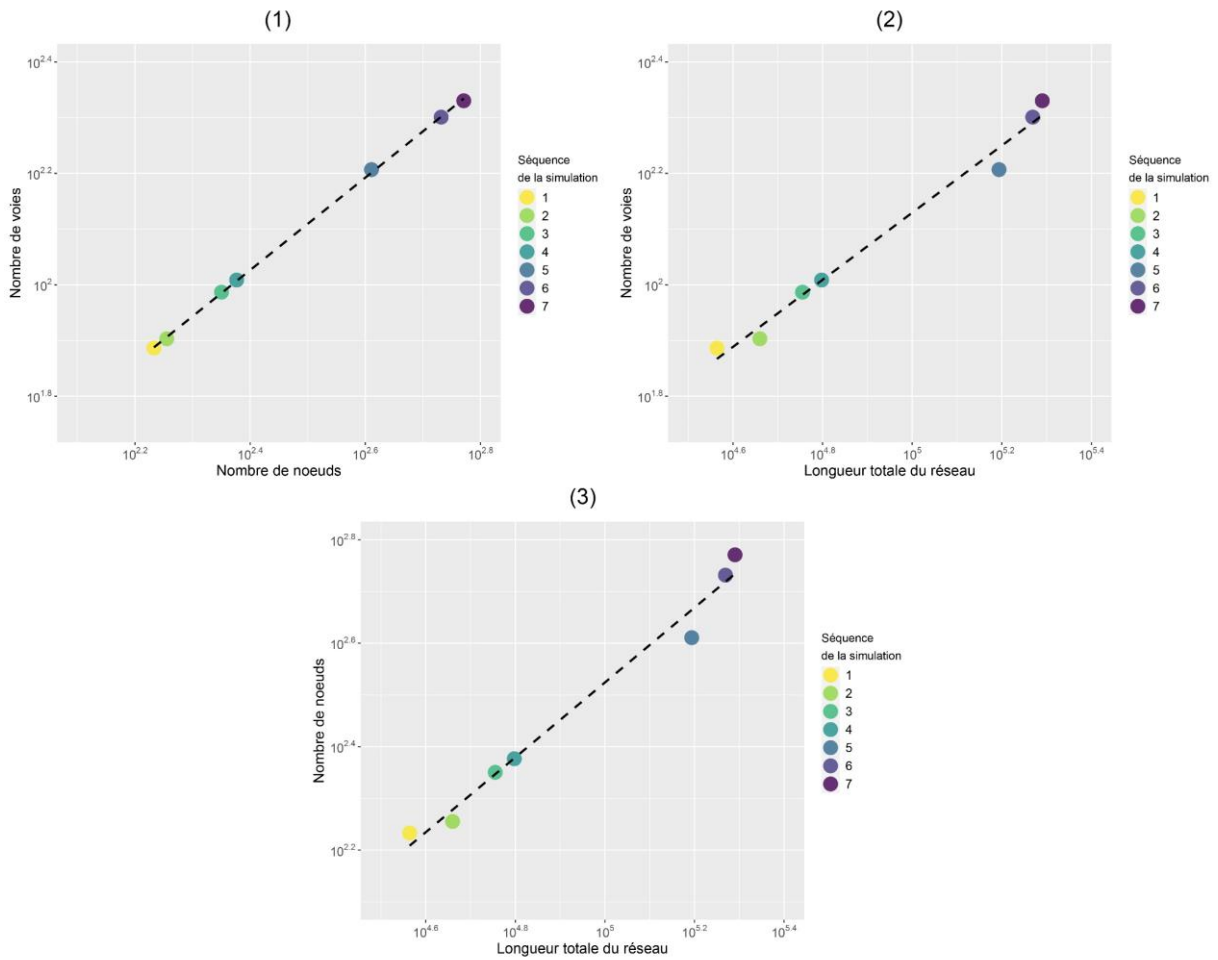


Figure 10.39. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale de l'hypergraphe du réseau viaire aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction du la nombre de nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (3) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale

10.2.3 Simulation d'une ville monocentrique axialisée

10.2.3.1 Paramétrage du scénario

Un scénario de simulation d'une forme de ville monocentrique axialisée est défini par quatre phases de simulation. La première phase de simulation implique la génération d'**axes d'évolution** par le prolongement de voies pour former des **voies radiales**. La deuxième phase consiste en une **densification** au niveau du centre. La troisième phase implique l'**expansion** du réseau en se connectant aux axes radiaux. La quatrième phase représente un renforcement de la monocentralité par une **expansion et une intensification autour du centre**. Ces quatre phases engendrent un développement du réseau autour d'un seul centre principal et le long des axes.

La **phase 1** inclut deux séquences pour la simulation de **voies radiales**. La **phase 2** comprend deux séquences correspondant aux morphotypes de **voies orthogonales/diagonales** et cellulaire. La **phase 3** inclut deux séquences relatives aux morphotypes de **voies intercalaires et ramifiées**. La **phase 4** se réfère à une unique séquence pour la simulation du morphotype de **voies cellulaires** (Tableau 10.12).

Pour la **phase 1**, les séquences 1 et 2 simulent des **voies radiales** à partir du réseau initial. Pour la séquence 1, la distance de répulsion est définie à $r_0 = 400$ et la longueur maximale est définie à $l_{\max} = 2000$, afin de permettre un premier prolongement des voies principales du réseau (avec un rattachement préférentiel selon le degré des voies $W_p = 1$). Pour la séquence 2, la distance de répulsion est définie à $r_0 = 1000$ et la longueur maximale est définie à $l_{\max} = 5000$, dans le but d'accentuer le caractère axial des voies radiales. Une simulation en deux séquences, en adaptant l'étendue du morphotype, permet d'introduire une légère sinuosité des voies radiales. Dans le cas contraire, si une seule séquence était appliquée, les voies radiales apparaîtraient inévitablement de manière linéaire.

Pour la **phase 2**, la séquence 3 simulent des voies **orthogonales/diagonales**, qui permettent une densification autour du centre. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 180$ et la longueur maximale est définie à $l_{\max} = 560$ pour ajuster la taille du morphotype. Ensuite la séquence 4 permet le morcellement des îlots de grande taille par des **voies cellulaires**. La distance de répulsion est définie à $r_0 = 110$ et la longueur maximale est définie à $l_{\max} = 440$ pour définir une étendue plus petite.

La **phase 3** simule l'expansion du réseau deux manières distinctes correspondant à deux étendues. La séquence 5 simule cette expansion par des **voies intercalaires** qui se rattachent aux voies radiales. Par ailleurs, la séquence 6 favorise une expansion du réseau autour du centre en simulant de **voies ramifiées** de petite taille, avec des valeurs de paramètres $r_0 = 150$ et $l_{max} = 600$.

Au cours de la **phase 4**, la séquence 7 permet une réticulation du réseau par une simulation de **voies cellulaires** pour assurer une meilleure connectivité, renforçant ainsi la centralité.

Pour l'ensemble des phases les autres paramètres sont maintenus à leur valeur calibrée pour la simulation de chaque morphotype respectif.

Phase	Phase 1 : Extension axiale		Phase 2 : Densification autour du centre		Phase 3 : Extension du réseau		Phase 4 : Réticulation du réseau
	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3	Séquence 4	Séquence 5	Séquence 6	Séquence 7
Morphotype de voie	Radiale	Radiale	Orthogonale	Cellulaire	Intercalaire	Ramifiée	Cellulaire
Nombre d'itération	5	5	50	30	4	30	30
W_p	1	1	1	0	1	0	0
E_{pp}	1	1	0	0	0	1	0
O_p	0	0	1	1	1	0	1
α	1	1	1	1	1	1	1
P_e	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ω	0	0	1	1	0	0	1
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
r_0	400	1000	180	110	800	150	150
k_{ext}	3	3	1	3	1	3	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
l_{max}	2000	5000	360	440	3200	600	600
A_i	80	80	60	60	60	60	60
A_s	60	60	60	60	60	60	60
c	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4

Tableau 10.12. Paramétrage pour la simulation d'une ville monocentrique axialisée.
Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.

10.2.3.2 Résultats de simulation et analyses morphologiques

La visualisation du réseau simulé aux différentes séquences est cohérente avec la formalisation des différentes phases d'évolution prédéfinies (Figure 10.40). Le réseau d'initialisation (Figure 10.40 - (0)), et les réseaux issus de chaque séquence de la simulation (Figure 10.40 - (1) à (7)) sont analysés à partir des indicateurs caractérisant leurs voies.

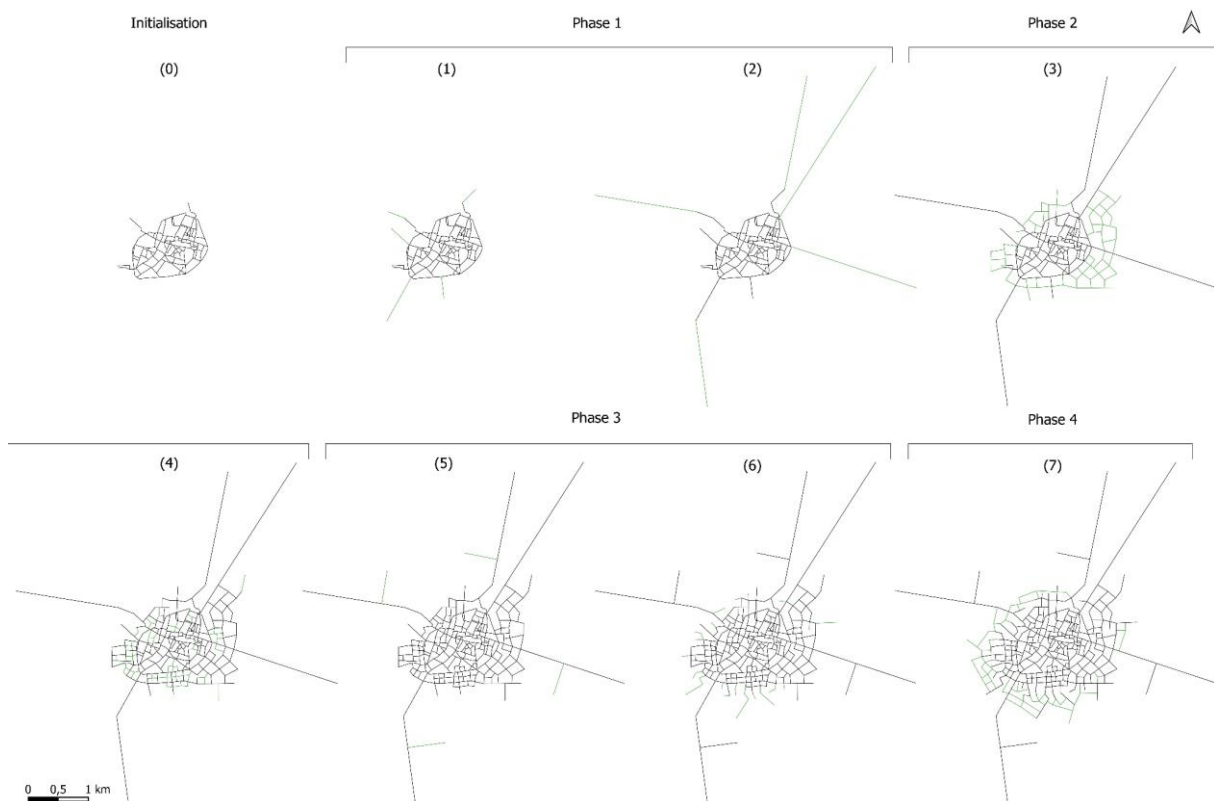


Figure 10.40. Simulation du réseau viaire d'une ville monocentrique axialisée. Les segments générés lors de chaque séquence sont représentés en vert.

Degré

En ce qui concerne l'indicateur de degré, les voies les plus connectées, caractérisées par les valeurs les plus élevées, préservent leur hiérarchie dans le réseau tout au long de la simulation. Ces voies correspondent à la voie contournant le centre et aux deux voies principales, qui se croisent centralement, sur le réseau d'initialisation.

Les voies radiales, qui sont dans le prolongement des voies du centre, présentent des valeurs moyennes au cours de la simulation (représentées en orange sur la figure 10.41 - (2), (3), (4), (5) et (6)). Les voies orthogonales situées dans la périphérie immédiate du centre présentent des valeurs élevées de degré. L'émergence de ces voies renforce la structure monocentrique

du réseau (représentées en rouge sur la figure 10.41 - (3), (4), (5) et (6)). À l'issue de la simulation, les voies radiales du réseau présentent également des valeurs élevées de degré, et sont mieux connectées à l'ensemble du réseau, renforçant ainsi la structure axialisée.

Espacement

L'espacement des voies met en évidence de manière distincte la structure compacte par rapport à la structure axiale du réseau à l'issue des différentes séquences de la simulation.

Les voies avec les valeurs faibles et moyennes d'espacement sont principalement celles au niveau du centre et du péricentre (représentées en bleu, vert et jaune sur la figure 10.42), ce qui implique une forte densité du réseau. Ces voies assurent une accessibilité locale pour faciliter les déplacements piétons au sein du centre. En revanche, les voies radiales se distinguent par des valeurs très élevées d'espacement, traduisant une densité très faible à intermédiaire du réseau (représentées en rouge sur la figure 10.42).

Orthogonalité

À l'issue des séquences de la phase 2 de la simulation, l'orthogonalité des voies révèle les valeurs les plus élevées pour les voies orthogonales/diagonales et cellulaires au niveau du péricentre (représentées en rouge sur la figure 10.43 - (3) et (4)).

Les voies intercalaires générés au cours de la phase 3 de la simulation, ainsi que les voies cellulaires issues de la phase 4 de la simulation, présentent également des valeurs d'orthogonalité très élevées (représentées en rouge sur la figure 10.43 - (5), (6) et (7)).

Le réseau final est caractérisé par une structure orthogonale uniquement à une échelle locale. Les voies les plus structurantes du réseau ne sont pas orthogonales.

Centralité de proximité

Au cours de la simulation, les voies caractérisées par des valeurs de centralité de proximité élevées correspondent principalement aux voies structurantes du réseau d'initialisation (représentées en rouge sur la figure 10.44). Ces voies sont reliées à l'ensemble du réseau via des chemins topologiques simples, assurant un accès facile, et renforçant ainsi la structure monocentrique. Les voies radiales présentent des valeurs moyennes à faibles (représentées en orange et en jaune sur la figure 10.44).

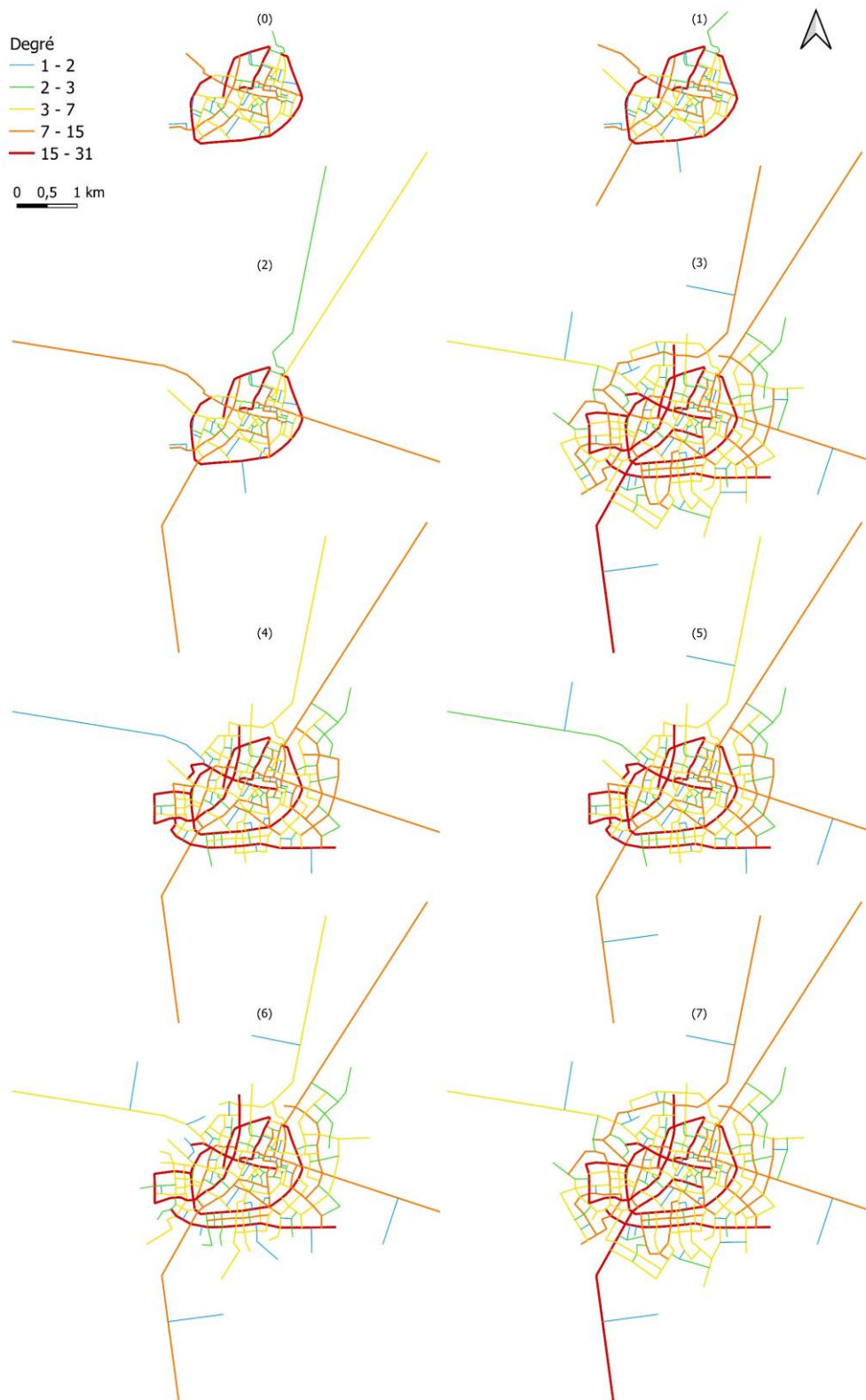


Figure 10.41. Degré des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

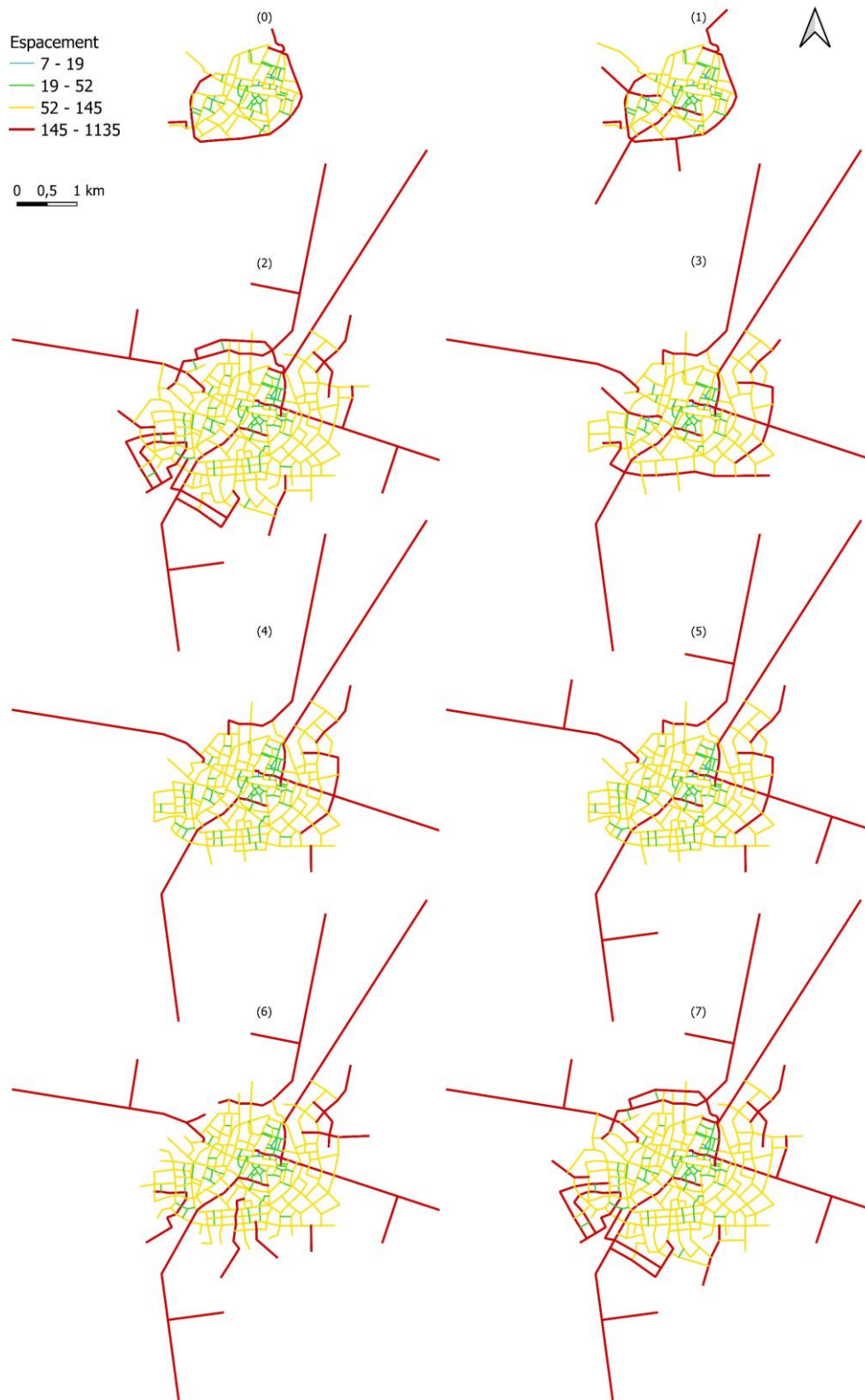


Figure 10.42. Espacement des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

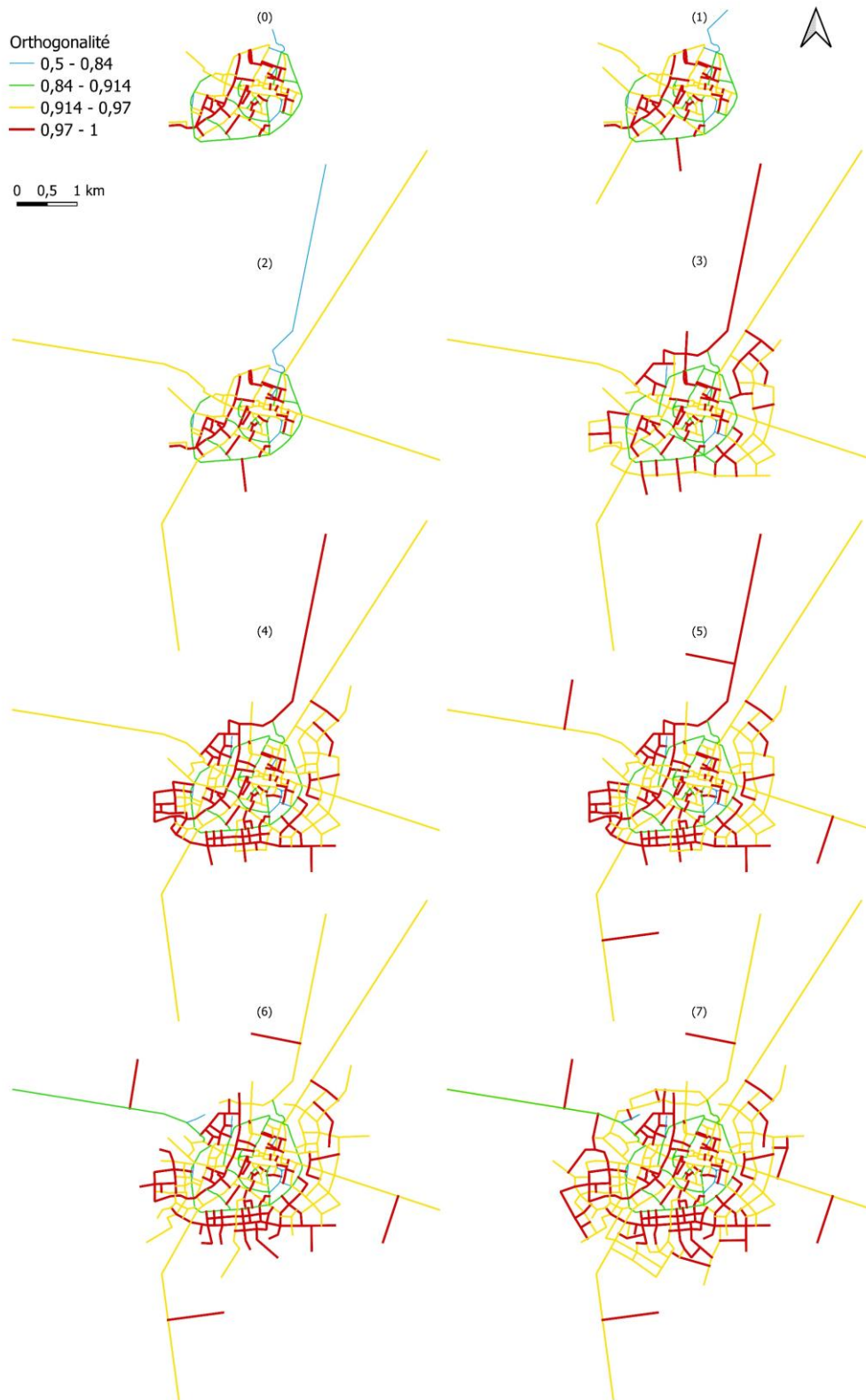


Figure 10.43. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

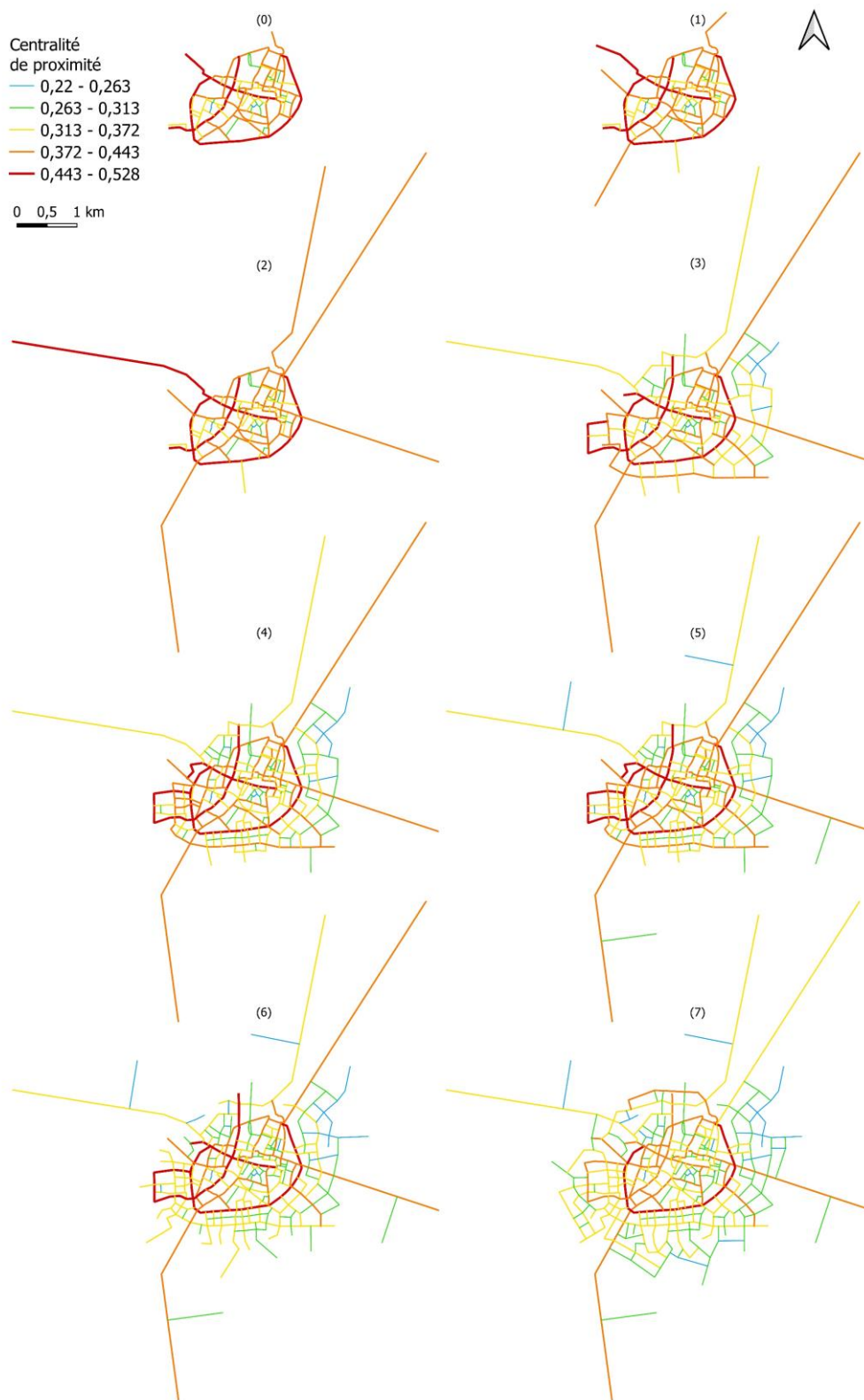


Figure 10.44. Centralité de proximité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

Centralité d'intermédiarité

Pour le réseau résultant des premières séquences de simulation, les voies avec les valeurs les plus élevées de centralité d'intermédiarité correspondent à la voie contournant le centre historique (Figure 10.45 - (1) et (2)). Les voies radiales, les mieux connectées à cette voie, présentent également des valeurs importantes de centralité de proximité (représentées en orange sur la figure 10.45 - (2) et (3)).

À mesure que le réseau se densifie autour du centre au cours des dernières séquences, la centralité d'intermédiarité des voies orthogonales/diagonales ainsi que celle des voies radiales se renforce (Figure 10.45 - (4), (5), (6), et (7)), puisqu'elles sont sur les chemins les plus courts entre les voies intercalaires, cellulaires et ramifiées.

Ces résultats confirment que la structure axialisée influence la centralité topologique du réseau.

Degré de desserte

Les valeurs les plus élevées de degré de desserte correspondent à la voie contournant le centre historique (en rouge sur la figure 10.46 - (2) et (3)). Au cours de la simulation, le degré de desserte se renforce pour des voies au niveau de la périphérie immédiate du centre (en rouge sur la figure 10.46 - (4), (5), (6) et (7)). En revanche, les valeurs pour les voies radiales varient entre différentes séquences de simulation.

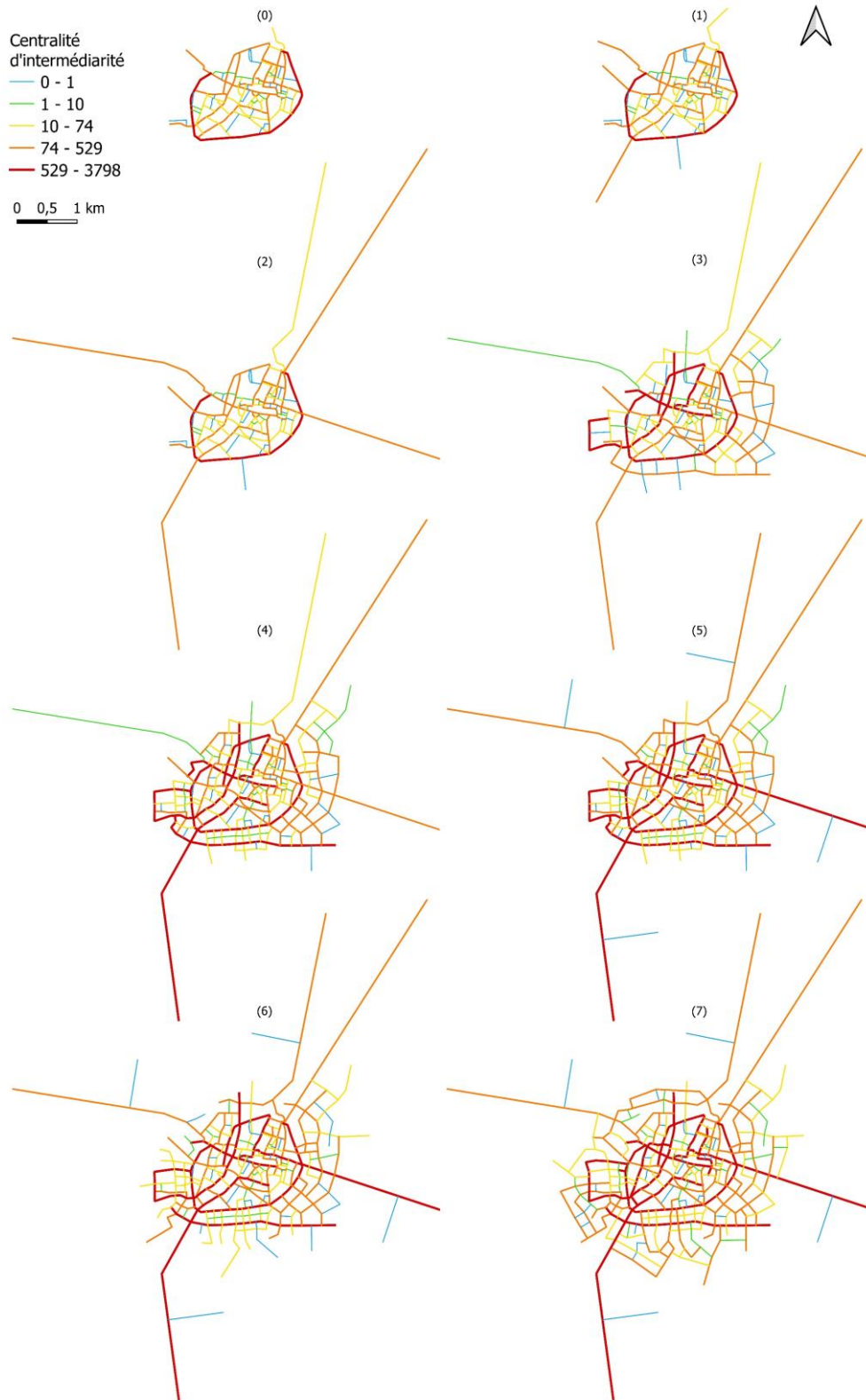


Figure 10.45. Centralité d'intermédiarité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

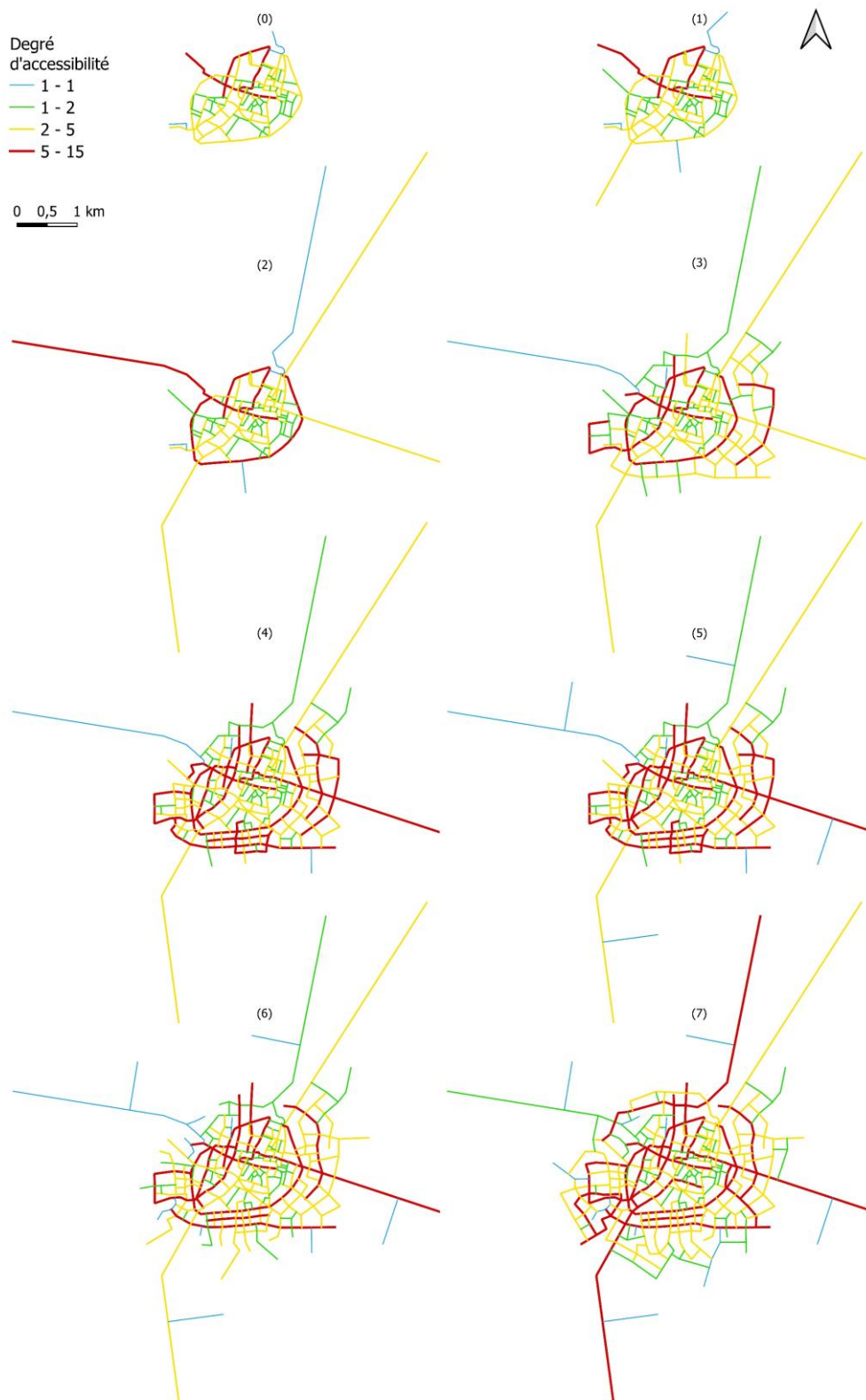


Figure 10.46. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.

10.2.3.3 Etude des propriétés structurelles

Dans cette section, les propriétés structurelles du réseau simulé sont étudiées et comparées à celles identifiées pour les réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4). Nous suivons ici la même démarche de présentation de résultats que celle adoptée pour le scénario précédent (d'une ville monocentrique compacte).

À l'échelle des nœuds et des voies

- **Degré des nœuds**

Les valeurs du degré des nœuds présentent une forme de distribution similaire pour le réseau à l'issue des différentes séquences de simulation (Figure 10.48). Le réseau est particulièrement caractérisé par une prédominance de nœuds ayant un degré $k=3$ par rapport au nœuds de degré $k=1$ (Figure 10.48). Cette propriété est constante tout au long de son évolution, et révèle la présence de motifs maillés marqués par des croisements en forme de T (Figure 10.47). Cette observation est conforme à la conceptualisation du scénario.

- **Degré des voies**

Les des valeurs du degré des voies présentent une forme de distribution similaire pour le réseau à l'issue des différentes séquences de simulation (Figure 10.49). En échelle logarithmique, cette distribution (en longue queue sur une échelle normale (voir Annexe 35)), suggère une loi de puissance. Cette caractéristique est une propriété de "petit-monde" identifiée pour des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 4).

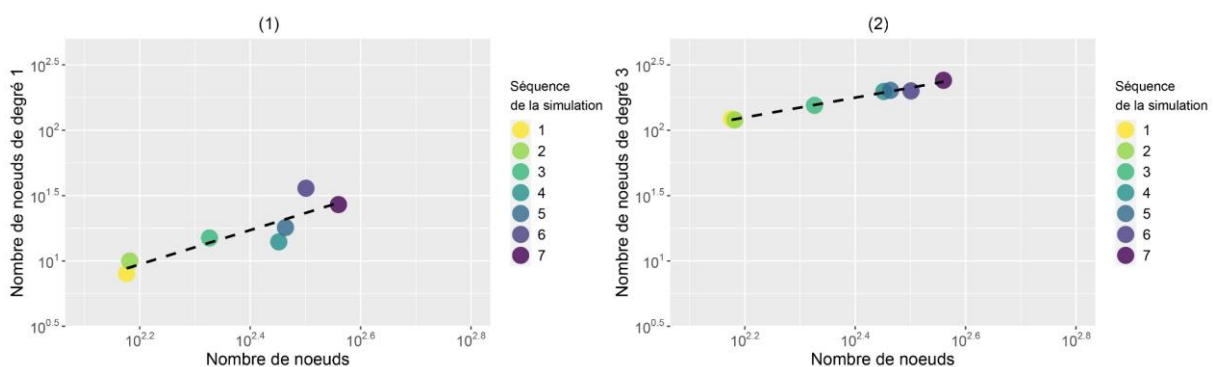


Figure 10.47. Nuages de points représentant l'évolution du nombre des nœuds de degré (1) $k=1$ et (2) $k=3$, par rapport au nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique axialisé.

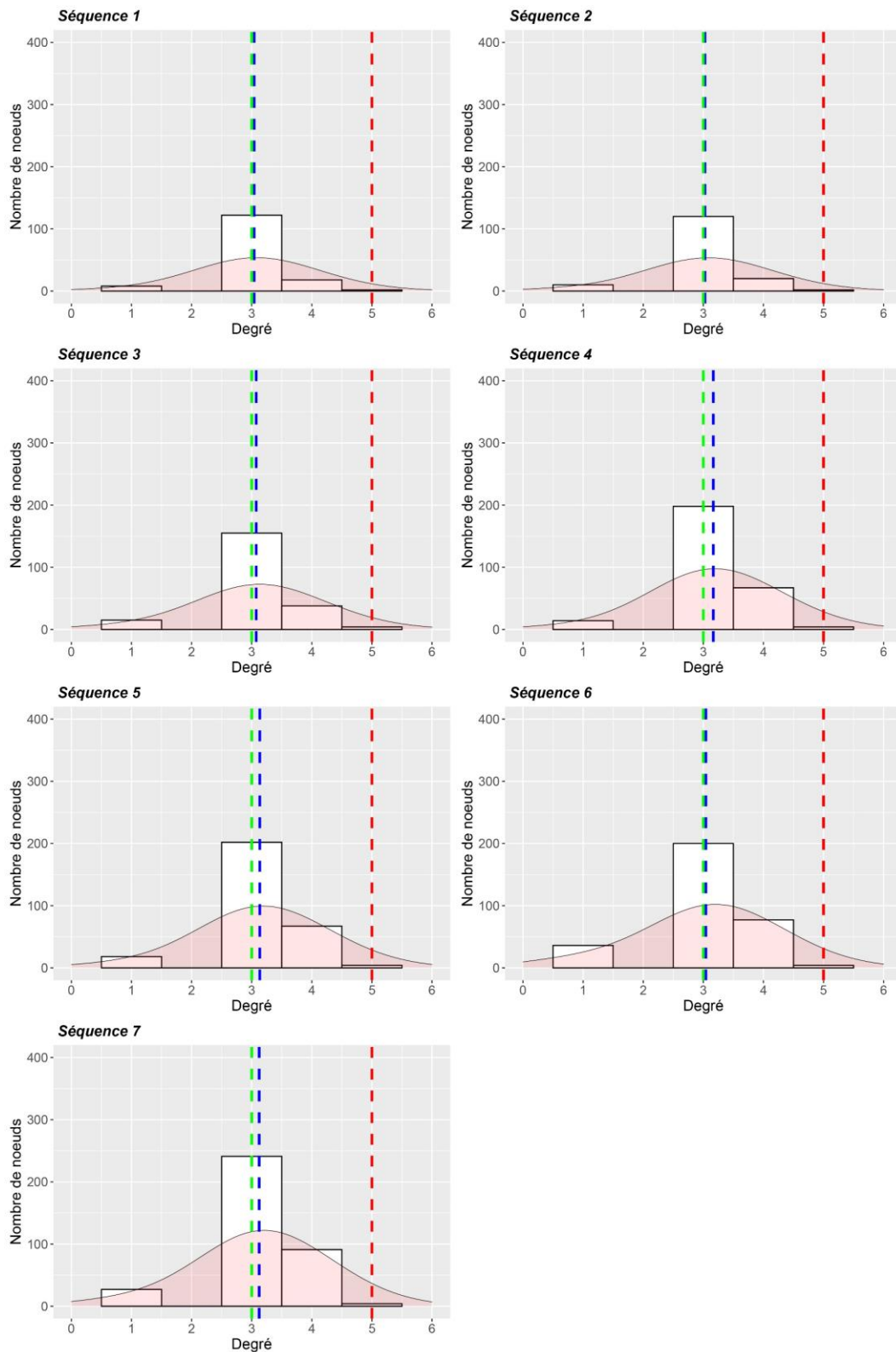


Figure 10.48. (1) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (2) nombre de nœuds de degré $k=3$, par rapport nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. La droite (en trait discontinu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

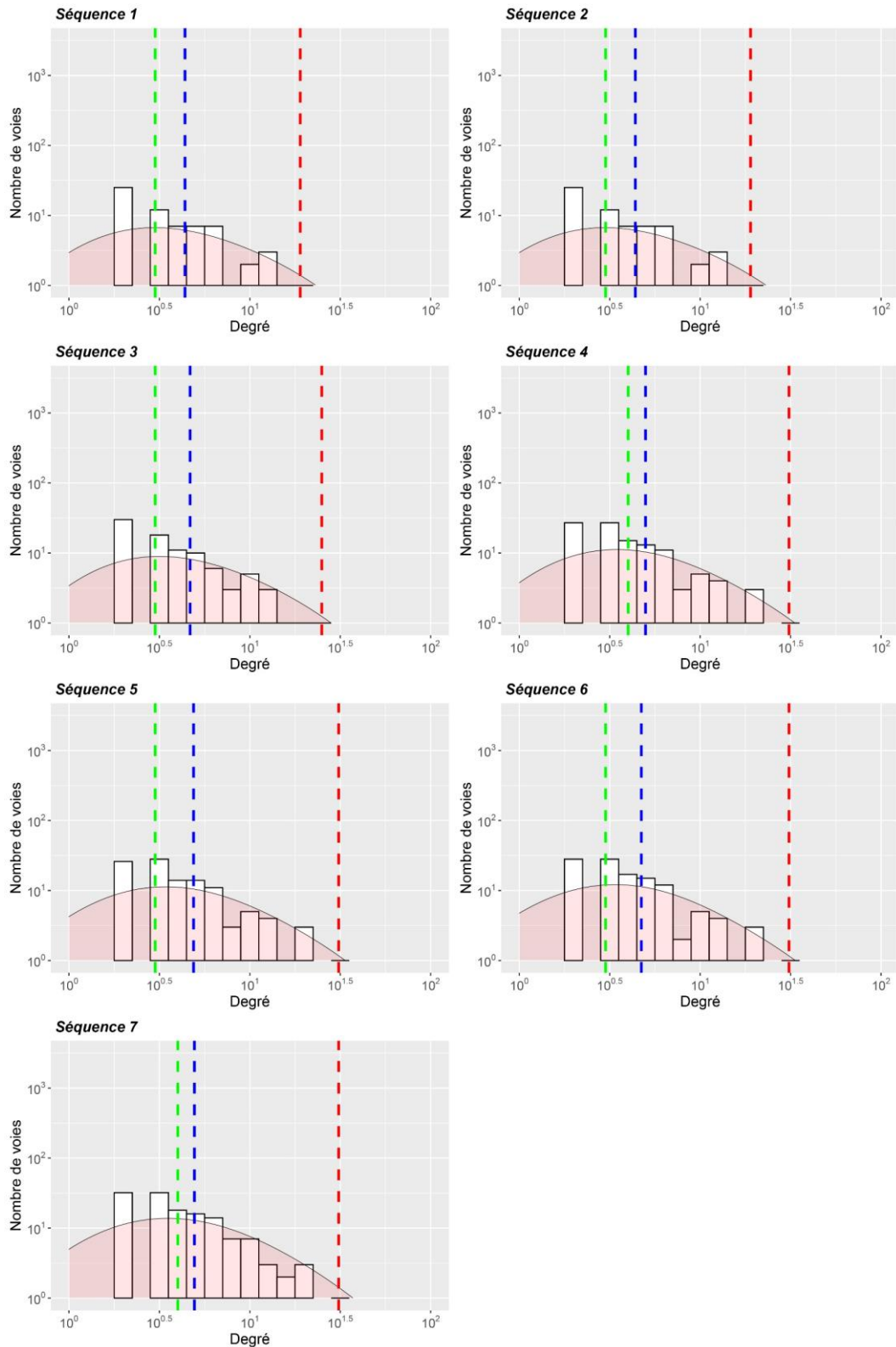


Figure 10.49. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

- **Longueur des voies**

Pour toutes les séquences, le réseau simulé présente une distribution des valeurs de la longueur des voies avec des caractéristiques similaires aux réseaux réels. Nous observons une distribution (en échelle logarithmique) qui suggère une loi log-Normale (Figure 10.50). Cette caractéristique correspond à une propriété d'invariance d'échelle qui a été identifiée pour les réseaux réels.

- **Espacement des voies**

Cette invariance d'échelle est également observée pour l'espacement des voies du réseau simulé, présentant une forme distribution similaire (Figure 10.51). Sur une l'échelle logarithmique, cette distribution suggère également une loi log-Normale.

À l'échelle des graphes viaires

- **Valeurs médianes**

La valeur médiane du degré des nœuds reste constante pour les réseaux issus des différentes séquences de la simulation, avec une valeur égale à 3 (Figure 10.52 – (1)). Tandis que la valeur médiane du degré des voies révèle une certaine variation. Pour la plupart des séquences, elle est égale à 3, sauf pour les réseaux associés aux séquences 4 et 7 (Figure 10.52 – (2)). Ces deux séquences permettent de simuler respectivement des voies cellulaires qui renforce la connectivité du réseau, ce qui explique une valeur médiane plus élevée du degré des voies.

- **Relations scalantes**

Des lois d'échelle peuvent être identifiées pour les propriétés de l'hypergraphe du réseau résultant des différentes séquences de la simulation. Ces lois d'échelle concernent les relations deux à deux entre (1) le nombre de nœuds et le nombre de voies, (2) la longueur totale du réseau et le nombre de voies, et (3) la longueur totale du réseau et le nombre de nœuds. L'ajustement de la relation entre les données correspond à un modèle de régression linéaire en échelle logarithmique (L'ajustement de la relation entre les données correspond à un modèle de régression linéaire en échelle logarithmique (Figure 10.53).

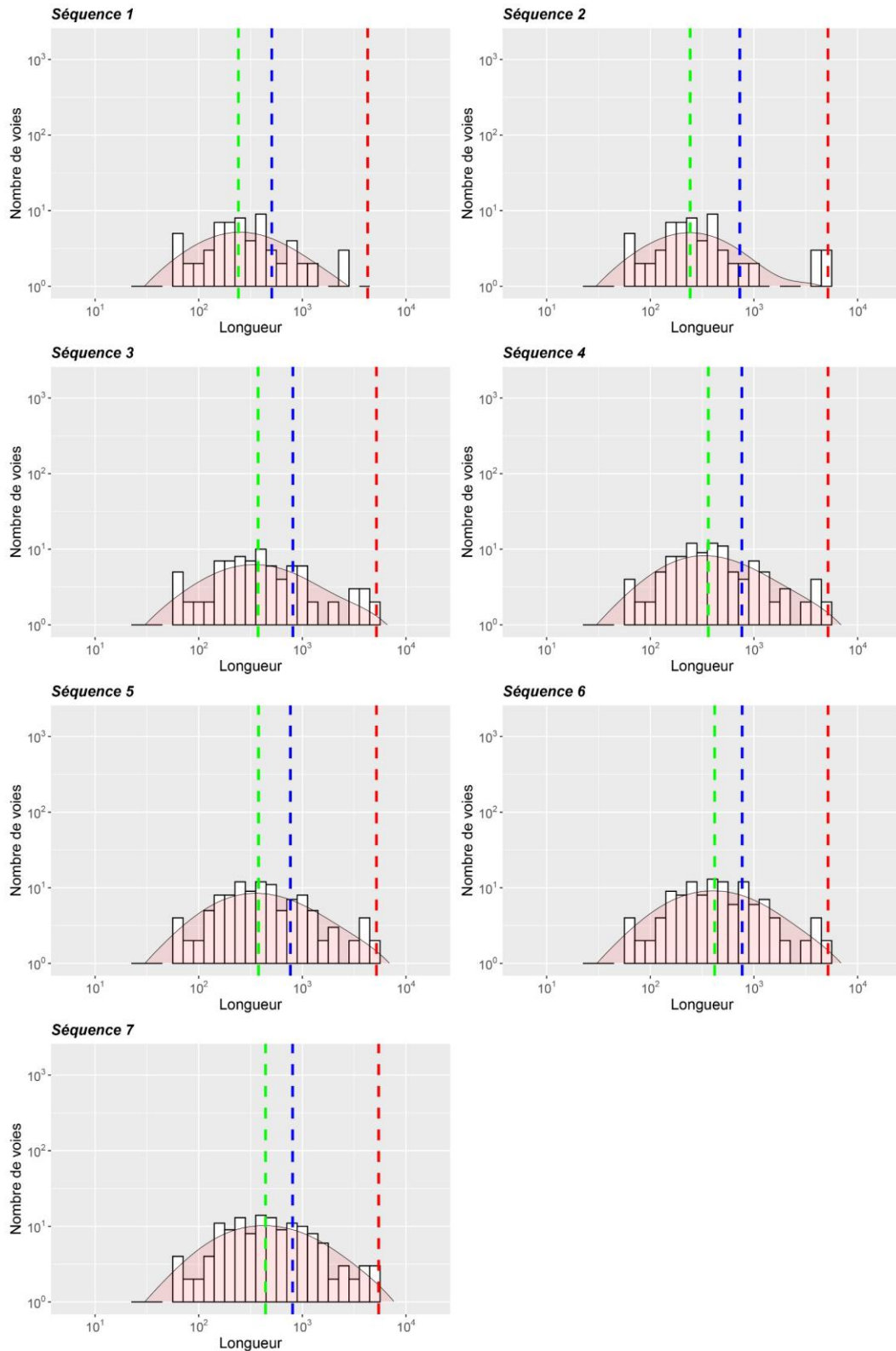


Figure 10.50. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

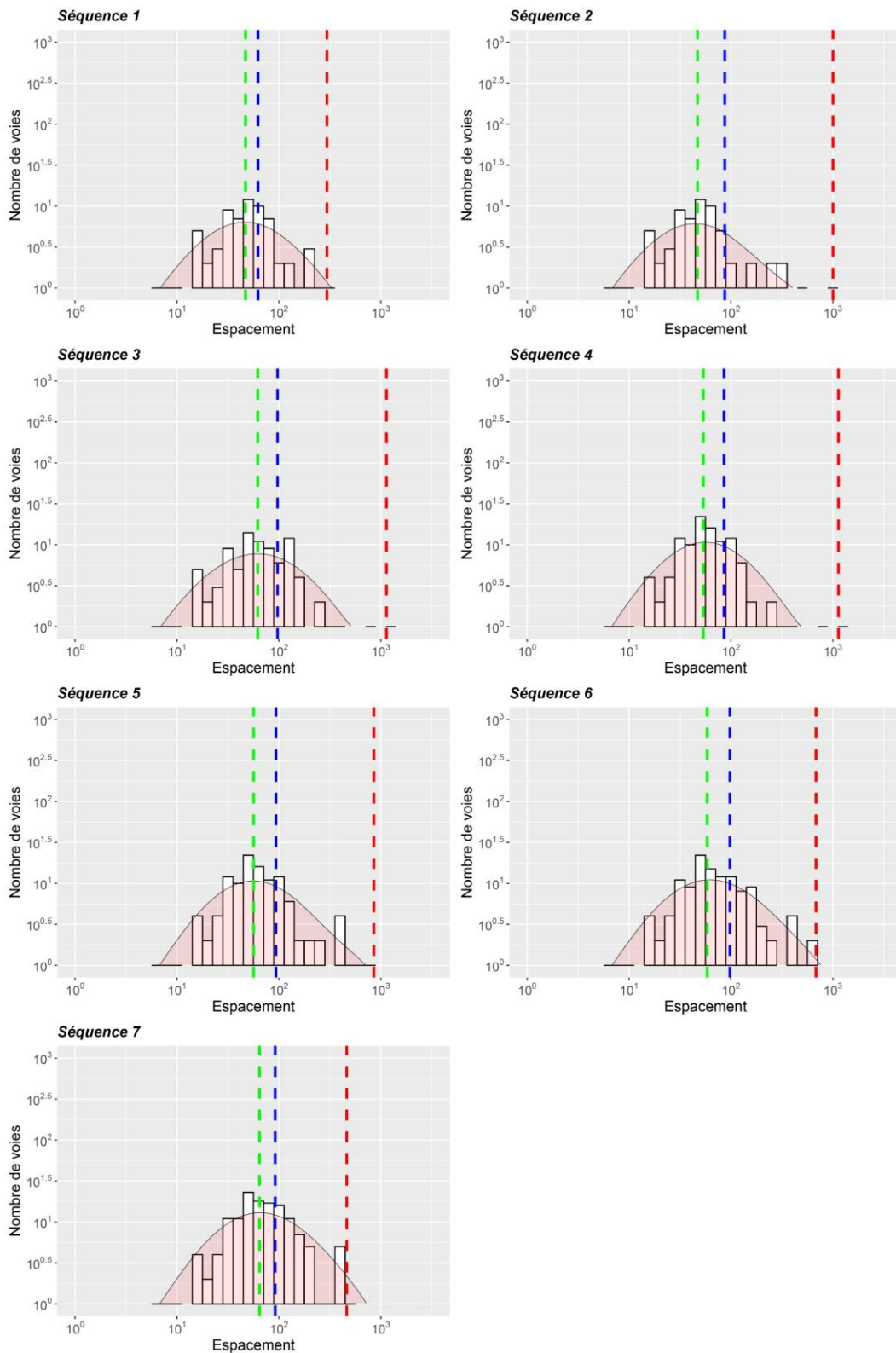


Figure 10.51. Histogrammes de la distribution de l'espace des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

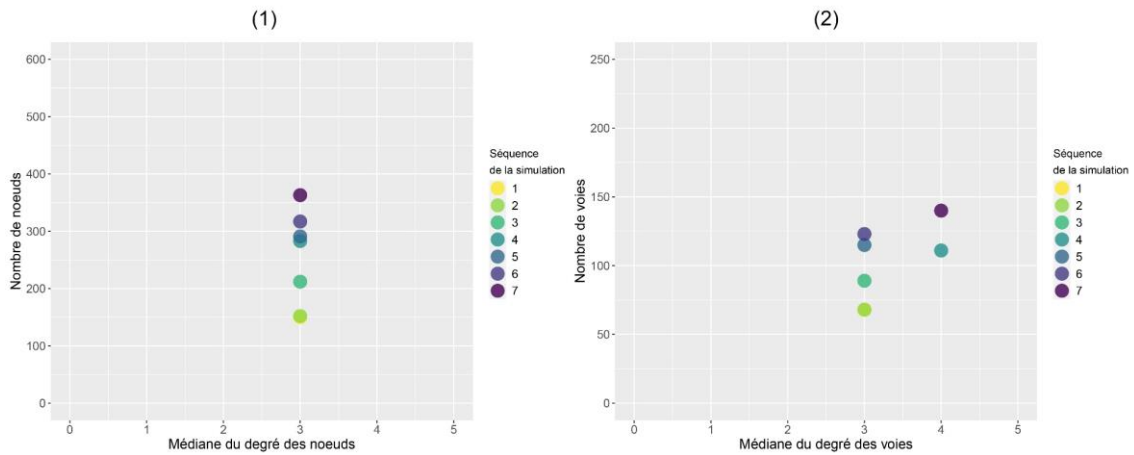


Figure 10.52. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.

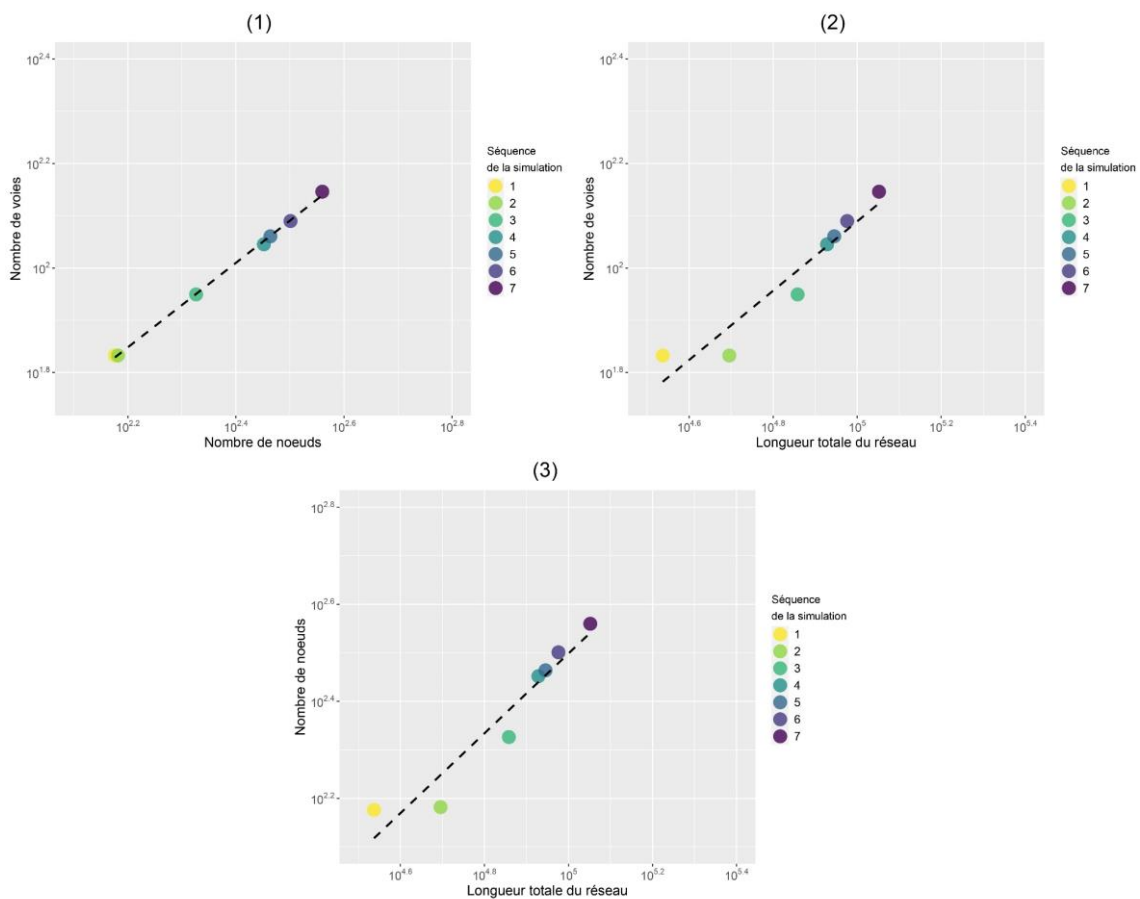


Figure 10.53. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale de l'hypergraphe du réseau viaire aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction de la la nombre de nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (3) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale.

10.3 Synthèse du chapitre 10

Dans ce chapitre, les simulations de différents types de réseaux ont porté sur des formes de villes simples et d'autres plus complexes. La simulation de formes de villes simples porte sur l'émergence et l'évolution d'un réseau viaire correspondant à une typo-morphologie de ville prédéfinie. La simulation de formes de villes plus complexes porte sur différentes phases d'évolution d'un réseau viaire réel selon deux scénarios distincts : monocentrique compacte et monocentrique axialisé.

Pour chaque scénario de simulation, le nombre d'itérations varie pour chaque séquence et/ou phase de la simulation. Ce nombre peut être adapté selon l'objectif de simulation pour chaque séquence, en respectant les contraintes relatives à la simulation de certains morphotypes de voies (voir sous-section 9.2.2). Une définition adéquate des séquences est essentielle pour obtenir les résultats souhaités. Pour chaque séquence, correspondant à un morphotype donné, les valeurs des paramètres sont maintenues aux valeurs présentées précédemment pour le calibrage du modèle (voir sous-section 9.2.2). Seules la distance de répulsion r_0 et la longueur maximale l_{max} sont ajustées. Le choix des valeurs de ces deux paramètres dépend de la taille souhaitée des morphotypes et des îlots.

Les analyses morphologiques des réseaux simulés affirment la cohérence des résultats à l'échelle des voies, à partir des indicateurs considérés pour l'analyse des réseaux réels (cf. partie 1, chapitre 2). L'étude des propriétés structurelles des réseaux simulés, par le modèle WayMorph, révèlent des résultats cohérents à l'échelle des voies et à l'échelle du graphe viaire. Ces propriétés sont similaires à celles identifiées précédemment pour les réseaux viaires réels étudiés (cf. partie 1, chapitre 4).

Les résultats des scénarios de simulation valident davantage la capacité du modèle WayMorph à reproduire les morphotypes de voies à différentes échelles spatiales. Plus particulièrement, ces résultats mettent en évidence la capacité du modèle à simuler : (1) différentes formes de villes, (2) différentes phases d'évolution du réseau, et (3) des réseaux avec des propriétés structurelles similaires à celles identifiées pour des réseaux réels.

Conclusion de la partie 3

Dans cette troisième partie, nous avons proposé un nouveau modèle de morphogénèse de réseaux viaires, que nous avons nommé "*WayMorph*". La conception de ce modèle a été fondée sur (1) un aperçu des modèles existants pour identifier les manques à combler et les possibilités d'amélioration et de développement, (2) une étude approfondie du modèle de Courtat (2012) comme socle de réflexion et de développement, et (3) la formalisation, sous la forme de règles morphologiques et topologiques simples, de mécanismes génératifs qui se rapportent aux processus d'évolution et aux patrons de formation/rattachement mis en évidence dans les parties 1 et 2 de la thèse.

Le modèle *WayMorph* a fait objet d'une évaluation, d'un calibrage et d'une validation empirique. (1) L'évaluation du modèle au moyen de l'analyse de stabilité a démontré qu'il est relativement stable à l'échelle du graphe viaire, et moins stable à l'échelle des voies. Ces résultats sont en accord avec les objectifs de la conception du modèle, qui visent à simuler une variété de réseaux viaires de manière manuelle et délibérée, intégrant des disparités locales tout en exhibant des propriétés globales communes. L'évaluation au moyen de l'analyse de sensibilité a permis (i) de déterminer l'amplitude de variation et les intervalles de confiance des valeurs des paramètres, et (ii) de vérifier les effets de la variation des valeurs de paramètres sont cohérents par rapport aux hypothèses de leur formalisation. (2) Les résultats du calibrage et de la validation empirique du modèle ont permis (i) de déterminer les valeurs ou l'amplitude des paramètres pour la simulation de chaque morphotype de voies (cf. partie 2, chapitre 6), et (ii) de valider sa capacité à simuler les différents morphotypes à partir de différents initiateurs. Toutefois, deux morphotypes représentent des résultats de simulation peu satisfaisants.

Le modèle a ensuite permis de simuler différents types de réseaux viaires en considérant deux catégories de scénarios : (1) des formes de villes simples à partir d'une typo-morphologie "statique", et (2) des formes de villes plus complexes en partant d'une typo-morphologie associée aux processus évolutifs. Les résultats de simulation valident que le modèle est capable de reproduire, en plus des différentes formes de villes, des propriétés structurelles similaires à celles des réseaux viaires réels étudiés (cf. partie 1, chapitre 4).

La conception du modèle s'est basée la décomposition du réseau viaire en divers morphotypes, dont la simulation est possible en appliquant des règles locales simples. Dans une approche inverse, la simulation séquentielle des morphotypes de voie a permis de

construire par simulation des réseaux viaires de différentes formes. Ainsi, nous pouvons affirmer notre troisième hypothèse de recherche, il est donc possible de reproduire, par simulation, des processus d'évolution de réseaux viaires à partir de règles morphologiques et topologiques simples.

Conclusion générale

Ce travail de recherche contribue à la compréhension et la caractérisation de la structuration progressive de la trame territoriale à une échelle urbaine, à travers l'analyse de l'évolution de son réseau viaire au cours du temps. Les analyses morpho-historiques ont été menées sur trois cas d'étude, Dijon, Besançon et Pontarlier du 17^{ème} au 21^{ème} siècle. Choisir ces cas d'étude a eu un double intérêt pour cette recherche. D'une part, cela nous a permis de mener les analyses sur des villes avec des caractéristiques différentes, en termes de population, de contextes géographiques locaux et de structures urbaines. D'autre part, ce choix a permis d'illustrer que la méthode d'analyse morphologique et morpho-historique est applicable à plusieurs contextes et structures afin de répondre à des questions de recherche qui englobent à la fois des dimensions spatiales et temporelles. En outre, les conclusions tirées de l'analyse de ces trois cas d'étude ont conduit à la conception d'un modèle de simulation de morphogénèse, permettant de simuler l'émergence et l'évolution de réseaux viaires, à partir de différentes situations initiales.

Discussion

Une approche interdisciplinaire

Cette recherche a été menée dans le cadre d'une approche interdisciplinaire : nous avons construit et mobilisé des données géohistoriques pour une analyse morpho-historique de réseaux viaires, en intégrant des concepts et des méthodologies issus de la géographie urbaine, de l'urbanisme et de la physique statistique. Ce travail de recherche offre ainsi un aperçu global des travaux et des connaissances sur l'analyse, la modélisation et la simulation de réseaux viaires, qui constituent autant de champs de recherche prenant racines en géographie, en physique et en informatique. Les connaissances issues du domaine de l'urbanisme ont, elles, été mobilisées pour asseoir la réflexion et interpréter certains résultats obtenus.

Apports empiriques

Les analyses menées dans cette recherche ont concerné les réseaux viaires anciens et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier. Deux apports empiriques majeurs ressortent des résultats des analyses. Le premier est l'identification de propriétés structurelles des réseaux viaires invariantes dans l'espace et le temps. Les résultats apportent des preuves empiriques de ces propriétés à l'échelle de l'hypergraphe viaire, et leur interprétation nous renseigne sur les mécanismes simples sous-jacents à l'évolution morphologique des réseaux

viaires au cours du temps. Les protocoles d'analyses proposés peuvent être appliqués à d'autres cas d'études pour explorer s'il s'agit de propriétés universelles de réseaux viaires. Le deuxième apport empirique consiste en l'identification de huit morphotypes de voies qui composent le réseau viaire. Ces morphotypes sont identifiables sur les différents réseaux étudiés soit, à toutes les dates soit, à certaines dates seulement notamment dans le cas de morphotypes qui ne deviennent discernables qu'à des stades avancés de l'évolution du réseau (par exemple, les voies concentriques n'apparaissent qu'après la destruction des remparts d'une ville donnée).

Apports méthodologiques

Le premier apport méthodologique de la thèse concerne la création des données géohistoriques. Pour ce faire, de nombreuses cartes historiques ont été consultées, triées, numérisées et traitées, pour constituer le corpus spatio-temporel sur les terrains d'étude de ce travail. La vectorisation des réseaux anciens, des trois villes étudiées aux différentes dates, a été réalisée sur la base des réseaux actuels en adoptant une méthode qui a permis l'appariement des données dans le temps. Cela revêt un grand intérêt pour les analyses morpho-historiques, tout en présentant un potentiel d'application étendu à d'autres domaines (étude des tissus bâtis, des parcellaires...).

Le deuxième apport méthodologique concerne le suivi de l'évolution morphologique des voies des réseaux viaires dans le temps. En effet, si les données géohistoriques correspondent aux segments de rues constituant le réseau viaire, la caractérisation topologique et géométrique est, elle, menée à l'échelle des voies composant l'hypergraphe viaire. Le calcul d'indicateurs à partir de l'hypergraphe viaire s'est avéré particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des réseaux géohistoriques, dont l'emprise spatiale peut varier notablement selon la couverture spatiale de la carte historique utilisée.

Nous avons ainsi validé l'intérêt de la représentation des réseaux par un hypergraphe en considérant l'objet "voie" proposée par Lagesse (2015). Par ailleurs, la différence d'entités élémentaires considérées entre les données (segments de rues) et les analyses morphologiques (voies) a nécessité de définir un protocole d'appariement des résultats des indicateurs calculés sur les voies, afin d'être en mesure de mener des analyses diachroniques. Les résultats de cette recherche démontrent que l'approche diachronique appliquée permet une lecture fine de la morphogenèse des villes étudiées, en identifiant les permanences et les changements à l'échelle des voies. Par ailleurs, cette approche peut être transposable à tout territoire, dès lors que les données viaires sont disponibles

Le troisième apport méthodologique est d'avoir conçu un modèle de simulation de la morphogénèse des réseaux viaires à partir de la combinaison d'une approche/analyse géohistorique, d'une approche/analyse typo-morphologique et d'une approche de modélisation. Le suivi de l'évolution morphologique de réseaux viaires a été possible à l'échelle des voies, grâce à l'appariement des résultats des indicateurs. Le suivi des indicateurs, topologiques et géométriques d'ordre local, a permis d'identifier des morphotypes de voies et de les associer aux processus d'évolution du réseau et aux patrons de formation/rattachement des nouvelles voies aux voies existantes. Ceci a constitué une base solide et originale pour la conception des mécanismes génératifs du modèle proposé pour la simulation de morphogénèse de réseaux viaires (WayMorph).

Apports théoriques

Les résultats de notre recherche ont permis d'investiguer comment et en quoi les réseaux viaires, composés d'entités simples qui évoluent en interaction, produisent un comportement émergent, collectif et complexe. Dans ce sens, le modèle de morphogénèse WayMorph est conçu avec un nombre réduit de mécanismes et de paramètres. Le décryptage des patrons simples de formation et de rattachement des nouvelles voies aux voies préexistantes a permis d'aboutir à la simulation de réseaux de différentes forme simples et complexes.

Perspectives

Les études théoriques et empiriques autour de la ville cherchent à mieux comprendre l'organisation et le fonctionnement des villes tandis que l'objectif pour les acteurs urbains et les praticiens est de mieux les aménager et les gérer. Comment lier ces études théoriques et empiriques pluridisciplinaires sur les villes (en physique, en mathématique, en géographie, notamment) et certains domaines principalement pratiques comme l'architecture, l'urbanisme ou la gestion territoriale représente un vrai défi. A la suite de ce travail de recherche, nous souhaitons explorer des perspectives qui émergent des possibilités d'application des résultats obtenus, tout en considérant de nouvelles questions de recherche.

Perspectives liées au modèle

Deux perspectives de recherche se dessinent concernant le modèle de morphogénèse de réseaux viaires WayMorph. La première concerne les scénarios de simulation. Dans le cadre de cette recherche, nous avons délibérément choisi de nous concentrer sur la simulation des formes de villes simples et d'autres plus complexes, ces choix étant motivés par les questions de recherche spécifiques que nous cherchions à aborder dans le cadre de notre thèse. Par

ailleurs, les scénarios de simulation de formes de villes plus complexes peuvent être appliqués à partir des réseaux réels des trois villes étudiées, à différentes dates. En outre, le modèle WayMorph offre une flexibilité considérable pour explorer et définir différents scénarios d'évolution. Il ne se limite pas aux seuls scénarios que nous avons examinés. Il serait donc intéressant de concevoir des scénarios d'évolution qui tiennent compte de différents objectifs ou même des scénarios prospectifs à long terme. La deuxième perspective envisageable consiste à utiliser le modèle comme un outil génératif et la méthodologie d'analyse de réseau associée comme un outil d'aide à la décision dans le cadre de projets d'aménagement urbain. À une échelle locale, cela impliquerait de simuler la création d'un réseau viaire sur un terrain vacant en tenant compte de critères spécifiques pour ajuster les paramètres du modèle. Ces critères pourraient inclure des éléments tels que la taille des îlots, la connectivité, et la géométrie du réseau. Ensuite, l'analyse des réseaux viaires simulés permettra d'apprécier ou de critiquer des conceptions spécifiques, en lien avec les caractéristiques particulières du réseau. À l'échelle de la ville, cela ouvrirait la possibilité d'intégrer une approche de recherche expérimentale, afin de proposer des projets urbains d'extension ou de modification du réseau viaire. On pourrait ainsi évaluer l'impact des changements sur l'amélioration de l'accès au centre-ville, ou sur la décongestion de certaines zones problématiques. En utilisant le modèle de manière proactive et itérative, les planificateurs urbains pourraient explorer divers projets alternatifs de conception et évaluer leur impact potentiel sur la connectivité et l'accessibilité du réseau.

Perspectives thématiques

En termes de perspectives et d'élargissements thématiques, trois perspectives se dégagent. La première concerne le **lien entre la forme et la fonction du réseau viaire**, en particulier les modes déplacement. Les interactions entre l'évolution des modes de transport et de déplacement et l'urbanisation sont bien connues à l'échelle des systèmes de villes (Bretagnolle, 1999, 2003; Pumain, 2006)⁶² mais elles le sont beaucoup moins à l'échelle intra-urbaine. Il serait d'un grand intérêt d'expliquer les transformations des réseaux viaires urbains

⁶² « Même si l'accroissement historique de la vitesse des communications n'a pas été linéaire, ni homogène, il est monotone, c'est-à-dire qu'il va toujours dans le même sens. Ses effets fortement concentrateurs sur la structure du peuplement ont été maintes fois démontrés. A partir d'un semis de villages séparés par des distances faibles, définies par le rayon d'action des techniques les plus élémentaires, la sélection des villes, points de concentration du peuplement, s'est effectuée en fonction de, la vitesse du déplacement, à pied, à cheval, en diligence, en chemin de fer, en voiture, en avion ou en TGV. Par court-circuitage des petits centres, la concentration relative de la population dans les plus grands centres augmente, et la hiérarchie du peuplement est simplifiée par le bas : ce sont d'abord les plus petits villages qui disparaissent, les plus gros résistent mieux, et puis les petites villes, dont on a montré qu'elles avaient relativement diminué d'importance, tout en gagnant un peu de population, mais en s'accroissant bien moins vite que les grandes » (Pumain, 2006).

en lien avec celles des modes de déplacement utilisés (Aguilera & Mignot, 2010; Pouyanne, 2004), elles-mêmes liées aux changements d'activités des individus et de leurs localisations (Martouzet et al., 2012). Les lieux d'habitations, de travail et la localisation des activités sont déterminants dans l'utilisation du réseau viaire : l'occupation du sol est un vecteur de déplacement et la géométrie du réseau y est liée (Stransky, 1995). Selon l'organisation de la structure du réseau, certains cheminements sont favorisés au détriment d'autres. Ainsi, la forme du réseau avant l'avènement de la voiture était optimisée pour des déplacements à faible distance, exprimant des organisations et des logiques de vie différentes de celles de la période actuelle. Celles-ci se sont transformées au cours du temps avec l'avancée technologique de l'ère industrielle. L'analyse de l'impact des transformations des modes de déplacement sur la forme des réseaux viaires aidera à comprendre les dynamiques associées. Les effets culturels intervenants dans le choix d'un mode de déplacement devront aussi être pris en considération. Par exemple à Téhéran, la voiture est le mode de déplacement principal et des autoroutes quadrillent la ville ; à l'inverse, certains villages grecs n'ont pas su ou pu adapter leur réseau au passage de l'âne à la voiture ; les voies haussmanniennes, quant à elles, sont parfois interrompues par un escalier construit pour conserver leur linéarité, et à Orléans le tramway peine à passer sur le réseau ancien. Il est d'ores et déjà possible de formuler quelques hypothèses concernant le mode de déplacement dominant sur chaque morphotype de voies (identifiés dans le cadre de cette recherche) ainsi que le niveau de desserte associée. Par exemple, pour les voies concentriques, il peut être supposé que le mode de déplacement dominant soit principalement carrossable, assurant un niveau de desserte favorable à la circulation de transit. Pour les voies cellulaires ou intercalaires, il est possible de présumer que le mode de déplacement doux, tels que la marche ou le vélo, sont privilégiés, avec un niveau de desserte assurant principalement l'accès résidentiel, ou la promenade.

Une autre perspective de recherche est relative à la **classification de formes de villes** à partir de la forme et la structure de leur réseau viaire. Cet axe de recherche a déjà pris forme au sein de l'équipe de recherche Morphocity. Les premiers résultats concrets ont été obtenus dans le cadre d'un projet tutoré en Master 2 (Dubois & Meister, 2022), qui a été encadré conjointement par Claire Lagesse et Philippe Bonnin. Les résultats de ce projet sont une classification de formes de villes basée sur la caractérisation de leur réseaux viaires. Cette classification a été mobilisée pour élaborer des scénarios de simulation concernant les formes de villes dans le cadre de la thèse. Cette approche ouvre la voie à une réflexion stimulante sur la manière dont la forme de la ville, et intrinsèquement de son réseau viaire, peut être liée à des aspects culturels. L'idée sous-jacente est de comprendre comment le contexte historique

et géographique, les valeurs et la culture d'une société peuvent se manifester à travers la structure et l'apparence des villes. Par exemple, certaines cultures peuvent favoriser des modèles urbains compacts et densément peuplés en raison de préoccupations liées à la convivialité et à la proximité des interactions sociales, à l'image des anciennes médinas. D'autres peuvent opter pour des structures plus étalées, peut-être pour des raisons liées au contexte naturel, à des héritages historiques ou à des opérations de planification. L'architecture des bâtiments d'une ville donnée tout comme la forme de son réseau viaire sont à la fois une réponse actuelle à un contexte culturel et des modes de vie spécifiques, et un héritage de réponses à un contexte et des modes de vie passés. Ce processus de classification peut également être étendu pour explorer comment ces formes urbaines évoluent au fil du temps. Les influences culturelles ne sont pas statiques, et les changements dans la société peuvent se refléter dans les modifications de la structure urbaine. Ainsi, cette perspective de recherche offre une opportunité fascinante de comprendre comment les villes se transforment en réponse à des évolutions culturelles et sociales.

Enfin, une dernière perspective de recherche concerne la **relation entre la forme du réseau viaire et les ségrégations socio-spatiales**. Dans une ville, l'un des objectifs essentiels est de permettre la réactivité et l'interaction fluides entre les individus et les organisations avec toutes les composantes de l'environnement urbain. Pour qu'une ville puisse promouvoir cela, il est impératif que la ville occupe de manière optimale son espace. Cela signifie que la ville doit disposer de réseaux efficaces et bien optimisés qui couvrent l'ensemble de son territoire. En effet, ces interactions essentielles commencent généralement par les déplacements de la population au sein de la ville. Toutefois, la forme urbaine peut favoriser la ségrégation en créant des barrières physiques entre les quartiers riches et les quartiers défavorisés, limitant ainsi l'accès des populations à des ressources importantes (Mignot et al., 2013), plus particulièrement dans le contexte des métropoles (Fusco & Scarella, 2011). À l'inverse, une planification urbaine plus inclusive peut favoriser la mixité sociale et l'accessibilité équitable à tous les habitants. Du point de vue de la topologie, il existe des différences quantitatives notables dans les réseaux viaires dans certaines zones urbaines, qui vont au-delà des différences qualitatives liées à l'aménagement ou au revêtement des routes, par exemple. Ces différences topologiques, qui concernent principalement la connectivité, signifient qu'il y a probablement de très grandes différences dans la façon dont les personnes qui vivent dans certaines zones urbaines interagissent avec le reste de la ville par rapport aux personnes qui peuvent vivre dans d'autres quartiers. Ainsi l'analyse des réseaux viaires pourrait révéler la corrélation entre leur attributs structurels et l'accessibilité et le niveau socio-économique de

ces différentes zones. Ces recherches peuvent susciter un vif intérêt pour la planification urbaine et la gestion des transports.

Ouverture

La recherche exposée dans cette thèse puise son intérêt dans un contexte global et dans les diverses perspectives qui en découlent. En effet, la croissance urbaine, combinée à la croissance globale de la population, devrait entraîner une concentration des populations dans les zones urbaines. Même dans les pays développés où la population nationale diminue, de nombreuses villes densément peuplées continuent de s'étendre en raison de l'attrait qu'elles présentent pour les personnes en quête de meilleures opportunités d'emploi et de soins de santé. Cette croissance à venir rendra encore plus complexe la compréhension, la planification et la conception des structures urbaines existantes.

Mieux comprendre la structuration et les transformations morphologiques aidera les différents acteurs de la planification territoriale à imaginer le réseau viaire du futur. Si les conclusions de cette recherche contribuent à combler le manque empirique lié à l'évolution du réseau viaire de trois villes, l'analyse et la simulation de la morphogénèse peuvent être applicables à tout territoire pour lequel les données viaires sont disponibles. Cela pourra contribuer à enrichir les connaissances théoriques et empiriques sur ce sujet. Une telle analyse et un tel modèle sont donc très prometteurs et utiles pour l'aide à la décision visant à aménager les villes et les territoires de demain.

Bibliographie

Abrams, C., & Kolodny, R. (1971). *The Language of Cities : A Glossary of Terms*. The Viking Press, Inc.

Adolphson, M. (2009). Estimating a Polycentric Urban Structure. Case Study : Urban Changes in the Stockholm Region 1991–2004. *Journal of Urban Planning and Development*, 135(1), 19-30. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2009\)135:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2009)135:1(19))

Aguilera, A., & Mignot, D. (2010). *Formes urbaines et mobilité domicile-travail, des liens discutés*. In : *Mobilités et modes de vie métropolitains. Les intelligences du quotidien* (p. 7p). L'OEIL D'OR. <https://hal.science/hal-00904245>

Al Sayed, K. (2013). The signature of self-organisation in cities. Temporal patterns of clustering and growth in street networks. *Revue internationale de géomatique*, 23, 379-406. <https://doi.org/10.3166/rig.23.227-253>

Al Sayed, K., Hanna, S., & Penn, A. (2022). Urban growth : Modelling street network growth in Manhattan (1642–2008) and Barcelona (1260–2008). *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.949441>

Al Sayed, K., & Penn, A. (2016). On the nature of urban dependencies : How Manhattan and Barcelona reinforced a natural organisation despite planning intentionality. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(6), 975-996. <https://doi.org/10.1177/0265813516650200>

Al Sayed, K., & Penn, A. (2017). Translating Analytical Descriptions of Cities into Planning and Simulation Models. In John. S. Gero (Éd.), *Design Computing and Cognition '16* (p. 537-554). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44989-0_29

Al Sayed, K., Turner, A., & Hanna, S. (2009). Cities as emergent models : The morphological logic of Manhattan and Barcelona. In D. Koch, L. Marcus, & J. Steen (Éds.), *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*. Royal Institute of Technology (KTH).

Al Sayed, K., Turner, A., & Hanna, S. (2012). Generative structures in cities. *Proceedings of the 8th International Space Syntax Symposium*, 1-18.

Al Sayed, K., Turner, P. A., & Hanna, S. (2010). Modelling the spatial morphogenesis in cities : The dynamics of spatial change in Manhattan. In H. J. P. Timmermans & B. de Vries (Éds.), *10th International Conference on Design & Decision Support Systems*. <http://2010.ddss.nl/>

Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47-97. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>

Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine*. Armand Colin.

Altaweel, M., Hanson, J., & Squitieri, A. (2021). The structure, centrality, and scale of urban street networks : Cases from Pre-Industrial Afro-Eurasia. *PLOS ONE*, 16(11), e0259680. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259680>

Altman, D. (1993). Expertise, legitimacy and the centrality of community. *AIDS: facing the second decade*, 1-2.

Amblard, F. (2003). *Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées : Application à des modèles de dynamiques d'opinions* [Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II]. <https://theses.hal.science/tel-00326863>

Andersson, C., Hellervik, A., Lindgren, K., Hagson, A., & Tornberg, J. (2003). The urban economy as a scale-free network. *Physical Review E*, 68(3), 036124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.036124>

Araldi, A. (2019). *Retail distribution and urban form : Street-based models for the French Riviera* [Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02467816>

Araldi, A., & Fusco, G. (2019). From the street to the metropolitan region : Pedestrian perspective in urban fabric analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(7), 1243-1263. <https://doi.org/10.1177/2399808319832612>

Axelrod, R. (1997). The Complexity of Cooperation : Agent-Based Models of Competition and Collaboration. In *The Complexity of Cooperation*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400822300>

Azimzadeh, M., & Klarquist, B. (2001). Metamorphosis and evolution of cities : The status of planning and urban design. *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium.(51.1-51.15) Atlanta: Georgia Institute of Technology*.

Badariotti, D., Banos, A., & Moreno, D. (2007). Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : Le modèle Remus. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 403. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.10993>

- Badeche, H. (2014). *L'espace public entre conception et usage : Cas des jardins publics de Biskra*. [Thèse de doctorat]. Université Mohamed Khider Biskra.
- Badhrudeen, M., Derrible, S., Verma, T., Kermanshah, A., & Furno, A. (2022). A Geometric Classification of World Urban Road Networks. *Urban Science*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/urbansci6010011>
- Banos, A. (2016). *Modéliser c'est apprendre. Itinéraire d'un géographe*. Editions Matériologiques.
- Barabási, A.-L. (2013). Network science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1987), 20120375. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0375>
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- Baro, J. (2015). *Modélisation multi-échelles de la morphologie urbaine à partir de données carroyées de population et de bâti* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01263031>
- Barros, J. (2012). Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach. In A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, & M. Batty (Éds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems* (p. 571-589). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4_28
- 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). Time Evolution of Road Networks. In M. Chraïbi, M. Boltes, A. Schadschneider, & A. Seyfried (Éds.), *Traffic and Granular Flow '13* (p. 317-337). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10629-8_38
- Barthelemy, M. (2018). *Morphogenesis of Spatial Networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20565-6>
- Barthelemy, M., Bordin, P., Berestycki, H., & Griboaudi, M. (2013). Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific Reports*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/srep02153>

- Barthélemy, M., & Flammini, A. (2006). Optimal traffic networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(07), L07002. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2006/07/L07002>
- Barthélemy, M., & Flammini, A. (2008). Modeling Urban Street Patterns. *Physical Review Letters*, 100(13), Article 13. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.138702>
- Barthélemy, M., & Flammini, A. (2009). Co-evolution of Density and Topology in a Simple Model of City Formation. *Networks and Spatial Economics*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9068-5>
- Batty, M. (2004). *A new theory of space syntax* [CASA Working Papers]. Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL).
- Batty, M. (2010). Complexity in City Systems : Understanding, Evolution, and Design. In *A Planner's Encounter with Complexity*. Routledge.
- Batty, M. (2013). *The New Science of Cities*. MIT Press.
- Baumont, C., Beguin, H., & Huriot, J.-M. (1996). *Définir la ville* [Rapport de recherche]. Laboratoire d'analyse et de techniques économiques(LATEC). <https://hal.science/hal-01527276>
- Bavelas, A. (1948). A mathematical model for group structures. *Human organization*, 7(3), 16-30.
- Bavelas, A. (1951). *An experimental approach to organizational communication*. American Management Association.
- Beauquier, D., Berstel, J., & Chrétienne, P. (2005). *Eléments d'algorithmique*. Masson, Version.
- Beirão, J., Mendes, G., Duarte, J. P., & Stouffs, R. (2010). Implementing a generative urban design model. *eCAADe 2010 Conference: Future Cities*, 265.
- Bejan, A., & Ledezma, G. A. (1998). Streets tree networks and urban growth : Optimal geometry for quickest access between a finite-size volume and one point. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 255(1), 211-217. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(98\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(98)00085-5)
- Bell, M. G. H., & Lida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis* (1^{re} éd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118903032>

- Béra, R., & Claramunt, C. (2004). Can Relative Adjacency Contribute to Space Syntax in the Search for a Structural Logic of the City? In M. J. Egenhofer, C. Freksa, & H. J. Miller (Éds.), *Geographic Information Science* (p. 38-50). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30231-5_3
- Bettencourt, L. (2013). The Origins of Scaling in Cities. *Science*, *340*(6139), 1438-1441. <https://doi.org/10.1126/science.1235823>
- Bettencourt, L. (2020). Urban growth and the emergent statistics of cities. *Science Advances*, *6*(34), eaat8812. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8812>
- Bettencourt, L. (2021). Complex networks and fundamental urban processes. *Handbook of cities and networks*, 41-70.
- Bettencourt, L., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(17), 7301-7306. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610172104>
- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, *467*(7318), 912-913. <https://doi.org/10.1038/467912a>
- Black, W. R. (1971). An Iterative Model for Generating Transportation Networks*. *Geographical Analysis*, *3*(3), 283-288. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1971.tb00370.x>
- 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), 67. <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>
- Bonacich, P. (1972). Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. *Journal of mathematical sociology*, *2*(1), 113-120.
- Bonacich, P. (1987). Power and centrality : A family of measures. *American journal of sociology*, *92*(5), 1170-1182.
- Bonacich, P. (1991). Simultaneous group and individual centralities. *Social networks*, *13*(2), 155-168.

Bonin, O. (2016). Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques : Comment utiliser la carte de Cassini comme source de données ? *Flux*, N° 105(3), 5-17.

Bonnin, P., & Douady, S. (2013). Analyse et modélisation de la morphogenèse du réseau des rues. *Les réseaux dans le temps et dans l'espace. Presented at the ctes de la deuxième journée d'étude du groupe fmr, Paris*, 47-73.

Bordin, P. (2010). L'intégration du temps dans les sig. *XYZ*,(122). <https://www.aftopo.org/wp-content/uploads/articles/pdf/article412208.pdf>

Borrego, C., Martins, H., Tchepel, O., Salmim, L., Monteiro, A., & Miranda, A. I. (2006). How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 461-467. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.07.009>

Bottinelli, A., Louf, R., & Gherardi, M. (2017). Balancing building and maintenance costs in growing transport networks. *Physical Review E*, 96(3), 032316. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.032316>

Bottinelli, A., van Wilgenburg, E., Sumpter, D. J. T., & Latty, T. (2015). Local cost minimization in ant transport networks : From small-scale data to large-scale trade-offs. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(112), 20150780. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0780>

Bouttier, J., Di Francesco, P., & Guitter, E. (2003). Geodesic distance in planar graphs. *Nuclear Physics B*, 663(3), 535-567. [https://doi.org/10.1016/S0550-3213\(03\)00355-9](https://doi.org/10.1016/S0550-3213(03)00355-9)

Brede, M. (2010a). Coordinated and uncoordinated optimization of networks. *Physical Review E*, 81(6), 066104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.81.066104>

Brede, M. (2010b). Optimal synchronization in space. *Physical Review E*, 81(2), 025202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.81.025202>

Bretagnolle, A. (1999). *Espace-temps et système de villes : Effets de l'augmentation de la vitesse de circulation sur l'espacement et l'étalement des villes. Université Paris I [PhD Thesis].* thèse de doctorat.

Bretagnolle, A. (2003). Vitesse des transports et sélection hiérarchique entre les villes françaises. Pumain D, Mattéi MF. *Anthropos, Données Urbaines*, 4, 309-323.

Bretagnolle, A., & Delisle, F. (2010). Formes de villes en Europe et aux Etats-Unis. *Mappemonde*.

- Brunet, R. (1986). La carte-modèle et les chorèmes. *Mappemonde*, 4(4), 2-6. <https://doi.org/10.3406/mappe.1986.2334>
- 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 - Condensed Matter and Complex Systems*, 49(4), 513-522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>
- Burgess, E. W., McKenzie, R. D., & Wirth, L. (1925). *The city*. University of Chicago Press.
- Cajot, S., Schüler, N., Peter, M., Koch, A., & Maréchal, F. (2017). Interactive optimization for the planning of urban systems. *Energy Procedia*, 122, 445-450. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.383>
- Çalışkan, O. (2017). Parametric Design in Urbanism : A Critical Reflection. *Planning Practice & Research*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02697459.2017.1378862>
- Cancho, R. F. i., & Solé, R. V. (2003). Optimization in Complex Networks. In R. Pastor-Satorras, M. Rubi, & A. Diaz-Guilera (Éds.), *Statistical Mechanics of Complex Networks* (p. 114-126). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44943-0_7
- Caniggia, G. (1963). *Lettura di una città : Como*.
- Caniggia, G., & Maffei, G. L. (1979). *Composizione architettonica e tipologia edilizia*. Marsilio Venezia.
- Capitaine, M., Lardon, S., Ber, F. L., & Metzger, J.-L. (2001). *Chorèmes et graphes pour modéliser les interactions entre organisation spatiale et fonctionnement des exploitations agricoles*. 15 p. <https://inria.hal.science/inria-00100487>
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., & Porta, S. (2006). Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E*, 73(6), Article 6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.066107>
- Cariboni, J., Gatelli, D., Liska, R., & Saltelli, A. (2007). The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling*, 203(1), 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.045>
- Carvalho, R., & Penn, A. (2004). Scaling and universality in the micro-structure of urban space. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 332, 539-547. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.10.024>

Casali, Y., & Heinimann, H. R. (2019). A topological analysis of growth in the Zurich road network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.01.010>

Castex, J., & Panerai, P. (1970). Notes sur la structure de l'espace urbain. *L'Architecture d'aujourd'hui*, 153, 30-33.

Chan, S. H. Y., Donner, R. V., & Lämmer, S. (2011). Urban road networks—Spatial networks with universal geometric features? *The European Physical Journal B*, 84(4), 563-577. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2011-10889-3>

Chartrand, G., Kubicki, G., & Schultz, M. (1998). Graph similarity and distance in graphs. *Aequationes Mathematicae*, 55(1), 129-145. <https://doi.org/10.1007/s000100050025>

Chérel, G., Cottineau, C., & Reuillon, R. (2015). Beyond Corroboration : Strengthening Model Validation by Looking for Unexpected Patterns. *PLOS ONE*, 10(9), e0138212. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138212>

Choay, F. (1994). Penser la non-ville et la non-campagne de demain. *La France au-delà du siècle. La Tour d'Aigues: Éditions de l'Aube*.

Chouquer, G. (1995). Aux origines antiques et médiévales des parcellaires. *Histoire & Sociétés Rurales*, 4(1), 11-46. <https://doi.org/10.3406/hsr.1995.1164>

Cirunay, M. T., & Batac, R. C. (2023). Evolution of the periphery of a self-organized road network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 128629. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128629>

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

Colomb, M., Tannier, C., Perret, J., Chapron, P., & Brasebin, M. (2022). Parcel Manager : A parcel reshaping model incorporating design rules of residential development. *Transactions in GIS*, 26(6), 2558-2597. <https://doi.org/10.1111/tgis.12970>

Conzen, M. R. G. (1960). Alnwick, Northumberland : A Study in Town-Plan Analysis. *Transactions and Papers (Institute of British Geographers)*, 27, iii-122. <https://doi.org/10.2307/621094>

Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about Urban Form : Papers on Urban Morphology, 1932-1998*. Peter Lang.

- Costes, B. (2016). *Vers la construction d'un référentiel géographique ancien : Un modèle de graphe agrégé pour intégrer, qualifier et analyser des réseaux géohistoriques* [Thèse de doctorat]. Paris Est.
- Courtat, T. (2012). *Walk on City Maps—Mathematical and Physical phenomenology of the City, a Geometrical approach* [Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris VII]. <https://doi.org/10/document>
- Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011a). Hypergraphs and City Street Networks. *arXiv Preprint arXiv:1106.0297*. <https://arxiv.org/abs/1106.0297>
- Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011b). *Hypergraphs and City Street Networks* (arXiv:1106.0297). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1106.0297>
- Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011c). Mathematics and Morphogenesis of the City : A Geometrical Approach. *Physical Review E*, 83(3), 036106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.036106>
- Creswell, A., White, T., Dumoulin, V., Arulkumaran, K., Sengupta, B., & Bharath, A. A. (2018). Generative Adversarial Networks : An Overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(1), 53-65. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2765202>
- Crooks, A. T. (2010). Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(5), 661-675. <https://doi.org/10.1080/13658810903569572>
- Crosetto, M., Tarantola, S., & Saltelli, A. (2000). Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1), 71-79. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00169-9)
- Crowther, D., & Echenique, M. (1972). Development of a model of urban spatial structure. *Urban space and structures*, 175-218.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality in networks of urban streets. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*, 16(1), 015113.
- Cura, R., Dumenieu, B., Abadie, N., Costes, B., Perret, J., & Gribaudo, M. (2018). Historical collaborative geocoding. *arXiv:1703.07138 [cs]*. <http://arxiv.org/abs/1703.07138>
- Curie, F., Perret, J., & Ruas, A. (2010). Simulation of urban blocks densification. *13th agile international conference on geographic information science*.

Dahal, K. R., & Chow, T. E. (2014). A GIS toolset for automated partitioning of urban lands. *Environmental Modelling & Software*, 55, 222-234. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.024>

Daniel, F., Kucherbaev, P., Cappiello, C., Benatallah, B., & Allahbakhsh, M. (2018). Quality Control in Crowdsourcing : A Survey of Quality Attributes, Assessment Techniques, and Assurance Actions. *ACM Computing Surveys*, 51(1), 7:1-7:40. <https://doi.org/10.1145/3148148>

Delaunay, B. (1934). Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 7(793-800), 1-2.

Desmarais, G. (1993). *La morphogenèse de Paris des origines à la Révolution : Une analyse morphologique, dynamique et sémiotique* [Thèse de doctorat, Paris, EHESS]. <https://www.theses.fr/1993EHES0324>

Desyllas, J., & Duxbury, E. (2001). Axial maps and visibility graph analysis. *Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium*, 27, 21-13.

de Vries, J. J., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (2001). Alonso's Theory of Movements : Developments in Spatial Interaction Modeling. *Journal of Geographical Systems*, 3(3), 233-256. <https://doi.org/10.1007/PL00011478>

Domingo, M. (2016). *Modélisation de structures habitées à partir d'une approche de graphe* [Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale]. <https://www.theses.fr/2016BRES0121>

Dong, L., Huang, Z., Zhang, J., & Liu, Y. (2020). Understanding the mesoscopic scaling patterns within cities. *Scientific Reports*, 10(1), 21201. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78135-2>

Dubois, G., & Meister, A. (2022). *Création d'un atlas des formes urbaines, et mise en relation avec leurs contextes géo-historiques* [Mémoire de master 2]. Université de Franche-Comté.

Dumenieu, B. (2015). Un système d'information géographique pour le suivi d'objets historiques urbains à travers l'espace et le temps. Thèse soutenue le 4 décembre 2015. *L'Atelier du Centre de recherches historiques. Revue électronique du CRH*. <http://journals.openedition.org/acrh/6932>

- Edmonds, B., & Moss, S. (2005). From KISS to KIDS – An ‘Anti-simplistic’ Modelling Approach. In P. Davidsson, B. Logan, & K. Takadama (Éds.), *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation* (p. 130-144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32243-6_11
- El Gouj, H., Rincón-Acosta, C., & Lagesse, C. (2022). Urban morphogenesis analysis based on geohistorical road data. *Applied Network Science*, 7(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00440-0>
- Erlander, S., & Stewart, N. F. (1990). *The Gravity Model in Transportation Analysis : Theory and Extensions*. VSP.
- Euler, L. (1953). Leonhard euler and the koenigsberg bridges. *Scientific American*, 189(1), 66-72.
- Fang, Z., Yang, T., & Jin, Y. (2020). *DeepStreet : A deep learning powered urban street network generation module* (arXiv:2010.04365). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.04365>
- Figueiredo, L., & Amorim, L. (2005). Continuity lines in the axial system. *The Fifth Space Syntax International Symposium. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands*.
- Fleet, C., Aucott, P., & Southall, H. (2018). GB 1900 project. *Sheetlines (2018)*, 46-48.
- Fleet, C., Kowal, K. C., & Pridal, P. (2012). Georeferencer : Crowdsourced Georeferencing for Map Library Collections. *D-Lib Magazine*, 18(11/12). <https://doi.org/10.1045/november2012-fleet>
- Fleury, A. (2004). La rue : Un objet géographique ? *Tracés. Revue de Sciences humaines*, 5, Article 5. <https://doi.org/10.4000/traces.3133>
- Foltête, J.-C. (2007). *Quel rôle du réseau de voirie urbaine sur la distribution des flux piétonniers ?*
- Fortunato, S. (2010). Community detection in graphs. *Physics Reports*, 486(3), 75-174. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.11.002>
- 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., Roeder, D., & Mulholland, R. R. (1979). Centrality in social networks : II. Experimental results. *Social networks*, 2(2), 119-141.

Fusco, G. (2020). *Catastrophes, changement et résilience urbaine*. Ovidia. <https://hal.science/hal-03533530/document>

Fusco, G., & Scarella, F. (2011). Métropolisation et ségrégation sociospatiale. Les flux de mobilités résidentielles en Provence-Alpes-Côte d'Azur. *L'Espace géographique*, 40(4), 319-336. <https://doi.org/10.3917/eg.404.0319>

Fusero, P., Massimiano, L., Tedeschi, A., & Lepidi, S. (2013). Parametric urbanism : A new frontier for smart cities. *Planum the journal of urbanism*, 2(27), 1-13.

Gan, L., Li, D., & Song, S. (2006). Is the Zipf law spurious in explaining city-size distributions? *Economics Letters*, 92(2), 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2006.03.004>

Garden, M. (2006). Histoire de la rue. *Pouvoirs*, n° 116(1), 5-17.

Garrison, W. L. (1960). Connectivity of the Interstate Highway System. *Papers in Regional Science*, 6(1), 121-137. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1960.tb01707.x>

Garrison, W. L., & Marble, D. F. (1962). The structure of transportation networks. *US Army Transportation Command, Technical Report*, 62, 73-88.

Gastner, M. T., & Newman, M. E. J. (2006a). Optimal design of spatial distribution networks. *Physical Review E*, 74(1), 016117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.016117>

Gastner, M. T., & Newman, M. E. J. (2006b). Shape and efficiency in spatial distribution networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(01), P01015. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2006/01/P01015>

Gastner, M. T., & Newman, M. E. J. (2006c). The spatial structure of networks. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 49(2), 247-252. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00046-8>

Genre-Grandpierre, C., & Foltête, J.-C. (2003). Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.3925>

Genre-Grandpierre, C., Fusco, G., Balac, M., Ciari, F., Gueye, S., Sahuc, C., Michelon, P., Caglioni, M., Moreno, D., Decoupigny, F., Araldi, A., Mercier, A., Ovtracht, N., & Crozet, Y. (2015). *Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile* (p. 186) [Rapport de recherche]. UMR Espace, Université d'Avignon ; UMR Espace, Université de Nice ; ETH Zurich ;

Laboratoire d'informatique d'Avignon, Université d'Avignon ; Université Nice Sophia Antipolis ; LET. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01708490>

Gerosa, P. G. (1992). *Éléments pour une histoire des théories sur la ville comme artefact et forme spatiale:(18.-20. Siecles)*. Université des sciences humaines.

Ginot, V., & Monod, H. (2007). Exploring Models by Simulation. Application to Sensitivity Analysis. *Agent-based modelling and simulation in the social land human sciences*. Bardwell Press, Oxford.

Goldman, W. (1998). *Topology and Geometry*. By Glen E. Bredon. *The American Mathematical Monthly*, 105(2), 192-194. <https://doi.org/10.1080/00029890.1998.12004869>

Goss, Q., Akbaş, M. İ., Jaimes, L. G., & Sanchez-Arias, R. (2019). Street Network Generation with Adjustable Complexity Using k-Means Clustering. *2019 SoutheastCon*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020392>

Gourdon, J.-L. (2002). La rue : Permanence et renouvellement. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 92(1), 115-122. <https://doi.org/10.3406/aru.2002.2464>

Gourdon, J.-L. (2020). La rue comme forme. In J. Brody (Éd.), *La rue* (p. 21-31). Presses universitaires du Midi. <http://books.openedition.org/pumi/6456>

Graftiaux, M.-S. (2021). *The Impact of Structure and Growth Parameters on Street Networks' Efficiency* [Master Thesis]. Erasmus School of Economics or Erasmus University.

Griffiths, S. (2009). Persistence and change in the spatio-temporal description of Sheffield Parish c.1750-1905. In D. Koch, L. Marcus, & J. Steen (Éds.), *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*. http://www.sss7.org/Proceedings_list.html

Griffiths, S., Dhanani, A., Ellul, C., Haklay, M., Jeevendrampillai, D., Nikolova, N., Rickles, P., & Vaughan, L. (2013). Using space syntax and historical land-use data to interrogate narratives of high street 'decline' in two Greater London suburbs. In Y. Kim, A. T. Park, & K. W. Seo (Éds.), *Proceedings of the Ninth International Space Syntax Symposium*. http://www.sss9.or.kr/paperpdf/hebf/SSS9_2013_REF036_P.pdf

Gudmundsson, A., & Mohajeri, N. (2013). Entropy and order in urban street networks. *Scientific reports*, 3(1), 1-8.

Guidoni, E. (1981). *La ville européenne : Formation et signification du quatrième au onzième siècle*. Editions Mardaga.

Hachi, R., & Lagesse, C. (2017). The impact of urban transformations on the morphology of streets networks. *11th International Space Syntax Symposium*, 65.1-65.13. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02383065>

Haggett, P., & Chorley, R. J. (1969). *Network Analysis in Geography*. St. Martin's New York.

Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2012). Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32(2), 135-154. <https://doi.org/10.1007/BF00547132>

Happe, K. (Éd.). (2005). *Agent-Based Modelling and Sensitivity Analysis by Experimental Design and Metamodelling: An Application to Modelling Regional Structural Change*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.24464>

Hartmann, S., Weinmann, M., Wessel, R., & Klein, R. (2017). *StreetGAN: Towards road network synthesis with generative adversarial networks*. Václav Skala - UNION Agency. <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/29554>

Heinzle, F., & Anders, K.-H. (2007). Characterising Space via Pattern Recognition Techniques : Identifying Patterns in Road Networks. In W. A. Mackaness, A. Ruas, & L. T. Sarjakoski (Éds.), *Generalisation of Geographic Information* (p. 233-253). Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-008045374-3/50014-4>

Helbing, D., Schweitzer, F., Keltsch, J., & Molnár, P. (1997). Active walker model for the formation of human and animal trail systems. *Physical Review E*, 56(3), 2527-2539. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.56.2527>

Hillier, B. (1987). La morphologie de l'espace urbain : L'évolution de l'approche syntaxique. *Architecture et Comportement/Architecture and Behaviour*, 3(3), 205-216.

Hillier, B. (1998). A Note on the Intuiting of Form : Three Issues in the Theory of Design. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(7), 37-40. <https://doi.org/10.1177/239980839802500707>

Hillier, B. (1999). Centrality as a process : Accounting for attraction inequalities in deformed grids. *Urban Design International*, 4(3-4), 107-127. <https://doi.org/10.1080/135753199350036>

- 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* (p. 475-490). Springer. https://doi.org/10.1007/11556114_30
- Hillier, B., & Leaman, A. (1972). System, structure and transformation. *Transactions of the Bartlett Society*, 9, 3.
- Hillier, B., Leaman, A., Stansall, P., & Bedford, M. (1976). Space syntax. *Environment and Planning B: Planning and design*, 3(2), 147-185.
- Hillier, B., & Vaughan, L. (2007). The city as one thing. *Progress in planning*, 67(3), 205-230.
- Hirtzel, J. (2015). *Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (MOBISIM)* [Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté]. <https://theses.hal.science/tel-01273313>
- Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities* (United States Federal Housing Administration). U.S. Government Printing Office.
- Huang, Q., Parker, D. C., Filatova, T., & Sun, S. (2014). A review of urban residential choice models using agent-based modeling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(4), 661-689.
- Isard, W. (1956). *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, Trade, and Urban Structure*. MIT Press. <https://trid.trb.org/view/131509>
- Isard, W. (1998). Gravity and spatial interaction models. *Methods of interregional and regional analysis*, 243-279.
- Jacobs, A. B. (1993). Great Streets. *University of California Transportation Center, Working Papers*, Article qt3t62h1fv. <https://ideas.repec.org//p/cdl/uctcwp/qt3t62h1fv.html>
- James, R. M. (2000). *Topology*. Prentic Hall of India Private Limited, New delhi.
- Jang, G. U., Joo, J. C., & Park, J. (2020). Capturing the Signature of Topological Evolution from the Snapshots of Road Networks. *Complexity*, 2020(ID 8054316), e8054316. <https://doi.org/10.1155/2020/8054316>
- Jänich, K. (2006). *Topologie*. Springer-Verlag.

Jiang, B. (2007). A topological pattern of urban street networks : Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2), 647-655. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.064>

Jiang, B., & Claramunt, C. (2002). Integration of space syntax into GIS : New perspectives for urban morphology. *Transactions in GIS*, 6(3), 295-309.

Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and design*, 31(1), 151-162.

Jiang, B., Claramunt, C., & Klarqvist, B. (2000). Integration of space syntax into GIS for modelling urban spaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3-4), 161-171. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85010-2](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85010-2)

Jiao, C., Heitzler, M., & Hurni, L. (2022). A fast and effective deep learning approach for road extraction from historical maps by automatically generating training data with symbol reconstruction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 102980. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102980>

Jjumba, A., & Dragičević, S. (2012). High Resolution Urban Land-use Change Modeling : Agent iCity Approach. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 5(4), 291-315. <https://doi.org/10.1007/s12061-011-9071-y>

Kalapala, V., Sanwalani, V., Clauset, A., & Moore, C. (2006). Scale invariance in road networks. *Physical Review E*, 73(2), 026130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026130>

Kansky, K. J. (1963). *Structure of transportation networks : Relationships between network geometry and regional characteristics*. The University of Chicago.

Kar, B., Sieber, R., Haklay, M., & Ghose, R. (2016). Public Participation GIS and Participatory GIS in the Era of GeoWeb. *The Cartographic Journal*, 53(4), 296-299. <https://doi.org/10.1080/00087041.2016.1256963>

Karimi, K., & Motamed, N. (2003). The tale of two cities : Urban planning of the city Isfahan in the past and present. *4th International Space Syntax Symposium*, 1, 14-1.

Kasanko, M., Barredo, J. I., Lavallo, C., McCormick, N., Demicheli, L., Sagris, V., & Brezger, A. (2006). Are European cities becoming dispersed? : A comparative analysis of 15 European urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 77(1), 111-130. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.003>

- Keeble, L. (1969). *Principles and practice of town and country planning*. Estates Gazette.
- Kelly, T., & Wonka, P. (2011). Interactive architectural modeling with procedural extrusions. *ACM Transactions on Graphics*, 30(2), 14:1-14:15. <https://doi.org/10.1145/1944846.1944854>
- Kempinska, K., & Murcio, R. (2019). Modelling urban networks using Variational Autoencoders. *Applied Network Science*, 4(1), 114. <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0234-0>
- Klarqvist, B. (2015). A space syntax glossary. *NA*, 6(2).
- Knecht, K., & König, R. (2012). *Automatische Grundstücksumlegung mithilfe von Unterteilungsalgorithmen und typenbasierte Generierung von Stadtstrukturen*. <https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2673>
- Krafta, R. (1994). Modelling Intraurban Configurational Development. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(1), 67-82. <https://doi.org/10.1068/b210067>
- Krafta, R., de Oliveira, D., & Bordini, R. H. (2003). The city as object of human agency. *Fourth International Space Syntax Symposium (SSS4), London*, 17-19.
- Kropf, K. (2018). *The Handbook of Urban Morphology*. John Wiley & Sons.
- Kubat, A. S. (1999). The morphological history of Istanbul. *Urban Morphology*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.51347/jum.v3i1.3883>
- Lagesse, C. (2015). *Lire les Lignes de la Ville* [Thèse de doctorat, Université Paris Diderot-Paris VII]. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01245898>
- Lagesse, C., Bonnin, P., Bordin, P., & Douady, S. (2016). Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris. *Flux*, 3, 33-49.
- Lagesse, C., Bordin, P., & Douady, S. (2015). A spatial multi-scale object to analyze road networks. *Network Science*, 3(1), 156-181. <https://doi.org/10.1017/nws.2015.4>
- Lam, L. (1995). Active walker models for complex systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 6, 267-285. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(95\)80033-D](https://doi.org/10.1016/0960-0779(95)80033-D)
- Lam, L., Pochy, R., Gould, H., & Tobochnik, J. (1993). Active-Walker Models : Growth and form in Nonequilibrium Systems. *Computer in Physics*, 7(5), 534-541. <https://doi.org/10.1063/1.4823214>

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>

Langton, S. (2021, janvier 4). *The universality of street segments : Length and sinuosity*. Samuel Langton. https://www.samlangton.info/post/street_segments_1/

Laperrière, V., Badariotti, D., Banos, A., & Müller, J.-P. (2009). Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation. *Ecological Complexity*, 6(2), 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.08.001>

Lara, R. L., & Ramirez, G. A. C. (2018). Extended City, Habitability and Human Security : The case of the Metropolitan Area of San Luis Potosí. In *Philosophy of the sustainability of the urban environment : Context, Concepts and Case Studies (UASLP)*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, MÉXICO.

Laterrasse, J. (2018). Urbanisme et trame urbaine : Ce que nous apprend l'histoire des villes. *e-Phaïstos. Revue d'histoire des techniques*, Article 1. <https://doi.org/10.4000/ephaistos.1281>

Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient Behavior of Small-World Networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>

Latora, V., & Marchiori, M. (2004). The architecture of complex systems. *Nonextensive Entropy: Interdisciplinary Applications*, 377.

Latora, V., & Marchiori, M. (2007). A measure of centrality based on network efficiency. *New Journal of Physics*, 9(6), 188.

Lavedan, P. (1926). *Qu'est-ce l'urbanisme? Introduction a l'histoire de l'urbanisme*. H. Laurens.

Lavedan, P. (1959). *Histoire de l'urbanisme : Renaissance et temps modernes*. H. Laurens.

Le Néchet, F. (2015). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : Une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26753>

Le Néchet, F., & Aguiléra, A. (2012). Forme urbaine et mobilité domicile–travail dans 13 aires urbaines françaises : Une analyse multiéchelle. *Recherche Transports Sécurité*, 2012(03-04), 259-270.

- Leavitt, H. J. (1951). Some effects of certain communication patterns on group performance. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 46(1), 38.
- Lee, M., Cheon, S., Son, S.-W., Lee, M. J., & Lee, S. (2023). *Exploring the relationship between the spatial distribution of roads and universal pattern of travel-route efficiency in urban road networks* (arXiv:2302.06972). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2302.06972>
- Lerman, I.-C., & Bachar, K. (2008). Comparaison de deux critères en classification ascendante hiérarchique sous contrainte de contiguïté. Application en imagerie numérique. *Journal de la Société française de statistique & Revue de statistique appliquée*, 149(2), 45-74.
- Levinson, D. (2012). Network Structure and City Size. *PLOS ONE*, 7(1), e29721. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029721>
- 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>
- Levinson, D., & Zhang, L. (2004). *A Model of the Rise and Fall of Roads* (SSRN Scholarly Paper 1748575). <https://papers.ssrn.com/abstract=1748575>
- Levy, A. (2005). Formes urbaines et significations : Revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122(3), 25-48.
- Li, X., Qian, Y., Zeng, J., Wei, X., & Guang, X. (2021). The Influence of Strip-City Street Network Structure on Spatial Vitality : Case Studies in Lanzhou, China. *Land*, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/land10111107>
- Litvine, A., El Gouj, H., Meyer, J., Starzec, A., Thévenin, T., Séguy, I., Mimeur, C., Hare, D., Boissard, R., & Roy, D. (2022). Setting a standard for open and collaborative data acquisition for historical cartography : Digitizing the french État-major maps as a collaboration between the ANR COMMUNES and open historical maps. *Proceedings of the 6th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geospatial Humanities*, 1-7. <https://doi.org/10.1145/3557919.3565811>
- Louf, R., & Barthelemy, M. (2014). A typology of street patterns. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(101), 20140924. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0924>
- Louf, R., Jensen, P., & Barthelemy, M. (2013). Emergence of hierarchy in cost-driven growth of spatial networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(22), Article 22. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222441110>

- Lowe, J. C., & Moryadas, S. (1975). *The geography of movement*. Houghton Mifflin Company.
- Luca, C. (2007). Generative platform for urban and regional design. *Automation in Construction*, 16(1), 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.10.008>
- Lynch, K. (1981). *Good City Form-Cambridge*. Mass.(3rd ed.), MIT Press.
- Mangin, D., & Panerai, P. (1999). *Projet urbain*. Parenthèses Marseille.
- March, L. (1976). *The architecture of form*. Cambridge University Press.
- March, L., & Martin, L. (1972). *Urban space and structures*. Cambridge University Press.
- March, L., & Steadman, P. (1971). *The Geometry of Environment : An Introduction to Spatial Organization in Design*. Routledge.
- Marshall, S. (2005). *Streets and patterns*. Spoon press.
- Marshall, S. (2016). Line structure representation for road network analysis. *Journal of Transport and Land Use*, 9(1), 29-64.
- Martouzet, D., Bailleul, H., Feildel, B., Laffont, G.-H., & Thibault, S. (2012). *Le périurbain à l'épreuve des modèles d'habiter. La viabilité périurbaine entre théorie (s) et pratique (s)* [Rapport de recherche]. CITERES; Université de Tours; CNRS; PUCA/DGALN-Ministère de l'écologie. <https://hal.science/halshs-01954151/>
- Masucci, A. P., Arcaute, E., Hatna, E., Stanilov, K., & Batty, M. (2015). On the problem of boundaries and scaling for urban street networks. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(111), Article 111. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0763>
- Masucci, A. P., Serras, J., Johansson, A., & Batty, M. (2013). Gravity versus radiation models : On the importance of scale and heterogeneity in commuting flows. *Physical Review E*, 88(2), 022812. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.022812>
- Masucci, A. P., 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>
- Masucci, A. P., Stanilov, K., & Batty, M. (2013). Limited Urban Growth : London's Street Network Dynamics since the 18th Century. *PLOS ONE*, 8(8), e69469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069469>

- Masucci, A. P., Stanilov, K., & Batty, M. (2014). Exploring the evolution of London's street network in the information space : A dual approach. *Physical Review E*, 89(1), 012805. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.012805>
- Mathian, H., & Sanders, L. (2014). *Objets géographiques et processus de changement : Approches spatio-temporelles*. ISTE Group.
- Mathian, H., & Tannier, C. (2015). Formalisation des interactions spatiales dans les modèles multi-agents—Essai d'analyse comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(3), Article 3. <https://doi.org/10.3166/RIG.25.393-414>
- Mattingly, D. J., & Salmon, J. (2002). *Economies Beyond Agriculture in the Classical World*. Routledge.
- Mäyrä, J., Kivinen, S., Keski-Saari, S., Poikolainen, L., & Kumpula, T. (2023). Utilizing historical maps in identification of long-term land use and land cover changes. *Ambio*. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01838-z>
- Mehmood, M. S., Li, G., Jin, A., Rehman, A., Wijeratne, V. P. I. S., Zafar, Z., Khan, A. R., & Khan, F. A. (2021). The spatial coupling effect between urban street network's centrality and collection & delivery points : A spatial design network analysis-based study. *PLOS ONE*, 16(5), e0251093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251093>
- Michener, C. D., & Sokal, R. R. (1957). A quantitative approach to a problem in classification. *Evolution*, 130-162.
- Mignot, D., Aguiléra, A., Bloy, D., Caubel, D., & Madre, J.-L. (2013). Urban forms, mobility, and segregation. *Dialogues in Urban and Regional Planning: Volume 5, 5*, 163.
- Milgram, S. (1967). Six degrees of separation. *Psychology Today*, 2, 60-64.
- Miyake, S. (2021). Les enjeux de l'urbanisme post-catastrophe dans le Japon du Nord-Est, 10 ans après le tsunami du 11 mars 2011 (R. Scoccimarro, Trad.). *Ebisu. Études japonaises*, 58, Article 58. <https://doi.org/10.4000/ebisu.5759>
- Molinero, C., & Thurner, S. (2021). How the geometry of cities determines urban scaling laws. *Journal of The Royal Society Interface*, 18(176), 20200705. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0705>
- Monod, H., Naud, C., & Makowski, D. (2006). Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. *Working with Dynamic Crop Models*, 55.

Montenegro, N., & Duarte, J. P. (2009). Computational ontology of urban design. *Proceedings of the 27th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe'09)*, 253-260.

Moudon, A. V. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban morphology*, 1(1), 3-10.

Mueller, J., Lu, H., Chirkin, A., Klein, B., & Schmitt, G. (2018). Citizen Design Science : A strategy for crowd-creative urban design. *Cities*, 72, 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.08.018>

Muratori, S. (1967). *Civiltà e territorio*. Centro studi di Roma urbanistica.

Nagy, D., Villaggi, L., & Benjamin, D. (2018). Generative urban design : Integrating financial and energy goals for automated neighborhood layout. *Proceedings of the Symposium for Architecture and Urban Design Design, Delft, the Netherlands*, 265-274.

Nes, A., & Zhaohui, S. (2009). Network Typology, Junction Typology and Spatial Configuration and Their Impacts on Street Vitality in Singapore. In D. Koch, L. Marcus, & J. Steen (Éds.), *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*.

Newman, M. (2018). *Networks*. Oxford University Press.

Ngo, T. A., & See, L. (2012). Calibration and Validation of Agent-Based Models of Land Cover Change. In A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, & M. Batty (Éds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems* (p. 181-197). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4_10

Nieminen, J. (1974). On the centrality in a graph. *Scandinavian Journal of Psychology*, 15(1), 332-336. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1974.tb00598.x>

Novarina, G., & Trotta-Brambilla, G. (2018). Sperimentazioni per il riscatto delle aree rurali in Francia. *Urban tracks | Sentieri urbani*, pp-34.

Omer, I., & Jiang, B. (2008). Topological qualities of urban streets and the image of the city : A multi-perspective approach. *11th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 1-11. https://www.academia.edu/download/30601690/74_DOC.pdf

Pailhous, J. (1970). *La représentation de l'espace urbain : L'exemple du chauffeur de taxi*. Presses Universitaires de France.

- Panerai, P., Castex, J., & Depaule, J.-C. (1997). *Formes urbaines, de l'îlot à la barre*. Parenthèses.
- Panerai, P., Demorgon, M., & Depaule, J.-C. (1999). *Analyse urbaine*. Parenthèses.
- Parish, Y. I. H., & Müller, P. (2001). Procedural modeling of cities. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 301-308. <https://doi.org/10.1145/383259.383292>
- Parlebas, P. (1972). Centralité et compacité d'un graphe. *Mathématiques et Sciences humaines*, 39, 5-26.
- Pawlowski, K. (1992). *Circulades languedociennes de l'an mille. Naissance de l'urbanisme européen*. Presses du Languedoc.
- Penn, A. (2003). Space Syntax And Spatial Cognition : Or Why the Axial Line? *Environment and Behavior*, 35(1), 30-65. <https://doi.org/10.1177/0013916502238864>
- Penn, A., & Al Sayed, K. (2017). Spatial information models as the backbone of smart infrastructure. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(2), 197-203. <https://doi.org/10.1177/2399808317693478>
- Penn, A., & Turner, A. (2002). *Space syntax based agent simulation*. Springer-Verlag.
- Peponis, J., Allen, D. A., French, S., Scoppa, M., & Brown, J. (2007). *STREET CONNECTIVITY AND URBAN DENSITY: Spatial measures and their correlation*. [Http://www.spacesyntaxistanbul.itu.edu.tr/](http://www.spacesyntaxistanbul.itu.edu.tr/).
- Peponis, J., Burdett, R., & Hanson, J. (1983). Space syntax, a different urban perspective. *Architects' Journal*, 178, 47-63.
- Perna, A., Kuntz, P., & Douady, S. (2011). Characterization of spatial networklike patterns from junction geometry. *Physical Review E*, 83(6), 066106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.066106>
- Perret, J. (2006). *Modélisation d'environnements urbains virtuels* [Thèse de doctorat, Université de Rennes 1]. <https://hal.science/tel-03766262>
- Perret, J. (2016). *Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines* [Habilitation à diriger des recherches]. Université de Paris-Est.

Perret, J., Boffet Mas, A., & Ruas, A. (2009). Understanding Urban Dynamics : The use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases. *24th international cartography conference (icc'09)*.

Perret, J., Curie, F., Gaffuri, J., & Ruas, A. (2010). A Multi-Agent System for the simulation of urban dynamics. *10th European conference on complex systems (ECCS'10), Lisbon, Portugal*.

Perret, J., Ruas, A., & Mas, A. (2009). *Understanding Urban Dynamics : The use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases*.

Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006a). Analyse du réseau des voiries urbaines : Une approche directe. *Planning, 33*, 705-725.

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.

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.

Porta, S., Romice, O., Maxwell, J. 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.

Portugali, J. (2000). Spatial Cognitive Dissonance and Socio—Spatial Emergence in a Self-Organizing City. In J. Portugali (Éd.), *Self-Organization and the City* (p. 141-173). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04099-7_8

Pousse, R. (2020). *Caractérisation et modélisation du réseau viaire* [Thèse de doctorat, Université Paris Cité]. <https://www.theses.fr/2020UNIP7037>

Pouyanne, G. (2004). Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction mobilité-forme urbaine. Méthodologie et premiers résultats. *Cahiers scientifiques du transport, 45(1)*, 49-82.

Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (2012). *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer Science & Business Media.

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. <https://doi.org/10.1057/udi.2013.4>

- Puissant, A., Lachiche, N., Skupinski, G., Braud, A., Perret, J., & Mas, A. (2011). Classification et évolution des tissus urbains à partir de données vectorielles. *Revue internationale de géomatique*, 21, 513-532. <https://doi.org/10.3166/rig.21.513-532>
- Pumain, D. (2006). *Systèmes de villes et niveaux d'organisation*. Belin. <https://shs.hal.science/halshs-00145939/>
- Pumain, D., Paulus, F., Vacchiani-Marcuzzo, C., & Lobo, J. (2006). An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.2519>
- Pumain, D., & Robic, M.-C. (1996). *Théoriser la ville*. Anthropos-Economica.
- Qi, Z., & Li, Z. (2015). Empirical determination of geometric parameters for selective omission in a road network. *International Journal of Geographical Information Science*. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1085538>
- Racine, J.-B. (1971). Le modèle urbain américain : Les mots et les choses. *Annales de Géographie*, 80(440), 397-427.
- Raimbault, J. (2021). Complementarity of generative models for road networks. *arXiv:2109.15206 [physics]*. <http://arxiv.org/abs/2109.15206>
- Rakha, T., & Reinhart, C. (2012). Generative urban modeling : A design work flow for walkability-optimized cities. *Proceedings of SimBuild*, 5(1), 255-262.
- Ramalho, C. E., & Hobbs, R. J. (2012). Time for a change : Dynamic urban ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(3), 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.10.008>
- Ratti, C. (2004). Space syntax : Some inconsistencies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(4), 487-499.
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance : Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)
- Ravetz, A. (1974). *Model Estate (Routledge Revivals) : Planned Housing at Quarry Hill, Leeds*. Routledge.
- Reggiani, A., & Nijkamp, P. (2009). *Complexity and Spatial Networks : In Search of Simplicity*. Springer Science & Business Media.

Reggiani, A., & Nijkamp, P. (2015). Did Zipf Anticipate Spatial Connectivity Structures? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(3), 468-489. <https://doi.org/10.1068/b120012p>

Reuillon, R., Leclaire, M., & Rey-Coyrehourcq, S. (2013). OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, 29(8), 1981-1990. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.05.003>

Reuillon, R., Schmitt, C., De Aldama, R., & Mouret, J.-B. (2015). A New Method to Evaluate Simulation Models : The Calibration Profile (CP) Algorithm. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(1), 12.

Rey-Coyrehourcq, S. (2015). *Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie* [Thèse de doctorat, Paris 1]. <https://www.theses.fr/2015PA010690>

Richiardi, M., Leombruni, R., Saam, N. J., & Sonnessa, M. (2006). A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1). <https://econpapers.repec.org/article/jasjasssj/2005-86-1.htm>

Robinson, D. (2012). *Computer Modelling for Sustainable Urban Design : Physical Principles, Methods and Applications*. Routledge.

Rossi, A. (1966). *L'architettura della città*. Il Saggiatore.

Rossi, A., & Brun, F. (1981). *L'architecture de la ville*. L'Equerre.

Rosvall, M., Trusina, A., Minnhagen, P., & Sneppen, K. (2005). Networks and Cities : An Information Perspective. *Physical Review Letters*, 94(2), 028701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.028701>

Rudin, W. (1953). *Principles of mathematical analysis*. McGraw Hill.

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), 74. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30235-7>

Sabidussi, G. (1966). The centrality index of a graph. *Psychometrika*, 31(4), 581-603.

Salingaros, N. A. (2003). Connecting the fractal city. *5th Biennial of towns and town planners in Europe, Barcelona*.

- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S., & Campolongo, F. (2005). Sensitivity Analysis for Chemical Models. *Chemical Reviews*, 105(7), 2811-2828. <https://doi.org/10.1021/cr040659d>
- Samaniego, H., & Moses, M. E. (2008). Cities as organisms : Allometric scaling of urban road networks. *Journal of Transport and Land Use*, 1(1), 21-39.
- Sanders, L. (2006). Les modèles agent en géographie urbaine. In F. Amblard & D. Phan (Éds.), *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*. Hermes-Lavoisier. <https://shs.hal.science/halshs-00119088>
- Schlegel, I. (2023). A Holistic Workflow for Semi-automated Object Extraction from Large-Scale Historical Maps. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*. <https://doi.org/10.1007/s42489-023-00131-z>
- Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R., & Pumain, D. (2015). Half a Billion Simulations : Evolutionary Algorithms and Distributed Computing for Calibrating the Simpoplocal Geographical Model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(2), 300-315. <https://doi.org/10.1068/b130064p>
- Schnabel, M. A., Zhang, Y., & Aydin, S. (2017). Using Parametric Modelling in Form-based Code Design for High-dense Cities. *Procedia Engineering*, 180, 1379-1387. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.301>
- Schouten, M., Verwaart, T., & Heijman, W. (2014). Comparing two sensitivity analysis approaches for two scenarios with a spatially explicit rural agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 54, 196-210. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.003>
- Schweitzer, F., Ebeling, W., Rosé, H., & Weiss, O. (1997). Optimization of Road Networks Using Evolutionary Strategies. *Evolutionary Computation*, 5(4), 419-438. <https://doi.org/10.1162/evco.1997.5.4.419>
- Senaratne, H., Mobasheri, A., Ali, A. L., Capineri, C., & Haklay, M. (Muki). (2017). A review of volunteered geographic information quality assessment methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(1), 139-167. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1189556>
- Serra, M., Gil, J., & Pinho, P. (2017). Towards an understanding of morphogenesis in metropolitan street-networks. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(2), Article 2. <https://doi.org/10.1177/0265813516684136>

Sharma, H., Zerbe, N., Lohmann, S., Kayser, K., Hellwich, O., & Hufnagl, P. (2015). A review of graph-based methods for image analysis in digital histopathology. *Diagnostic Pathology*. <https://doi.org/10.17629/www.diagnosticpathology.eu-2015-1:61>

Shpuza, E. (2009). Evolution of street networks in Adriatic and Ionian coastal cities. *7th International Space Syntax Symposium*, 101.

Sieber, R. E., & Haklay, M. (2015). The epistemology(s) of volunteered geographic information : A critique. *Geo: Geography and Environment*, 2(2), 122-136. <https://doi.org/10.1002/geo2.10>

Sieber, R. E., Robinson, P. J., Johnson, P. A., & Corbett, J. M. (2016). Doing Public Participation on the Geospatial Web. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(5), 1030-1046. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1191325>

Simini, F., González, M. C., Maritan, A., & Barabási, A.-L. (2012). A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*, 484(7392), Article 7392. <https://doi.org/10.1038/nature10856>

Smith, M. J., Wedge, R., & Veeramachaneni, K. (2017). FeatureHub : Towards Collaborative Data Science. *2017 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 590-600. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2017.66>

Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1962). The comparison of dendrograms by objective methods. *Taxon*, 33-40.

Southall, H., Aucott, P., Fleet, C., Pert, T., & Stoner, M. (2017). GB1900 : Engaging the public in very large scale gazetteer construction from the ordnance survey "County series" 1: 10,560 mapping of Great Britain. *Journal of Map & Geography Libraries*, 13(1), 7-28.

Southworth, M., & Ben-Joseph, E. (2013). *Streets and the Shaping of Towns and Cities*. Island Press.

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>

Spreiregen, P. D. (1965). *Urban design : The architecture of towns and cities*. McGraw-Hill Book Company.

- Stead, D., & Marshall, S. (2001). The Relationships between Urban Form and Travel Patterns. An International Review and Evaluation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 1(2), Article 2. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2001.1.2.3497>
- Steadman, P. (1983). *Architectural morphology : An introduction to the geometry of building plans*. Pion.
- Stemers, K. (2003). Energy and the city : Density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0)
- Stemers, K., & Nikolopoulou, M. (2014). Assessing the Urban Microclimate : Introducing innovative modelling techniques. *Environmentally Friendly Cities: Proceedings of Plea 1998, Passive and Low Energy Architecture, 1998, Lisbon, Portugal, June 1998*, 157.
- Stephenson, K., & Zelen, M. (1989). Rethinking centrality : Methods and examples. *Social networks*, 11(1), 1-37.
- Stewart, J. Q. (1948). Demographic Gravitation : Evidence and Applications. *Sociometry*, 11(1/2), 31-58. <https://doi.org/10.2307/2785468>
- Stouffer, S. A. (1960). Intervening Opportunities and Competing Migrants. *Journal of Regional Science*, 2(1), 1-26. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1960.tb00832.x>
- Strano, E., Nicosia, V., Latora, V., Porta, S., & Barthélemy, M. (2012). Elementary processes governing the evolution of road networks. *Scientific Reports*, 2(1), 296. <https://doi.org/10.1038/srep00296>
- Strano, E., Viana, M., da Fontoura Costa, L., Cardillo, A., Porta, S., & Latora, V. (2013). Urban Street Networks, a Comparative Analysis of Ten European Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(6), 1071-1086. <https://doi.org/10.1068/b38216>
- 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>
- Sun, J., Yu, X., Baciú, G., & Green, M. (2002). Template-based generation of road networks for virtual city modeling. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, 33-40. <https://doi.org/10.1145/585740.585747>
- Taaffe, E. J., Morrill, R. L., & Gould, P. R. (1973). Transport Expansion in Underdeveloped Countries : A Comparative Analysis. In B. S. Hoyle (Éd.), *Transport and Development* (p. 32-49). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-15506-4_3

Tang, L., Li, Q., Yang, X., Xu, F., & Zeng, W. (2013). Road Network Modeling and Representation for Time-dependent Traffic Control. *International journal on information*, 16, 6459-6472.

Tannier, C. (2017). *Analyse et simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines de l'échelle micro-locale à l'échelle régionale—Modèles multi-échelles et trans-échelles* [Habilitation à diriger des recherches, Université Bourgogne Franche-Comté]. <https://hal.science/tel-01668615>

Tannier, C. (2020). Effets de la distance et dépendance d'échelles dans les modèles géographiques de villes et de territoires. In D. Pumain (Éd.), *La modélisation en géographie : Villes et territoires* (p. 59-100). Iste editions. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02527343>

Taylor, G. D., Harit, S., English, J. R., & Whicker, G. (1995). Hub and spoke networks in truckload trucking : Configuration, testing and operational concerns. *The Logistics and Transportation Review*, 31(3), 209-238.

Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks. : An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Normandie Université]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03124155>

Tirico, M., Balev, S., Dutot, A., & Olivier, D. (2019). Morphogenesis of Complex Networks : A Reaction Diffusion Framework for Spatial Graphs. In L. M. Aiello, C. Cherifi, H. Cherifi, R. Lambiotte, P. Lió, & L. M. Rocha (Éds.), *Complex Networks and Their Applications VII* (p. 769-781). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05411-3_61

Travençolo, B. A. N., & Costa, L. da F. (2008). Accessibility in complex networks. *Physics Letters A*, 373(1), 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2008.10.069>

Tsai, Y.-H. (2005). Quantifying Urban Form : Compactness versus « Sprawl ». *Urban Studies*, 42(1), 141-161. <https://doi.org/10.1080/0042098042000309748>

Tu, S., & Zhang, M. (2022). The Big Data Model for Urban Road Land Use Planning Is Based on a Neural Network Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2727512. <https://doi.org/10.1155/2022/2727512>

Turner, A. (2001). Angular analysis. *Proceedings of the 3rd international symposium on space syntax*, 30, 30-11.

Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>

- Uhl, J. H., & Duan, W. (2021). Automating Information Extraction from Large Historical Topographic Map Archives : New Opportunities and Challenges. In M. Werner & Y.-Y. Chiang (Éds.), *Handbook of Big Geospatial Data* (p. 509-522). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55462-0_20
- Uhl, J. H., Leyk, S., Chiang, Y.-Y., & Knoblock, C. A. (2022). Towards the automated large-scale reconstruction of past road networks from historical maps. *Computers, Environment and Urban Systems*, *94*, 101794. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101794>
- Vanegas, C. A., Aliaga, D. G., Benes, B., & Waddell, P. (2009). Visualization of Simulated Urban Spaces : Inferring Parameterized Generation of Streets, Parcels, and Aerial Imagery. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *15*(3), 424-435. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.193>
- Vanegas, C. A., Kelly, T., Weber, B., Halatsch, J., Aliaga, D. G., & Müller, P. (2012). Procedural Generation of Parcels in Urban Modeling. *Computer Graphics Forum*, *31*(2pt3), 681-690. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03047.x>
- van Imhoff, E., & Post, W. (1998). Microsimulation Methods for Population Projection. *Population: An English Selection*, *10*(1), 97-138.
- Vasseur, B., Jeansoulin, R., Devillers, R., & Frank, A. (2006). External Quality Evaluation of Geographical Applications : An Ontological Approach. In *Fundamentals of Spatial Data Quality* (p. 255-270). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470612156.ch13>
- 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), Article 2.
- Vershbow, B. (2013). NYPL Labs : Hacking the library. *Journal of Library Administration*, *53*(1), 79-96.
- Viana, M. P., Strano, E., Bordin, P., & Barthelemy, M. (2013). The simplicity of planar networks. *Scientific Reports*, *3*(1), 3495. <https://doi.org/10.1038/srep03495>
- Von Neumann, J., & Ulam, S. (1951). Monte carlo method. *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series*, *12*(1951), 36.

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>

Wagner, R. (2007). On the Metric, Syntactic and Functional Structure of Axial Maps'. *Proceedings 6th International Space Syntax Symposium*.

Wang, J. (2015). Resilience of Self-Organised and Top-Down Planned Cities—A Case Study on London and Beijing Street Networks. *PLOS ONE*, 10(12), e0141736. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141736>

Wang, J., Georganos, S., Kuffer, M., Abascal, A., & Vanhuyse, S. (2022). On the knowledge gain of urban morphology from space. *Computers, Environment and Urban Systems*, 95, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101831>

Wang, P., Gu, C., Yang, H., & Wang, H. (2022). The multi-scale structural complexity of urban morphology in China. *Chaos, Solitons & Fractals*, 164, 112721. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112721>

Wang, S., Yu, D., Kwan, M., Zhou, H., Li, Y., & Miao, H. (2019). The Evolution and Growth Patterns of the Road Network in a Medium-Sized Developing City : A Historical Investigation of Changchun, China, from 1912 to 2017. *Sustainability*, 11(19), 1-25.

Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis : Methods and Applications*. Cambridge University Press.

Watteaux, M. (2003). Le plan radio-quadrillé des terroirs non planifiés. *Études rurales*, 167-168, Article 167-168. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.8024>

Wegener, M. (2021). Land-use transport interaction models. In M. M. Fischer & P. Nijkamp (Éds.), *Handbook of regional science* (p. 229-246). Springer.

Whitehand, J. W. (2001). British urban morphology : The Conzenion tradition. *Urban morphology*, 5(2), 103-109.

Wickramasuriya, R., Chisholm, L. A., Puotinen, M., Gill, N., & Klepeis, P. (2011). An automated land subdivision tool for urban and regional planning : Concepts, implementation and testing.

Environmental Modelling & Software, 26(12), 1675-1684.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.06.003>

Willard, S. (2012). *General Topology*. Courier Corporation.

Wilson, A. G. (1971). A Family of Spatial Interaction Models, and Associated Developments. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 3(1), 1-32.
<https://doi.org/10.1068/a030001>

Wilson, L., Danforth, J., Davila, C. C., & Harvey, D. (2019). How to generate a thousand master plans : A framework for computational urban design. *SimAUD 2019*, 113-119.

Xie, F. (2008). *Validating the Model of Network Degeneration : Case Study of the Indiana Interurban Network (08-0959)*. Article 08-0959. Transportation Research Board 87th Annual Meeting Transportation Research Board. <https://trid.trb.org/view/847771>

Xie, F., & Levinson, D. (2007a). Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 39(3), 336-356. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00707.x>

Xie, F., & Levinson, D. (2008). The weakest link : The decline of the surface transportation network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 100-113.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.09.001>

Xie, F., & Levinson, D. (2009). Jurisdictional Control and Network Growth. *Networks and Spatial Economics*, 9(3), 459-483. <https://doi.org/10.1007/s11067-007-9036-5>

Xie, F., & Levinson, D. (2007b). *The Topological Evolution of Road Networks (07-0671)*. Article 07-0671. Transportation Research Board 86th Annual Meeting Transportation Research Board.
<https://trid.trb.org/view/801245>

Yamins, D., Rasmussen, S., & Fogel, D. (2003). Growing Urban Roads. *Networks and Spatial Economics*, 3(1), 69-85. <https://doi.org/10.1023/A:1022001117715>

Yan, X.-Y., Zhao, C., Fan, Y., Di, Z., & Wang, W.-X. (2014). Universal predictability of mobility patterns in cities. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(100), 20140834.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0834>

Yang, C., Wang, Y., & Zeng, P. (2011). Evolution Model of Urban Road Network. *同济大学学报 (自然科学版) (英文版)*, 39(4), 534-539. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2011.04.012>

Yang, J., Tang, W., Gong, J., Shi, R., Zheng, M., & Dai, Y. (2023). Simulating urban expansion using cellular automata model with spatiotemporally explicit representation of urban demand. *Landscape and Urban Planning*, 231, 104640. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104640>

Yang, Y., Samaranayake, S., & Dogan, T. (2020, mai). An Adaptive Workflow to Generate Street Network and Amenity Allocation for Walkable Neighborhood Design. *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design 2020*. <https://doi.org/10.7298/bmn8-0y37>

Yerra, B. M., & Levinson, D. (2005). The emergence of hierarchy in transportation networks. *The Annals of Regional Science*, 39(3), 541-553. <https://doi.org/10.1007/s00168-005-0230-4>

Yu, J. (2019). *Modelling and Simulation of Urban Road Network Evolution Using Generative Network Models* [PhD Thesis, University of Leeds]. <https://etheses.whiterose.ac.uk/25984/>

Zhang, F., Wu, L., Zhu, D., & Liu, Y. (2019). Social sensing from street-level imagery : A case study in learning spatio-temporal urban mobility patterns. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 153, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.017>

Zhang, Q. (2005). Road Network Generalization Based on Connection Analysis. In P. F. Fisher (Éd.), *Developments in Spatial Data Handling. 11th International Symposium on Spatial Data Handling* (p. 343-353). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-26772-7_26

Zhao, F., Wu, J., Sun, H., Gao, Z., & Liu, R. (2016). Population-driven Urban Road Evolution Dynamic Model. *Networks and Spatial Economics*, 16(4), 997-1018. <https://doi.org/10.1007/s11067-015-9308-4>

Zhong, Q., & Liu, Q. (2021). Automatic Generation of Urban Road Planning Network Under Deep Learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2074(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2074/1/012088>

Zhou, Y., Huang, X., Zhong, T., Chen, Y., Yang, H., Chen, Z., Xu, G., Niu, L., & Li, H. (2020). Can annual land use plan control and regulate construction land growth in China? *Land Use Policy*, 99, 105026. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105026>

Liste des figures

Figure 0.1 : Structure de la thèse. 26

Figure 1.1. a- Le quartier "Trentemoult" à Rezé (France). b- Le réseau de rues correspondant agrégé selon les noms de rues. c- Le graphe direct associé. d- Le graphe dual associé. Source : Hamaina et al. (2012).	34
Figure 1.2. (a) Empreinte du bâti. (b) Carte axiale résultante. (c) Indicateur d'accessibilité calculé sur la carte axiale. Source : Domingo (2016).....	36
Figure 1.3. (a) Un espace urbain fictif. (b) Carte axiale résultante. (c) Graphe linéaire ("line graph") correspondant. Source : Jiang & Claramunt (2004).	36
Figure 1.4. Le réseau du quartier de Sättra (a) et (b) son graphe correspondant. Note : Chaque nœud est étiqueté par le nom de la rue correspondante. Source : Jiang & Claramunt (2004).	38
Figure 1.5. (a) Premier algorithme (<i>Angular tolerance</i>) appliqué sur la rue 1, qui est ramifiée (au sommet D), et sur la rue 3, qui contient une boucle. (b) Deuxième algorithme (<i>The minimal reciprocal alignment</i>) : à l'intersection A, le segment 1 pourrait être associé à 3 et 2. L'angle le plus proche de π est formé avec le segment 3, mais les segments 3 et 4 correspondent à un angle réciproquement minimal, ils sont donc associés. Et les segments 1 et 2 sont associés. Le même raisonnement conduit aux mêmes associations quel que soit le premier segment considéré. Source : Courtat et al. (2011b).....	39
Figure 1.6. Illustration du chemin le plus court et du chemin le plus simple entre deux points de la ville d'Avignon intra-muros, en considérant le nombre de voies. Réalisée par : Estelle Degouys. Source : Lagesse (2015).	42
Figure 1.7. Mesure de centralité du réseau viaire de la ville d'Ahmedabad avec une approche directe. Dans cette figure, le coloriage rouge/bleu a été effectué sur les nœuds. (a) Proximité globale calculée sur l'ensemble du réseau ; (b) Proximité locale calculée sur un sous-graphe dont les nœuds sont à moins de 400 mètres du nœud étudié ; (c) Proximité locale : idem (b), mais avec une distance maximale de 200 mètres seulement. Source : Porta et al. (2006a).....	46
Figure 1.8. Approche directe : Quatre indicateurs de centralité (CC = proximité, CB = intercalation, CS = rectitude, CI = information) calculés sur le réseau viaire d'Ahmedabad représenté par un graphe direct (nœuds = intersections, arcs = routes). Source : Porta et al. (2006a).....	47
Figure 1.9. Approche duale : Quatre indicateurs de centralité (C ^C = proximité, C ^B = intercalation, C ^S = rectitude, C ^I = information) calculés sur le réseau viaire d'Ahmedabad représenté par un graphe dual (nœuds = routes, arcs = intersections). Source : Porta et al., 2006a.	47
Figure 1.10. Représentation simplifiée du modèle physique de la base de données géohistoriques COVADEO. Source : El Gouj et al. (2022).	55
Figure 1.11. Méthodologie de vectorisation du réseau viaire historique de Pontarlier à partir d'une carte de 1692. Source carte : Archives départementales de Besançon. Source des données vectorielles : BD TOPO 2019 (IGN).	55
Figure 1.12. Méthode de construction des voies sur un échantillon de réseau : (a) un échantillon de segments de rues au sens mathématique du terme (lignes droites entre deux points) entre un nœud et un point annexe, ou entre points annexes ; (b) construction d'un graphe comportant des arcs et des nœuds ; (c) un hypergraphe avec des voies formées par un alignement d'arcs continus, en se basant sur leur angle de déviation minimal et le seuil choisi $\theta_{\max} = 60^\circ$. Par exemple, en tenant compte que l'angle b entre l'arc 1 et l'arc 2 est inférieur à l'angle c entre l'arc 2 et l'arc 3, la voie 1 est construite par l'association de l'arc 1 et de l'arc 2. L'arc 3 forme une voie distincte à lui seul. Source : El Gouj et al. (2022).	57

Figure 1.13. Schémas illustrant le calcul des indicateurs (a) degré, (b) connectivité et (c) degré de desserte sur le même échantillon de réseau. (a) Le degré est le nombre de voies qui croisent la voie de référence V_{ref} , soit 4. (b) La connectivité est le nombre d'arcs qui croisent V_{ref} , soit 5. (c) Le degré de desserte est le nombre de voies qui croisent V_{ref} dans une intersection en X, soit 1. Source : El Gouj et al. (2022).....	58
Figure 1.14. Fenêtre du plugin Morpheo sur QGIS pour la construction des voies.	61
Figure 1.15. Fenêtre du plugin Morpheo sur QGIS pour le calcul des indicateurs.....	62
Figure 1.16. Variation de la zone de couverture du réseau viaire de Pontarlier à deux dates. (a) Le réseau viaire historique de Pontarlier en 1692 et le polygone correspondant à la couverture spatiale de la carte source. (b) Le réseau viaire historique de Pontarlier en 1842 et le polygone correspondant. (c) L'emprise spatiale commune entre les deux dates correspond au polygone bleu (le plus petit).....	65
Figure 1.17. Variation de la zone de couverture du réseau viaire de Dijon à deux dates. (a) Le réseau viaire historique de Dijon en 1867 et le polygone correspondant à la couverture spatiale de la carte source. (b) Le réseau viaire historique de Dijon en 1876 et le polygone correspondant. (c) L'emprise spatiale commune entre les deux dates correspond à l'intersection (en rouge) entre les deux polygones de couverture avec une emprise spatiale plus réduite par rapport à celle des deux dates.....	65
Figure 1.18. Le degré calculé sur (a) les arcs et (b) les voies ; la centralité de proximité calculée sur (c) les arcs et (d) les voies du réseau viaire historique de Dijon en 1790. Source : El Gouj et al. (2022).	77
Figure 2.1. Le degré calculé sur les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1944, (b) Besançon en 1937 et (c) Pontarlier en 1931. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs du degré des voies. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	83
Figure 2.2. L'espacement calculé sur les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1883, (b) Besançon en 1883 et (c) Pontarlier en 1842. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs de l'espacement des voies selon une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	85
Figure 2.3. L'orthogonalité calculée pour les réseaux viaires historiques de (a) Dijon en 1790, (b) Besançon en 1786 et (c) Pontarlier en 1692. Les histogrammes de densité représentent la distribution des valeurs d'orthogonalité. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	87
Figure 2.4. Degré de desserte calculé pour le réseau viaire historique de Dijon en (a) 1790, (b) 1883 et (c) 1944. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs du degré de desserte. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	90
Figure 2.5. Centralité d'intermédiarité calculée pour le réseau viaire historique de Besançon en (a) 1786, (b) 1883 et (c) 1937. Les histogrammes représentent la distribution du logarithme de la centralité d'intermédiarité des voies. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une	

estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	92
Figure 2.6. La centralité de proximité calculée sur les voies du réseau viaire historique de Pontarlier en (a) 1692, (b) 1842 et (c) 1931. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs. La courbe en trait discontinu noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les couleurs des barres des histogrammes correspondent à celles des classes des indicateurs sur la carte. Source : El Gouj et al. (2022).	94
Figure 2.7. Extrait de la carte de Cassini représentant le tracé des routes connectées au centre historique intramuros de Dijon. Source : www.geoportail.gouv.fr	96
Figure 2.8. Extrait de la carte d'Etat Major (1826 – 1866) pour le territoire autour de Dijon, représentant le tracé des routes principales et urbaines. Source : www.geoportail.gouv.fr	96
Figure 2.9. Le degré des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	97
Figure 2.10. La centralité d'intermédierité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	98
Figure 2.11. La centralité de proximité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	99
Figure 2.12. Routes nationales et départementales et autoroutes traversant l'agglomération de Dijon. Source : www.geoportail.gouv.fr	100
Figure 2.13. Le degré de desserte des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	101
Figure 2.14. L'orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	102
Figure 2.15. Délimitation géographique de la ville de Dijon. Source : www.dijon.fr	102
Figure 2.16. L'espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon en 2019.	103
Figure 2.17. Carte topographique du territoire autour de l'agglomération de Dijon. Source : www.fr-topographic-map.com	104
Figure 2.18. Extrait de la carte de Cassini représentant le tracé des routes connectées au centre-historique de Besançon. Source : www.geoportail.gouv.fr	104
Figure 2.19. Extrait de la carte d'Etat Major (1826 – 1866) pour le territoire autour de Besançon, représentant le tracé des routes principales et urbaines. Source : www.geoportail.gouv.fr	105
Figure 2.20. Le degré des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	106
Figure 2.21. La centralité d'intermédierité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	107
Figure 2.22. La centralité de proximité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	108
Figure 2.23. Le degré de desserte calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	109
Figure 2.24. Routes nationales et départementales et autoroutes traversant l'agglomération de Besançon. Source : www.geoportail.gouv.fr	110
Figure 2.25. L'orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	111
Figure 2.26. L'espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon en 2019.	111
Figure 2.27. Carte topographique du territoire autour de l'agglomération de Besançon Source : www.fr-topographic-map.com	112
Figure 2.28. Extrait de la carte de Cassini représentant le tracé des routes les plus anciennes connectant la France à la Suisse en traversant Pontarlier. Source : www.geoportail.gouv.fr	113
Figure 2.29. Extrait de la carte d'Etat Major (1826 – 1866) représentant le tracé des routes principales et urbaines au niveau de Pontarlier. Source : www.geoportail.gouv.fr	113

Figure 2.30. Photographie historique de la Rue des Salins, représentant le jour de marché. Source : www.estrepublicain.fr	114
Figure 2.31. Photographie historique de la Rue de Besançon, avec une continuité de rez-de-chaussée commerciaux. Source : www.delcamp.net	114
Figure 2.32. Degré des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.	115
Figure 2.33. Centralité d'intermédiarité calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.	117
Figure 2.34. Centralité de proximité calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.	117
Figure 2.35. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.	119
Figure 2.36. Routes nationales et départementales traversant l'agglomération de Pontarlier. Source : www.geoportail.gouv.fr	119
Figure 2.37. Plan réseau des transports en commun de Pontarlier. Source : www.ville-pontarlier.fr	120
Figure 2.38. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019	121
Figure 2.39. Délimitation géographique des cinq quartiers et des lieux d'intérêts symboliques associées à la ville de Pontarlier. Source : www.ville-pontarlier.fr	121
Figure 2.40. Espacement des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier en 2019.	123
Figure 2.41. Carte topographique : Pontarlier, Doubs, Bourgogne-Franche-Comté. Source : www.fr- fr.topographic-map.com	123
Figure 3.1. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard du degré et du degré de desserte entre 1690 et 1883.	128
Figure 3.2. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard du degré et du degré de desserte entre 1883 et 2019.	129
Figure 3.3. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1690 et 1883.	131
Figure 3.4. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de l'espacement et de l'orthogonalité entre 1883 et 2019.	132
Figure 3.5. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard du degré et du degré de desserte entre 1696 et 1878.	134
Figure 3.6. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard du degré et du degré de desserte entre 1878 et 2019.	135
Figure 3.7. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard l'espacement et de l'orthogonalité entre 1696 et 1878.	137
Figure 3.8. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard l'espacement et de l'orthogonalité entre 1878 et 2019.	138
Figure 3.9. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard du degré, du degré de desserte entre 1692 et 1921.	140
Figure 3.10. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard du degré, du degré de desserte entre 1921 et 2019.	141
Figure 3.11. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard l'espacement et de l'orthogonalité entre 1692 et 1921.	142
Figure 3.12. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard l'espacement et de l'orthogonalité entre 1921 et 2019.	143

Figure 3.13. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Dijon au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité entre 1690 et 1883.....	146
Figure 3.14. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Dijon au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1883 et 2019.....	147
Figure 3.15. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Besançon au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité entre 1696 et 1878.....	148
Figure 3.16. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Besançon au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1878 et 2019.....	149
Figure 3.17. Evolution du rang hiérarchique (normalisé) des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard de la centralité de proximité et la centralité d'intermédiarité entre 1692 et 1921.....	150
Figure 3.18. Evolution du rang hiérarchique des voies du réseau viaire de Pontarlier au regard de la centralité d'intermédiarité et de la centralité de proximité entre 1921 et 2019.....	151
Figure 3.19. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1690, 1790, 1839 et 1844, avec (a) un degré $D_{(i)} > D_{max} 3$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > B_{max} 10$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$	157
Figure 3.20. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1855, 1867, 1876 et 1883, avec (a) un degré $D_{(i)} > D_{max} 3$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > B_{max} 10$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$	158
Figure 3.21. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 1900, 1944, 2010 et 2019, avec (a) un degré $D_{(i)} > D_{max} 3$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > B_{max} 10$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$	159
Figure 3.22. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon en 2010 et 2019, avec (a) un degré $D_{(i)} > D_{max} 3$, (b) une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > B_{max} 10$ et (c) une centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$	160
Figure 3.23. Histogrammes de distribution des valeurs de la centralité d'intermédiarité des voies du réseau viaire de Dijon de 1690 à 2019. La courbe en trait noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	162
Figure 3.24. Histogrammes de distribution des valeurs de la centralité de proximité des voies du réseau viaire de Dijon de 1690 à 2019. La courbe en trait noir représente la courbe de densité (une estimation lissée de la distribution des données). Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	163
Figure 3.25. Nuages de points représentant le nombre de voies les plus centrales par rapport au nombre total des voies du réseau de Dijon de 1690 à 2019 (un point par date, coloré selon le siècle concerné) ; (a) selon le degré des voies, (b) selon la centralité d'intermédiarité, (c) selon la centralité de proximité. Note : les valeurs-seuils de centralité sont les mêmes que celles définies en section 3.2.1 (degré : $D_{(i)} > D_{max} 3$; centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > B_{max} 10$, et centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$).....	164
Figure 3.26. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Dijon en 1790, 1844, 1883, 1944 et 2019.....	166
Figure 3.27. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Besançon en 1786, 1848, 1883, 1937 et 2019.....	166

Figure 3.28. Extraction des voies principales (en termes de degré) du réseau viaire de Pontarlier en 1692, 1760, 1842, 1931 et 2019.....	166
Figure 3.29. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Dijon entre 1790 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).....	167
Figure 3.30. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Besançon entre 1786 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).....	167
Figure 3.31. Squelette initial pérenne du réseau viaire de Pontarlier entre 1692 et 2019 (les structures identiques entre chaque paire de dates sont représentées en rouge).....	167
Figure 3.32. Evolution du nombre (a) de nouveaux nœuds, (b) de nouveaux arcs, (c) de nouvelles voies dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.....	168
Figure 3.33. Nouveaux segments apparus dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps (entre 1690 et 2019).....	170
Figure 3.34. Corrélacion entre la centralité de proximité et le degré de desserte des nouvelles voies apparues dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.....	171
Figure 3.35. Relation entre l'évolution entre deux dates de la position hiérarchique (rang normalisé) en termes de degré (sur l'axe des abscisses) et l'évolution de la position hiérarchique pour d'autres indicateurs (sur l'axe des ordonnées) des voies persistantes au cours du temps du réseau viaire de Dijon.....	174
Figure 3.36. Cartographie du différentiel de la centralité de proximité relatif aux changements structurels du réseau viaire de Dijon (a) entre 1790 et 1883, (b) entre 1883 et 1944, (c) entre 1944 et 2019.....	176
Figure 4.1. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N. (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N. (c) Nombre de voies V en fonction du nombre d'arcs A.....	187
Figure 4.2. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N. (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A. (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V.....	188
Figure 4.3. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N. (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N. (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A.....	189
Figure 4.4. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N. (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A. (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V.....	190
Figure 4.5. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N. (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N. (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A.....	191
Figure 4.6. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a)	

L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N . (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A . (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V	192
Figure 4.7. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Dijon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire. .	194
Figure 4.8. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Besançon au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire. .	195
Figure 4.9. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe, la longueur totale et l'aire de l'emprise spatiale du réseau viaire de Pontarlier au travers le temps, et leur ajustement linéaire (ligne bleue) sur une échelle logarithmique. (a) Nombre de nœuds N en fonction de l'aire. (b) Nombre d'arcs A en fonction de l'aire. (c) Nombre de voies V en fonction de l'aire. (d) Longueur totale du réseau en fonction de l'aire.	196
Figure 4.10. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).....	198
Figure 4.11. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Besançon à 12 dates (entre 1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	199
Figure 4.12. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire de Pontarlier à 10 dates (entre 1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	200
Figure 4.13. Ajustement des distributions de degré des voies du réseau viaire de Dijon avec des lois de puissance, log-normales et de Poisson en appliquant la méthode du maximum de vraisemblance.....	201
Figure 4.14. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viaire de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.....	202
Figure 4.15. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viaire de Besançon à 12 dates (entre 1696 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.	202
Figure 4.16. (a) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (b) nombre de nœuds de degré $k=3$ par rapport au nombre total des nœuds du réseau viaire de Dijon à 10 dates (entre 1692 et 2019). La droite (en bleu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.....	203
Figure 4.17. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Dijon entre 1690 et 2019.	204

Figure 4.18. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Besançon entre 1696 et 2019.....	205
Figure 4.19. Nuages de points représentant l'évolution du ratio r_N entre le nombre de nœuds de degré $k=1$ et $k=3$, et le nombre total de nœuds (hors nœuds de degré $k=2$) du réseau viaire de Dijon entre 1692 et 2019.....	206
Figure 4.20. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	208
Figure 4.21. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Besançon à 12 dates (1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	209
Figure 4.22. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies du réseau de Pontarlier à 10 dates (1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	210
Figure 4.23. Ajustement des distributions de la longueur des voies du réseau de Dijon à des lois de puissance et log-normales en appliquant la méthode du maximum de vraisemblance.....	211
Figure 4.24. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Dijon à 12 dates (entre 1690 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).....	212
Figure 4.25. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Besançon à 12 dates (1696 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).....	213
Figure 4.26. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies du réseau de Pontarlier à 10 dates (1692 et 2019) (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).....	214
Figure 5.1. Table chorématique. Source : Brunet, (1986).....	227
Figure 5.2. Les chorèmes urbains. Source : Baro (2015).	228
Figure 5.3. Représentation schématique de dix villes européennes. Source : Borsdorf (2004)	229
Figure 5.4. Quelques formes archétypales de villes et leurs possibles évolutions. Source : Allain (2004)	230
Figure 5.5. Plan hippodaméen de Timgad (Algérie). Source : Mattingly & Salmon (2002).....	232
Figure 5.6. Plan de la ville de Karlsruhe (Allemagne) en 1827 réalisé par T. Bradley.	232
Figure 5.7. Plan du projet de la cité linéaire (1913) d'Arturo Soria. Source : Larraga & Ramirez (2018).	233
Figure 5.8. Plan radio-quadrillé des réseaux viaires et parcellaires de Brie-Comte-Robert (Seine-et-Marne), d'après un cliché IGN de 1956. Source: Watteaux, 2003.	233

Figure 5.9. Réseaux viaires de différentes villes à la même échelle sur une fenêtre carrée de taille identique (1km ²). Source : (Jacobs, 1993).	234
Figure 5.10. Exemples de trames viaires simplifiées en Europe et aux Etats-Unis (sélection d'agglomérations comprises entre 1 et 3 millions d'habitants). Source : Bretagnolle et Delisle (2010).....	234
Figure 5.11. Exemples de motifs de réseaux viaires. Source : Marshall (2005).	236
Figure 5.12. Taxonomie des motifs de réseaux viaires. Source : Marshall (2005).	237
Figure 5.13. Exemple de deux structures, l'une arborescente (<i>tree</i>) et l'autre en grille (<i>grid</i>), à deux échelles (micro et macro). Source : Marshall (2005).....	237
Figure 5.14. Les quatre types de réseaux viaires A, B, C et D de la Figure 5.13 présentés comme s'ils s'étendaient du centre de la ville (à gauche) à la périphérie (à droite). Source : Marshall (2005).	238
Figure 5.15. Sélection de motifs fréquents de rues. Source : Perret (2006).	238
Figure 5.16. Quatre motifs de trames viaires (à la même échelle) identifiés en comparant le facteur de formes des îlots : (a) Buenos Aires, (b) Athènes, (c) Nouvelle-Orléans, (d) Mogadiscio. Source : Louf et Barthelemy (2014).	240
Figure 5.17. Six motifs de réseaux viaires. (a) motif régulier, (b) motif irrégulier, (c) motif hybride, (d) motif basé sur une grille, (e) motif basé sur un arbre ou une étoile, et (f) motif cellulaire. Source : Qi et Li (2015). .	241
Figure 5.18. Réseaux de rues et histogrammes polaires correspondants mettant en évidence l'ordre d'orientation des rues des villes de Manhattan (à gauche) et Boston (à droite). Source : Boeing (2019). 241	241
Figure 5.19. Taxonomie des segments de rues ajoutés pas à pas au réseau viaire (à gauche) et les morphotypes correspondants à différentes étapes d'évolution (non incrémentale) (à droite). Sur les images de droite, les lignes grises en pointillé représentent le réseau existant, les lignes noires épaisses sont les nouvelles rues, les cercles noirs sont les culs-de-sac, les cercles blancs les jonctions internes (nœuds d'intersection) et les cercles gris les jonctions externes (nœuds d'extrémité). Source : Serra et al. (2017).....	244
Figure 6.1. (a) Distribution statistique (en nuage de points) des valeurs selon le croisement des quartiles. (b) Carte représentant le croisement deux à deux des indicateurs de degré et d'orthogonalité. Réseau viaire de Dijon en 1944. Les différentes couleurs se rapportent aux quartiles en termes d'orthogonalité. L'épaisseur sur la carte et l'intensité des couleurs sur le graphique se rapportent au degré.....	250
Figure 6.2. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'orthogonalité et l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon en 1944.	253
Figure 6.3. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'espacement et du degré des voies du réseau viaire de Dijon en 1944.....	256
Figure 6.4. Motifs élémentaires identifiés à partir du croisement des valeurs de l'orthogonalité et du degré des voies du réseau viaire de Dijon en 1944.....	257
Figure 6.5. Exemple de l'évolution du rang normalisé de voies concentriques par rapport à chacun des trois indicateurs considérés.....	260
Figure 6.6. Illustration des schémas d'évolution des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier à partir des morphotypes associés et de leur ordre d'apparition.....	271
Figure 6.7. Dendrogramme représentant les résultats de la classification ascendante hiérarchique des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier, en 2019, avec des partitions entre 2 et 8 classes.....	274

Figure 6.8. Diagrammes représentant l'inertie entre les classes résultant de la classification ascendante hiérarchique des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier, en 2019, avec des partitions entre 2 et 8 classes	274
Figure 6.9. Voies de la classe 8 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies concentriques. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	276
Figure 6.10. Voies de la classe 7 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies radiales. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).	277
Figure 6.11. Voies de la classe 6 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies convergentes/divergentes. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	278
Figure 6.12. Voies de la classe 5 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies orthogonales/diagonales. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	279
Figure 6.13. Voies de la classe 4 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies ramifiées. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	280
Figure 6.14. Voies de la classe 3 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies intercalaires. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	281
Figure 6.15. Voies de la classe 2 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant principalement aux voies cellulaires. Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	282
Figure 6.16. Voies de la classe 1 résultant de la CAH des voies des réseaux viaires de (a) Dijon, (b) Besançon et (c) Pontarlier en 2019, correspondant à un nouveau morphotype de voies <i>articulaires</i> . Source des données viaires : BD TOPO 2019 (IGN).....	283
Figure 7.1. Le modèle de Helbing et al. (1997). Comparaison des différents types de systèmes de chemins entre quatre endroits : le système de chemins directs (représenté par les lignes noires) correspond aux connexions les plus courtes entre tous les points d'origine et les destinations. Source : Helbing et al. (1997).	294
Figure 7.2. Le modèle de Yamins et al. (2003). L'évolution d'un réseau viaire à partir d'une zone urbanisée sans routes principales. La croissance des voies radiales et des rocade est principalement contrôlée par l'équilibre entre le coût de la construction de routes à travers des zones urbanisées denses et le coût de la construction de routes plus longues et plus sinueuses. Source : Yamins et al. (2003).	294
Figure 7.3. Le modèle de Levinson & Zhang (2004). Les impacts des conditions initiales et des contraintes sur la croissance du réseau.	295
Figure 7.4. Le modèle de Levinson et Yerra (2006) Distribution spatiale d'une vitesse initiale aléatoire (à gauche). Distribution spatiale des vitesses pour le réseau après avoir atteint l'équilibre (à droite). La couleur et l'épaisseur du lien est associée à la vitesse ou aux flux de déplacement.	296

Figure 7.5. Le modèle de Xie et Levinson (2009). Etapes de croissance incrémentale du réseau. (a) Le réseau initial ; (b) Expérience A, itération 4 ; (c) Expérience A, itération 8 ; (d) Expérience A, itération 12. (e) Expérience B, itération 4 ; (f) Expérience B, itération 8 ; (g) Expérience B, itération 12.	296
Figure 7.6. Cartes utilisées dans CityEngine (Parish et Müller, 2001). A gauche : données d'entrée : hydrographie, relief, densité de population. A droite : réseau routier généré à partir des données. Source : Perret (2006).	299
Figure 7.7. Modèle StreetGAN. (1) Aperçu des différents styles de réseaux routiers utilisés pour entraîner le modèle : (a) Synthétique irrégulier, (b) Cellino San Marco irrégulier, (c) Berlin irrégulier, (d) Synthétique suburbain, (e) Portland avec autoroutes. (2). Différents échantillons générés par le modèle entraîné à partir des différents styles de réseaux routiers (1). Synthétique irrégulier (a) et (b), Cellino San Marco (c) et (d), Berlin irrégulier (e) et (f), Synthétique suburbain (g) et (h). D'après : Hartmann et al. (2017)	300
Figure 7.8. Modèle de Kempiska et Murcio (2019). Le modèle prend en entrée une image du réseau routier (gauche), la condense en un encodage de dimension inférieure (milieu) et finalement reconstitue l'image à partir de l'encodage (droite). Source : Kempinska et Murcio (2019).	300
Figure 7.9. Modèle de Kempiska et Murcio (2019). Réseau viaire reconstruit (en bas) à partir des images originales (en haut) à l'aide du modèle entraîné. Source : Kempinska et Murcio (2019)	300
Figure 7.10. Résultats obtenus avec le modèle DeepStreet sur le réseau routier de Barcelone. Source : Fang et al. (2020).....	302
Figure 7.11. Modèle de Wilson et al. (2019) : processus de génération procédurale. (a) données d'entrées. (b) Aggrégation des données d'entrées. (c) Génération de parcs et de parcelles (d) Génération de typologie bâtie. Source : L. Wilson et al. (2019).....	304
Figure 7.12. Modèle de Nagy et al. (2018). Comparaison des conceptions pour des cas de performance extrêmes. La zone peut être configurée en différents aménagements, tels que des espaces verts publics (représentés en vert), des habitations individuelles, ainsi que des immeubles (en bleu), de même que des rues et des chemins piétons.....	305
Figure 7.13. Etapes de simulation à partir du modèle paramétrique pour générer chaque option de conception. Source : (Nagy et al., 2018).....	305
Figure 7.14. Processus génératifs du modèle "Urbano". (1) Configuration primaire avec la grille dense. (2) Résultat des scores des rues à partir des données de trajets simulés. Apparition progressive des routes principales présentant un score élevé (en bas). (3) Génération d'un nouveau réseau de rues à partir des rues les plus fréquentées (en fusionnant les liens mineurs et en convertissant les intersections les plus importantes en places potentielles). (4) Analyse de la distribution des équipements et services. (5) Calcul du score de marche final basé sur la grille de coordonnées. (6) Calcul de la densité d'équipements et de services dans les îlots créés par simulation. Source : Y. Yang et al. (2020).	308
Figure 7.15. Trois subdivisions de rues simulées avec le modèle de Rakha et Reinhart (2012). Source : Rakha et Reinhart (2012).....	309
Figure 7.16. Les différentes échelles considérées dans le modèle GeOpenSim : ville, quartier, îlot, bâtiment et route. Source : Perret et al. (2010).....	310
Figure 7.17. Différentes étapes du processus hiérarchique de modélisation de GeoOpenSim : a. zones urbanisées (en rouge) créées lors de l'étape 1, b. îlots urbains (en rouge) créés à partir du réseau viaire	

(en blanc) lors de l'étape 2, c. îlots, bâtiments (en rouge foncé) et espaces vides créés lors de l'étape 5. Source : Perret et al. (2009).....	310
Figure 7.18. Modèle GeOpenSim. Les règles d'évolution fixent une valeur désirée de densité pour le bloc urbain. Après l'application des règles d'évolution. Source : Curie et al. (2010).	310
Figure 7.19. Subdivision d'une parcelle effectuée avec le modèle de Dahal et Chow (2014). a) parcelle candidate, b) îlots et rues modélisés, c) subdivision de la parcelle observée en réalité, et d) une ortho- photo de parcelle. Source : Dahal et Chow (2014).....	312
Figure 7.20. Exemples de parcelles et de rues simulées avec le modèle Parcel Manager. Source : Colomb et al. (2022).	312
Figure 7.21. Modèle Mondrian générant de nouvelles voies par découpages successifs. La coloration des voies traduit leur distance topologique calculée sur l'ensemble du réseau. Source : Perna et al. (2011).	312
Figure 7.22. Exploration de l'espace des paramètres du modèle de Pousse. Source : Pousse (2020).....	313
Figure 7.23. Schéma de l'évolution du réseau viaire d'après C. Yang et al. (2011). Chaque nouveau nœud généré (représenté par un anneau) est connecté au réseau existant, soit au nœud le plus proche (cercle gris), soit par une projection orthogonale qui implique la création d'un nouveau nœud (représenté par un cercle blanc) sur le réseau existant. Source : C. Yang et al. (2011).	317
Figure 7.24. Réseau simulé de la nouvelle zone de Pudong à différentes dates. Source : C. Yang et al. (2011).	317
Figure 7.25. Structures topologiques du réseau routier urbain simulé avec et sans l'effet de la répartition de la population. Les axes X-Y correspondent aux coordonnées spatiales des différentes populations sur la grille. D'après : Zhao et al. (2016).....	318
Figure 7.26. Influence de la population sur la forme du réseau viaire d'après Yu (2019). Quatre distributions de population et structures de réseau viaire simulées sous différentes combinaisons de paramètres : structures (a) centralisées, (b) regroupées, (c) décentralisées et (d) dispersées.....	318
Figure 7.27. Deux applications du modèle d'Al Sayed et al. (2022). Les réseaux à droite de chaque carte sont produits en comblant le vide de Central Park à Manhattan et la zone de la Citadelle à Barcelone (représentés par les deux encadrés noirs), suivant une structure en grille similaire à celle de leurs zones environnantes. L'intégration angulaire des segments (ASI : "Angular segment integration") est calculée sur les réseaux initiaux et ceux résultants des simulations. Source : Al Sayed et al. (2022).	320
Figure 7.28. Structures de réseaux optimisé. Les réseaux (a) et (d) ressemblent respectivement à des réseaux aériens et routiers, tandis que (b) et (c) présentent une structure intermédiaire entre les deux extrêmes. Source : Gastner et Newman (2006c).	322
Figure 7.29. Sept graphes orientés de réseaux routiers, où la complexité augmente de (a) à (g). Source : Goss et al. (2019).....	323
Figure 7.30. Les graphes orientés d'un réseau routier avec des niveaux de réduction progressifs du nombre de nœuds. Source : Goss et al. (2019).	323
Figure 7.31. Modèle de Bottinelli et al. (2017). Le réseau évolue par ajout aléatoire d'un seul nouveau nœud par itération. Le nouveau nœud est soit connecté au nœud le plus proche, soit le réseau est restructuré pour minimiser la longueur totale des liens. Source : Bottinelli et al. (2017).	323

Figure 7.32. Modèle de Barthelemy et Flammini (2008) : M est le point le plus proche des nœuds A et B. Un segment de rue se développe du point M jusqu'au point M' afin de réduire au maximum la distance cumulée avec les nœuds A et B du réseau existant. Source : Barthélemy et Flammini (2008).....	324
Figure 7.33. Modèle de Barthelemy et Flammini (2008). Evolution du réseau viaire à différents instants t : (a) t = 1 000, (b) t = 2 000, (c) t = 3 000, (d) t = 4 000. Au fil des itérations le réseau évolue d'abord en une structure arborescente, ensuite des boucles apparaissent pour des valeurs de densité plus élevées. Source : Barthélemy et Flammini (2008).....	325
Figure 7.34. Réseaux viaires générés à partir d'un unique nœud initial, dans une fenêtre de simulation délimitée, avec une variation des valeurs de paramètres du modèle. Source : Rui et al. (2013)	326
Figure 7.35. Modèle de Courtat (2012) : quatre étapes (a, b, c, d) du développement d'une ville, (e) réseau résultant de la simulation. Source : Courtat (2012)	327
Figure 7.36. Interactions entre les nœuds et le graphe dans le générateur de graphe planaire de réaction-diffusion. Source: Tirico et al. (2019).....	327
Figure 8.1. (a) Un graphe géométrique. (b) Un graphe rectiligne (rectification de la sinuosité). (c) Un graphe planaire (suppression des superpositions des arcs). D'après Courtat et al. (2011c).....	339
Figure 8.2. Un point x (disque rouge) et sa projection orthogonale (cercle en pointillé). (a) représente la projection orthogonale de x sur un segment existant. (b) Si la projection orthogonale de x n'atteint pas un segment existant, x est projeté sur le nœud existant le plus proche. Illustration réalisée par Clément Sebastio et modifiée par nos soins.....	340
Figure 8.3. Champ de potentiel de tous les points x par rapport à un seul objet h en l'absence d'effet angulaire. L'objet h est un point situé au centre du disque jaune. Source : Graftiaux (2021).....	342
Figure 8.4. Champ de potentiel avec l'effet angulaire de tous les points x par rapport à un seul objet h situé au centre du disque jaune. Source : (Graftiaux, (2021).....	342
Figure 8.5. Champ de potentiel d'un petit réseau. En bleu, les zones très favorables à la localisation d'un nouveau nœud. En vert, les zones moins favorables mais possibles pour la localisation d'un nouveau nœud. En jaune, les zones défavorables, qui se situent à proximité des segments initiaux ainsi que sur les diagonales. Source : Graftiaux (2021).	343
Figure 8.6. Voisinage visible VN d'un nouveau nœud représenté par des segments de couleur bleue : (a) ensemble des nœuds visibles. (b) ensemble des projections orthogonales visibles.	345
Figure 8.7. (a) Triangulation de Delaunay d'un graphe. (b) Le graphe de voisinage relatif correspondant au graphe de Delaunay (a). Figure simplifiée inspirée de Sharma et al.(2015).....	345
Figure 8.8. Suppression de toute projection orthogonale très proche d'un nœud existant (dans un rayon $c \times r_0$ d'un nœud visible depuis le nouveau nœud).	346
Figure 8.9. Simulations faites avec le modèle de Courtat (2012) pour différentes valeurs des paramètres d'organisation P_e et de construction ω . Le rayon de rejet est $r_0 = 10$ m, il n'y a pas d'étalement : $k_{ext} = 0$, le nombre de nœuds est $N = 80$ et la fenêtre de simulation correspond à un carré de côté 400 m. Le segment rouge représente un segment initial de rue de 20 mètres. Source : Courtat (2012).	350
Figure 8.10. Trois réseaux simulés avec le modèle de Courtat (2012) avec différentes valeurs du paramètre d'étalement η . Le paramètre η est égal à (a) 0,3, (b) 0,6 et (c) 0,9. Tous les autres paramètres sont identiques pour les trois simulations. Source : Graftiaux (2021).	350

Figure 8.11. Trois réseaux simulés avec le modèle de Courtat (2012) avec différentes valeurs du facteur d'étalement k_{ext} . De gauche à droite, le facteur k_{ext} est de 1, 5 et 10. Tous les autres paramètres sont identiques pour les trois simulations. Source : Graftiaux (2021).	351
Figure 8.12. Le réseau viaire d'une ville simulé à partir de deux éléments structurants longs et perpendiculaires et avec des valeurs des paramètres d'étalement variables au cours du temps. Le centre historique de la ville a été construit avec un faible paramètre de construction et sans étalement ($\omega = 0,2$ et $f_{ext} = 0$) pour rappeler l'aspect arborescent d'un souk central dans la Casbah. Ensuite, les paramètres sont modifiés à $\omega = 0,8$ et $f_{ext} = 0,15$, ce qui crée une couronne industrielle. Le réseau simulé est nettement circulaire bien que les éléments structurants initiaux soient longs et perpendiculaires. Source : Courtat (2012).	351
Figure 8.13. La distribution du logarithme des longueurs des rues pour deux réseaux viaires simulés. Source : Courtat (2012).	352
Figure 8.14. Récapitulatif des morphotypes de voies possibles et impossibles à simuler avec le modèle de Courtat (2012)	356
Figure 8.15. Connexion du nouveau nœud avec un attachement préférentiel selon le degré des voies.....	361
Figure 8.16. Restrictions pour l'angle d'intersection A_i (en bleu), entre le nouveau nœud (en vert) et tous les segments du réseau (en trait noir) et, pour l'angle de séparation A_s (en rouge), entre tous les segments possibles (en traits discontinus verts).	362
Figure 8.17. Différentes possibilités de connexions du nouveau nœud qui peuvent être retreint par l'angle d'intersection A_i et l'angle de séparation A_s	363
Figure 8.18. Possibilités de connexions du nouveau nœud avec un rattachement aux nœuds d'extrémités....	364
Figure 8.19. Mécanismes de connexion d'un nouveau nœud au réseau existant intégrés dans WayMorph. A₁ : Arc(s) créé(s) avec une préférence pour les projections orthogonales avec le paramètre O_p . A₂ : Arc(s) créé(s) avec une préférence pour les nœuds d'extrémité avec le paramètre E_{pp} . A₃ : Arc créé avec un attachement préférentiel selon le degré de voies avec le paramètre W_p . A₄ : Arc créé selon le mécanisme déjà intégré dans le modèle de Courtat (2012).	367
Figure 8.20. Exemple d'outputs du modèle WayMorph.	370
Figure 8.21. Interface du modèle WayMorph, avec la fenêtre pour la définition des valeurs des paramètres .	371
Figure 8.22. Exemple de distribution statistique créée à l'issue d'une simulation.	372
Figure 8.23. Test manuel sur le modèle WayMorph des possibilités de connexion d'un nouveau nœud avec l'activation alternée des paramètres de choix binaires. (a) $W_p = 1, E_{pp} = 1, O_p = 0, W_p = 0, E_{pp} = 1, O_p = 1$, (c) $W_p = 0, E_{pp} = 0, O_p = 1$. En vert, le(s) segment(s) créé(s). En bleu, les segments éliminés par la triangulation Delaunay. En jaune, le(s) segment(s) éliminé(s) par la restriction d'angle de séparation A_s . En orange, les segments éliminés par la restriction de l'angle d'intersection A_i	374
Figure 9.1. Nombre de segments du graphe viaire pour chaque réplcation d'une simulation avec $P_e = 0.5$	388
Figure 9.2. Nombre de nœuds du graphe viaire pour chaque réplcation d'une simulation avec $P_e = 0.5$	388
Figure 9.3. Nombre de voies du graphe viaire pour chaque réplcation d'une simulation avec $P_e = 0.5$	388
Figure 9.4. Corrélation linéaire entre les propriétés du graphe viaire pour chaque réplcation d'une simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Nombre de segments et nombre de voies. (b) Nombre de nœuds et nombres de voies. (c) Nombre de nœuds et nombre de segments.	389

Figure 9.5. Courbes de densité (courbes de probabilité) estimant la distribution des valeurs (a) du degré des voies et (b) de la longueur des voies pour chaque réplication d'une simulation avec $P_e = 0.5$. Chaque courbe correspond à une réplication.	390
Figure 9.6. Variabilité des résultats entre les 100 réplifications de la simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Coefficient de variation (en %) des propriétés du graphe. (b) Dispersion statistique du nombre de voies. (c) Dispersion statistique du nombre de segments. (d) Dispersion statistique du nombre de nœuds.....	393
Figure 9.7. Variabilité des résultats entre les 100 réplifications de la simulation avec $P_e = 0.5$. (a) Coefficient de variation (en %) des médianes d'indicateurs caractérisant les voies. (b) Dispersion statistique de la médiane du degré des voies. (c) Dispersion statistique de la médiane de la longueur des voies.	394
Figure 9.8. Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 tirages d'échantillons selon la taille R de l'échantillon - Propriétés des voies.	396
Figure 9.9. Evolution des valeurs de coefficients de variation pour les 1000 tirages d'échantillons selon la taille R de l'échantillon - Propriétés du graphe viaire.	397
Figure 9.10. Présentation et lecture des résultats de l'analyse de sensibilité selon la nature du résultat de simulation analysé. Figure adaptée de Hirtzel (2015).....	402
Figure 9.11. Réseaux d'initialisation testés.....	404
Figure 9.12. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre d'organisation P_e	405
Figure 9.13. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	406
Figure 9.14. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e	406
Figure 9.15. Sensibilité de la distribution (a) du degré (a) et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'organisation P_e	406
Figure 9.16. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre de construction ω	408
Figure 9.17. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre construction ω : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.....	408
Figure 9.18. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre construction ω	408
Figure 9.19. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre construction ω	409
Figure 9.20. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la distance de répulsion (1) $r_0 = 10$; (2) $r_0 = 50$; (3) $r_0 = 100$; (4) $r_0 = 150$ et (5) $r_0 = 200$	410
Figure 9.21. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0 : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	410
Figure 9.22. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0	411
Figure 9.23. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la distance de répulsion r_0	411
Figure 9.24. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du paramètre de compacité (1) $\eta = 0,2$, (2) $\eta = 0,4$; 3 $\eta = 0,6$; 4 $\eta = 0,8$ et 5 $\eta = 1,2$	412

Figure 9.25. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du paramètre de compacité η : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	413
Figure 9.26. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre de compacité η	413
Figure 9.27. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre de compacité η	413
Figure 9.28. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la longueur maximale avec (1) $l_{max} = 200$; (2) $l_{max} = 400$; (3) $l_{max} = 600$; (4) $l_{max} = 800$ et (5) $l_{max} = 1000$	415
Figure 9.29. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	415
Figure 9.30. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max}	415
Figure 9.31. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la longueur maximale l_{max}	416
Figure 9.32. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} avec (1) $k_{ext} = 1$; (2) $k_{ext} = 3$; (3) $k_{ext} = 5$; (4) $k_{ext} = 7$ et (5) $k_{ext} = 10$	417
Figure 9.33. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs du facteur d'étalement k_{ext} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	417
Figure 9.34. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du facteur d'étalement k_{ext}	417
Figure 9.35. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs du paramètre d'étalement k_{ext}	418
Figure 9.36. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} avec (1) $f_{ext} = 1$; (2) $f_{ext} = 3$; (3) $f_{ext} = 5$; (4) $f_{ext} = 7$ et (5) $f_{ext} = 10$	419
Figure 9.37. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext} : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	419
Figure 9.38. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext}	419
Figure 9.39. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de la fréquence d'étalement f_{ext}	420
Figure 9.40. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i avec (1) $A_i = 20$; (2) $A_i = 30$; (3) $A_i = 40$; (4) $A_i = 60$ et (5) $A_i = 80$	421
Figure 9.41. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	421
Figure 9.42. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i	422
Figure 9.43. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum d'intersection A_i	422
Figure 9.44. Graphes viaires simulés dans le cadre des tests des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s avec (1) $A_s = 20$; (2) $A_s = 30$; (3) $A_s = 45$; (4) $A_s = 60$ et (5) $A_s = 90$	423

Figure 9.45. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s : (a) nombre de voies, (b) nombre de nœuds, (c) nombre de segments.	423
Figure 9.46. Sensibilité des médianes (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s	423
Figure 9.47. Sensibilité de la distribution (a) du degré et (b) de la longueur des voies à une modification des valeurs de l'angle minimum de séparation A_s	424
Figure 9.48. Graphes viaires simulés avec différents initiateurs pour le modèle.	427
Figure 9.49. Sensibilité des propriétés des graphes viaires simulés au réseau d'initialisation du modèle.	427
Figure 9.50. Sensibilité des médianes du degré (a) et de la longueur (b) des voies au réseau d'initialisation du modèle.	428
Figure 9.51. Sensibilité de la distribution du degré (a) et de la longueur (b) des voies au réseau d'initialisation du modèle.	428
Figure 9.52. Illustration de la simulation de voies radiales/linéaires (à partir d'un réseau d'initialisation composé de deux segments croisés) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	434
Figure 9.53. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$	435
Figure 9.54. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$	435
Figure 9.55. Simulation de voies radiales/linéaires à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 400$ et $l_{max} = 2000$	436
Figure 9.56. Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir d'un réseau d'initialisation composé de deux segments croisés), avec les valeurs de paramètres correspondantes.	437
Figure 9.57. Illustration de la simulation de voies convergentes/divergentes (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires et une voie concentrique), avec les valeurs de paramètres correspondantes.	439
Figure 9.58. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$	439
Figure 9.59. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$	440
Figure 9.60. Simulation de voies convergentes/divergentes à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 250$ et $l_{max} = 500$	440
Figure 9.61. Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	442
Figure 9.62. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	443
Figure 9.63. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	443
Figure 9.64. Simulation de voies ramifiées à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	444

Figure 9.65. Illustration de la simulation de voies orthogonales/diagonales (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	445
Figure 9.66. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$	446
Figure 9.67. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$	446
Figure 9.68. Simulation de voies orthogonales/diagonales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 400$	447
Figure 9.69. Illustration de la simulation de voies transversales (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	448
Figure 9.70. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	449
Figure 9.71. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	449
Figure 9.72. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	450
Figure 9.73. Illustration de la simulation de voies intercalaires (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	451
Figure 9.74. Simulation de voies transversales (à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	452
Figure 9.75. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	452
Figure 9.76. Simulation de voies transversales à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 200$ et $l_{max} = 800$	452
Figure 9.77. Illustration de la simulation de voies cellulaires (à partir d'un réseau initial (en noir)) avec les valeurs de paramètres correspondantes.	453
Figure 9.78. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Dijon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	454
Figure 9.79. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Besançon (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	454
Figure 9.80. Simulation de voies cellulaires à partir du squelette du réseau de Pontarlier (en noir), avec $r_0 = 100$ et $l_{max} = 400$	455
Figure 10.1. Formes de villes simples définies par Philippe Bonnin. Source : Dubois & Meister (2022)	461
Figure 10.2. Association des formes de villes selon leur similitudes. Source : Dubois & Meister (2022)	461
Figure 10.3. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Médina". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de la Médina de Marrakech (Maroc).	465
Figure 10.4. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Médina"	467
Figure 10.5. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme " Village rue". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire	

résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Diane-Capelle (France).....	469
Figure 10.6. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Village-rue".....	470
Figure 10.7. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Rue-Plume". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la séquence 2 de la simulation (les nouveaux segments sont représentés en vert). (3) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 3 sont représentés en vert. (3) Réseau réel du centre historique de Bénévent (Italie).....	472
Figure 10.8. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Rue-plume".	473
Figure 10.9. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Fuseau quadrillée". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (le segment d'initialisation est représenté en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Monségur (France).....	475
Figure 10.10. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Fuseau-quadrillée".	476
Figure 10.11. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Quadrillée". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 2 sont représentés en vert. (3) Réseau réel de Carthagène (Espagne).....	478
Figure 10.12. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Quadrillée".	479
Figure 10.13. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Quadrillée avec enceinte". (1) Graphe viaire résultant de la séquence 1 de la simulation (les segments d'initialisation sont représentés en rouge). (2) Graphe viaire résultant de la séquence 2 de la simulation (les nouveaux segments sont représentés en vert). (3) Graphe viaire résultant de la simulation. Les segments générés lors de la séquence 3 sont représentés en vert. (3) Réseau réel du centre historique d'Aigues-Mortes (France).....	481
Figure 10.14. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Quadrillée avec enceinte".	482
Figure 10.15. Simulation d'un réseau viaire correspondant à la forme "Radio-quadrillée". (1), (2), (3), (4) et (5) Graphes viaires résultants respectivement des séquences 1, 2, 3, 4 et 5 de la simulation. Les segments d'initialisation sont représentés en rouge sur le premier réseau (1), et les nouveaux segments sont représentés en vert. (6) Graphe viaire résultant de la simulation. (7) Réseau réel de Vitry-le-François (France).	485
Figure 10.16. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Radio-quadrillée".....	486
Figure 10.17. Simulation d'un réseau viaire de forme "Radioconcentrique". (1), (2), (3), (4) et (5) Graphes viaires résultants respectivement des séquences 1, 2, 3, 4 et 5 de la simulation. Les segments d'initialisation sont représentés en rouge, et les nouveaux segments sont représentés en vert. (6) Graphe viaire résultant de la simulation. (7) Réseau réel de Brive-la-Gaillarde (France).	489
Figure 10.18. Indicateurs caractérisant les voies du réseau simulé de forme "Radioconcentrique".	490
Figure 10.19. Histogrammes de la distribution du degré des nœuds calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).....	493

Figure 10.20. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	494
Figure 10.21. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	495
Figure 10.22. Histogrammes de la distribution de l'espacement calculé sur les réseaux simulés des différentes formes de villes simples. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	496
Figure 10.23. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur les réseaux simulés de différentes formes de villes. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.	498
Figure 10.24. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale des hypergraphes associés aux réseaux simulés de différentes formes de villes, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (2) Le nombre de voies en fonction du nombre de nœuds.....	498
Figure 10.25. (a) Ville diffuse, (b) Ville couloir et (c) Ville compacte. Source : Borrego et al., (2006).	500
Figure 10.26. Simulation du réseau viaire d'une ville monocentrique compacte. Les segments générés lors de chaque séquence sont représentés en vert.	504
Figure 10.27. Degré des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.	506
Figure 10.28. Espacement des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.....	507
Figure 10.29. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte. ...	509
Figure 10.30. Centralité de proximité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.....	510
Figure 10.31. Centralité d'intermédiarité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.....	512
Figure 10.32. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique compacte.....	513
Figure 10.33. Histogrammes de la distribution du degré des nœuds calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux	

discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	515
Figure 10.34. (1) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (2) nombre de nœuds de degré $k=3$, par rapport nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. La droite (en trait discontinu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.....	516
Figure 10.35. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	517
Figure 10.36. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	518
Figure 10.37. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	519
Figure 10.38. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.	520
Figure 10.39. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale de l'hypergraphe du réseau viaire aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction du la nombre de nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (3) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale	521
Figure 10.40. Simulation du réseau viaire d'une ville monocentrique axialisée. Les segments générés lors de chaque séquence sont représentés en vert.	524
Figure 10.41. Degré des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	526
Figure 10.42. Espacement des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	527
Figure 10.43. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	528
Figure 10.44. Centralité de proximité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	529

Figure 10.45. Centralité d'intermédiarité des voies calculée sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	531
Figure 10.46. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau d'initialisation (0) et les réseaux simulés résultant des séquences ((1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7)) de la simulation d'une ville monocentrique axialisée.	532
Figure 10.47. Nuages de points représentant l'évolution nombre des nœuds de degré (1) $k=1$ et (2) $k=3$, par rapport nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique axialisé.	533
Figure 10.48. (1) Nombre de nœuds de degré $k=1$ et (2) nombre de nœuds de degré $k=3$, par rapport nombre total des nœuds du réseau viaire simulé correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. La droite (en trait discontinu) correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.	534
Figure 10.49. Histogrammes de la distribution du degré des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	535
Figure 10.50. Histogrammes de la distribution de la longueur des voies calculée sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	537
Figure 10.51. Histogrammes de la distribution de l'espacement des voies calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée (échelle logarithmique). La courbe de densité (en rouge transparent) représente une estimation lissée de la distribution des données. Les traits verticaux discontinus représentent : la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).	538
Figure 10.52. Nombre et valeur médiane du degré, des nœuds et des voies calculés sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée. (1) Le nombre de nœuds en fonction de la médiane du degré des nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la médiane du degré des voies.	539
Figure 10.53. Relation scalante entre les métriques et la longueur totale de l'hypergraphe du réseau viaire aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique axialisée, et leur ajustement linéaire (ligne en trait discontinu). (1) Le nombre de voies en fonction du la nombre de nœuds. (2) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale. (3) Le nombre de voies en fonction de la longueur totale.	539

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Protocole pour les analyses morphologiques des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier. *Le choix des indicateurs est expliqué dans chaque section correspondante.	67
Tableau 1.2. Protocole pour les analyses diachroniques et l'analyse de propriétés structurelles invariantes des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier. *Le choix des indicateurs est expliqué dans chaque section correspondante.	69
Tableau 1.3. Table attributaire des segments désagrégés à un temps t.	72
Tableau 1.4. Jointure entre les segments d'un réseau à deux temps t-1 et t (correspondant à deux dates) en se basant sur leur identifiant BD TOPO.	72
Tableau 1.5. Evolution du rang normalisé dans chaque indicateur pour chaque segment entre chaque temps t et t+1.	73
Tableau 1.6. Moyenne de l'évolution du rang normalisé dans un indicateur pour chaque voie à un temps t par rapport à un temps t-1.	73
Tableau 1.7. Données agrégées à l'échelle des voies à un temps t.	74
Tableau 6.1. Huit morphotypes de voies. O : orthogonalité ; E : espacement ; D : degré. P : permanence ; Ch : changement. Min - Q1 : premier quartile ; Q1 -Q2 : deuxième quartile ; Q2 -Q3 : troisième quartile ; Q3 - Q4 : quatrième quartile. * : le morphotype (en noir) et son intégration dans le réseau existant (en gris).	261
Tableau 6.2. Huit morphotypes de voies (suite). O : orthogonalité ; E : espacement ; D : degré. P : permanence ; Ch : changement. Min - Q1 : premier quartile ; Q1 -Q2 : deuxième quartile ; Q2 -Q3 : troisième quartile ; Q3 -Q4 : quatrième quartile. * : le morphotype (en noir) et son intégration dans le réseau existant (en gris).	264
Tableau 8.1. Récapitulatif des variables et des paramètres du modèle de Courtat (2012).	347
Tableau 8.2. Récapitulatif des valeurs de paramètres pour la simulation de certains morphotypes de voies par le modèle de Courtat (2012).	354
Tableau 8.3. Paramètres du modèle WayMorph.	368
Tableau 8.4. Variables du modèle WayMorph.	369
Tableau 8.5. Données d'entrée du modèle WayMorph.	369
Tableau 8.6. Valeurs initiales des paramètres du modèle de Courtat (2012). D'après : Graftiaux (2021).	375
Tableau 8.7. Les paramètres, leur valeur initiale, l'ordre de grandeur retenu, et leur valeur par défaut définie pour le modèle WayMorph.	377
Tableau 9.1. Coefficient de variation entre les 100 répliques de la simulation avec $P_e = 0.5$	391
Tableau 9.2. Valeurs de paramètres testées dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle WayMorph .	403
Tableau 9.3. Récapitulatif des valeurs ou de l'amplitude des paramètres pour la simulation de chaque morphotype de voies avec le modèle WayMorph. Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	456
Tableau 10.1. Association des formes de villes aux morphotypes de voies. Les formes de villes sélectionnées pour les scénarios de simulation sont notées en gras.	463

Liste des tableaux

Tableau 10.2. Paramétrage pour la simulation de la forme "Médina". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	465
Tableau 10.3. Paramétrage pour la simulation de la forme "Village-rue". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	468
Tableau 10.4. Paramétrage pour la simulation de la forme "Rue-plume". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	471
Tableau 10.5. Paramétrage pour la simulation de la forme "Fuseau quadrillée". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	474
Tableau 10.6. Paramétrage pour la simulation de la forme "Quadrillée". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	477
Tableau 10.7. Paramétrage pour la simulation de la forme "Quadrillée avec enceinte". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	480
Tableau 10.8. Paramétrage pour un scénario de simulation de la forme "Radio-quadrillée". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	484
Tableau 10.9. Paramétrage pour un scénario de simulation de la forme "Radioconcentrique". Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	488
Tableau 10.10. Association des deux formes de villes complexes considérées aux morphotypes de voies.	501
Tableau 10.11. Paramétrage pour la simulation d'une forme de ville monocentrique compacte. Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	503
Tableau 10.12. Paramétrage pour la simulation d'une ville monocentrique axialisée. Les valeurs notées en gras diffèrent des valeurs par défaut.	523

Liste des annexes

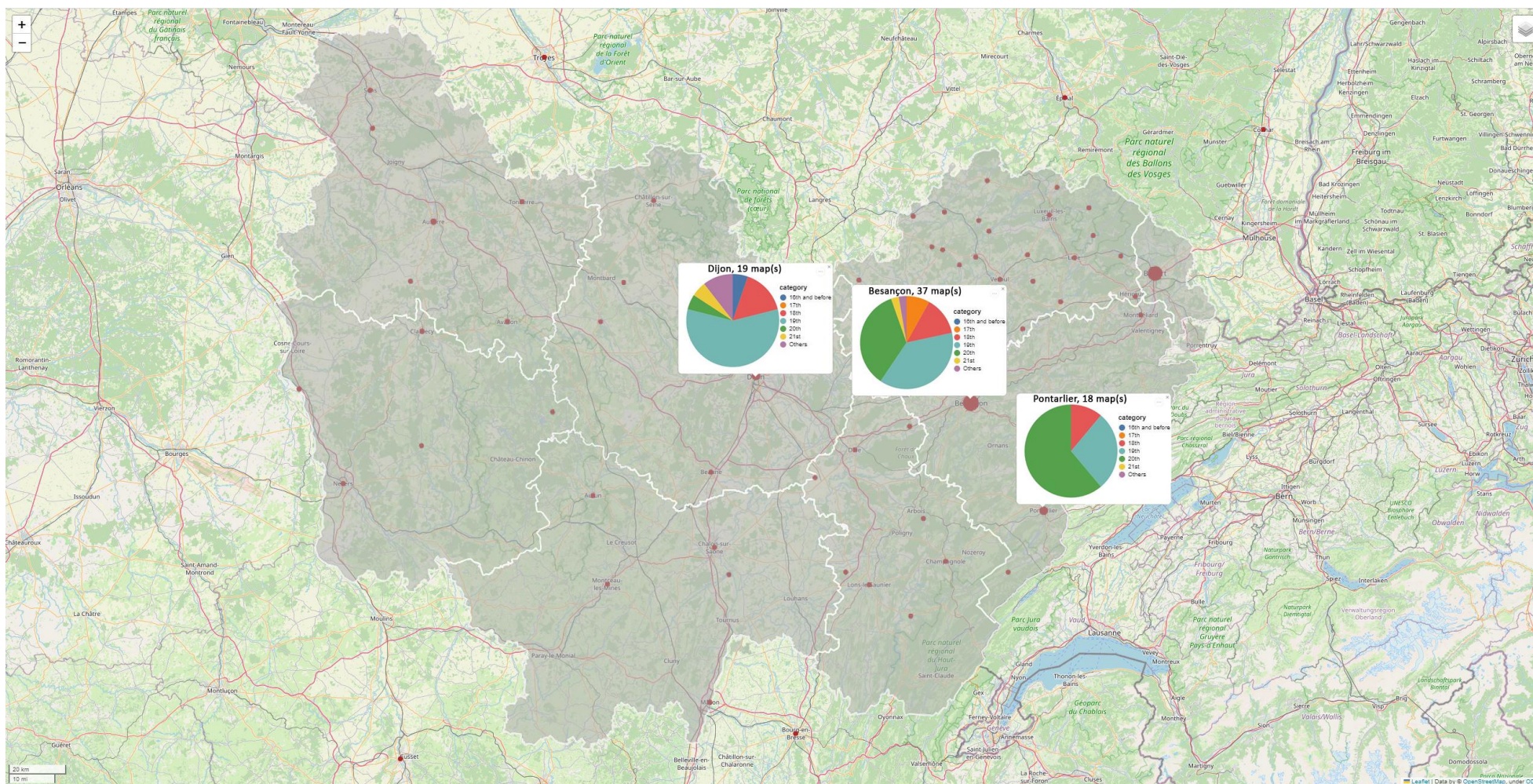
Annexe 1. Synthèse de la couverture spatiale et temporelle des cartes collectées pour les trois villes d'étude Dijon, Besançon et Pontarlier.....	613
Annexe 2 : Structure du catalogue des cartes historiques, pour la saisie des métadonnées.....	615
Annexe 3: Structure d'arborescence du catalogue pour le stockage des cartes de la région Bourgogne Franche-Comté.	617
Annexe 4. Extrait de la carte de l'agglomération de Dijon. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	619
Annexe 5. Extrait de la carte de la ville de Dijon. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	621
Annexe 6. Extrait de la carte de l'agglomération de Besançon. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	623
Annexe 7. Extrait de la carte de la ville de Besançon. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	625
Annexe 8. Extrait de la carte de l'agglomération de Pontarlier. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	627
Annexe 9. Extrait de la carte de la ville de Pontarlier. Source : Geoportail (IGN). https://www.geoportail.gouv.fr/carte	629
Annexe 10 : Tableau résumant les résultats des indicateurs pour les analyses morphologiques illustrant l'apport de chaque indicateur.	630
Annexe 11 : Carte du bâti et sa corrélation spatiale avec les voies caractérisées par le degré de desserte le plus élevé.	631
Annexe 12. Les indicateurs caractérisant les voies, calculés sur des réseaux viaires de différents types en considérant un découpage a priori du calcul d'indicateur et un découpage a posteriori.....	631
Annexe 13. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon entre 1690 et 2019 selon la valeur seuil de degré $D_{(i)} > D_{max} 3$, en considérant différentes emprises spatiales du réseau.	636
Annexe 14. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon selon la valeur seuil d'une centralité d'intermédierité $B_{(i)} > B_{max} 10$, en considérant différentes emprises spatiales du réseau.	639
Annexe 15. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon selon la valeur seuil de la centralité de proximité $C_{(i)} > 3 \times C_{max} 4$, en considérant différentes emprises spatiales pour le découpage du réseau.	641
Annexe 16. Propriétés du réseau viaire de Dijon pour les différentes dates en considérant toutes les couvertures spatiales.	645
Annexe 17: Propriétés du réseau viaire de Besançon pour les différentes dates en considérant la couverture spatiale de la carte source.....	646
Annexe 18 : Propriétés du réseau viaire de Pontarlier pour les différentes dates en considérant la couverture spatiale de la carte source.....	646
Annexe 19: Exemple de nuages de points représentant les métriques basiques du réseau de Dijon dans le temps : (a) le nombre de nœuds, (b) le nombre d'arcs, (c) le nombre de voies, et (d) la longueur totale du réseau. Pour chaque instant t les valeurs sont représentées selon les différents découpages du réseau. Les lignes connectent les valeurs des réseaux découpés selon la même couverture spatiale.	647

Annexe 20. Corrélation entre l'ensemble des indicateurs caractérisant les nouvelles voies apparues dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.	648
Annexe 21. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Dijon au travers le temps, en considérant différentes emprises spatiales. Les données sont ajustées à un modèle linéaire (ligne bleue) (échelle logarithmique). (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N. (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N. (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A.	654
Annexe 22. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Dijon au travers le temps, en considérant différentes emprises spatiales. Les données sont ajustées à un modèle linéaire (ligne bleue) (échelle logarithmique). (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N. (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A. (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V.	654
Annexe 23: Nuages de points représentant la relation entre le logarithme de la médiane des centralités (a) d'intermédiarité et (b) de proximité en fonction de la surface de couverture du réseau. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.	655
Annexe 24 : Nuages de points représentant la relation entre le logarithme (a) du nombre d'arcs A par rapport au nombre de nœuds N, (b) nombre de voies V en fonction du nombre d'arcs A, (c) Nombre de voies A et (d) de son double par rapport au nombre de nœuds N. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.	655
Annexe 25. Nuages de points représentant la relation entre le logarithme du nombre (a) d'arcs A, (b) de voies V, et (c) de nœuds N, et (d) de la longueur totale en fonction de la surface de couverture du réseau. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.	656
Annexe 26 : Ajustement des distributions de degré des voies des réseaux viaires de Besançon et Pontarlier avec des lois de puissance, log-normales et de Poisson avec la méthode du maximum de vraisemblance.	657
Annexe 27. Cartographie du croisement (deux à deux) des valeurs du degré, de l'orthogonalité et de l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon à différentes dates.	659
Annexe 28. Distribution statistique (en nuage de points) des valeurs selon le croisement des quartiles des valeurs du degré, de l'orthogonalité et de l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon à différentes dates.	662
Annexe 29. Histogrammes de distribution des propriétés des graphes et des voies à chaque étape de la simulation pour les 100 répliques :	665
Annexe 30. Tests de sensibilité aux paramètres à partir d'un réseau d'initialisation différent.	668
Annexe 31. Tests de sensibilité au réseau d'initialisation en considérant différents nombres d'itération.	669
Annexe 32. Simulation de voies concentriques avec différentes valeurs du paramètre de construction $0 \leq \omega \leq 0.4$: ...	673
Annexe 33. Simulation de voies ramifiées avec différentes valeurs des paramètres E_{pp} , W_p et A_i	676
Annexe 34. Distributions d'indicateurs calculés calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (sur une échelle normale).....	678
Annexe 35. Distributions d'indicateurs calculés calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (sur une échelle normale).....	681
Annexe 36. Autres exemples de scénarios d'évolution à partir de squelette de réseaux réels.	684

Annexes

Annexes chapitre 1

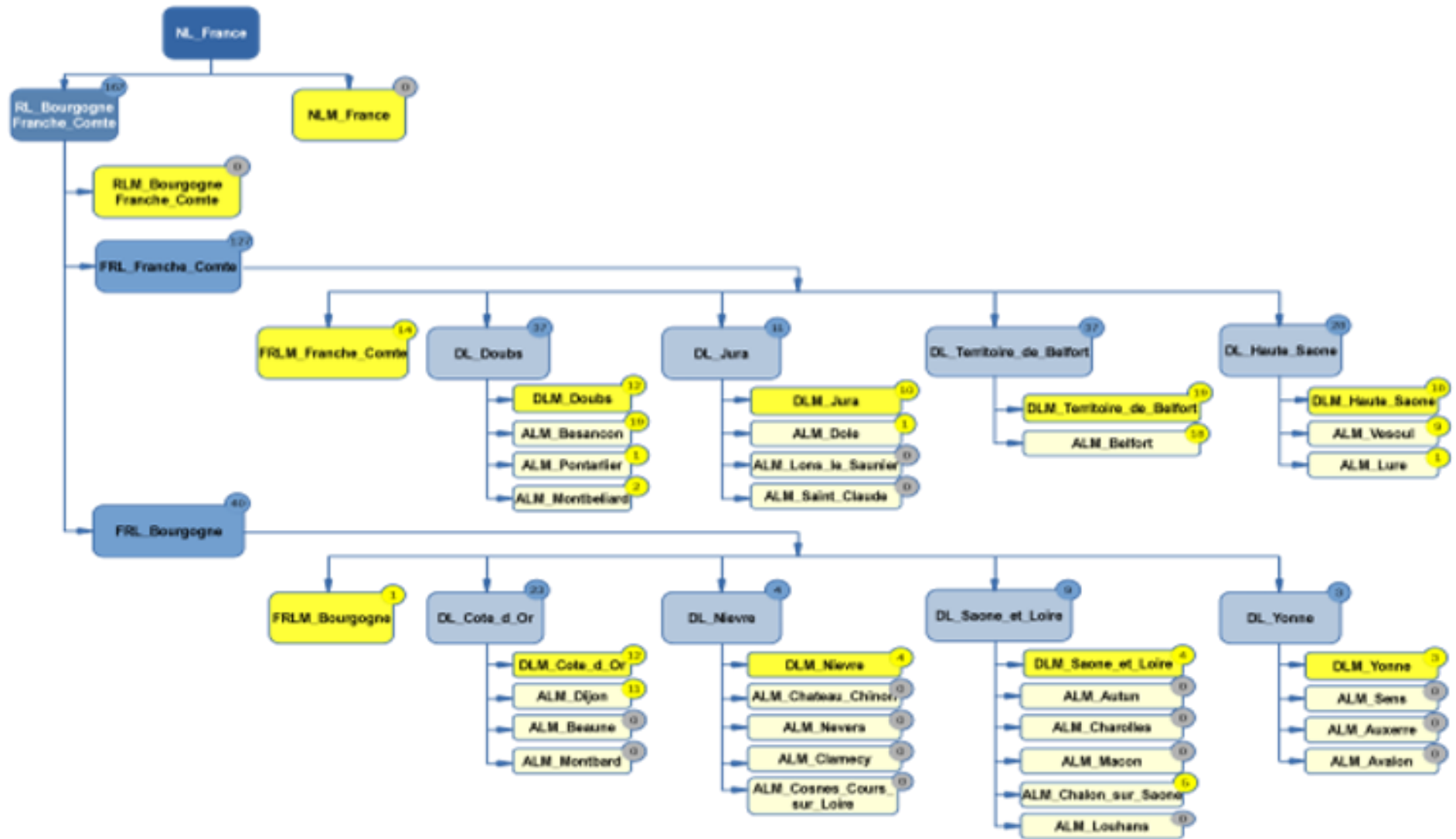
Annexe 1. Synthèse de la couverture spatiale et temporelle des cartes collectées pour les trois villes d'étude Dijon, Besançon et Pontarlier.



Annexe 2 : Structure du catalogue des cartes historiques, pour la saisie des métadonnées.

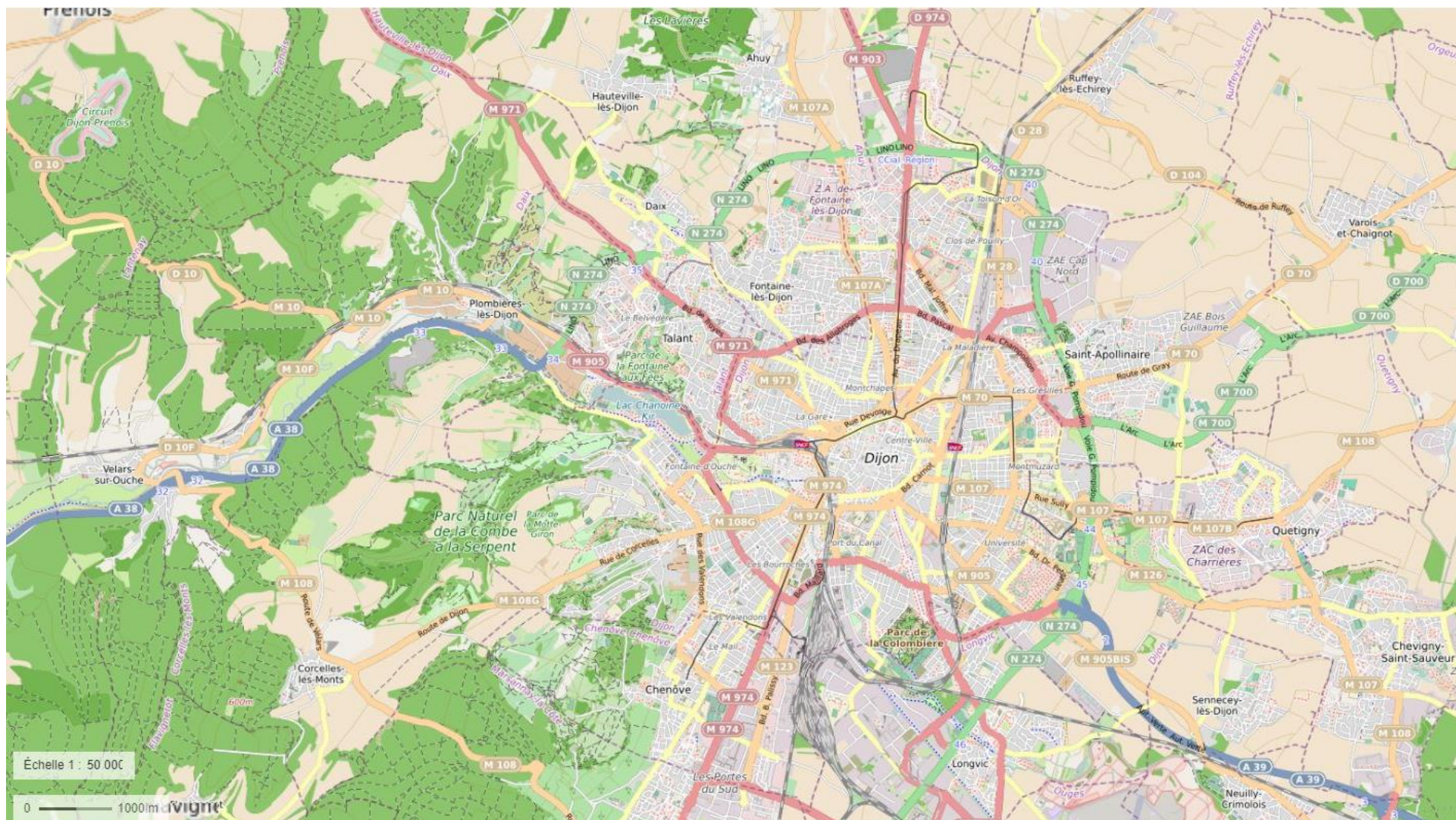
Map_ID	Associated zone	File_name	Map_title	Year	Century	Covered_zone	Level	Period_elaboration_map	Starting_date_creation	Publication date	Acquisition date	Sources	Format	Location	Map topic	Contents							Material description					Geographical scales	Conservation condition			
																Natural_zones	Agricultural_zones	Roads	Railroads	Hydrolic_networks	Interest_points	Administrative_boundaries	Urban_zones	Title	Legend	Orientation	Scale			Source		
2128	Côte d'Or	Dijon_1944	Groupement d'Urbanisme de Dijon. Plan topographique / dressé par le Cabinet Danger	1944	XX	Dijon	Communal	20 th - Century of Spatial exploration	1944	1944	21/10 /2019	Cabinet DANGER	JPG	Georeferenced	Topographic map	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1 : 10000	Good
2506	Doubs	Besancon_1937	Besançon	1937	XX	Besançon	Communal	20 th - Century of Spatial exploration	1937	1937	23/9/ 2019	Plan Siffert (1937)	JPG	Georeferenced	Description of a project	X	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	1 : 8000	Good
2508	Doubs	Besancon_1786	Plan de la ville et citadelle de Besançon	1786	XVIII	Besançon	Communal	18 th -Century of Lights	-	1786	23/9/ 2019	Unreadable	JPG	Departmental Archive of the Doubs	Descriptive map	✓	X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Unreadable	Mostly bad
2514	Doubs	Besancon_1848	Nouveau plan de la ville de Besançon	1848	XIX	Besançon	Communal	19 th - Century of Industrial Revolution	-	1848	23/9/ 2019	Valluet Jeune, éditeur	JPG	Mémoire Vive	Descriptive map	✓	X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	Unreadable	Mostly good
2518	Doubs	Besancon_1883	Besançon et son territoire	1883	XIX	Besançon et alentours	Communal	19 th - Century of Industrial Revolution	-	1883	23/9/ 2019	DELAVELLE (Maire), M.L. ROUZET, ingénieur voyer	JPG	Planning Department of Besançon	Topographic map	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	1 : 10000	Good

Annexe 3: Structure d'arborescence du catalogue pour le stockage des cartes de la région Bourgogne Franche-Comté.

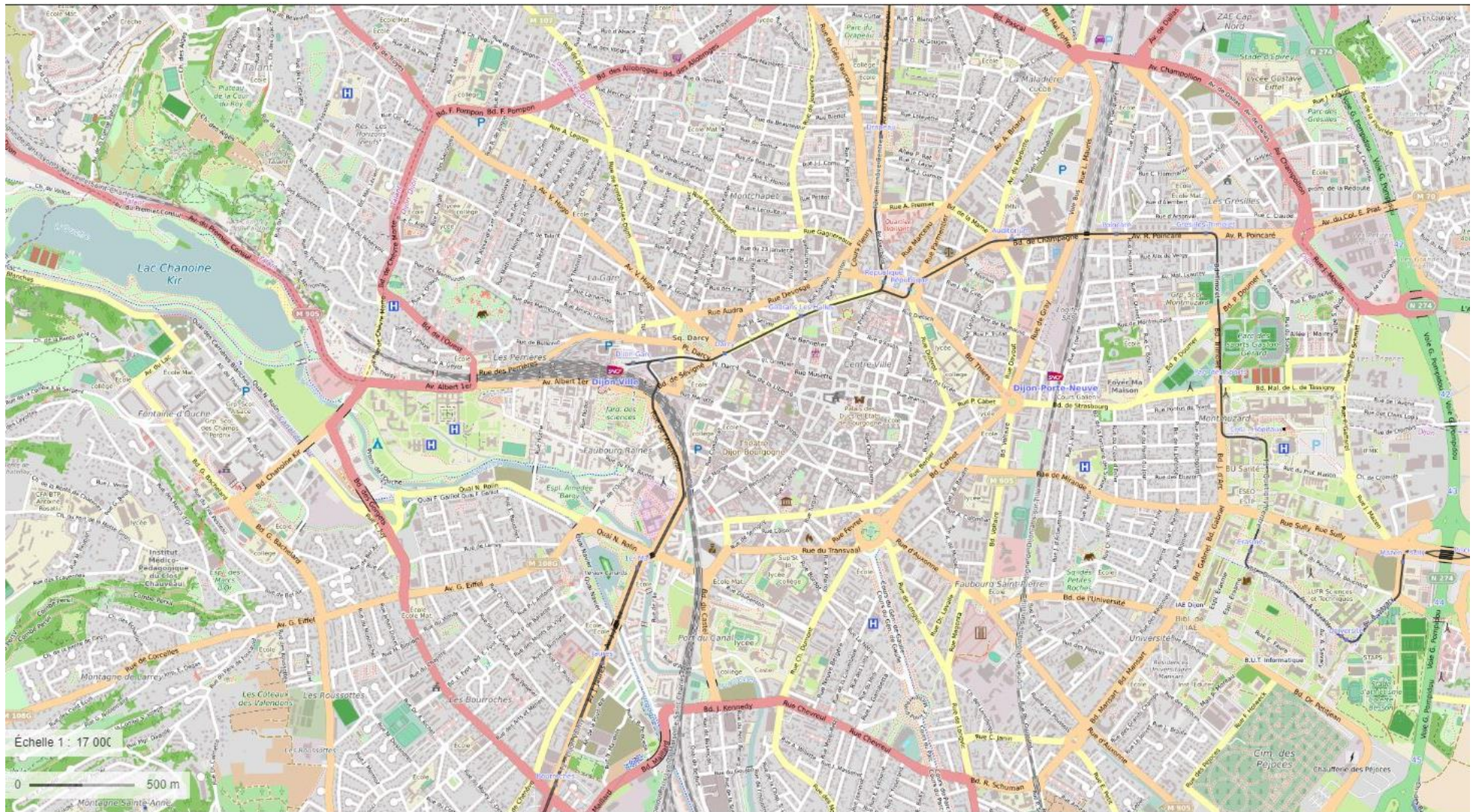


Annexes chapitre 2

Annexe 4. Extrait de la carte de l'agglomération de Dijon. Source : Geoportail (IGN). <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>



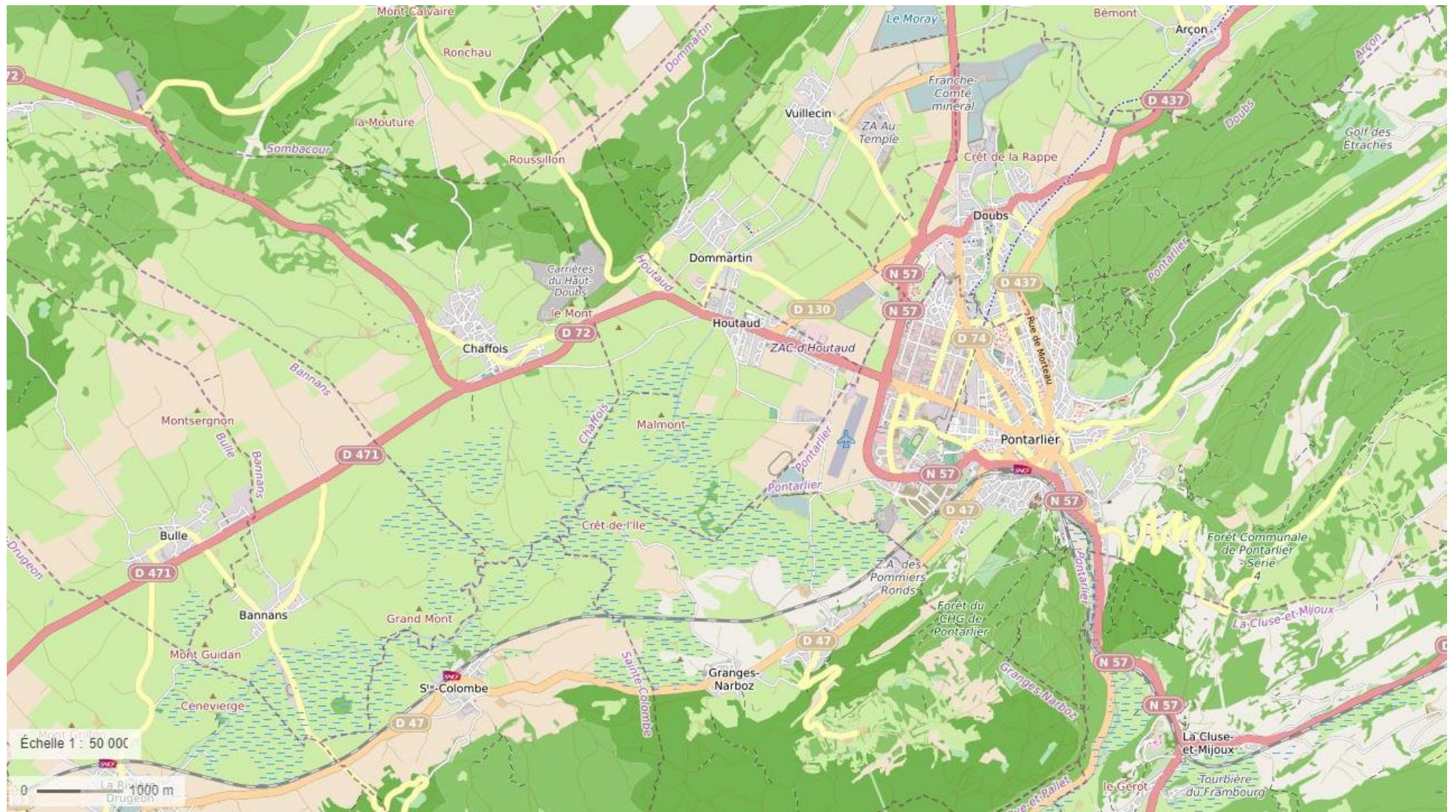
Annexe 5. Extrait de la carte de la ville de Dijon. Source : Geoportail (IGN). <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>



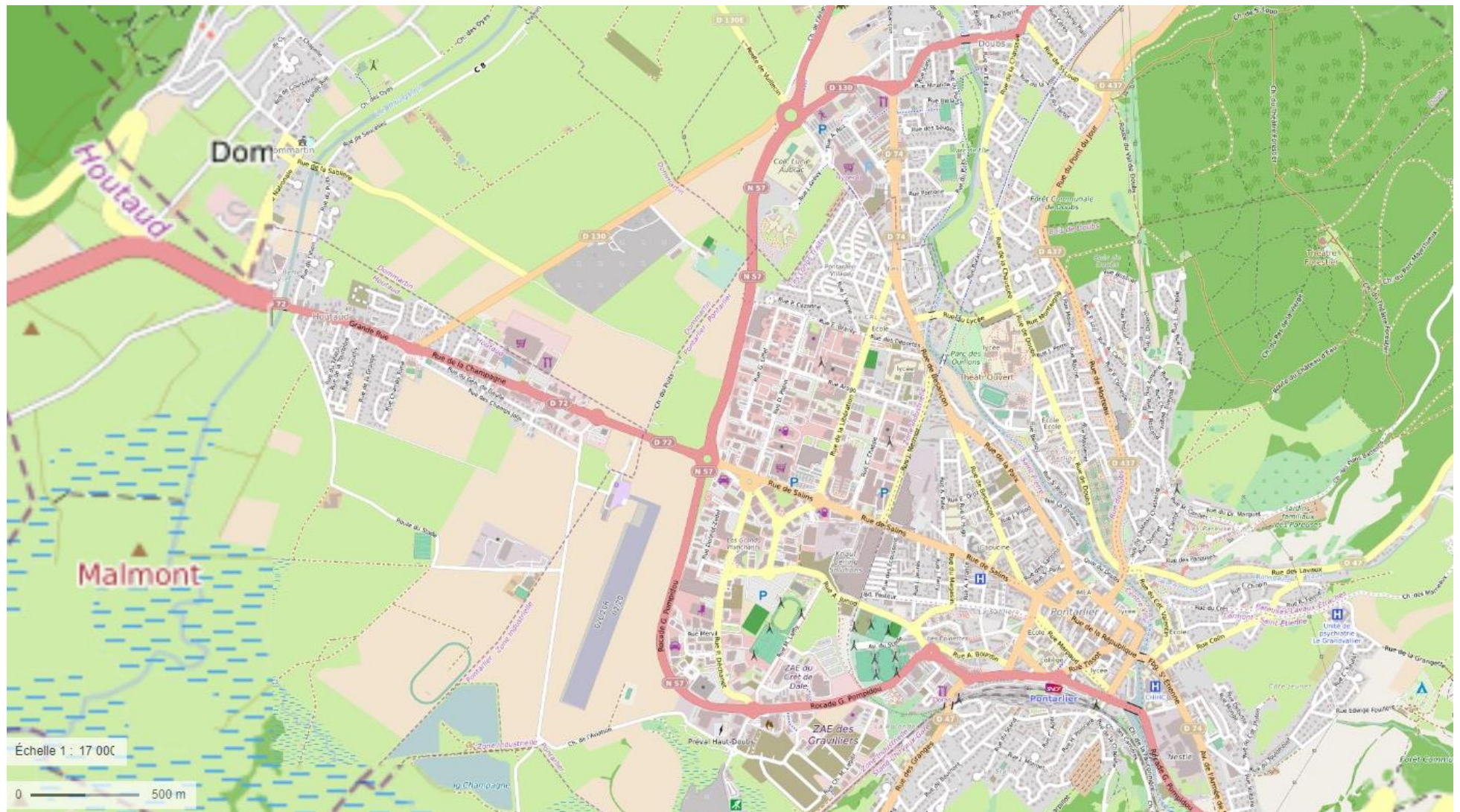
Annexe 7. Extrait de la carte de la ville de Besançon. Source : Geoportail (IGN), <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>



Annexe 8. Extrait de la carte de l'agglomération de Pontarlier. Source : Geoportail (IGN). <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>



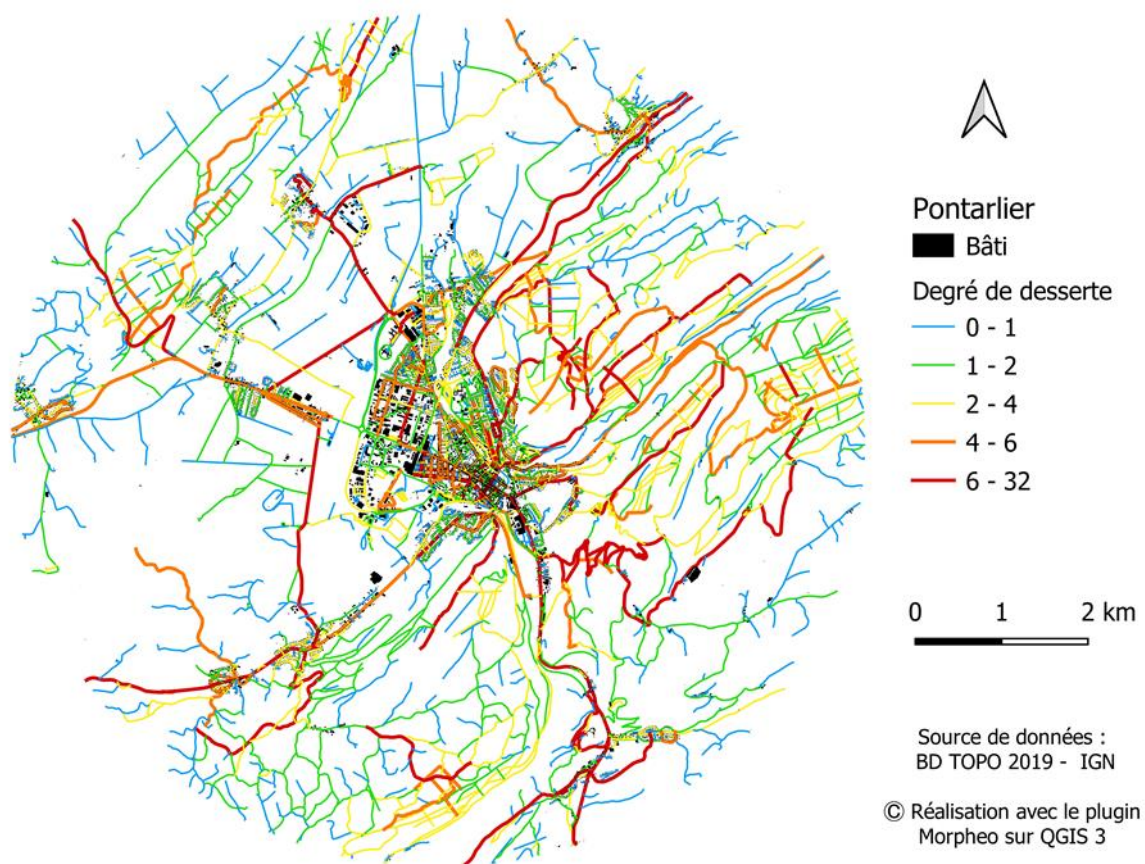
Annexe 9. Extrait de la carte de la ville de Pontarlier. Source : Geoportail (IGN), <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>



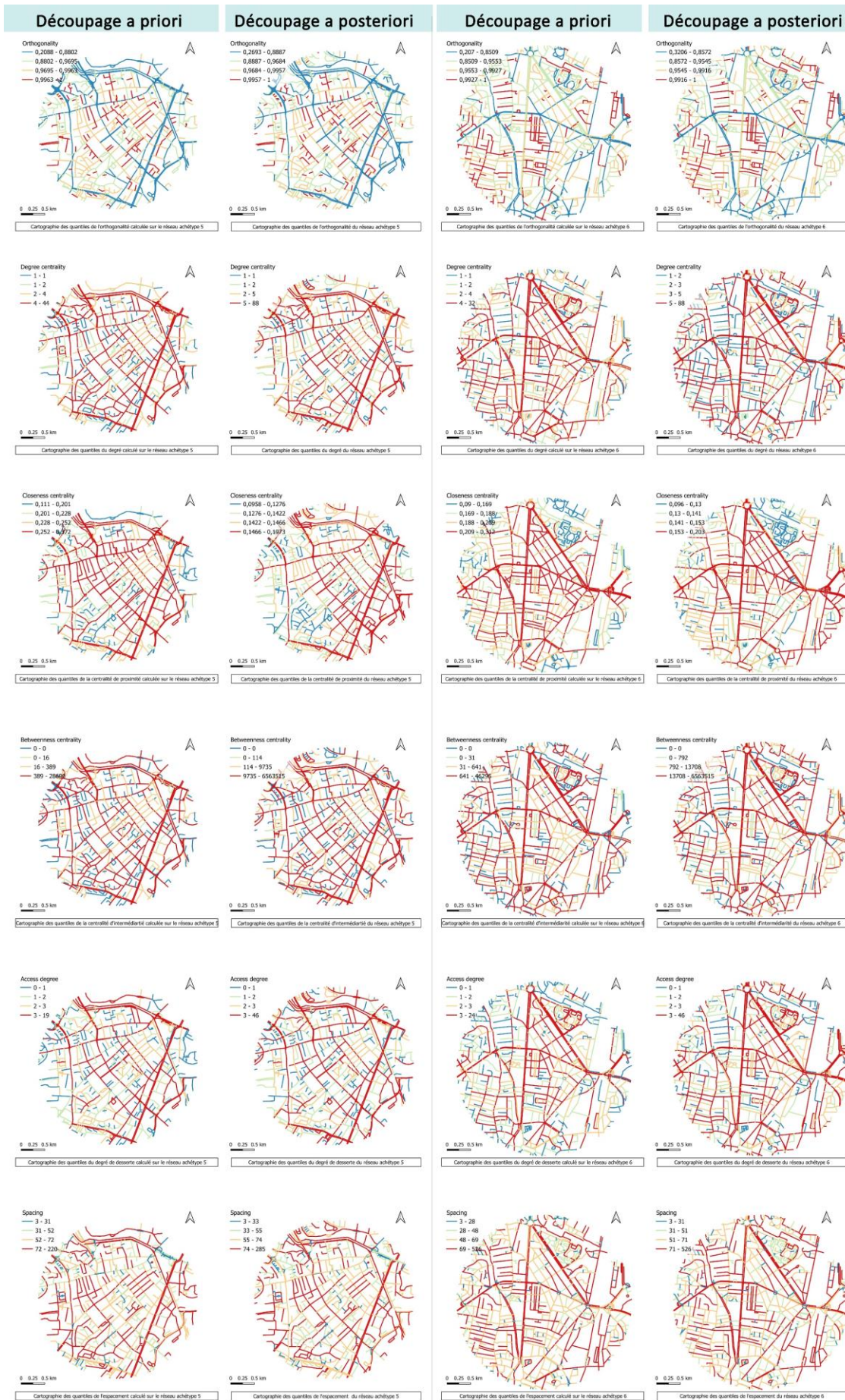
Annexe 10 : Tableau résumant les résultats des indicateurs pour les analyses morphologiques illustrant l'apport de chaque indicateur.

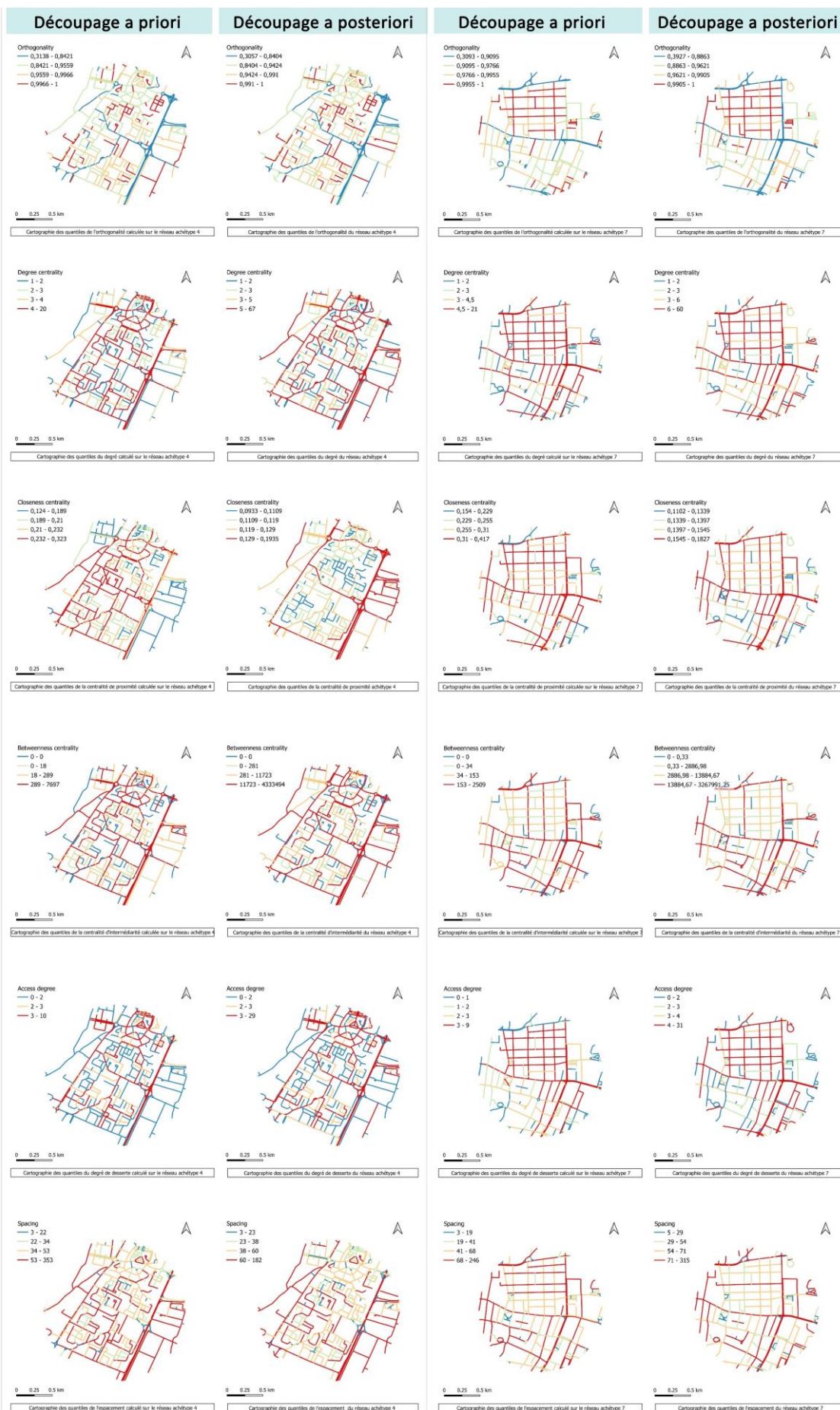
		Dijon			Besançon			Pontarlier			
		1790	1883	1944	1786	1883	1937	1692	1842	1931	
Network metrics	A (km ²)	5,83	9,98	28,39	10,11	48,04	24,16	2,10	1,12	4,65	
	L (km)	90,00	187,00	484,00	79,00	572,00	364,00	17,00	24,00	72,00	
Graph metrics	N _A	509,00	1226,00	3399,00	427,00	2341,00	2115,00	247,00	175,00	496,00	
	N _N	353,00	810,00	2255,00	307,00	1621,00	1503,00	190,00	133,00	340,00	
	N _w	162,00	359,00	985,00	138,00	721,00	696,00	85,00	59,00	144,00	
Summary statistics of indicators	Degree centrality	med	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
		m	3,89	3,00	4,33	3,62	3,82	3,63	3,34	3,47	3,96
		sd	3,29	3,92	4,11	3,17	3,38	3,61	2,97	3,46	3,63
		sd/N _w	0,02	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,03	0,06	0,03
		cv	0,85	1,31	0,95	0,88	0,88	1,00	0,89	1,00	0,92
	Orthogonality	med	0,91	0,92	0,95	0,90	0,88	0,89	0,94	0,97	0,83
		m	0,87	0,86	0,88	0,84	0,84	0,84	0,83	0,90	0,95
		sd	0,13	0,16	0,15	0,17	0,14	0,16	0,23	0,17	0,14
		sd/N _w	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		cv	0,15	0,18	0,17	0,21	0,17	0,19	0,27	0,19	0,14
	Spacing	med	61,97	58,26	52,45	57,95	87,47	61,47	52,55	50,54	45,99
		m	99,82	73,83	69,58	112,06	124,92	89,18	90,50	81,74	75,97
		sd	136,99	72,20	83,65	136,75	138,38	109,14	97,31	106,68	91,41
		sd/N _w	0,85	0,20	0,08	0,99	0,19	0,16	1,14	1,81	0,63
		cv	1,37	0,98	1,20	1,22	1,11	1,22	1,08	1,31	1,20
	Access degree	med	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
		m	2,65	2,80	2,86	2,29	2,54	2,38	1,97	2,07	2,64
		sd	1,79	1,80	2,18	1,29	1,78	1,56	1,11	0,99	1,99
		sd/N _w	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
		cv	0,68	0,64	0,76	0,56	0,70	0,66	0,56	0,48	0,75
Betweenness centrality	med	14,13	35,46	92,88	21,41	152,80	81,43	10,67	6,20	8,74	
	m	266,57	688,83	2971,16	366,85	2206,20	1860,72	115,98	56,48	226,72	
	sd	658,57	1954,75	10302,12	1052,39	6356,75	5898,20	220,62	134,55	592,08	
	sd/N _w	4,07	5,44	10,46	7,63	8,82	8,47	2,60	2,28	4,11	
	cv	2,47	2,84	3,47	2,87	2,88	3,17	1,90	2,38	2,61	
Closeness centrality	med	0,24	0,21	0,15	0,17	0,15	0,16	0,28	0,35	0,25	
	m	0,24	0,21	0,15	0,17	0,14	0,16	0,28	0,35	0,25	
	sd	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	
	sd/N _w	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	cv	0,17	0,17	0,17	0,15	0,17	0,17	0,19	0,16	0,18	

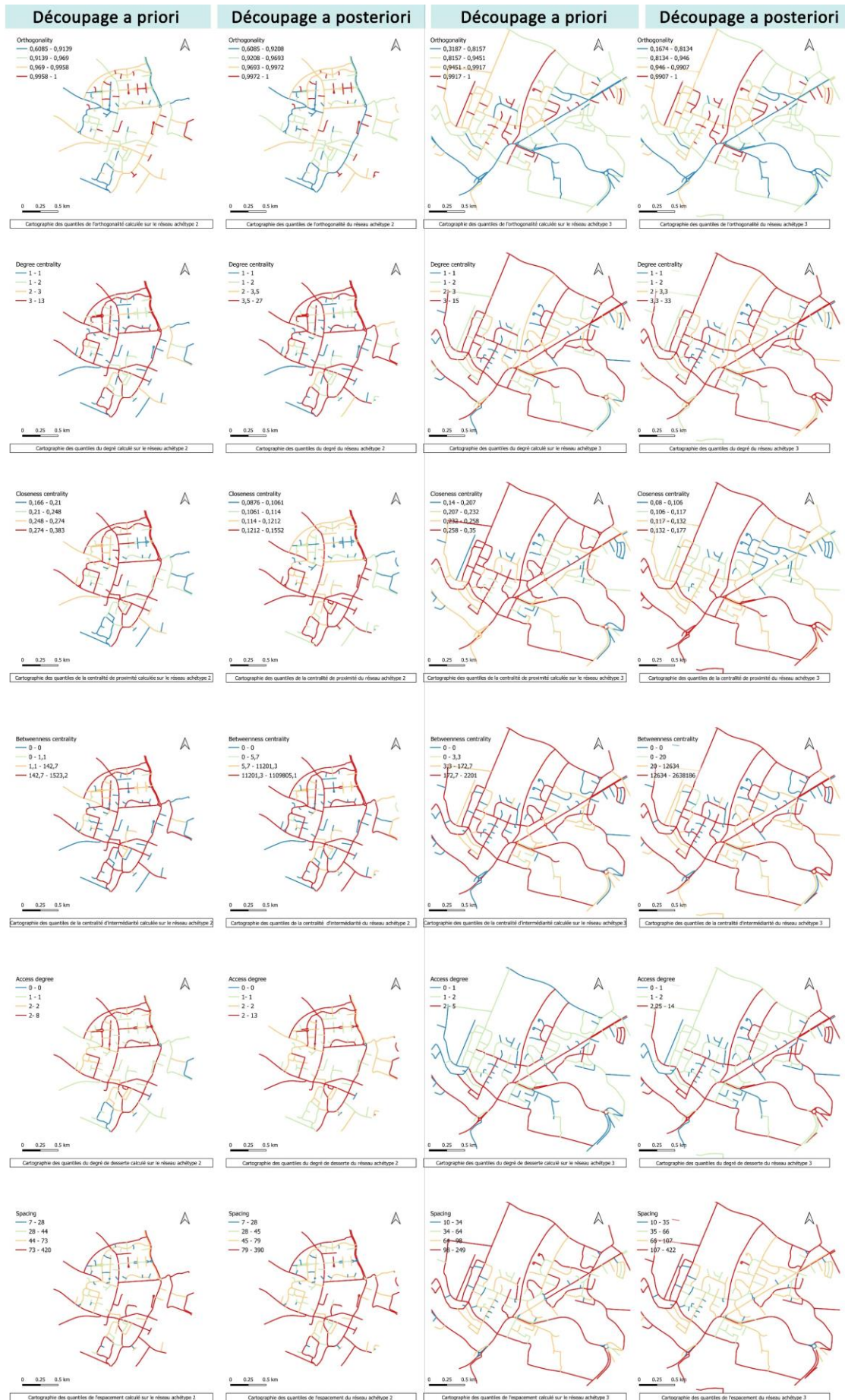
Annexe 11 : Carte du bâti et sa corrélation spatiale avec les voies caractérisées par le degré de desserte le plus élevé.

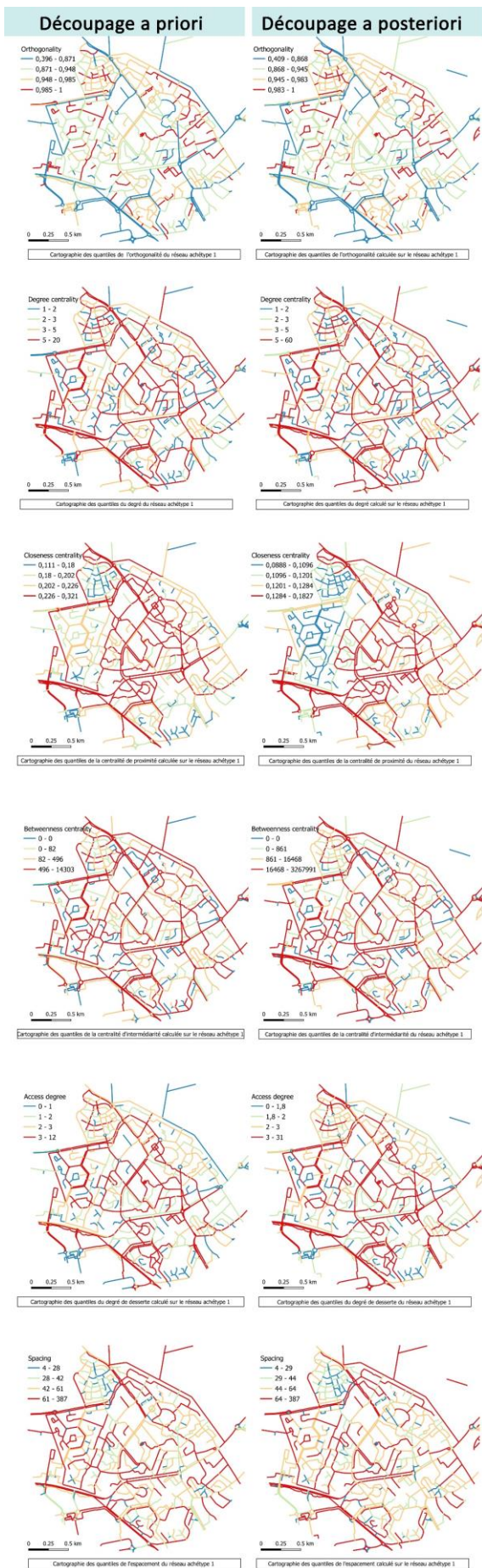


Annexe 12. Les indicateurs caractérisant les voies, calculés sur des réseaux viaires de différents types en considérant un découpage a priori du calcul d'indicateur et un découpage a posteriori.



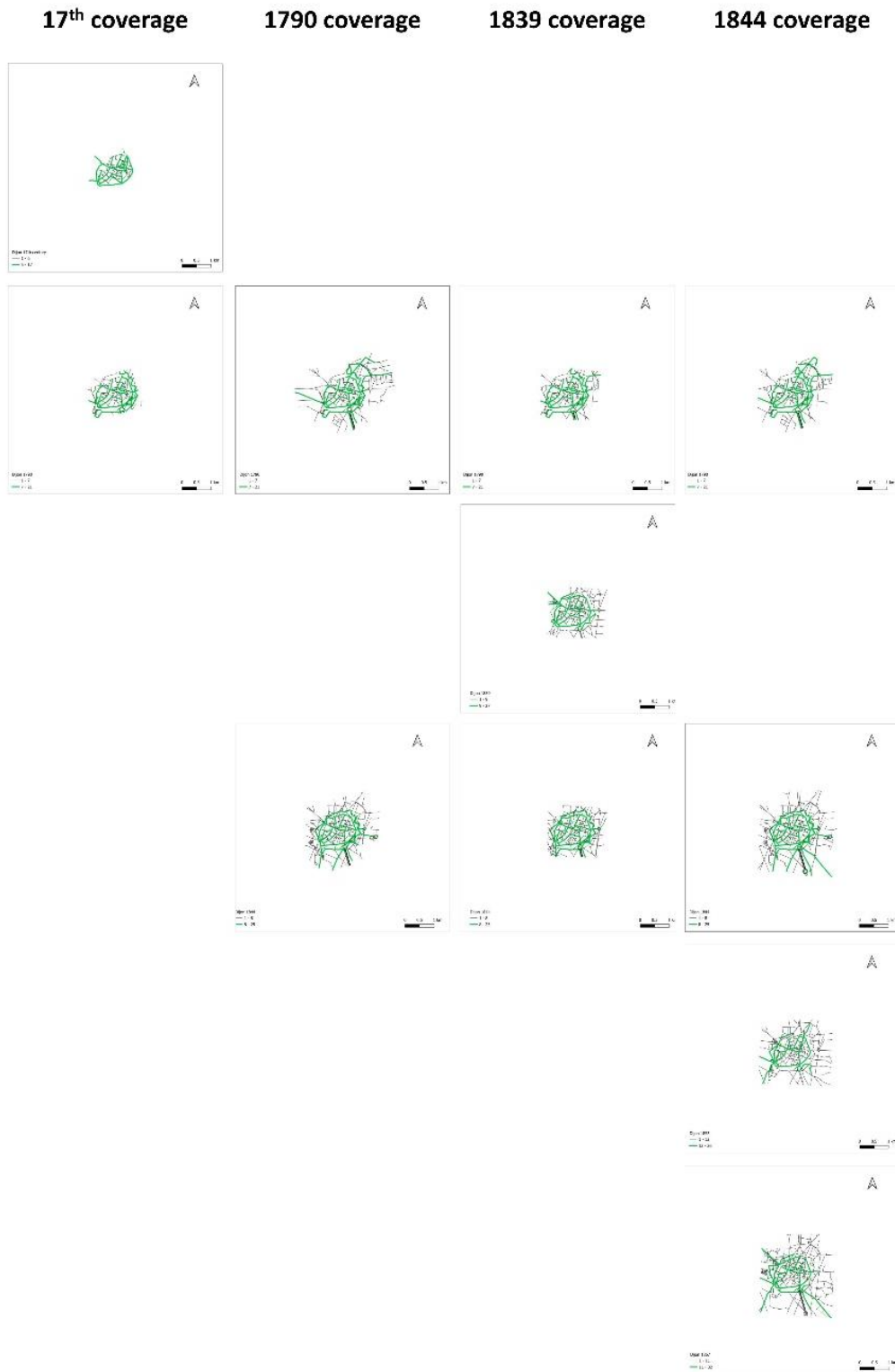


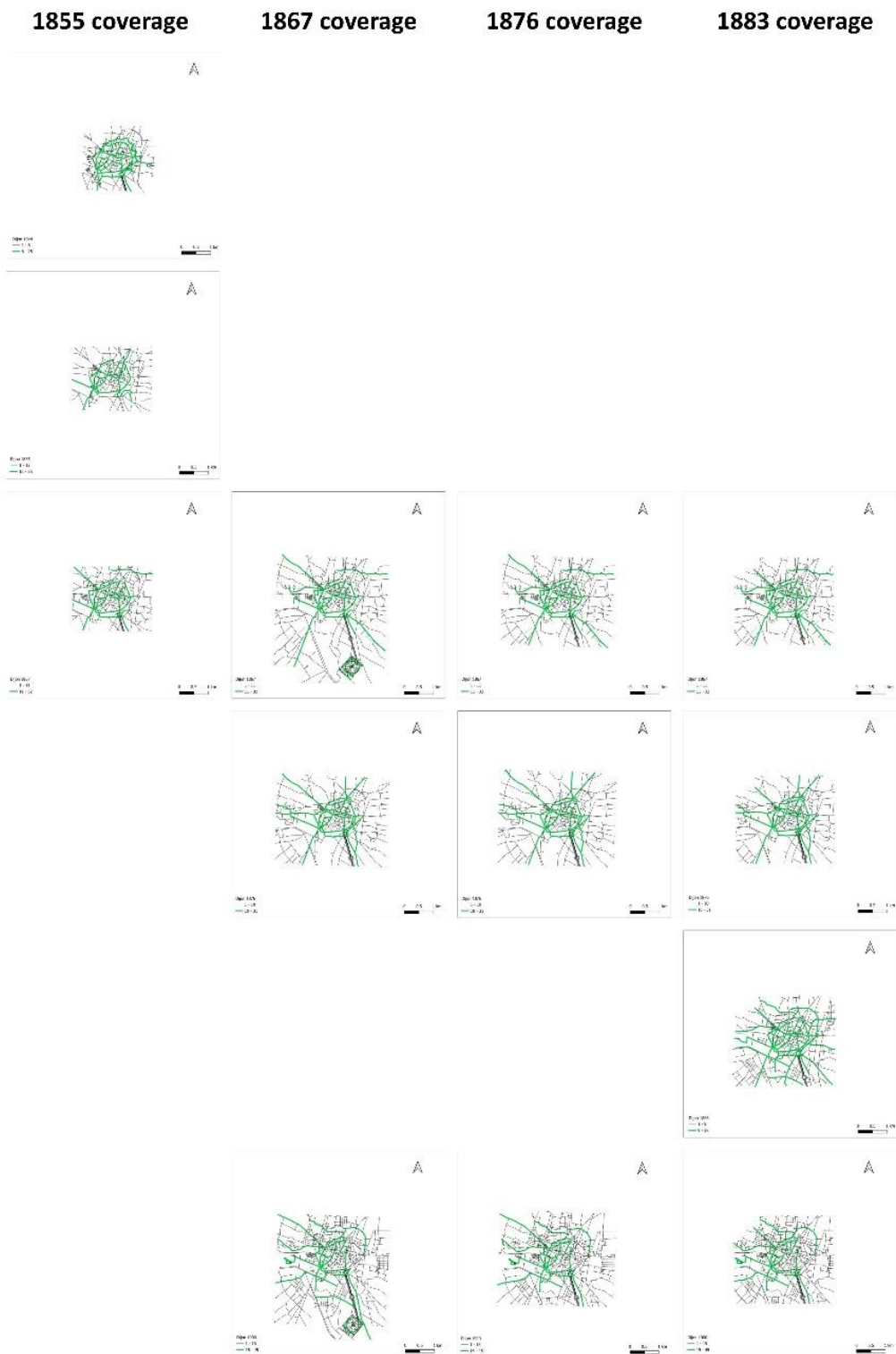


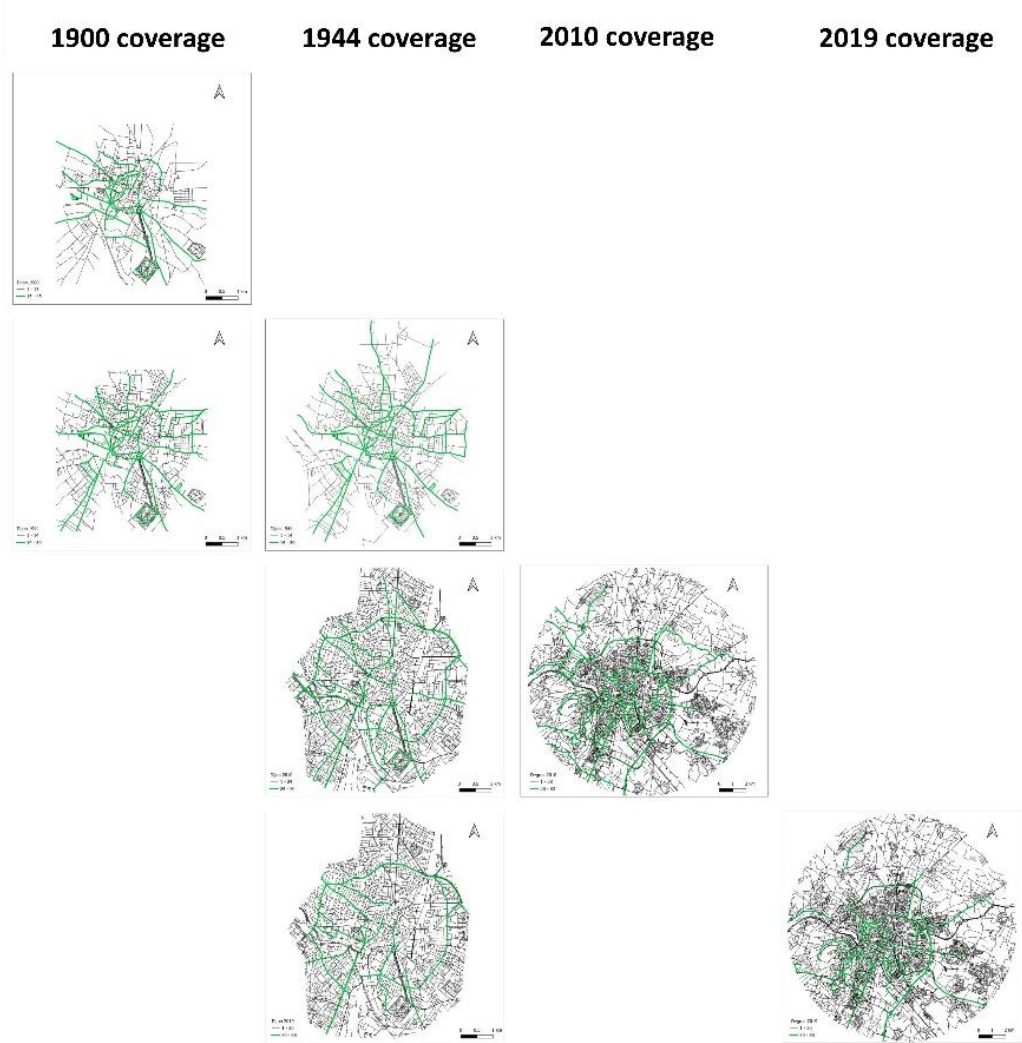


Annexes chapitre 3

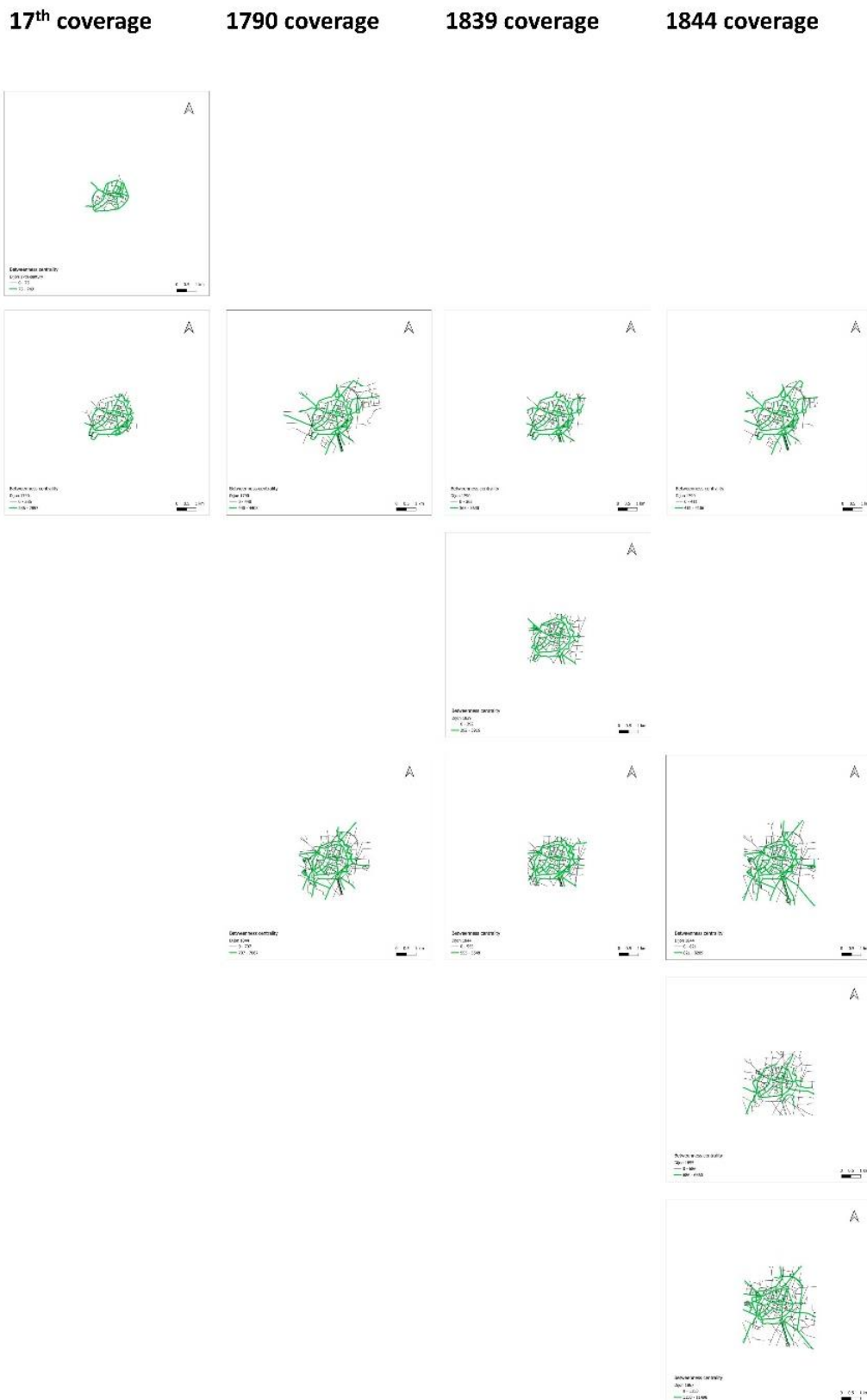
Annexe 13. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon entre 1690 et 2019 selon la valeur seuil de degré $D_{(i)} > \frac{D_{max}}{3}$, en considérant différentes emprises spatiales du réseau.







Annexe 14. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon selon la valeur seuil d'une centralité d'intermédiarité $B_{(i)} > \frac{B_{max}}{10}$, en considérant différentes emprises spatiales du réseau.

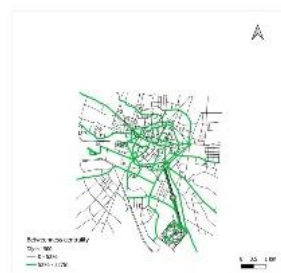
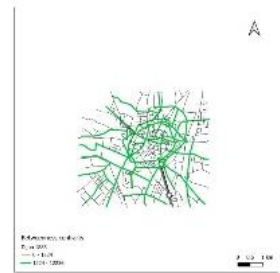
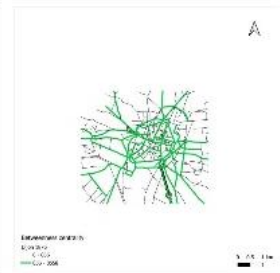
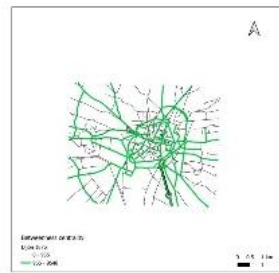
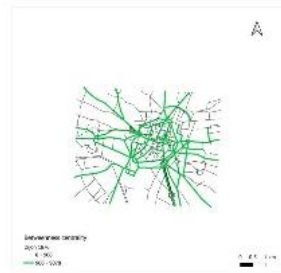
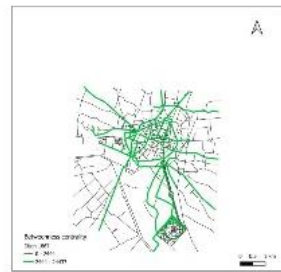
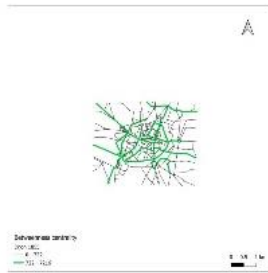


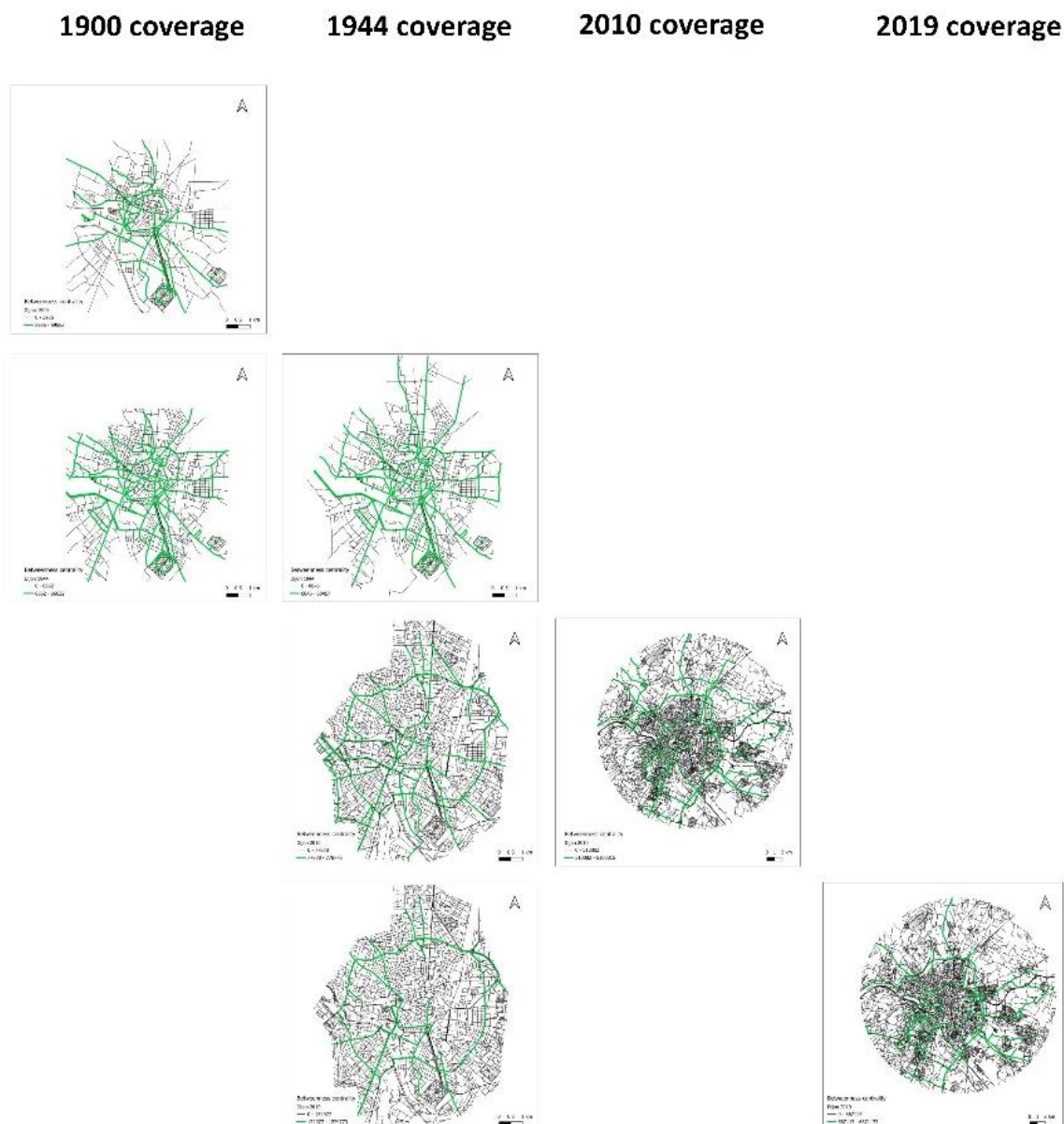
1855 coverage

1867 coverage

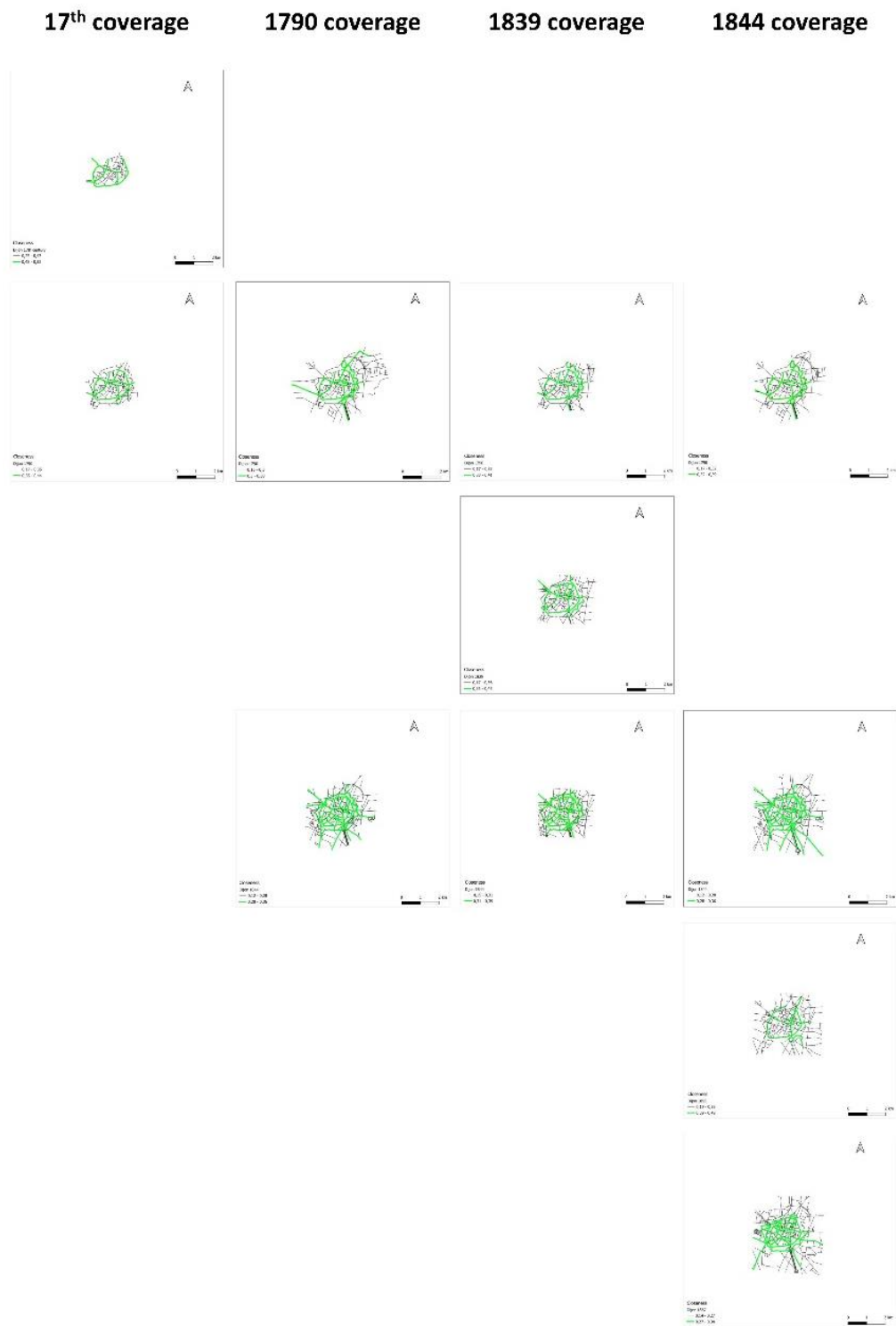
1876 coverage

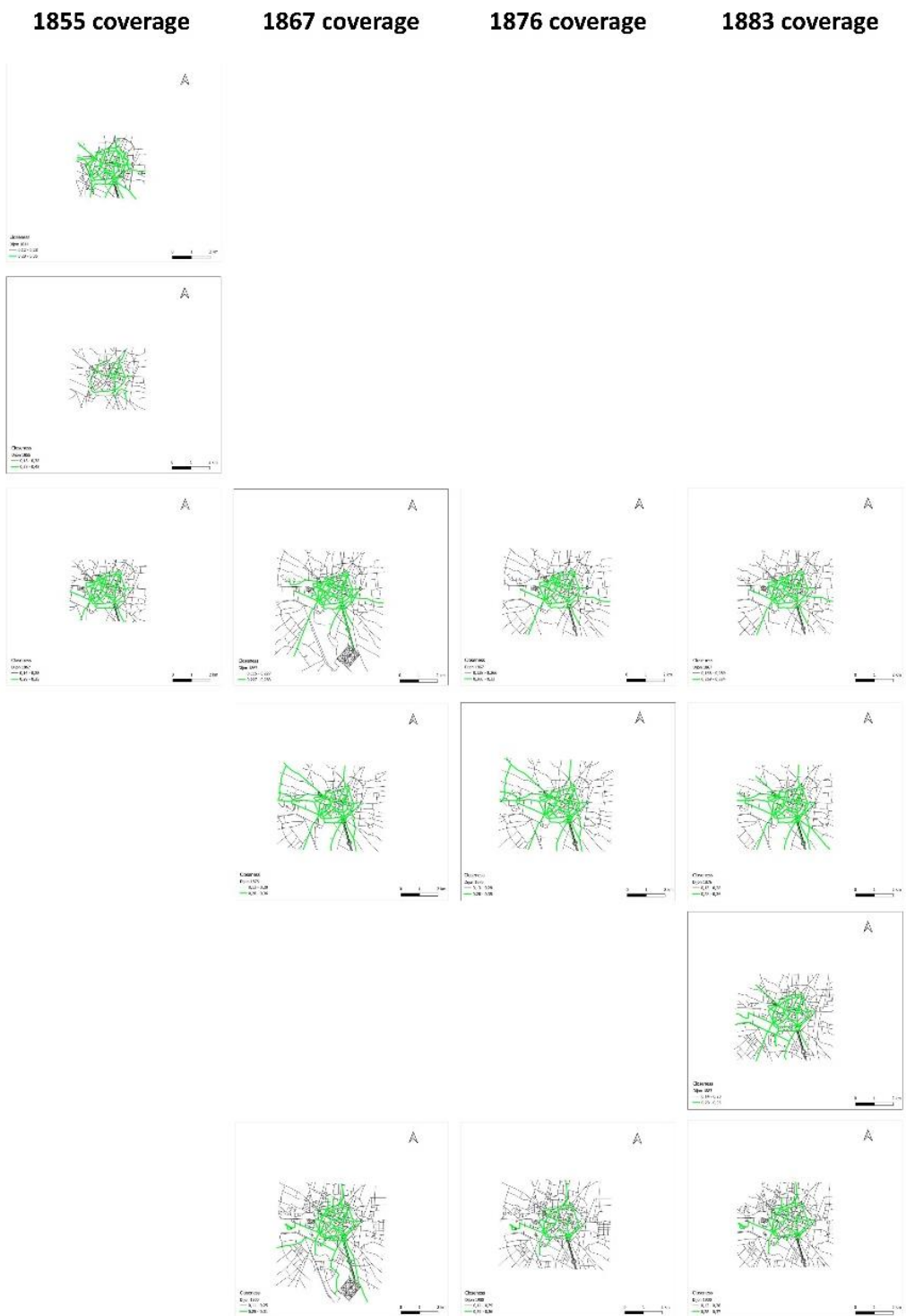
1883 coverage

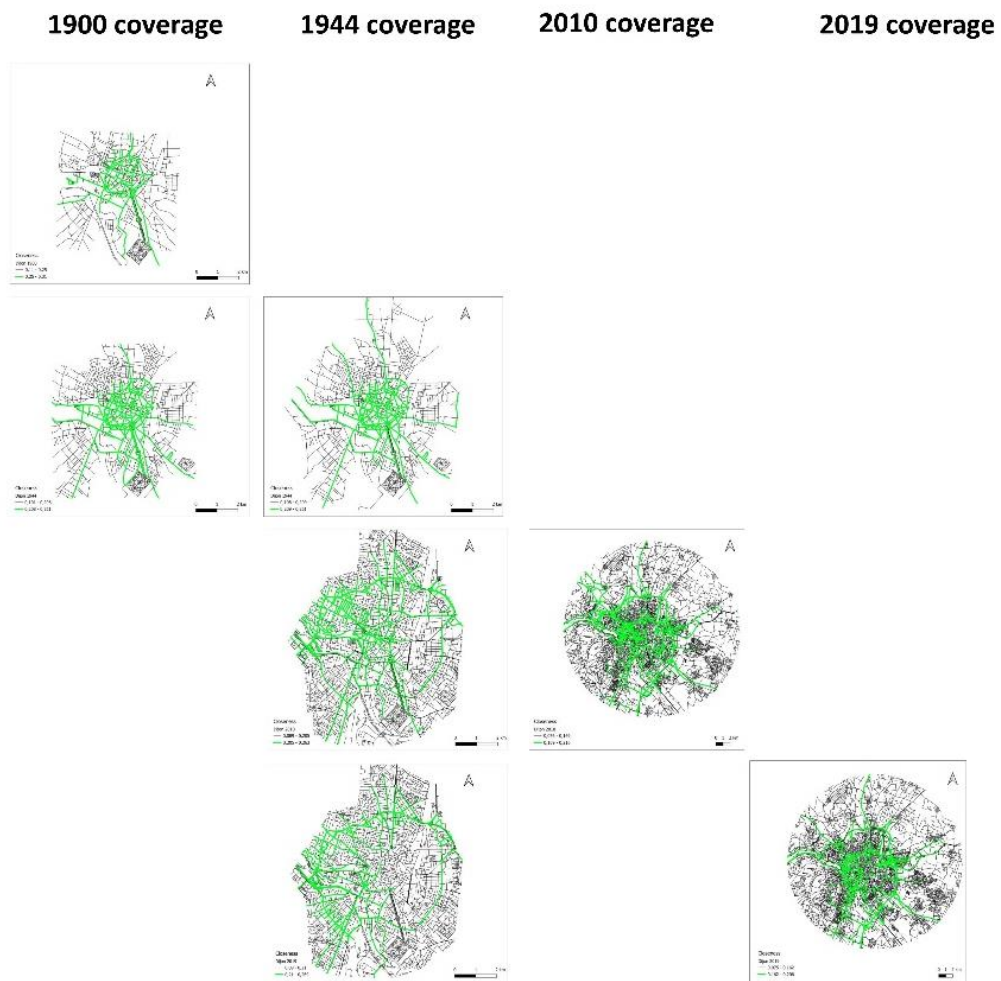




Annexe 15. Les voies les plus centrales du réseau viaire de Dijon selon la valeur seuil de la centralité de proximité $C_{(i)} > \frac{3 \times C_{max}}{4}$, en considérant différentes emprises spatiales pour le découpage du réseau.







Annexe 16. Propriétés du réseau viaire de Dijon pour les différentes dates en considérant toutes les couvertures spatiales.

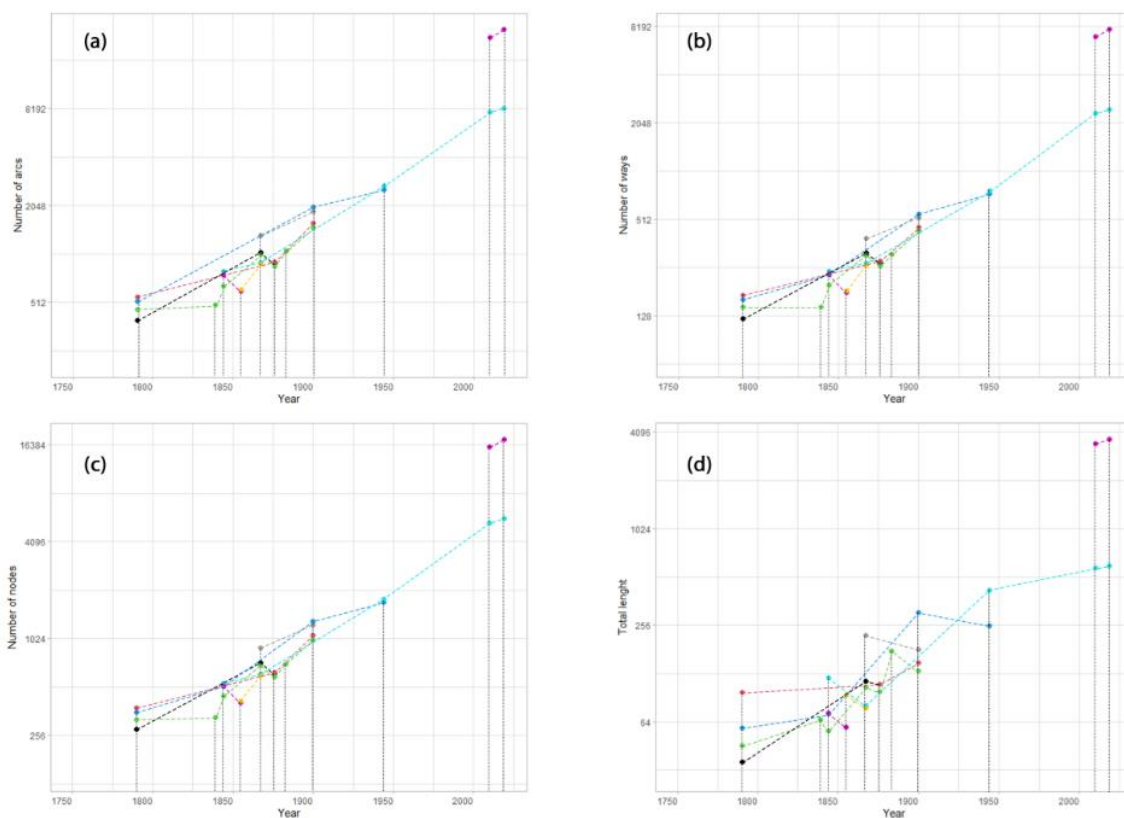
Année	Emprise spatiale correspondante	Recodage emprise spatiale	Aire (en km ²)	Nombre d'arcs	Nombre de nœuds	Nombre de voies	Longueur totale (en km)	Nombre de nouveaux arcs	Nombre de nouveaux nœuds	Nombre de nouvelles voies
1650	1650	1	2,240 5	222	146	67	30	-	-	-
1790	1650	1	2,240 5	397	279	123	36	175	133	56
1790	1790	2	5,827 8	552	381	171	98	155	102	48
1790	1839	3	5,827 8	465	321	145	45	0	0	0
1790	1790ci1844	4	-	519	358	161	58	54	37	16
1839	1839	3	3,252 9	492	332	145	66	0	0	0
1844	1839	3	3,252 9	649	449	198	56	157	117	53
1844	1790ci1844	4	-	758	516	231	72	109	67	33
1844	1844	5	6,235 7	795	539	243	121	37	23	12
1844	1844ci1855	6	-	761	522	233	73	0	0	0
1855	1844ci1855	6	-	604	408	179	60	0	0	0
1855	1855	7	6,032 9	617	417	183	95	13	9	4
1867	1844	5	-	906	617	271	81	289	200	88
1867	1855	7	-	883	603	263	79	0	0	0
1867	1867	8	15,89 7	1332	893	391	222	449	290	128
1867	1867ci1876	9	-	1045	722	316	115	0	0	0
1867	1883	11	-	1013	700	307	105	0	0	0
1876	1867ci1876	9	-	895	617	273	110	0	0	0
1876	1876	10	12,92 9	915	632	281	110	20	15	8
1876	1883	11	-	858	590	262	99	0	0	0
1883	1883	11	9,977	1066	706	308	176	208	116	46
1900	1867	8	-	1883	1239	523	181	817	533	215
1900	1876	10	-	1596	1072	455	150	0	0	0
1900	1883	11	-	1501	1010	432	134	0	0	0
1900	1900	12	21,77 1	2011	1309	551	308	510	299	119
1944	1900	12	-	2578	1727	742	254	567	418	191
1944	1944	13	28,39 4	2702	1793	768	423	124	66	26
2010	1944	13	-	7776	5361	2343	582	5074	3568	1575
2010	2010	14	224,8 8	22791	15949	7060	3469	15015	10588	4717
2019	1944	13	-	8204	5693	2486	604	0	0	0
2019	2019	15	224,8 8	25369	17625	7837	3681	17165	11932	5351

Annexe 17: Propriétés du réseau viaire de Besançon pour les différentes dates en
considérant la couverture spatiale de la carte source.

Année	Aire (en km ²)	Nombre d'arcs	Nombre de nœuds	Nombre de voies	Longueur totale (en km)	Nombre de nœuds de degré 1	Nombre de nœuds de degré 3
1696	5,668	164	126	55	32,632	33	77
1745	6,447	327	238	105	72,995	49	154
1786	10,122	380	278	123	92,375	59	176
1834	19,321	688	541	254	192,738	147	346
1848	4,693	340	235	104	73,113	34	159
1860	211,967	2151	1588	735	1009,468	314	1115
1878	47,618	1448	1047	483	480,147	192	726
1883	48,083	2239	1530	669	591,182	211	1031
1900	19,171	1165	843	381	256,052	159	570
1937	24,155	1951	1368	620	371,620	215	943
2010	211,967	15696	11480	5243	2990,939	2270	7787
2019	211,967	16937	12301	5587	3168,780	2340	8387

Annexe 18 : Propriétés du réseau viaire de Pontarlier pour les différentes dates en
considérant la couverture spatiale de la carte source.

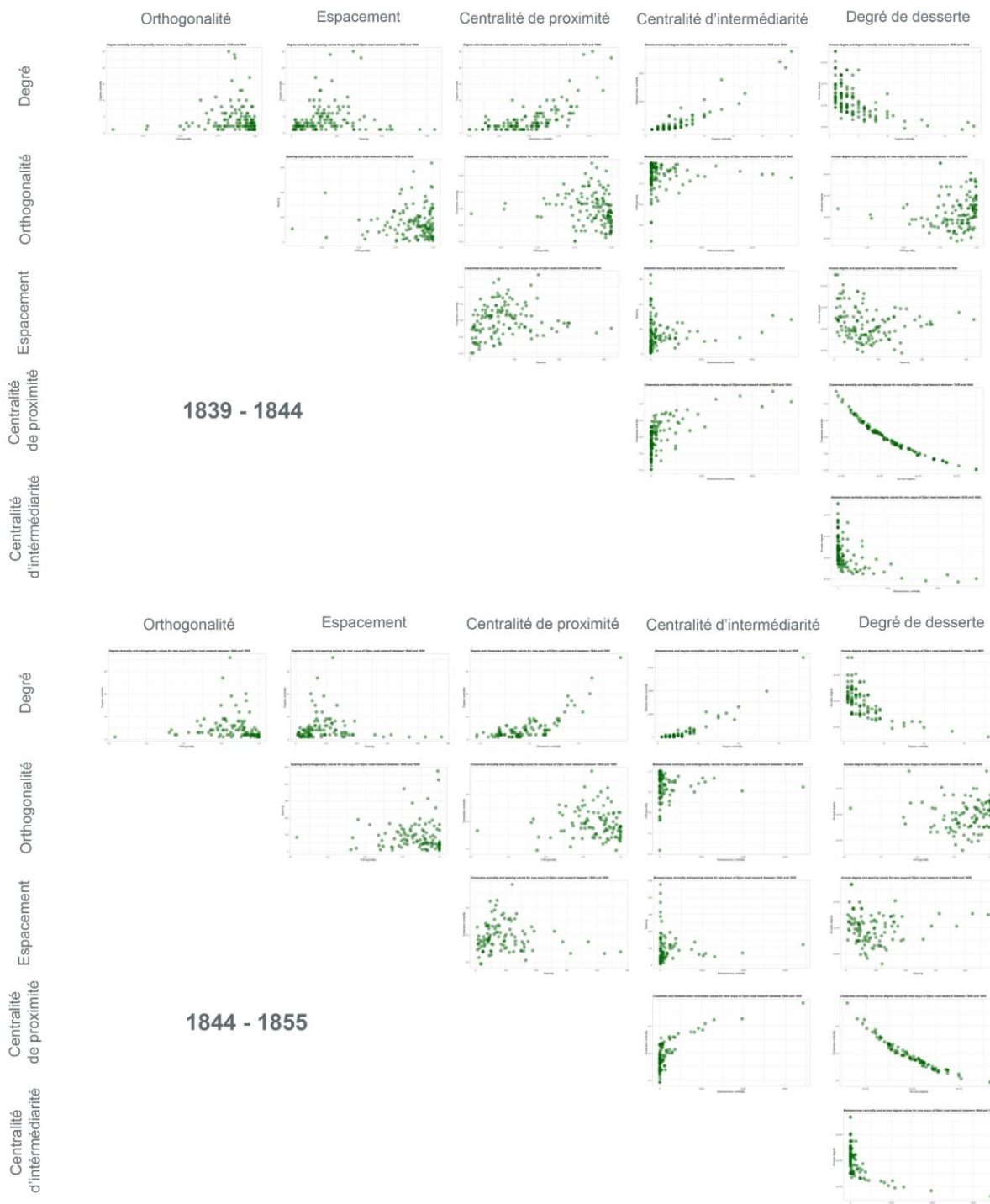
Année	Aire (en km ²)	Nombre d'arcs	Nombre de nœuds	Nombre de voies	Longueur totale (en km)	Nombre de nœuds de degré 1	Nombre de nœuds de degré 3
1692	2,03	244	185	81	35,70	45	115
1736	0,49	162	125	58	16,18	32	82
1760	1,51	144	116	41	17,35	43	39
1830	2,13	190	144	68	30,91	36	91
1842	1,17	177	137	61	24,41	41	73
1912	3,13	346	249	103	54,44	58	132
1921	4,35	289	216	99	53,64	55	127
1931	4,73	488	343	146	71,41	61	213
2010	109,40	4073	3136	1499	944,72	748	2161
2019	109,40	5060	3791	1761	1117,79	834	2550

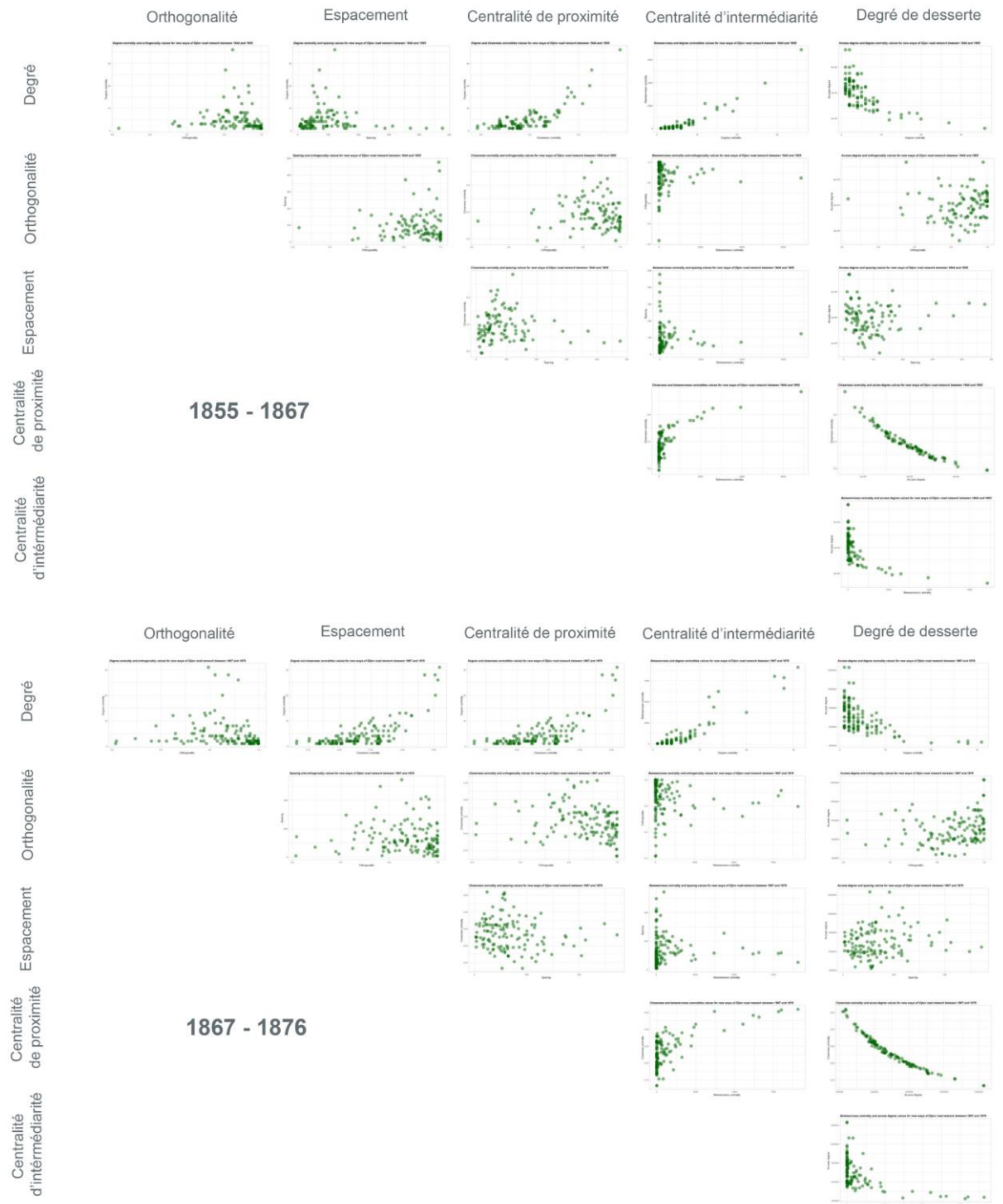


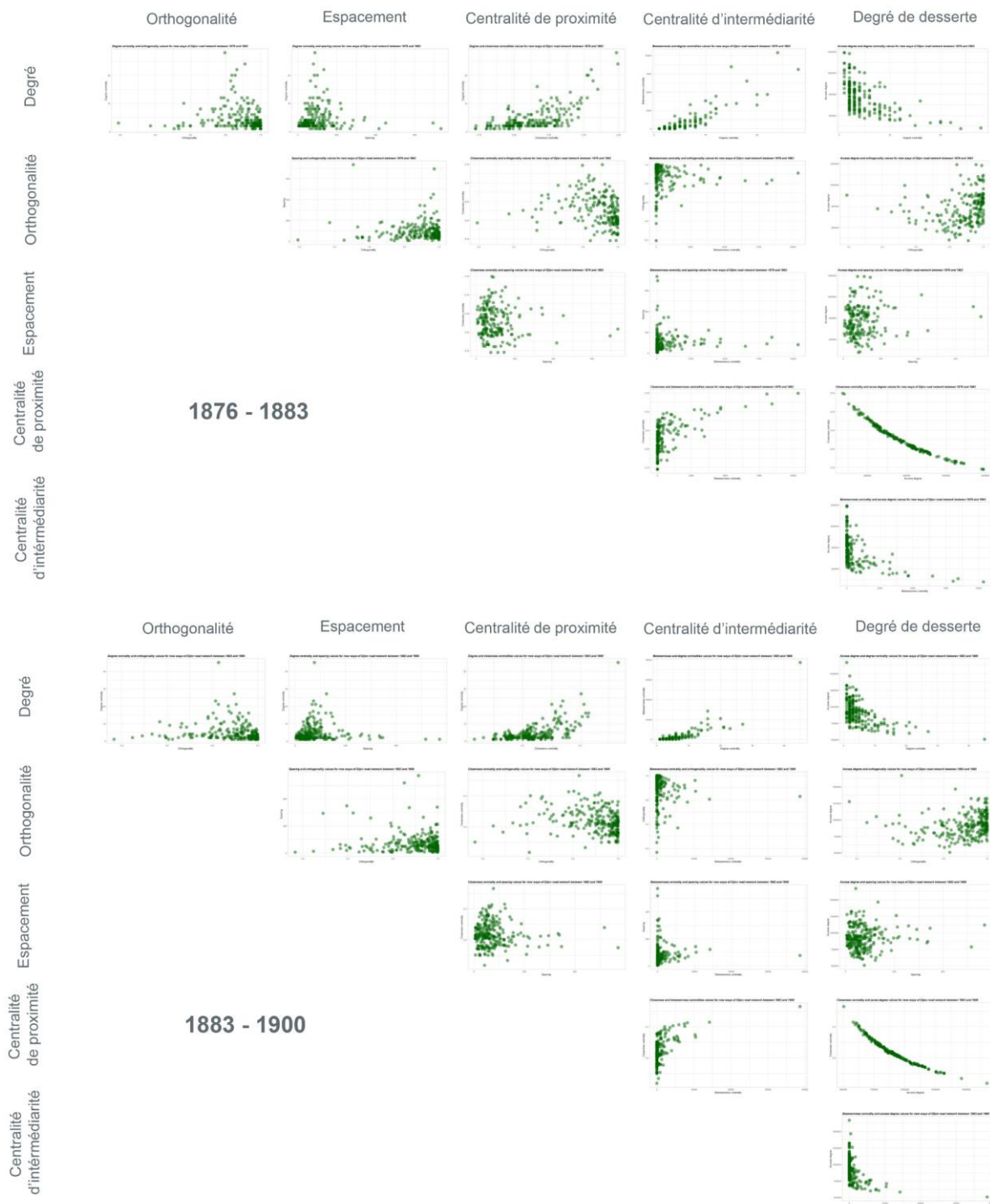
Annexe 19: Exemple de nuages de points représentant les métriques basiques du réseau de Dijon dans le temps : (a) le nombre de nœuds, (b) le nombre d'arcs, (c) le nombre de voies, et (d) la longueur totale du réseau. Pour chaque instant t les valeurs sont représentées selon les différents découpages du réseau. Les lignes connectent les valeurs des réseaux découpés selon la même couverture spatiale.

Annexe 20. Corrélation entre l'ensemble des indicateurs caractérisant les nouvelles voies apparues dans le réseau viaire de Dijon au cours du temps.

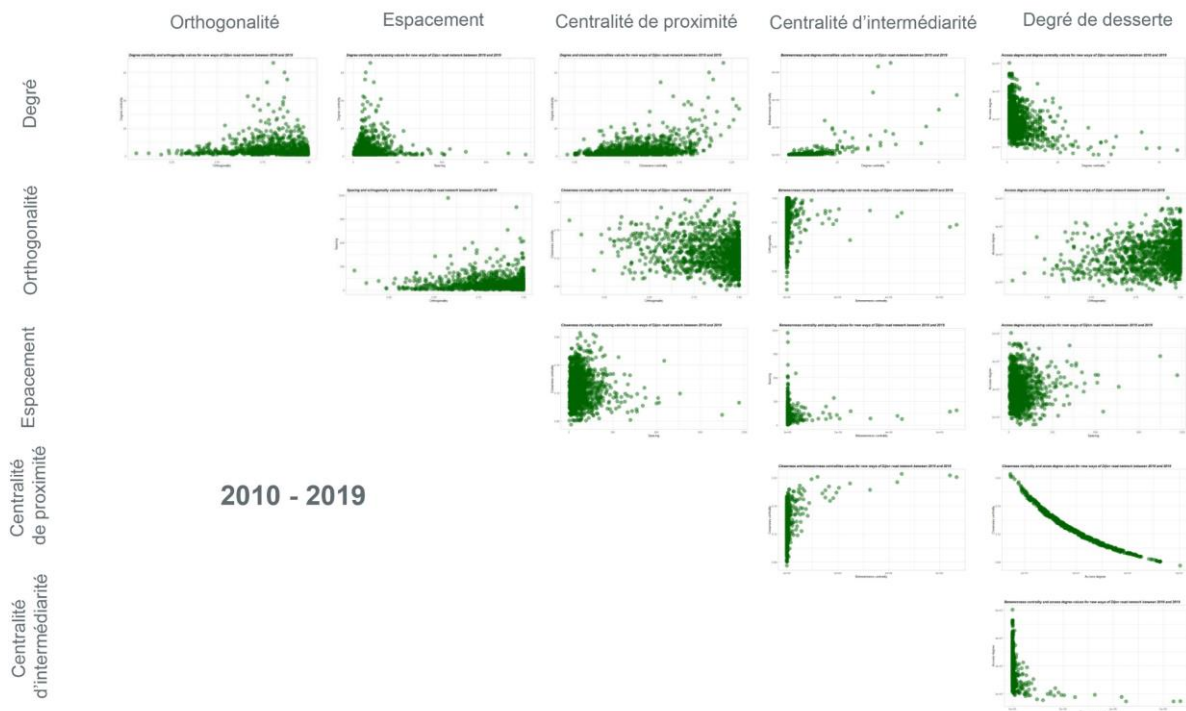






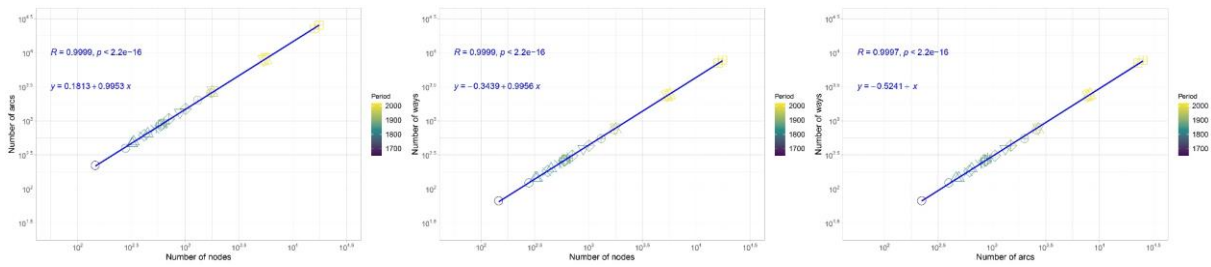




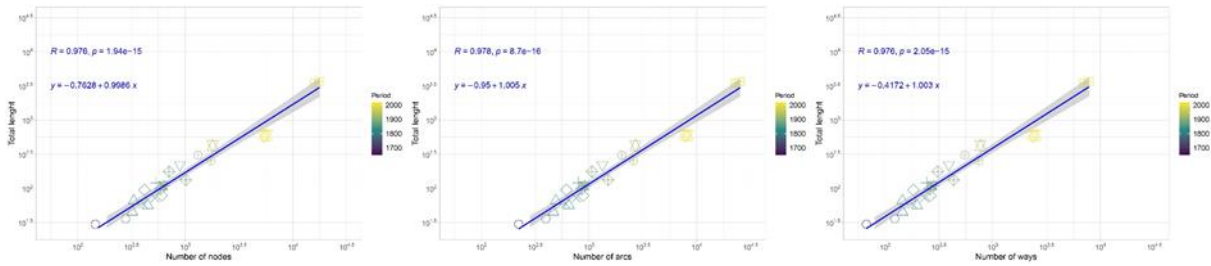


Annexes chapitre 4

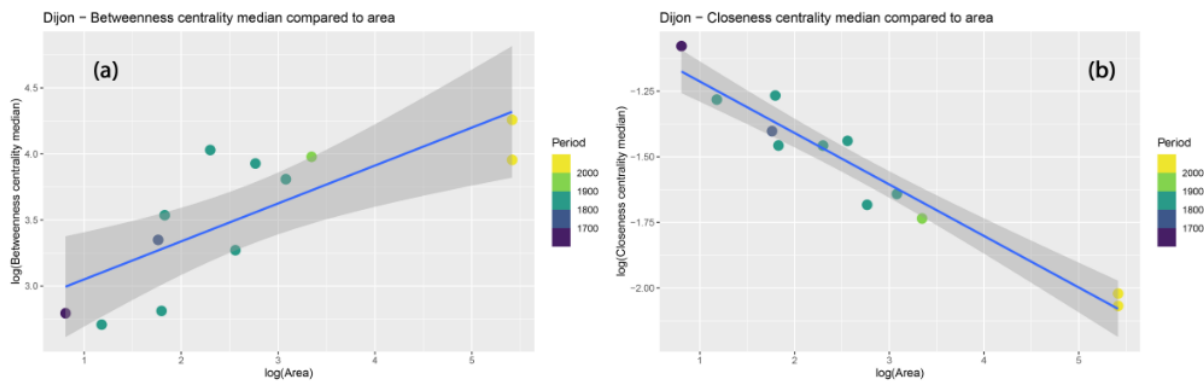
Annexe 21. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe associé au réseau viaire de Dijon au travers le temps, en considérant différentes emprises spatiales. Les données sont ajustées à un modèle linéaire (ligne bleue) (échelle logarithmique). (a) Nombre d'arcs A en fonction du nombre de nœuds N. (b) Nombre de voies V en fonction du nombre nœuds N. (c) Nombre de voies V d'arcs A en fonction du nombre d'arcs A.



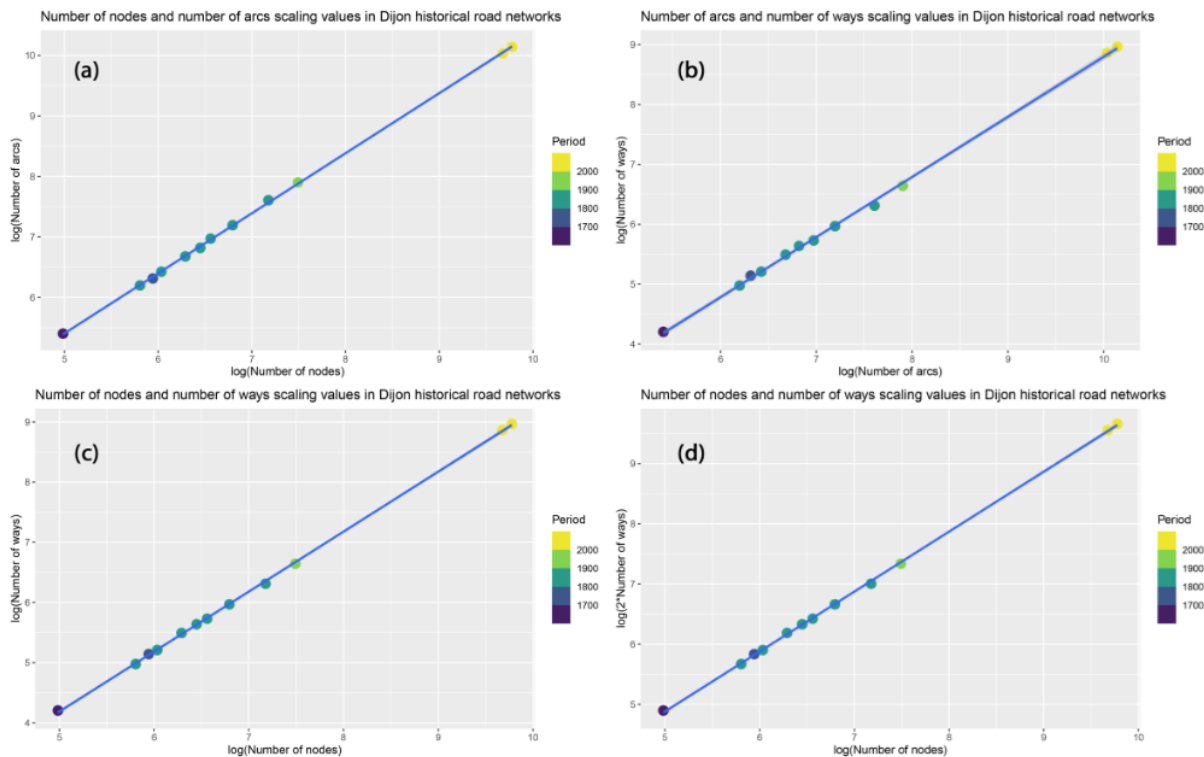
Annexe 22. Relation scalante entre les métriques de l'hypergraphe et la longueur totale L_{tot} du réseau viaire de Dijon au travers le temps, en considérant différentes emprises spatiales. Les données sont ajustées à un modèle linéaire (ligne bleue) (échelle logarithmique). (a) L_{tot} en fonction du nombre de nœuds N. (b) L_{tot} en fonction du nombre d'arcs A. (c) L_{tot} en fonction du nombre de voies V.



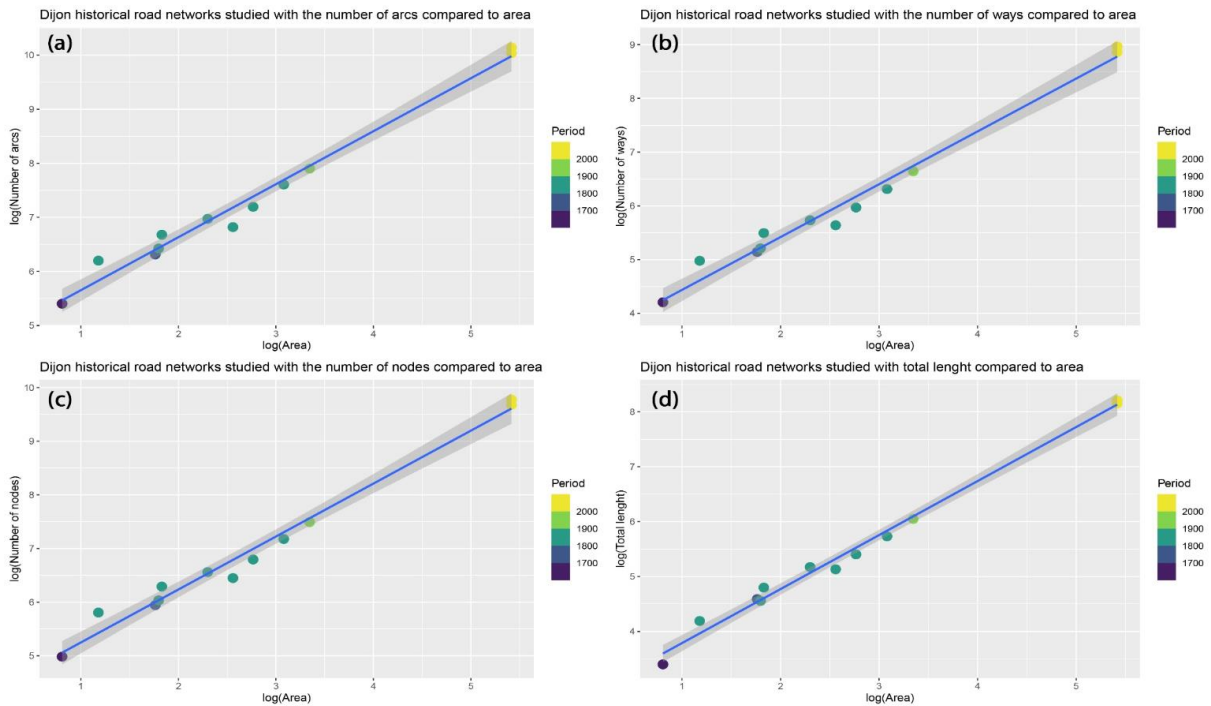
Annexe 23: Nuages de points représentant la relation entre le logarithme de la médiane des centralités (a) d'intermédiarité et (b) de proximité en fonction de la surface de couverture du réseau. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.



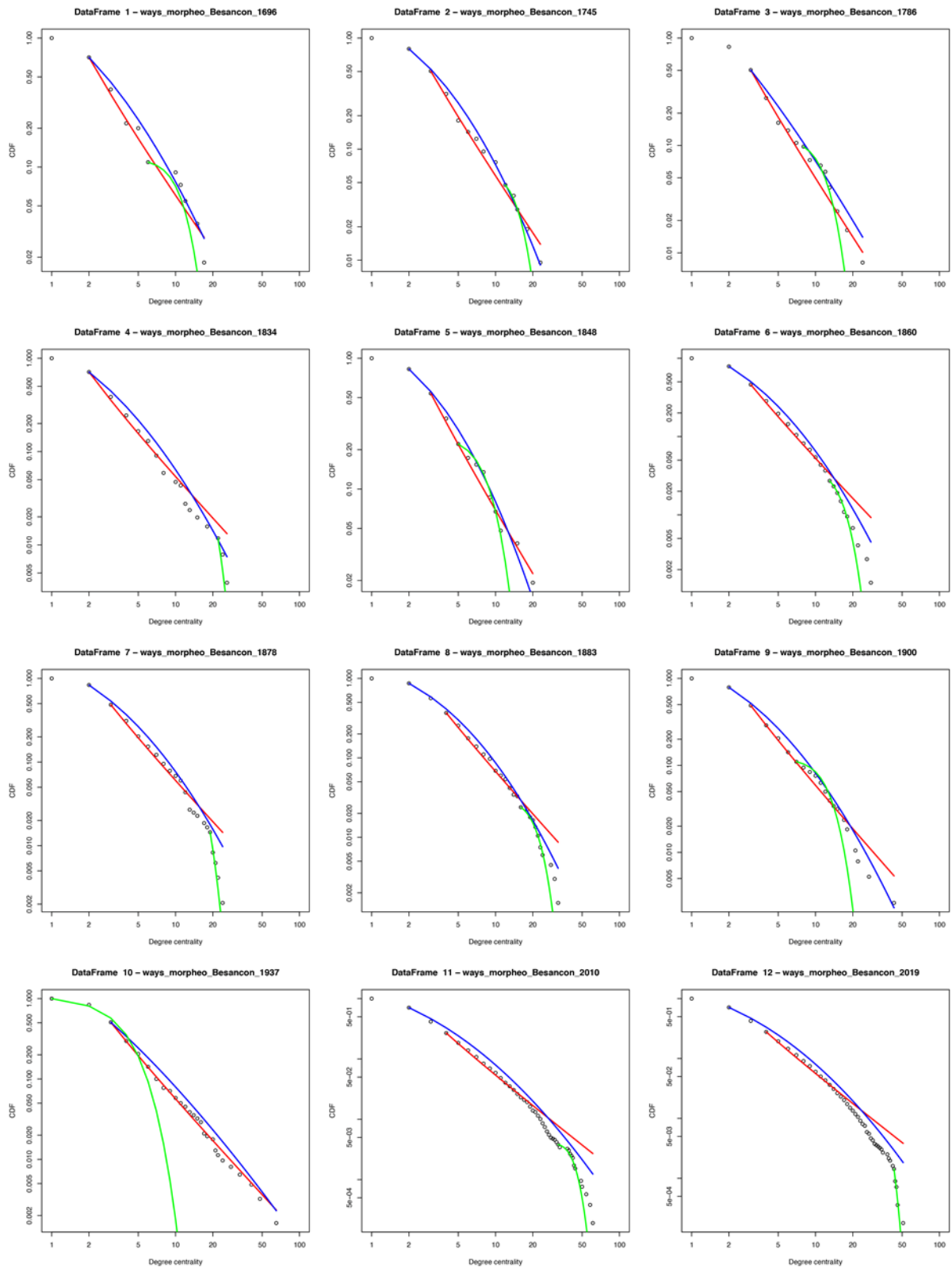
Annexe 24 : Nuages de points représentant la relation entre le logarithme (a) du nombre d'arcs A par rapport au nombre de nœuds N, (b) nombre de voies V en fonction du nombre d'arcs A, (c) Nombre de voies A et (d) de son double par rapport au nombre de nœuds N. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.

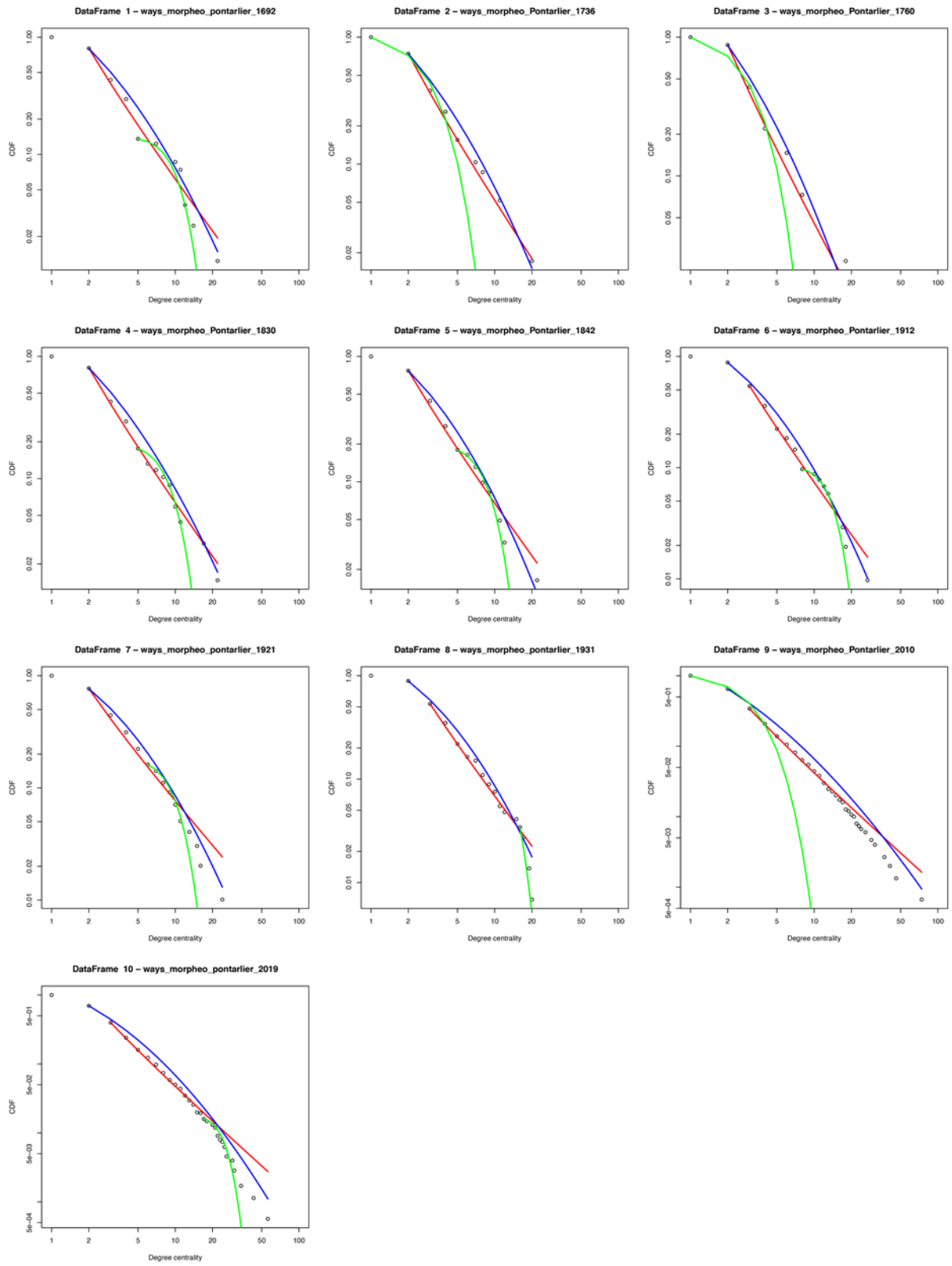


Annexe 25. Nuages de points représentant la relation entre le logarithme du nombre (a) d'arcs A, (b) de voies V, et (c) de nœuds N, et (d) de la longueur totale en fonction de la surface de couverture du réseau. L'échelle de couleur correspond à la période correspondante. La ligne bleue correspond à l'ajustement des valeurs à un modèle linéaire.



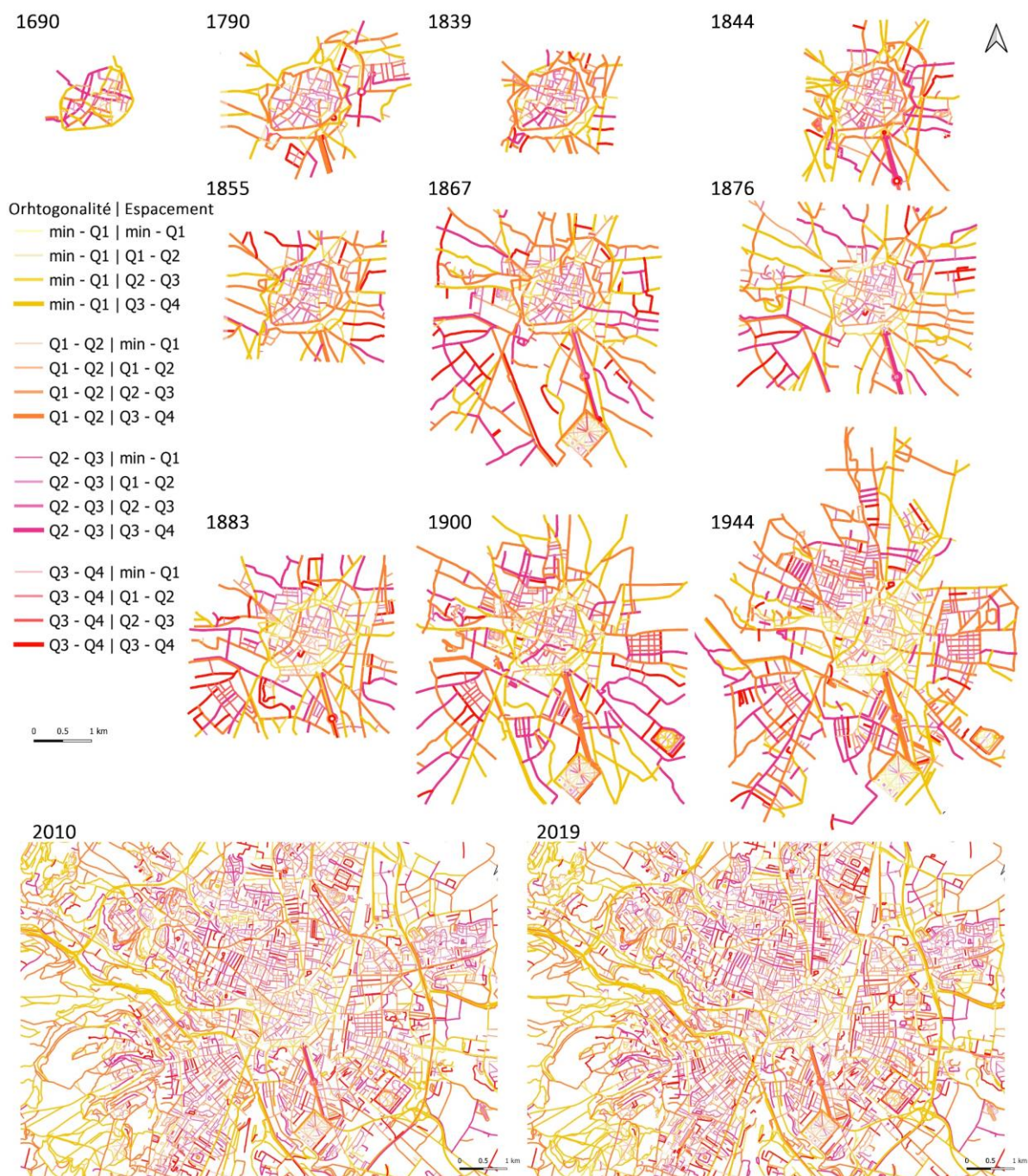
Annexe 26 : Ajustement des distributions de degré des voies des réseaux viars de Besançon et Pontarlier avec des lois de puissance, log-normales et de Poisson avec la méthode du maximum de vraisemblance.

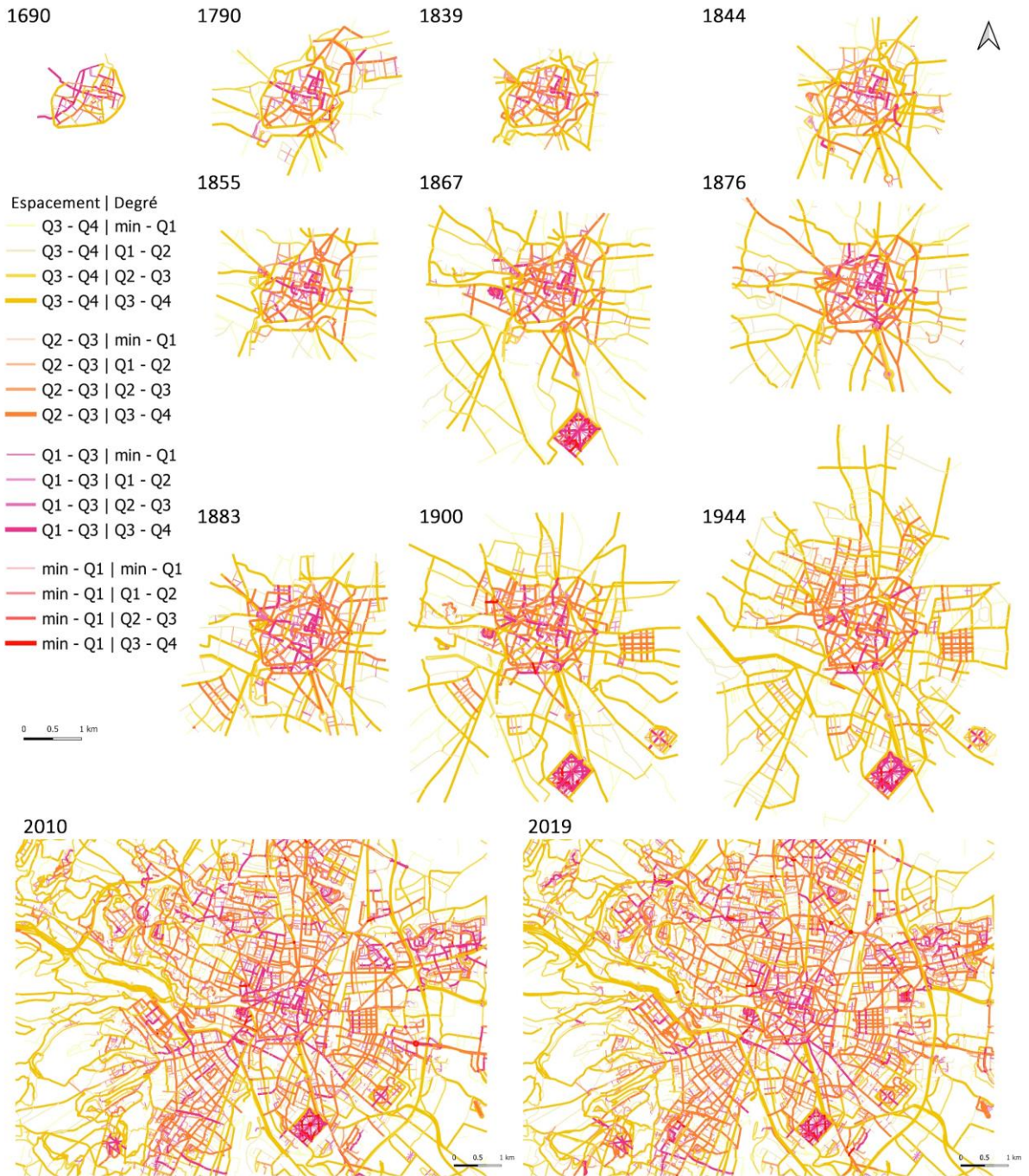


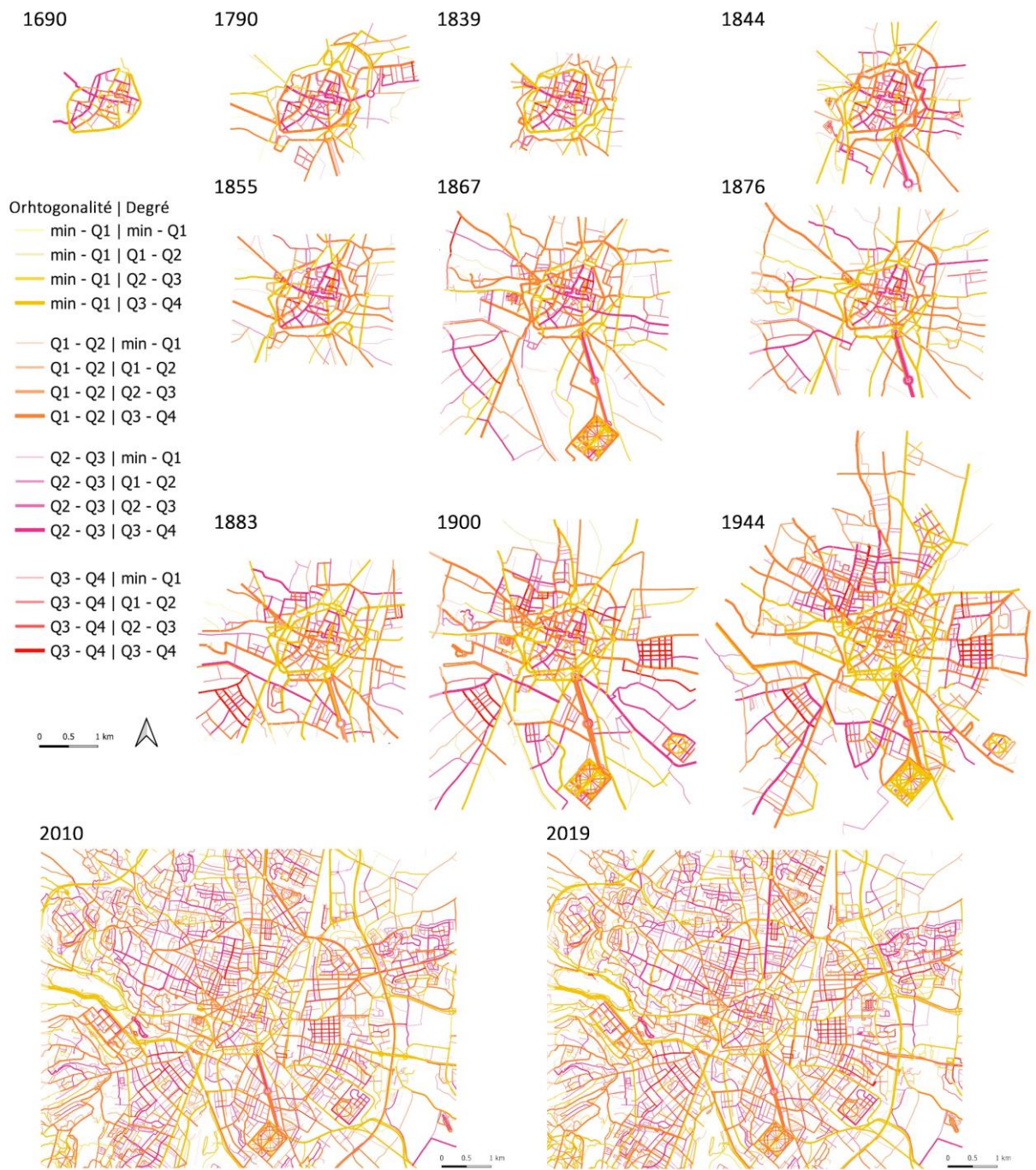


Annexes chapitre 6

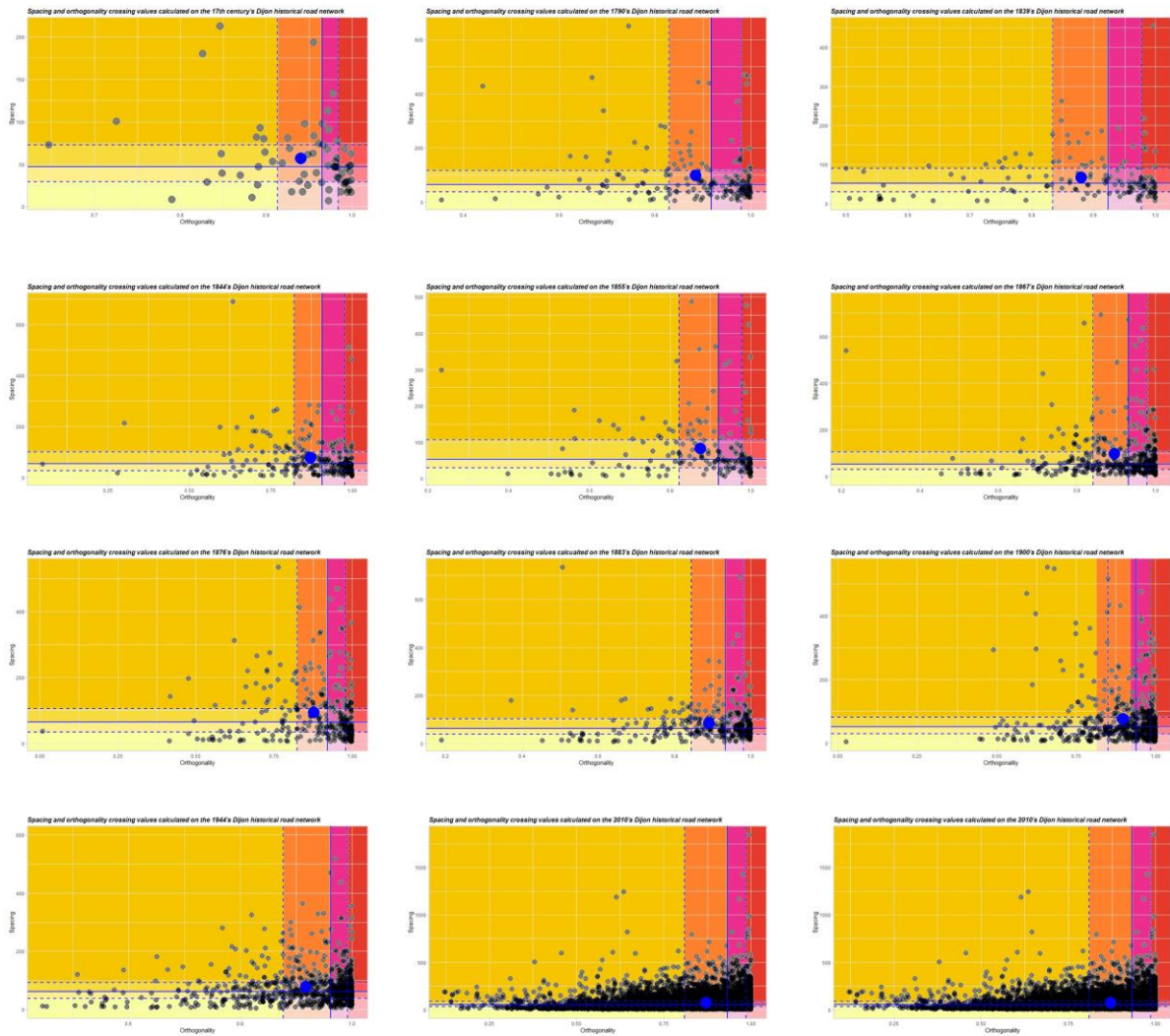
Annexe 27. Cartographie du croisement (deux à deux) des valeurs du degré, de l'orthogonalité et de l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon à différentes dates.

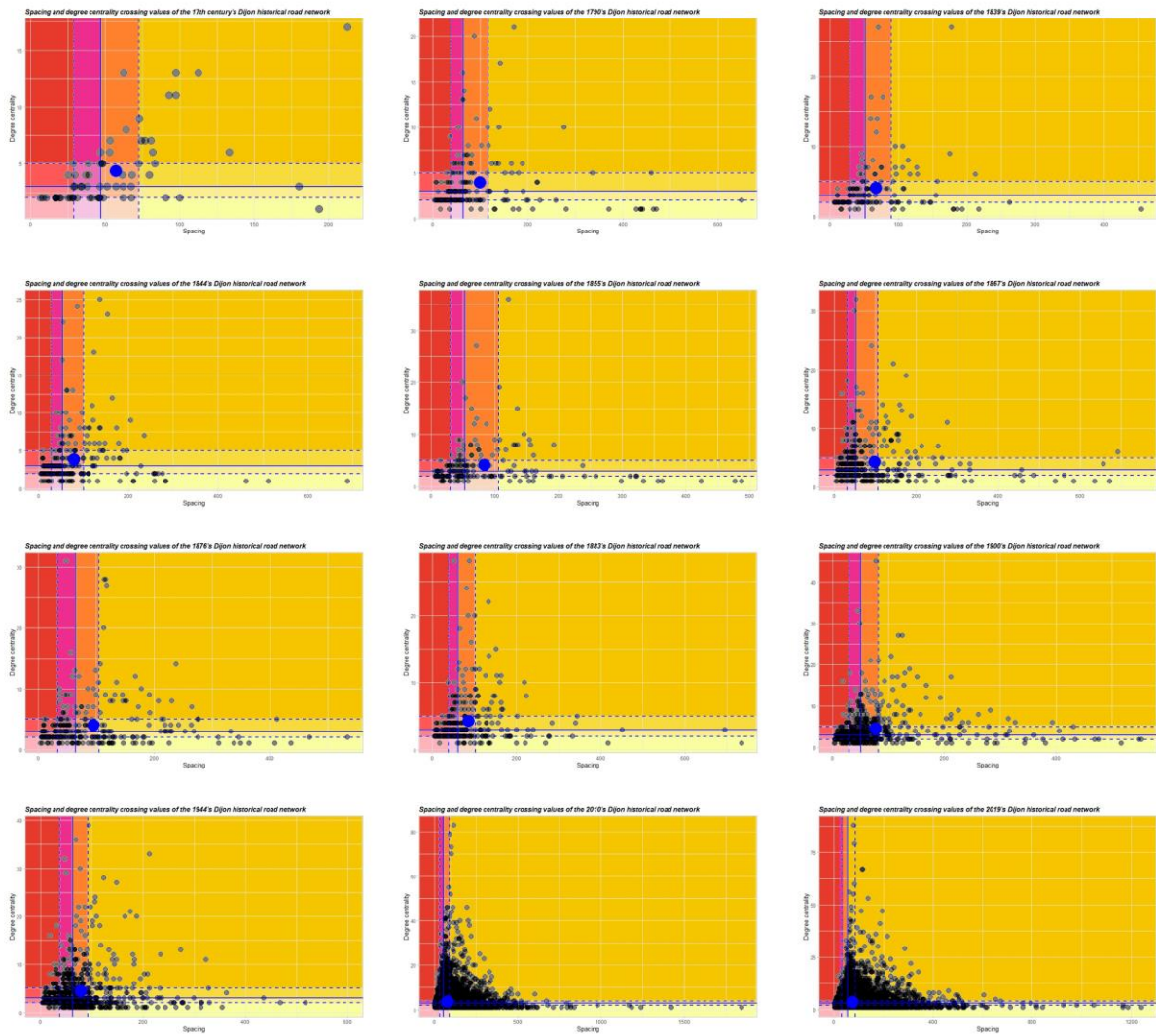


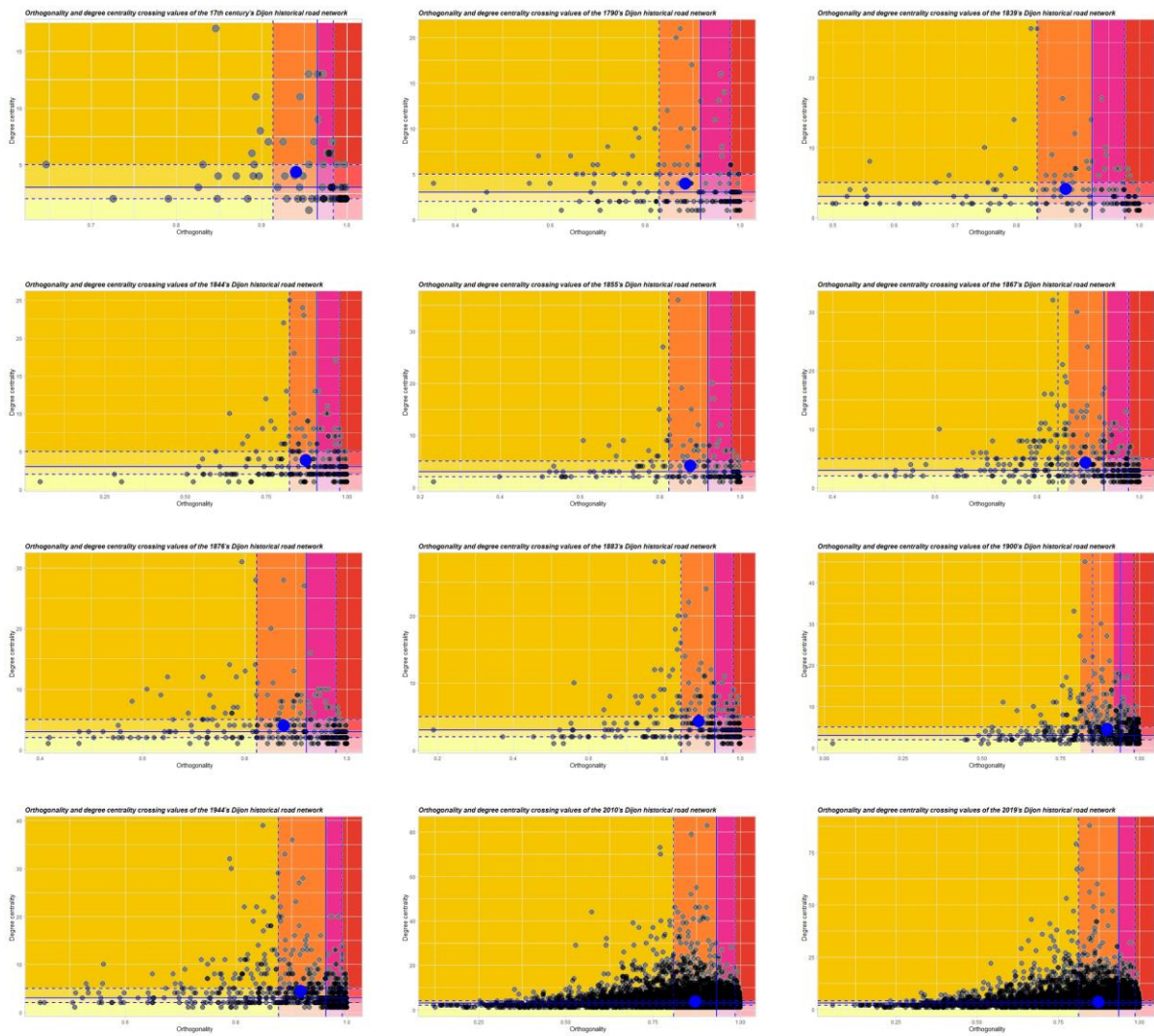




Annexe 28. Distribution statistique (en nuage de points) des valeurs selon le croisement des quartiles des valeurs du degré, de l'orthogonalité et de l'espacement des voies du réseau viaire de Dijon à différentes dates.



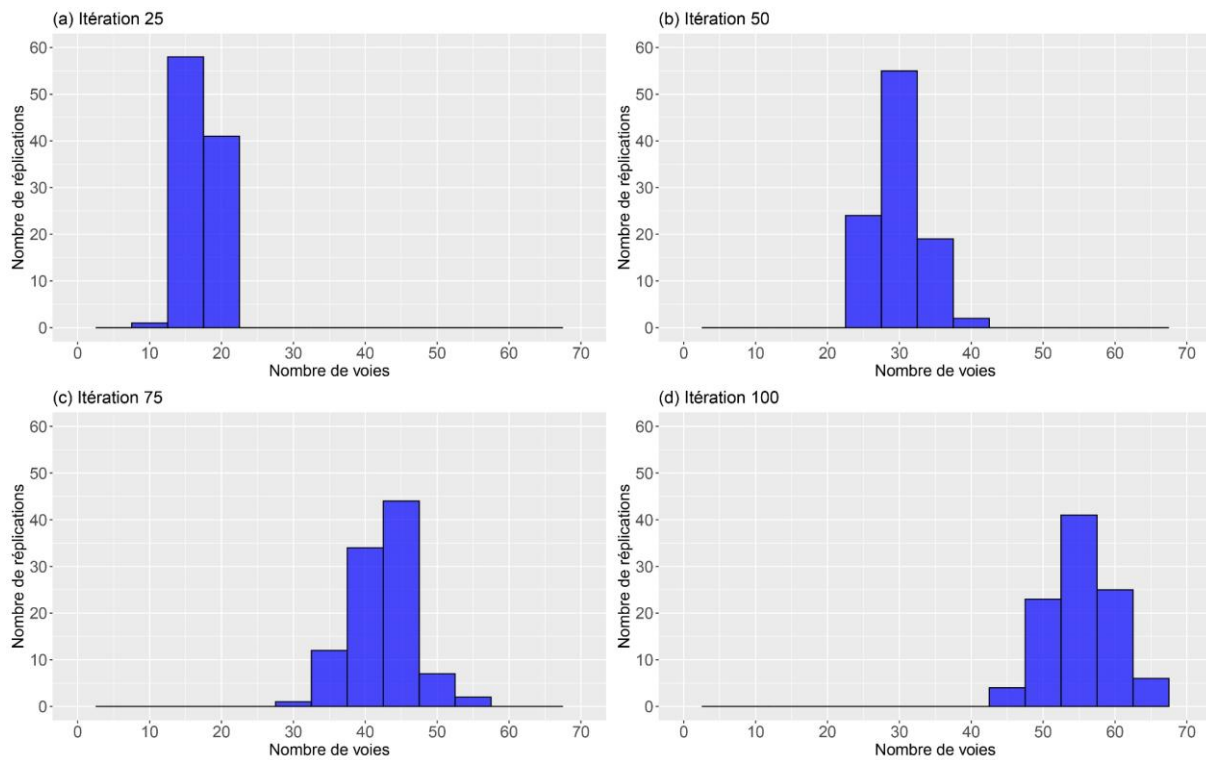




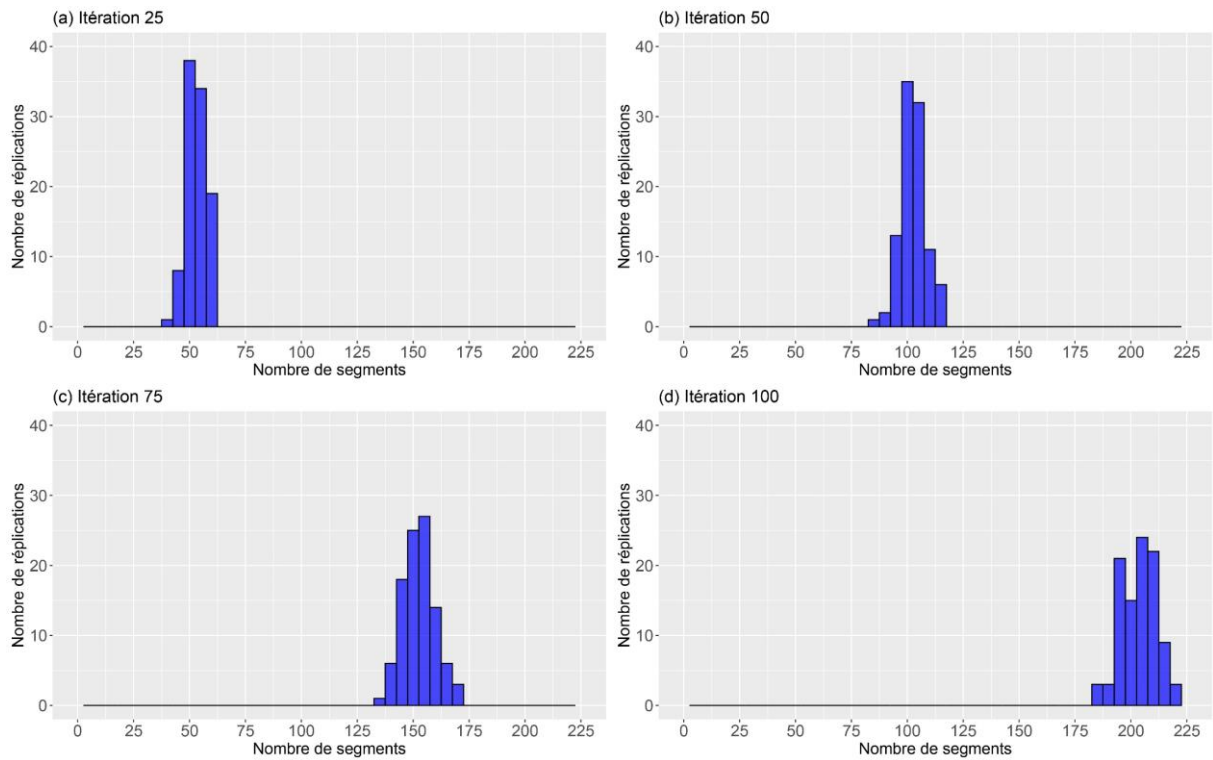
Annexes chapitre 9

Analyse de stabilité

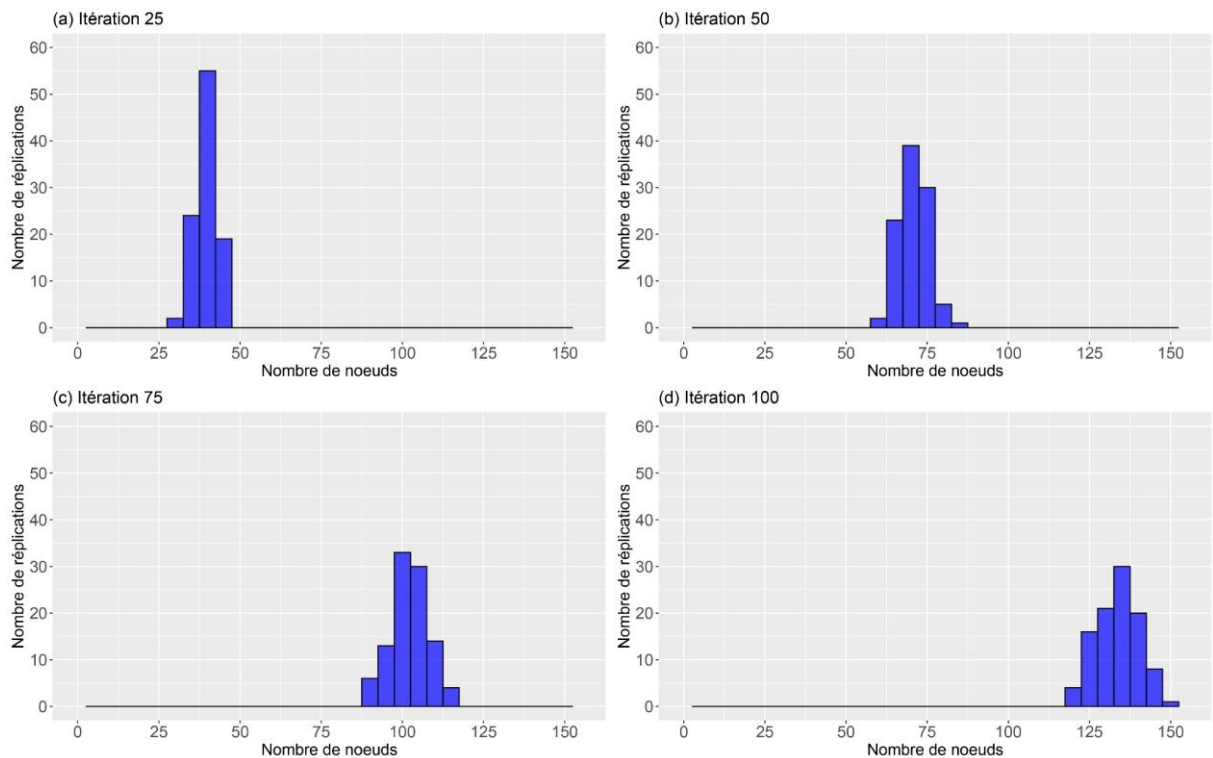
Annexe 29. Histogrammes de distribution des propriétés des graphes et des voies à chaque étape de la simulation pour les 100 réplifications :



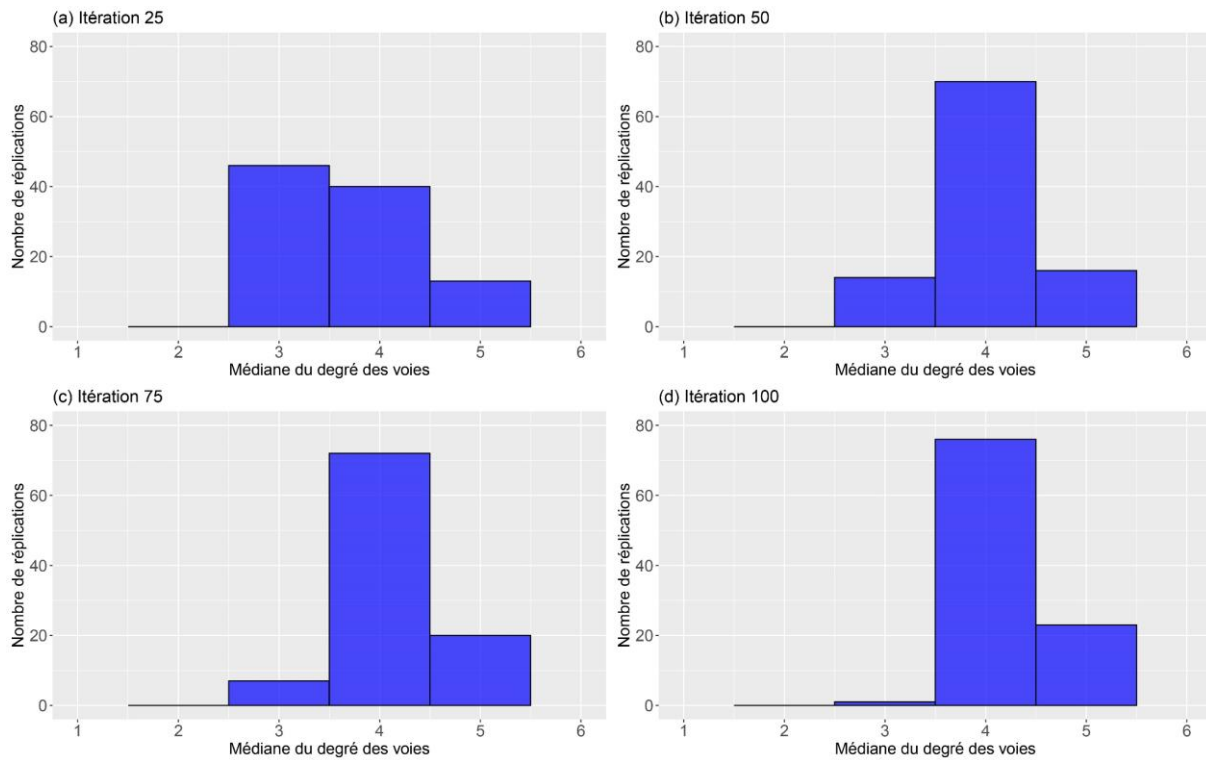
Histogrammes de distribution du nombre de voies à chaque étape de la simulation
avec $P_e = 0.5$ pour les 100 réplifications.



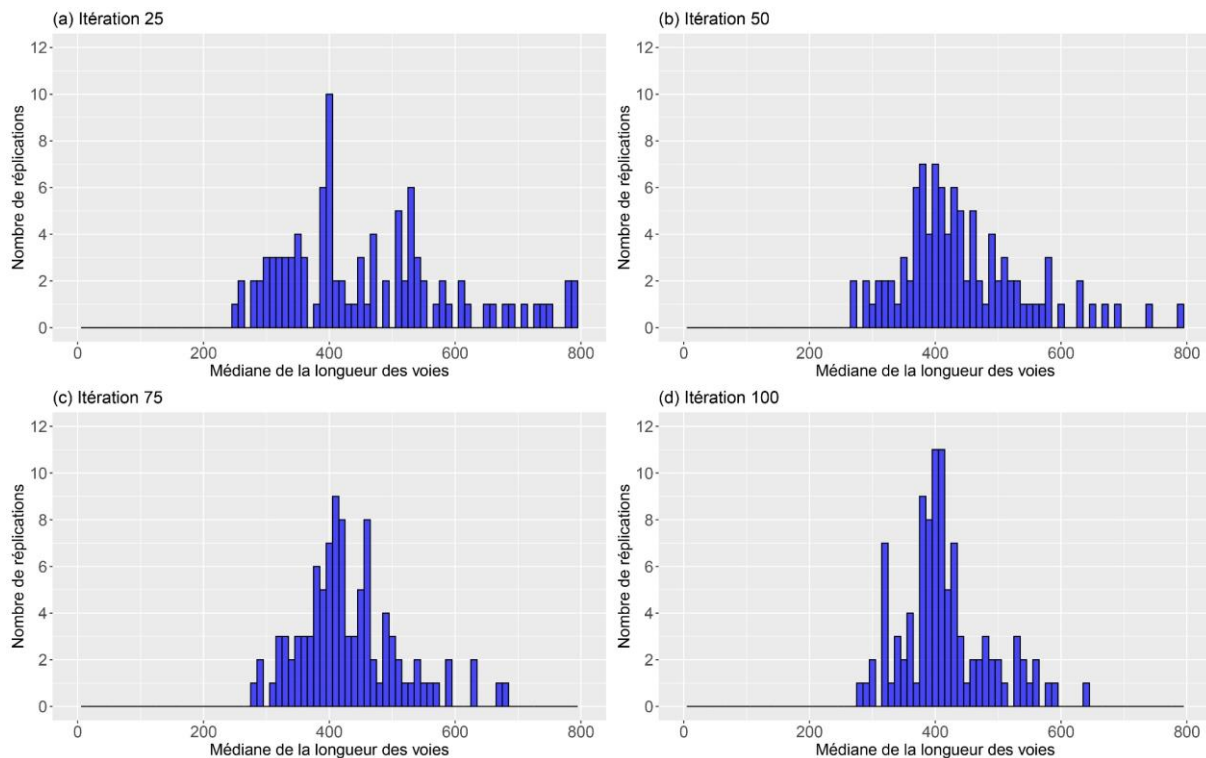
Histogrammes de distribution du nombre de segments à chaque étape de la simulation avec $P_e = 0.5$ pour les 100 répliquions.



Histogrammes de distribution du nombre de noeuds à chaque étape de la simulation avec $P_e = 0.5$ pour les 100 répliquions.



Histogrammes de distribution de la médiane du degré des voies à chaque étape de la simulation avec $P_e = 0.5$ pour les 100 répétitions.



Histogrammes de distribution de la médiane de la longueur des voies à chaque étape de la simulation avec $P_e = 0.5$ pour les 100 répétitions.

Analyse de sensibilité du modèle

Annexe 30. Tests de sensibilité aux paramètres à partir d'un réseau d'initialisation différent.

(a) : $Pe = 0.2$

(b) : $Pe = 0.4$

(c) : $Pe = 0.6$

(d) : $Pe = 0.8$

(e) : $Pe = 0.99$



Test des valeurs du paramètre d'organisation Pe à partir du squelette du réseau historique de Dijon.
Nombre d'itérations = 100

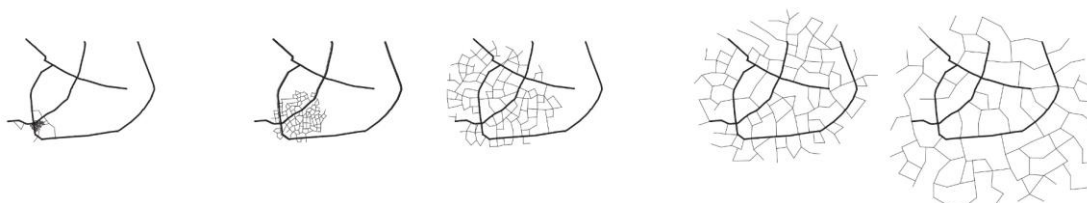
(a) : $r_0 = 10$

(b) : $r_0 = 50$

(c) : $r_0 = 100$

(d) : $r_0 = 150$

(e) : $r_0 = 200$



Test des valeurs de la distance de répulsion r_0 à partir du squelette du réseau historique de Dijon.
Nombre d'itérations = 100

(a) : $L_{max} = 400$

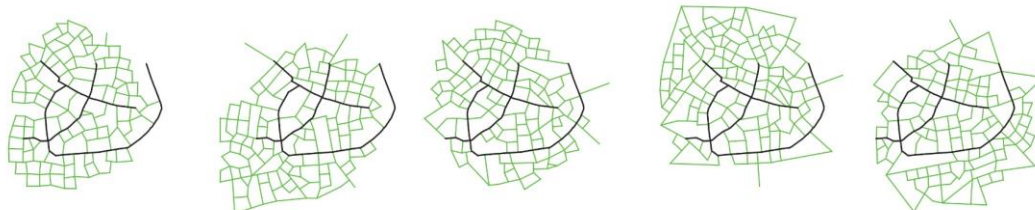
(b) : $L_{max} = 600$

(c) : $L_{max} = 800$

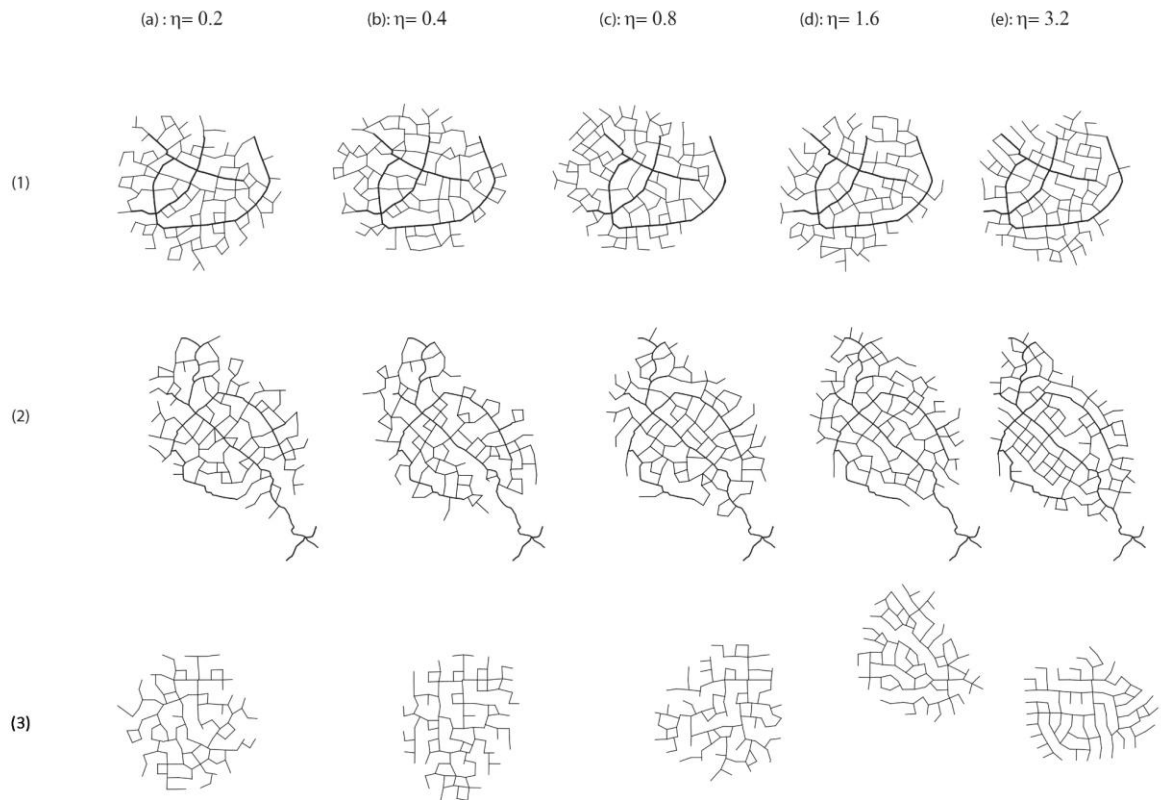
(d) : $L_{max} = 1000$

(e) : $L_{max} = 1200$

(1)
N=100



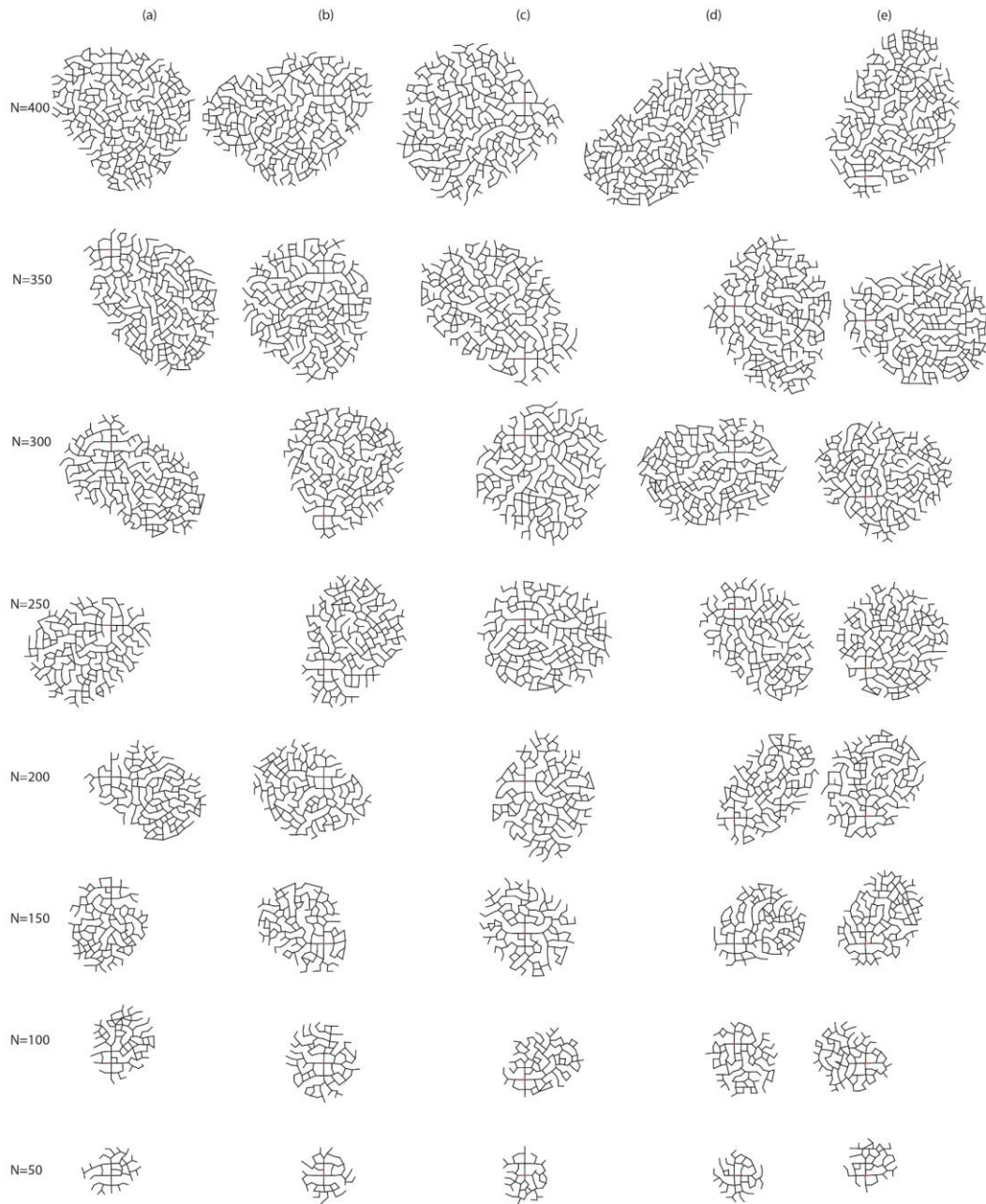
Test des valeurs de la longueur maximale L_{max} à partir du squelette du réseau historique de Dijon.
Nombre d'itérations = 100



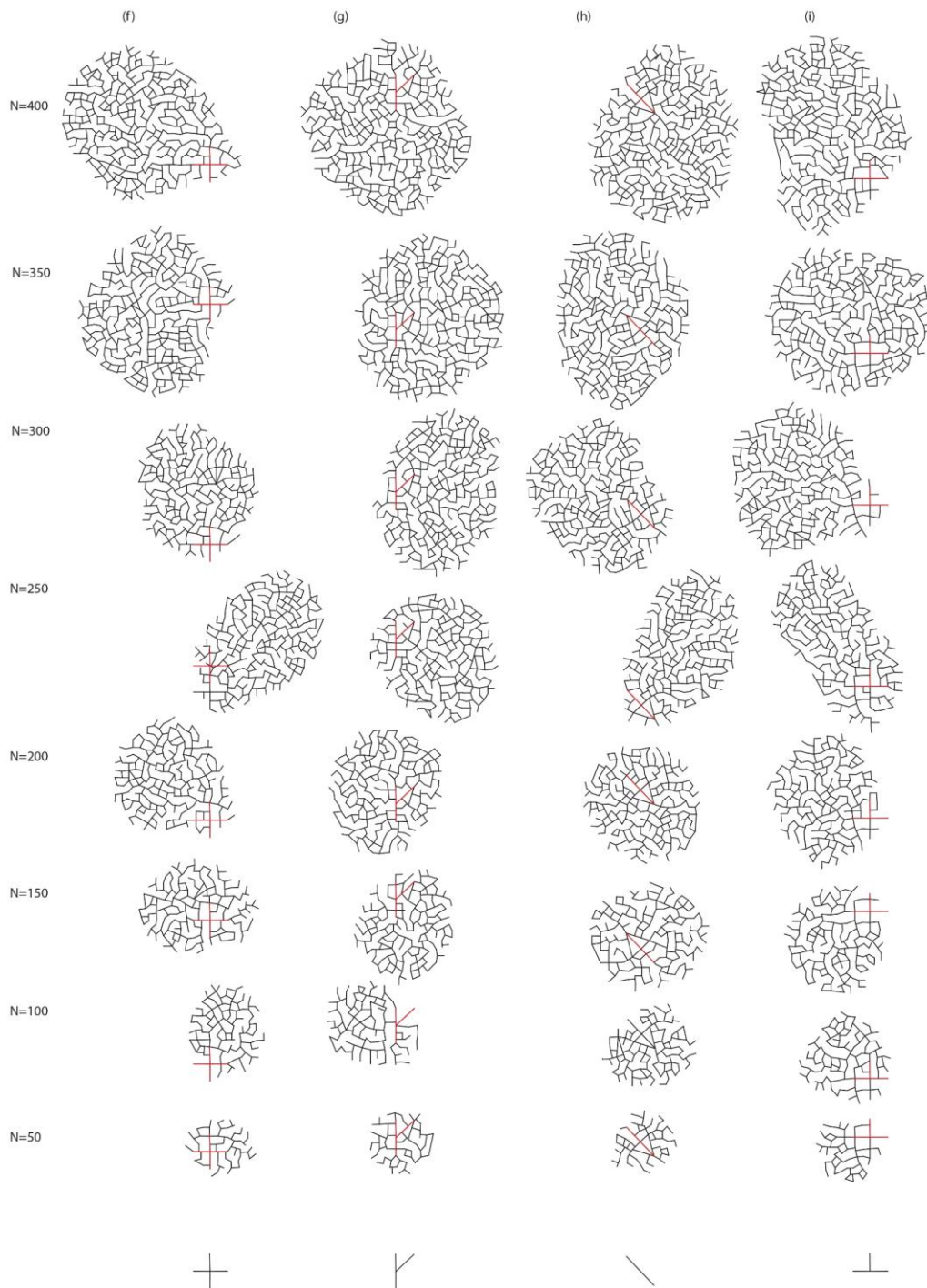
Simulation à partir (1) du squelette du réseau historique de Dijon, (2) de celui de Besançon et (3) d'un seul segment et tests des valeurs du paramètre d'étalement (a) $\eta = 0,2$, (b) $\eta = 0,4$; (c) $\eta = 0,8$; (d) $\eta = 1,6$ et (e) $\eta = 3,2$. $L_{\max} = 400$. Nombre d'itérations = 100.

Annexe 31. Tests de sensibilité au réseau d'initialisation en considérant différents nombres d'itération.

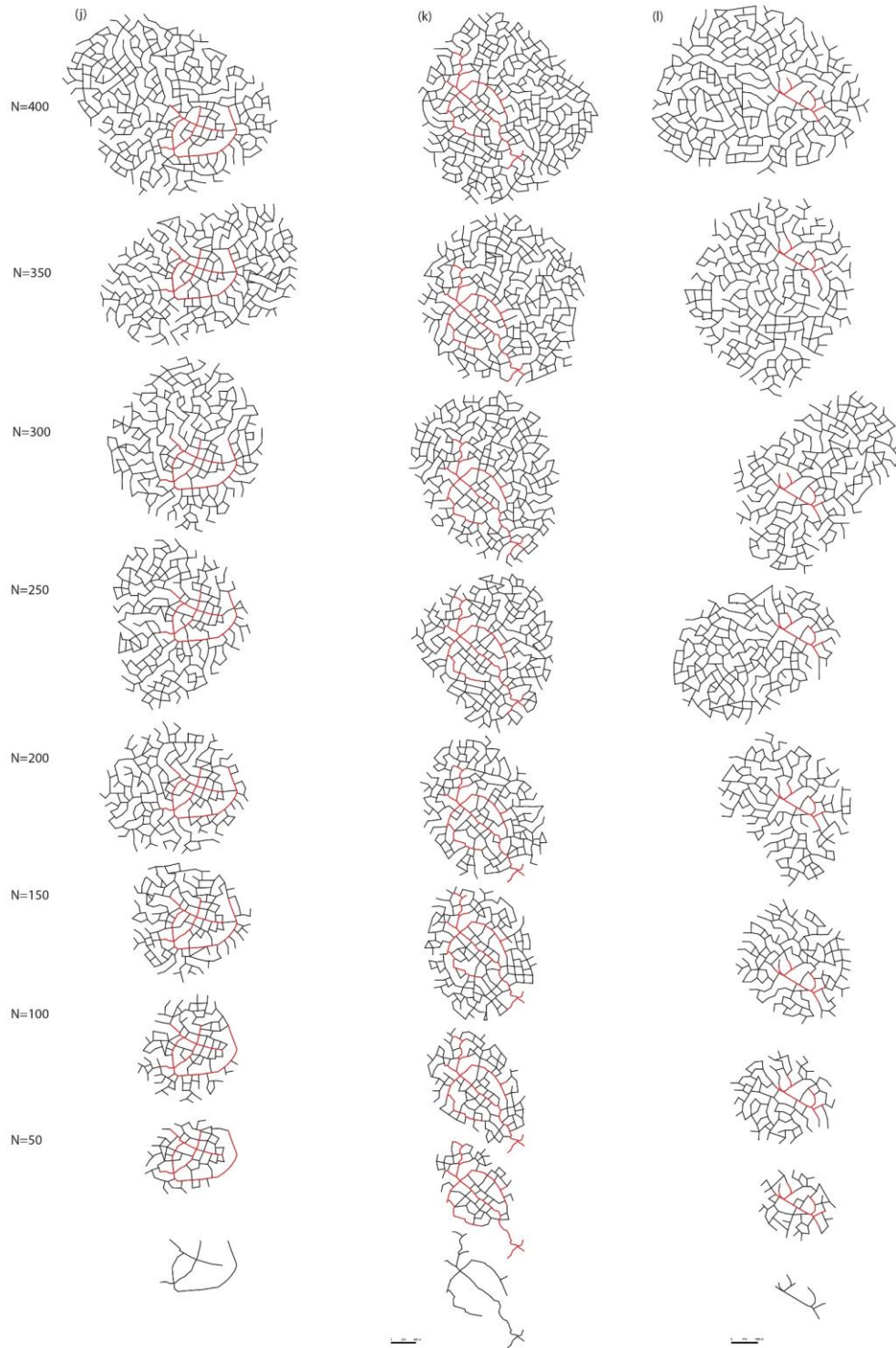
- Nombre d'itérations différents pour chaque réplique d'une même simulation
- 12 différents initiateurs :
 - 5 segments(s) initiateur(s) : un segment horizontal, un segment vertical, deux segments croisés centralement, deux segments croisés en L, un ensemble de 4 segments.
 - 4 initiateurs de voie(s) traversante(s) : deux voies croisées centralement, deux voies croisées en T, deux voies croisées en branchement Y, une voie radiale.
 - 3 squelettes de réseaux historiques réels



Test de la sensibilité du modèle aux initiateurs : Variabilité des réseaux viaires obtenus à partir de 5 différents segments d'initialisation répliqués d'une même simulation avec les mêmes paramètres pour un nombre d'itérations qui varie de 50 à 400.



Test de la sensibilité du modèle aux initiateurs : Variabilité des réseaux viaires obtenus par 4 réplifications d'une même simulation à partir de différents initiateurs, avec les mêmes paramètres pour un nombre d'itérations qui varie de 50 à 400.



Test de la sensibilité du modèle aux initiateurs : Variabilité des réseaux viaires obtenus par 3 répliques d'une même simulation à partir de différents initiateurs, avec les mêmes paramètres pour un nombre d'itérations qui varie de 50 à 400.

Calibrage du modèle

Annexe 32. Simulation de voies concentriques avec différentes valeurs du paramètre de construction $0 \leq \omega \leq 0.4$:

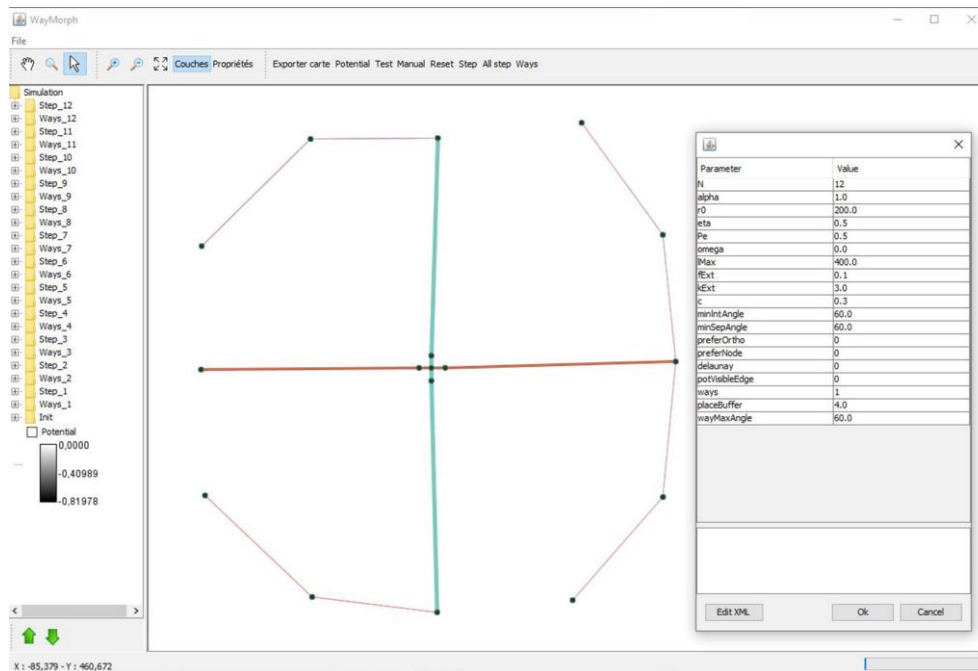


Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0$.

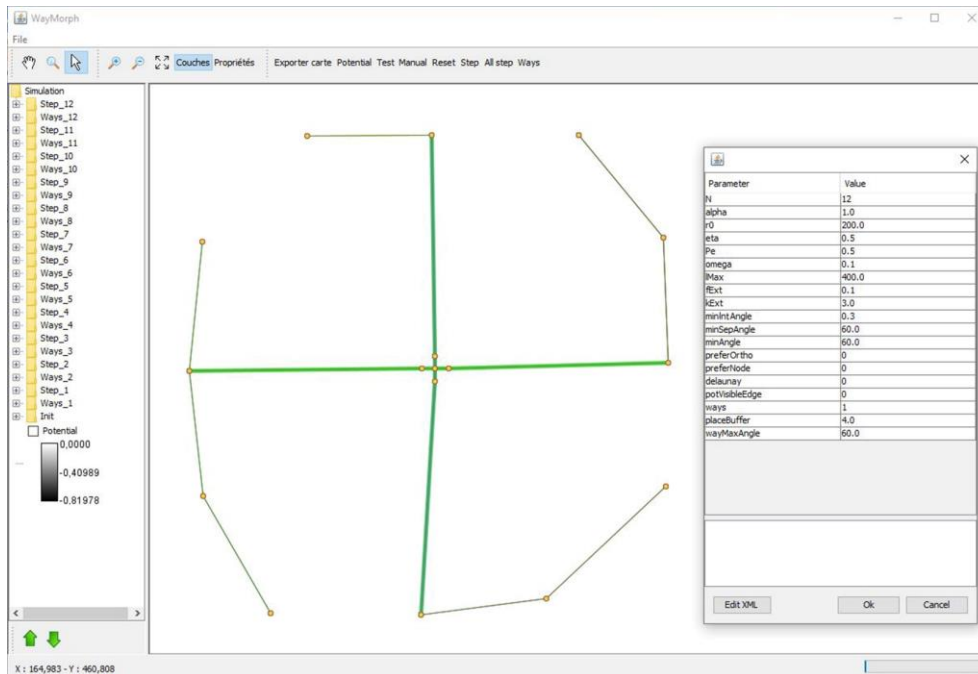
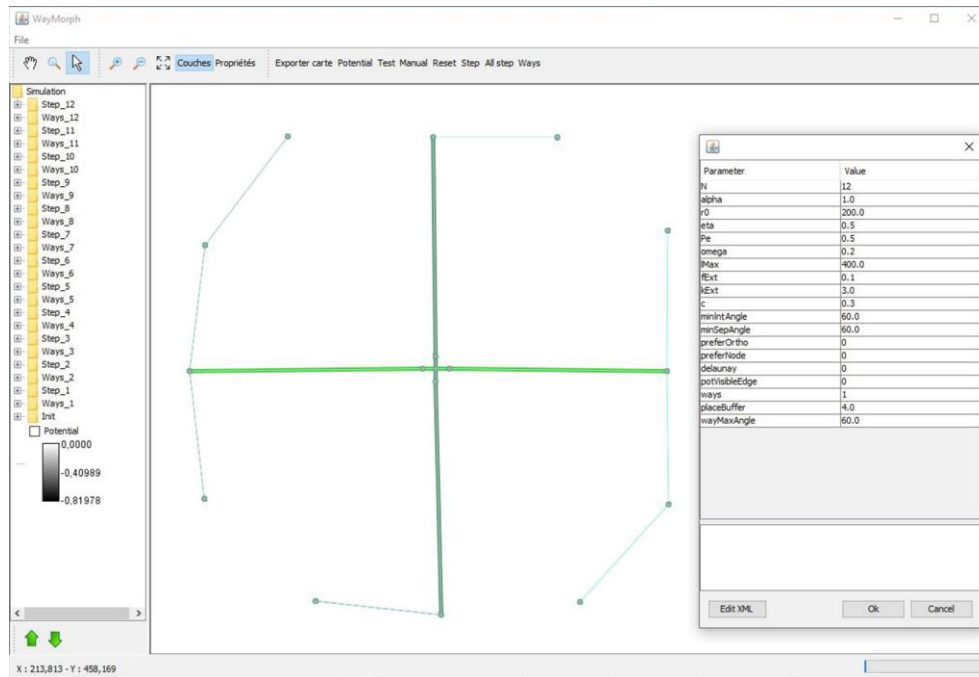


Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0,1$.



. Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0,2$.

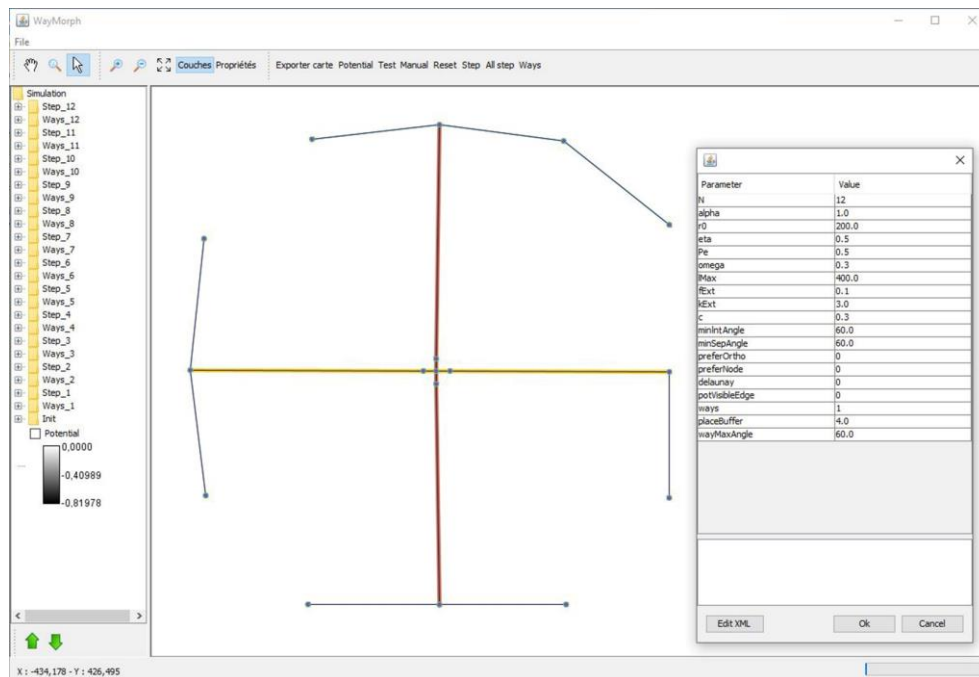


Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0,3$.

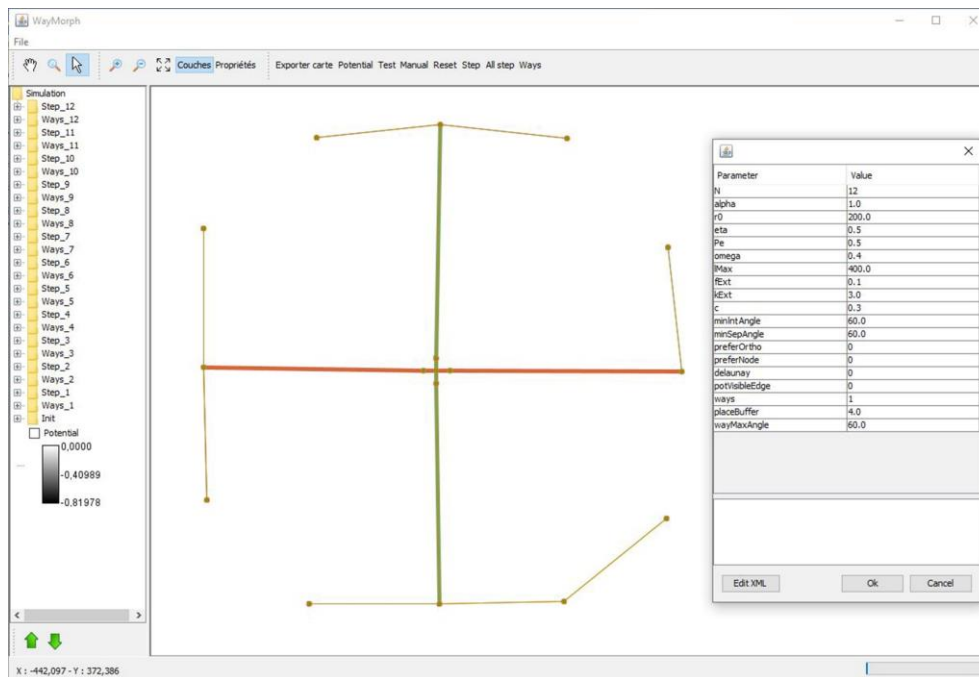


Illustration de la simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0,4$.

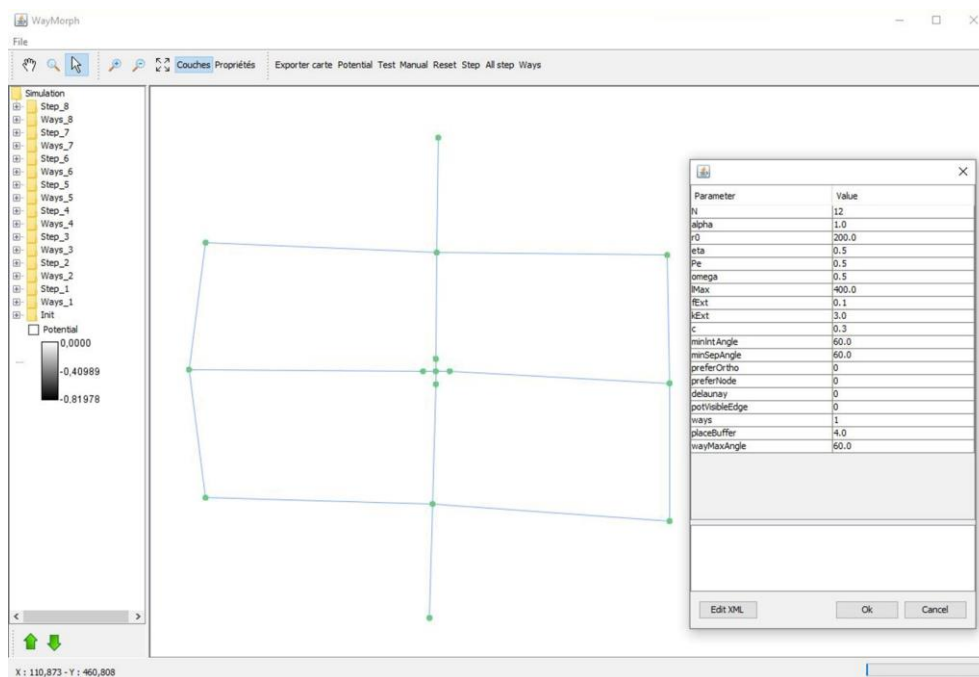


Illustration d'un test non abouti de simulation d'une voie concentrique (à partir de deux segments croisés) avec $\omega = 0,5$.

Annexe 33. Simulation de voies ramifiées avec différentes valeurs des paramètres E_{pp} , W_p et A_i

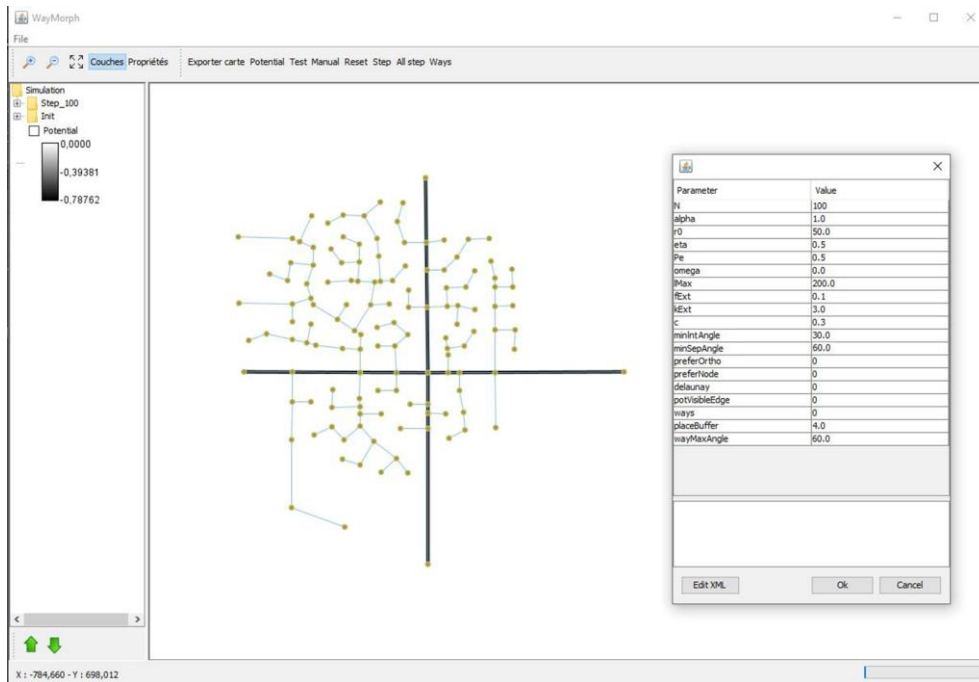


Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir)) avec $E_{pp} = 0$, $W_p = 0$ et $A_i = 30$.

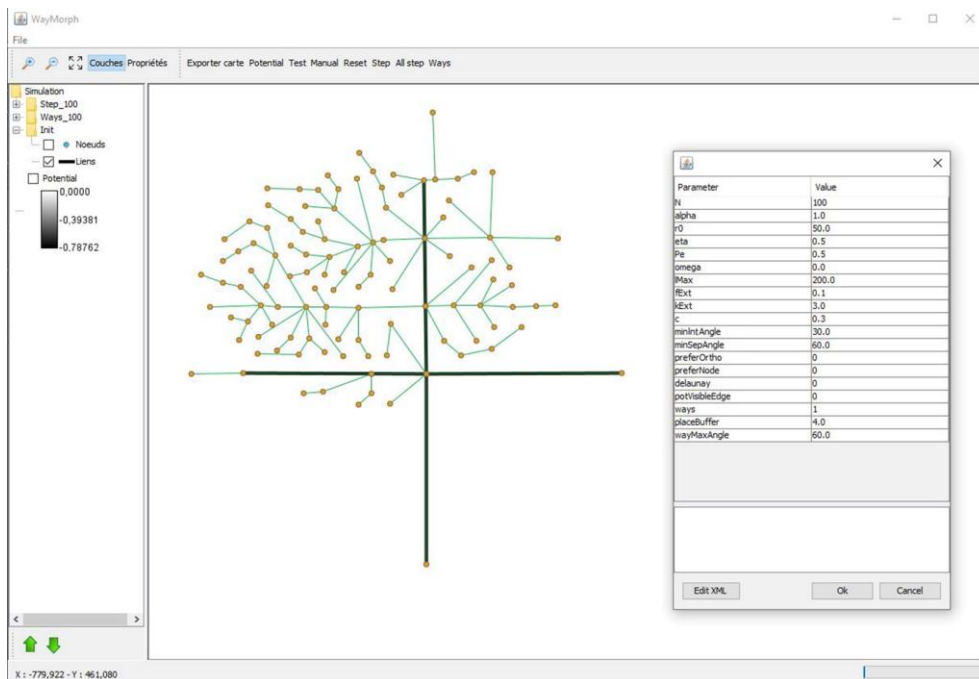


Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir)) avec $E_{pp} = 0$, $W_p = 1$ et $A_i = 30$.

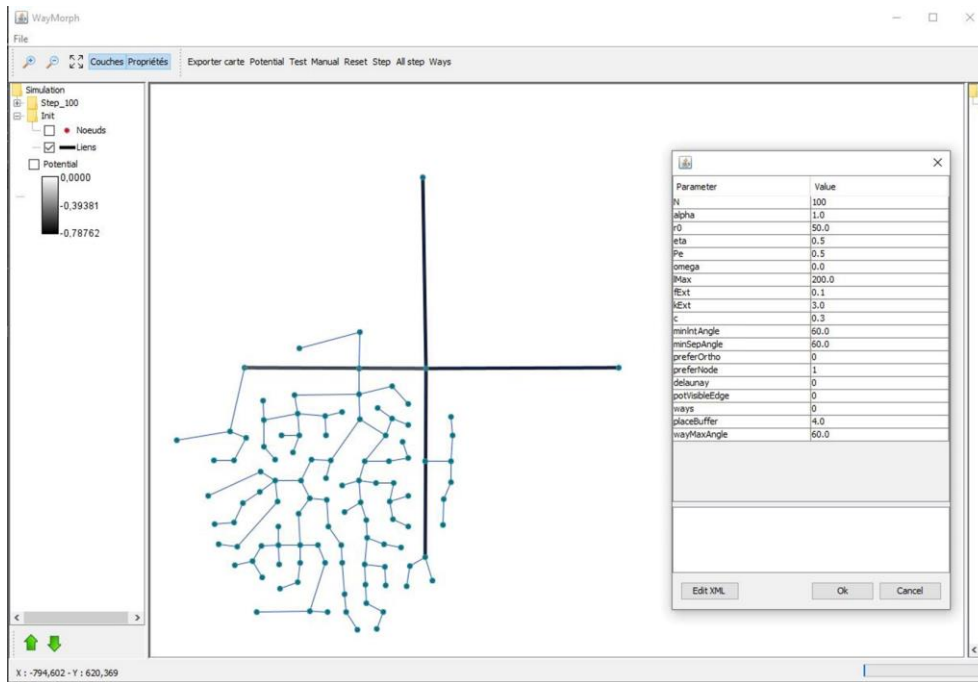


Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir))
avec $E_{pp} = 1$, $W_p = 0$ et $A_i = 60$.

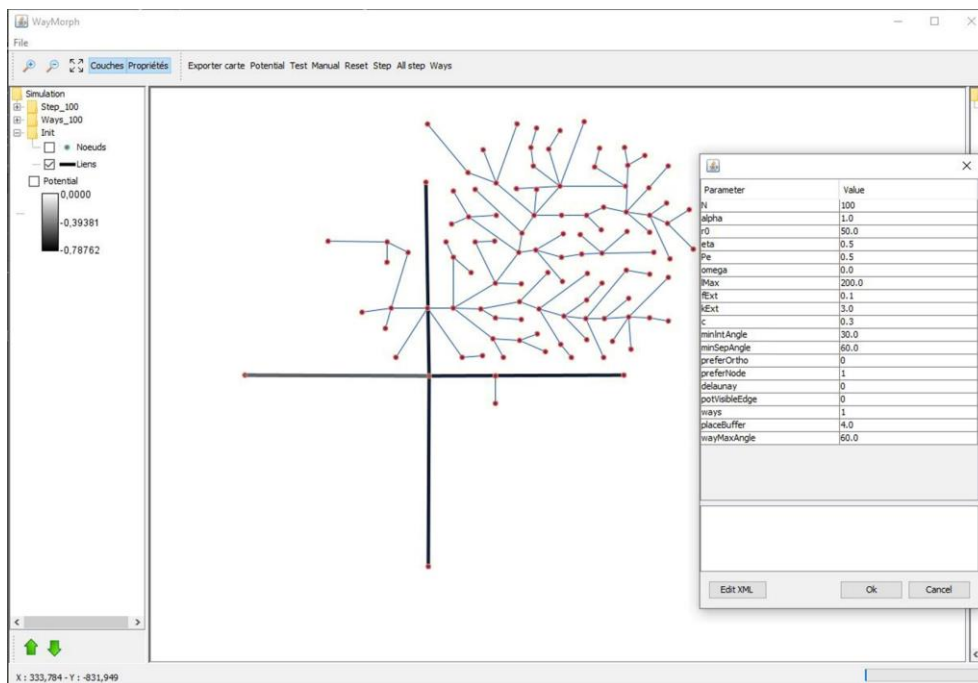
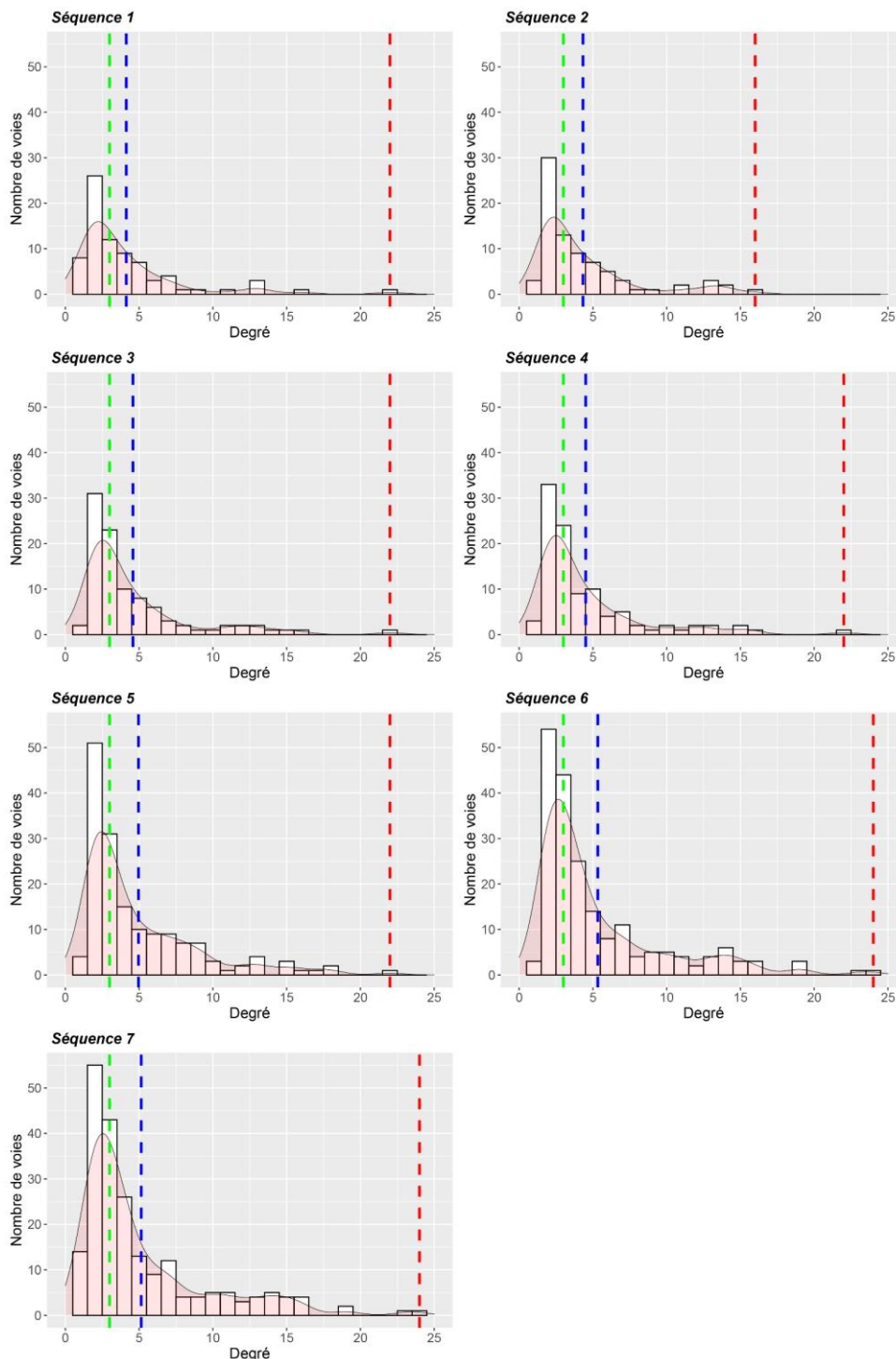


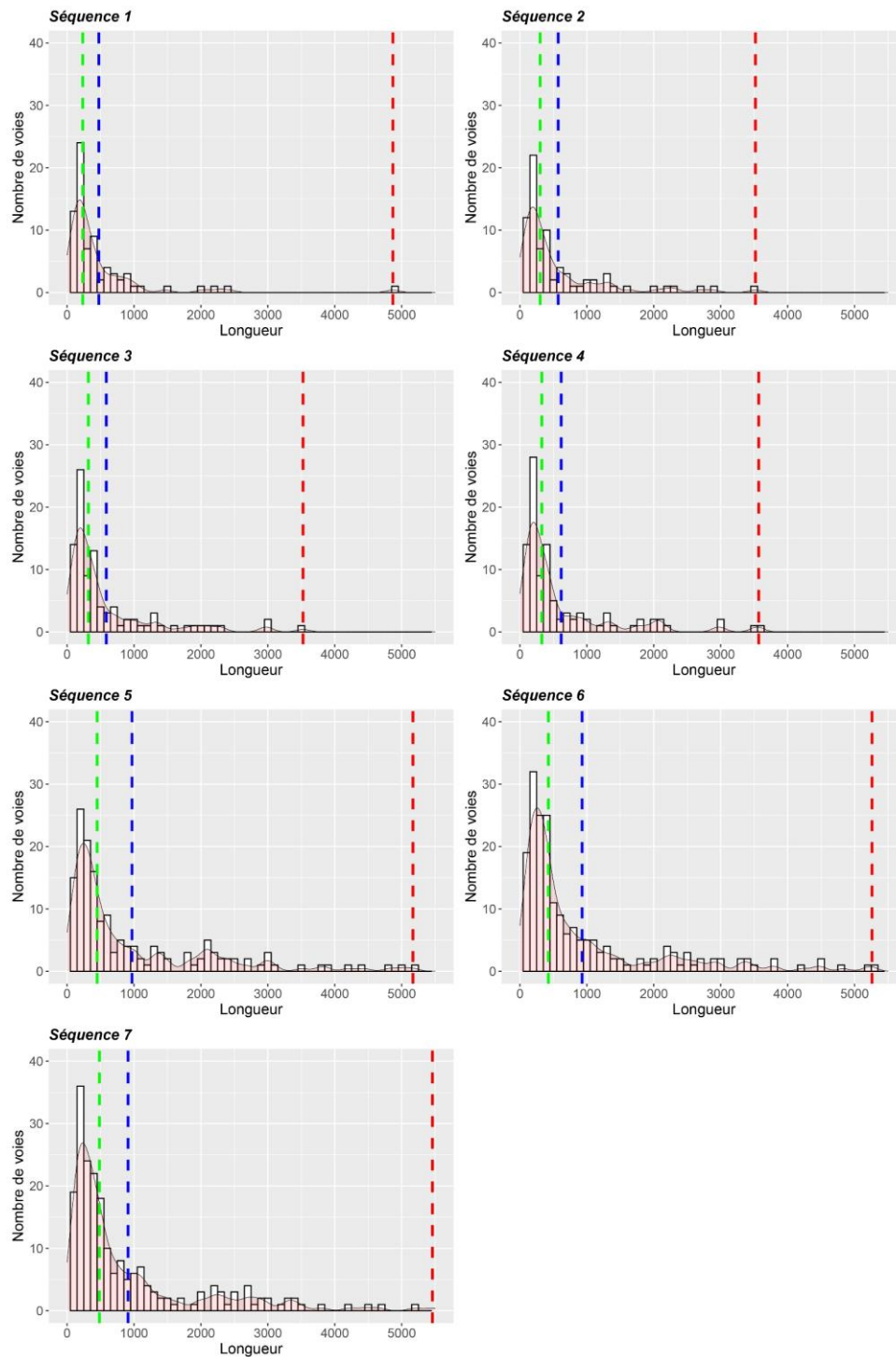
Illustration de la simulation de voies ramifiées (à partir d'un réseau initial composé d'un croisement de deux voies radiales/linéaires (en noir))
avec $E_{pp} = 1$, $W_p = 1$ et $A_i = 30$.

Annexes chapitre 10

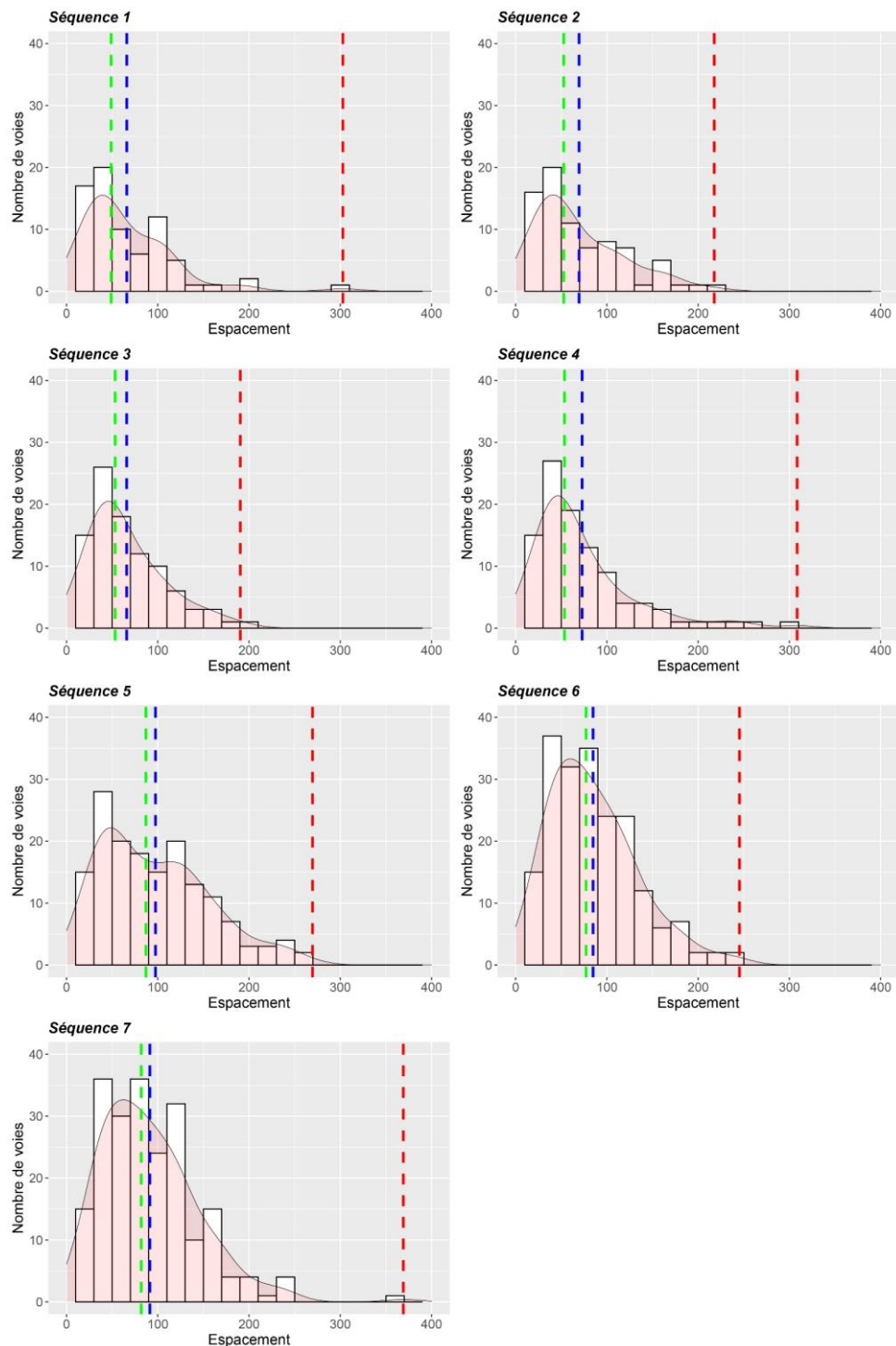
Annexe 34. Distributions d'indicateurs calculés calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (sur une échelle normale)



Distributions des valeurs du degré des voies, calculé sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique compacte. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

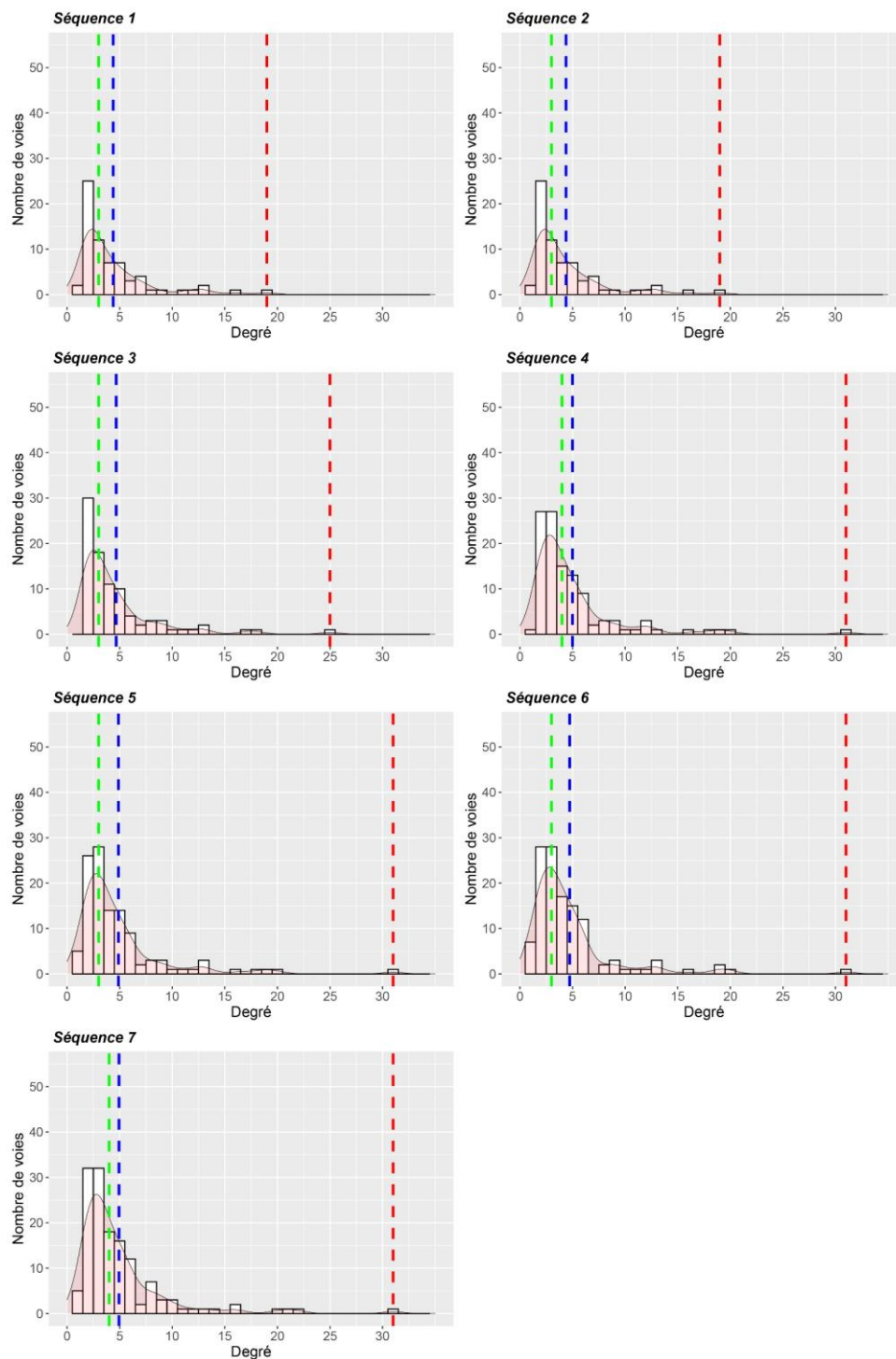


Distributions des valeurs de la longueur des voies, calculée sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique compacte. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

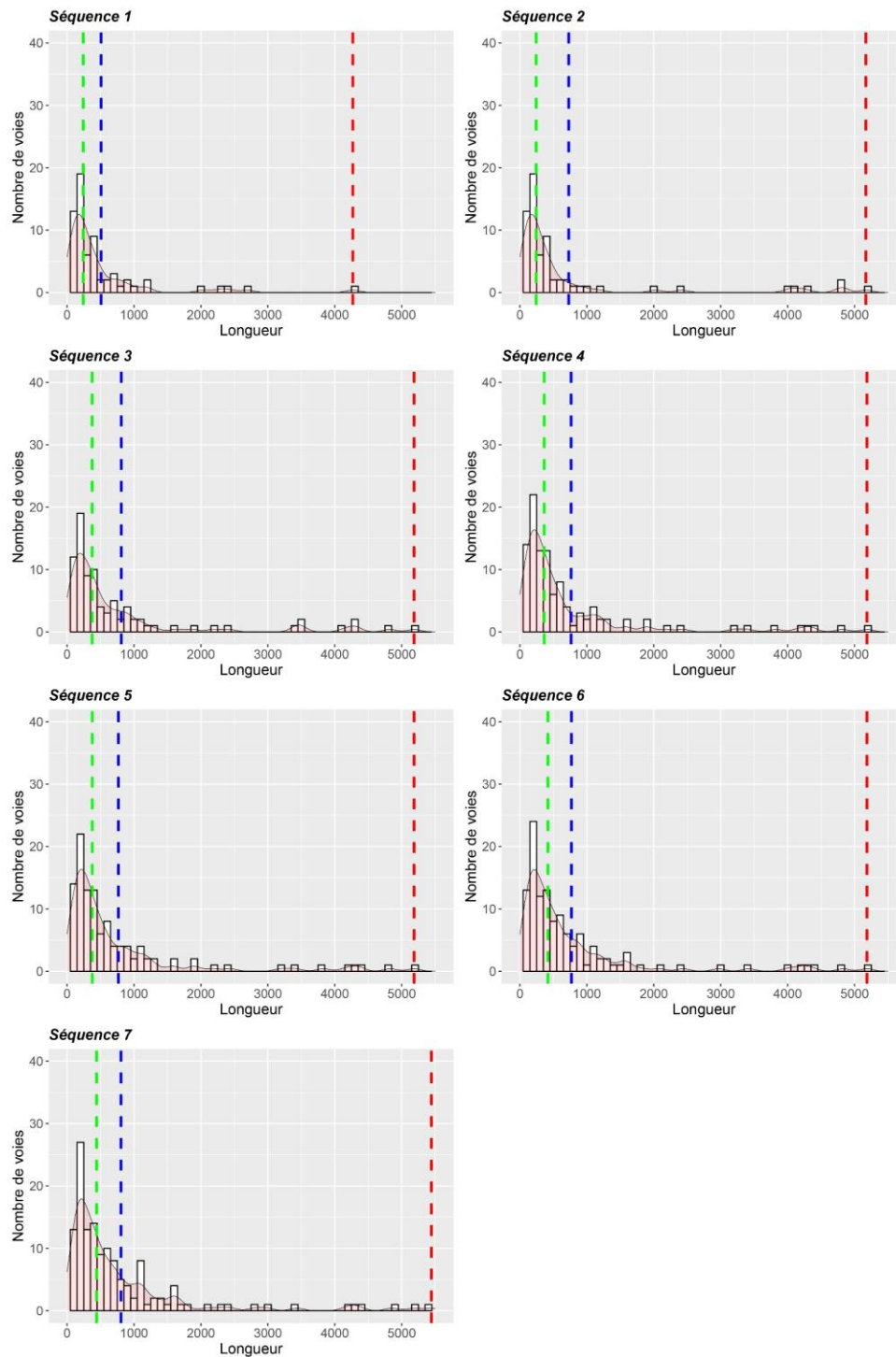


Distributions des valeurs de l'espacement des voies, calculé sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique compacte. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

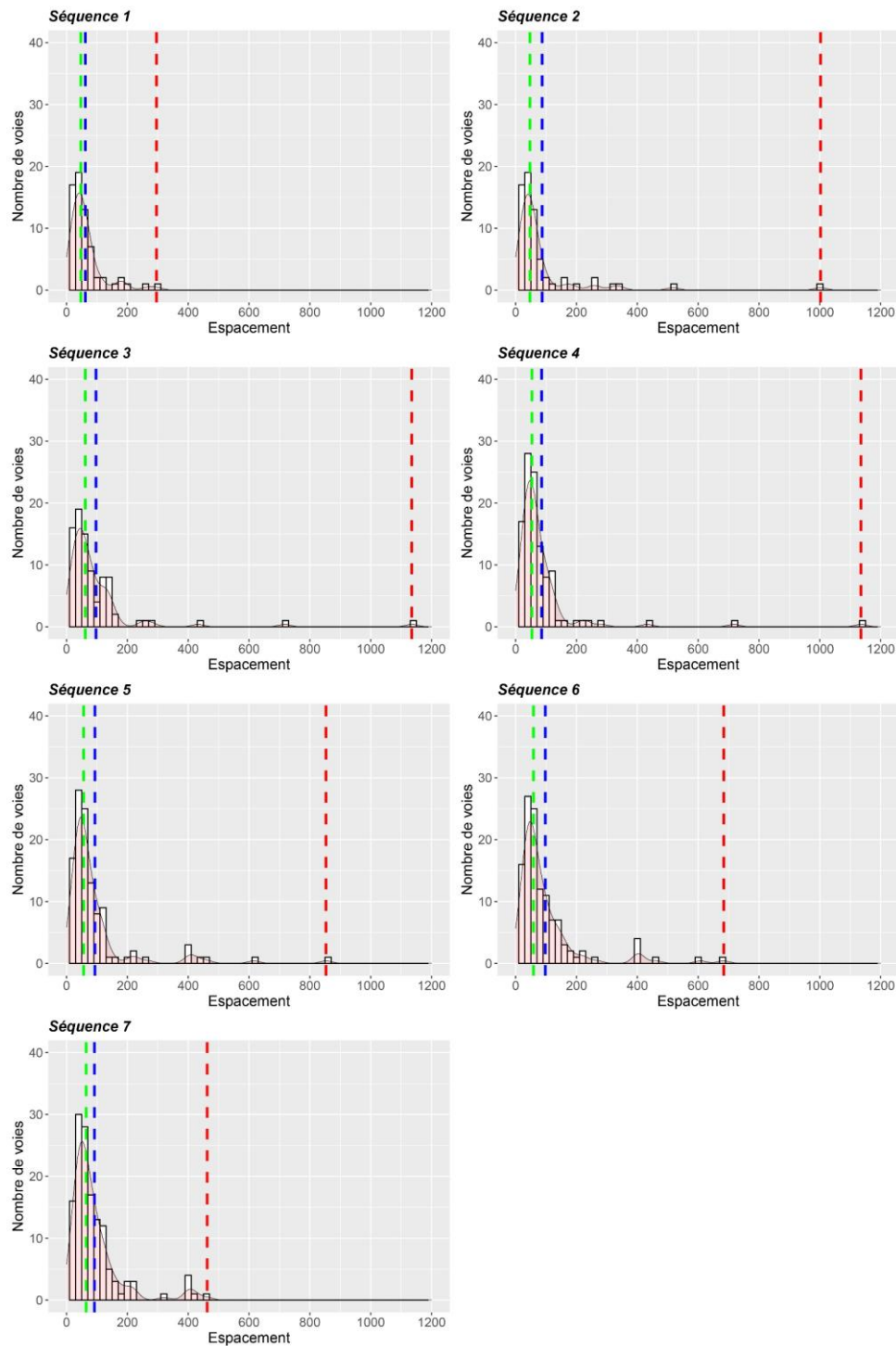
Annexe 35. Distributions d'indicateurs calculés calculé sur le réseau viaire correspondant aux différentes séquences de la simulation d'une ville monocentrique compacte (sur une échelle normale)



Distributions des valeurs du degré des voies, calculé sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique axialisée. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).



Distributions des valeurs de la longueur des voies, calculée sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique axialisée. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

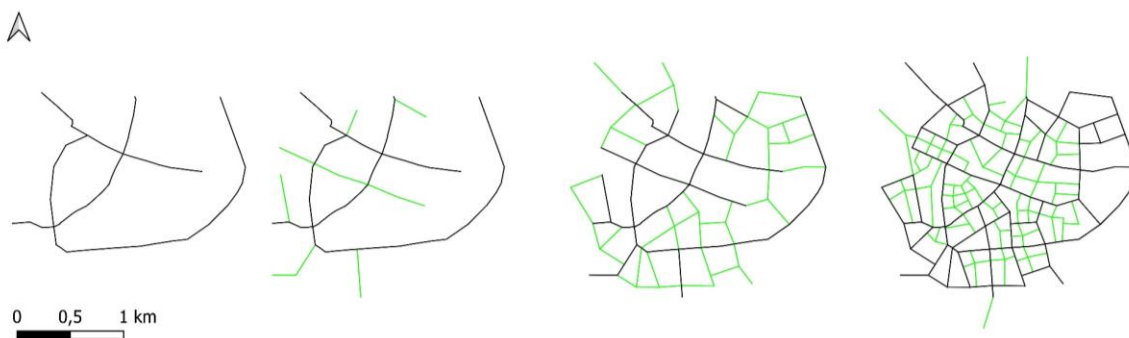


Distributions des valeurs de l'espacement des voies, calculé sur les réseaux simulés correspondant aux différentes séquences de la simulation du scénario d'évolution monocentrique axialisée. Les courbes (en rouge transparent) représentent l'ajustement de chaque distribution à une fonction de densité de probabilité. Les lignes verticales correspondent aux valeurs de la médiane (en vert), la moyenne (en bleu) et la valeur maximale (en rouge).

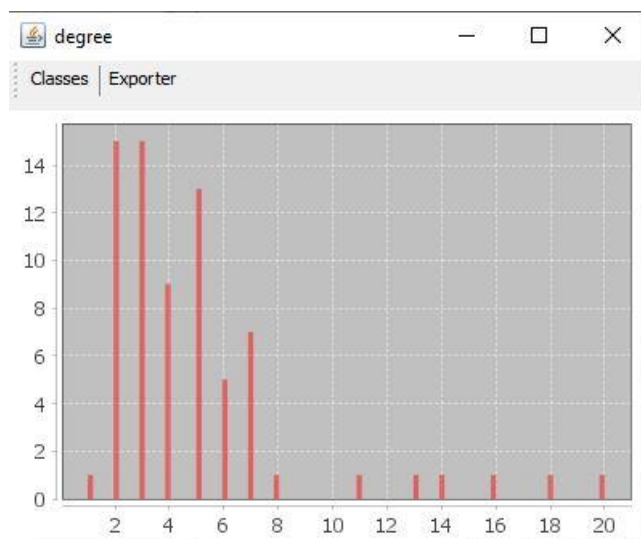
Annexe 36. Autres exemples de scénarios d'évolution à partir de squelette de réseaux réels.

Simulation 1	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3
Morphotypes simulés	Convergentes / divergentes	Orthogonales / diagonales	Cellulaires
Nombre d'itérations	10	20	40
r_0	250	200	100
l_{max}	500	400	400
k_{ext}	3	3	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.1

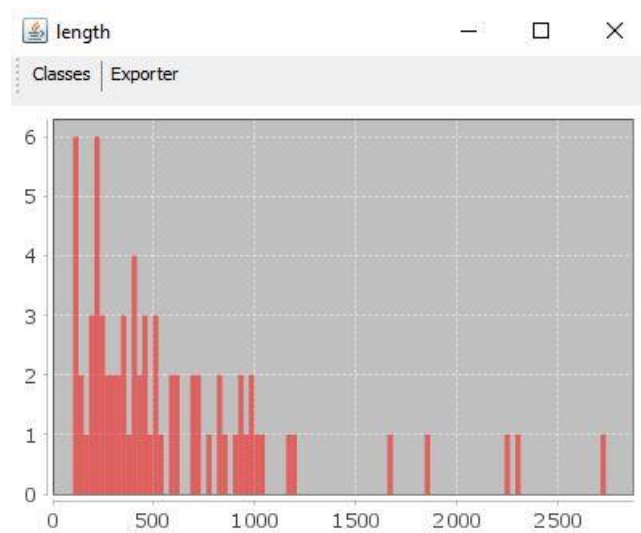
Simulation 1 : Trois séquences définies pour générer un réseau maillé.



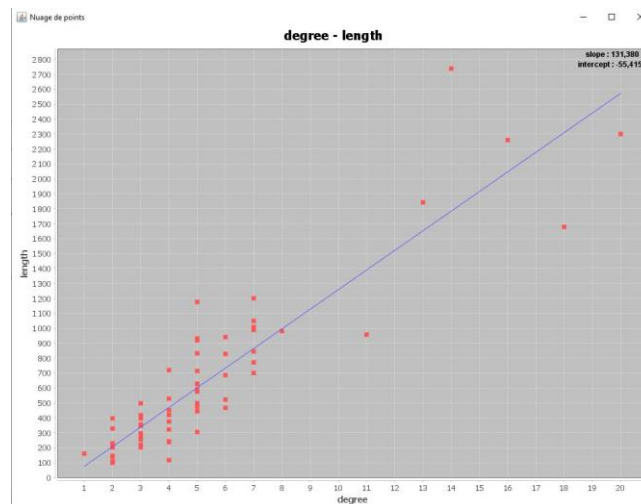
Résultats des séquences de la simulation 1 initialisée à partir du squelette du réseau de Dijon.



Histogramme de distribution du degré des voies du réseau viaire résultant de la simulation 1.



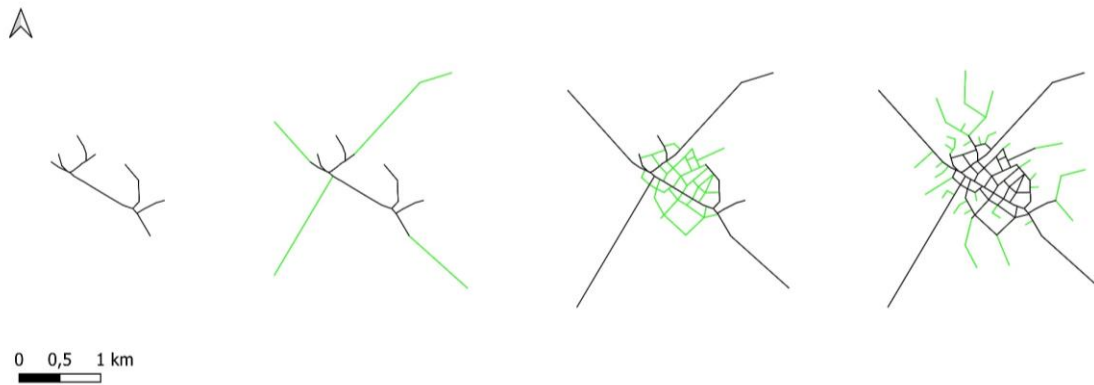
Histogramme de distribution de la longueur des voies du réseau viaire résultant de la simulation 1.



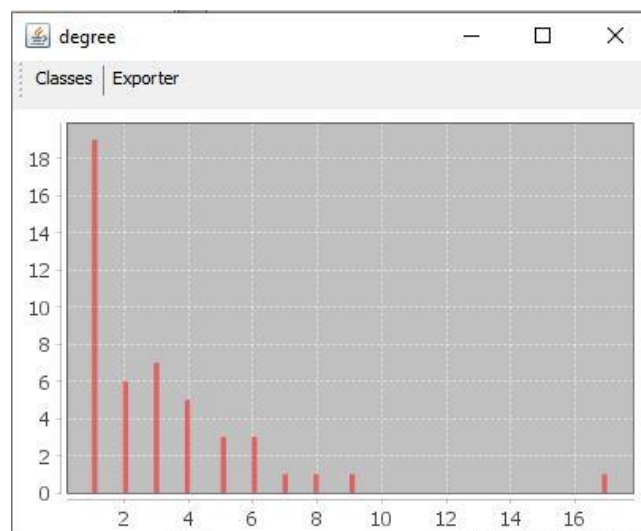
Nuage de points de la corrélation entre le degré et de la longueur des voies du réseau viaire résultant de la simulation 1.

Simulation 2	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3
Morphotypes	Radiales	Cellulaires	Ramifiées
Nombre d'itérations	5	20	40
r_0	400	100	100
l_{max}	2000	400	400
k_{ext}	3	3	3
f_{ext}	0.1	0.1	0.8

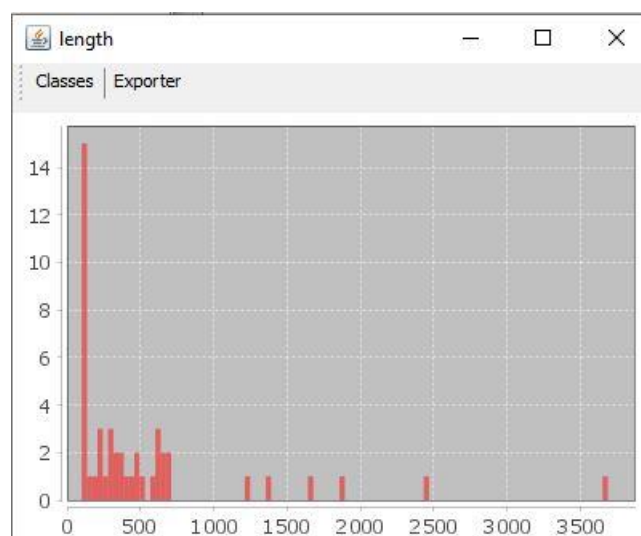
Simulation 2 : Trois séquences définies pour simuler une densification et une extension du réseau.



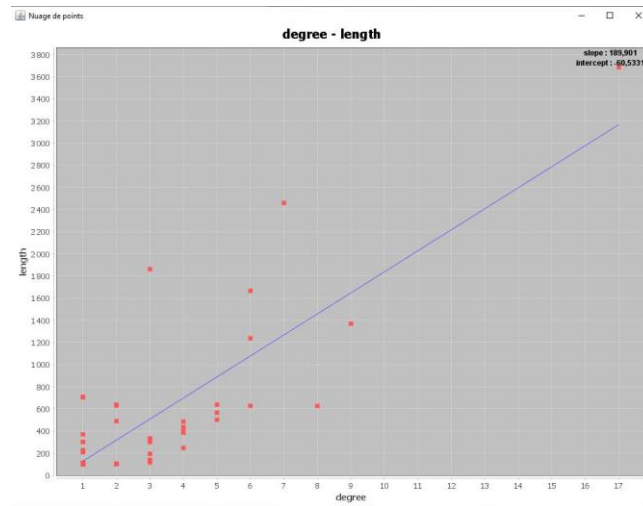
Résultats des séquences de la simulation 2 initialisée à partir du squelette du réseau de Pontarlier.



Histogramme de distribution du degré des voies du réseau viaire résultant de la simulation 2.



Histogramme de distribution de la longueur des voies du réseau viaire résultant de la simulation 2.



Nuage de points de la corrélation entre le degré et de la longueur des voies du réseau viaire résultant de la simulation 2

Table des matières

Avant-propos.....	1
Remerciements.....	3
Sommaire	7
Introduction générale	13
Un contexte scientifique interdisciplinaire	13
La ville : un système complexe en perpétuelle évolution	13
La morphologie urbaine en tant que domaine de recherche.....	15
Le réseau viaire comme objet d'étude	17
Etudes de l'évolution morpho-historique de réseaux viaires : deux grands courants.....	19
Approches par graphes en syntaxe spatiale	19
Approches par graphes en physique et en géographie	20
Notre approche morpho-historique des réseaux viaires.....	21
Objectifs et hypothèses de recherche	21
Terrains d'étude	23
Structure du manuscrit.....	24
<u>Première partie : Analyses morpho-historiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier</u>	
Introduction de la partie 1	29
Chapitre 1 - Concepts, données et méthodes.....	31
1.1 Concepts et méthodes à la base de l'étude morphologique de réseaux viaires	32
1.1.1 Modélisation du réseau viaire par un graphe : la géométrie métrique et la topologie	32
1.1.2 Modèles de représentation.....	33
1.1.2.1 Graphe direct (primaire) et graphe dual.....	33
Approche directe	33
Approche duale.....	35
1.1.2.2 Carte axiale	35
1.1.2.3 Modélisation du réseau viaire à travers la continuité : création d'un hypergraphe (sur-réseau)	36
1.1.3 Méthodologies de caractérisation des réseaux viaires	40
1.1.3.1 Distances.....	40
Distance topologique	41
Distance métrique.....	41
1.1.3.2 Centralités.....	42
Indicateurs issus de la théorie des graphes	42
Indicateurs de la syntaxe spatiale	44
Approche de multi-centralité des graphes viaires	45

1.2	Données viaires géohistoriques	47
1.2.1	Expériences d'acquisition et de traitement de données géohistoriques	48
1.2.2	Limites des cartes historiques comme sources de données viaires	51
1.2.2.1	Hétérogénéité spatiale et temporelle de la carte	51
1.2.2.2	Hétérogénéité des représentations graphiques du réseau viaire	51
1.2.3	Précautions requises pour la création et l'utilisation de données viaires géohistoriques	52
1.2.3.1	Interprétation du contenu de cartes anciennes	52
1.2.3.2	Connexité du réseau	53
1.2.3.3	Imprécisions géométriques	53
1.2.4	Création d'une base de données géohistoriques de réseaux viaires dans le cadre du projet COVADEO	54
1.3	Méthodes choisies pour l'étude morpho-historique des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier	56
1.3.1	Modèles de représentation et de caractérisation des réseaux viaires	56
1.3.1.1	La construction des voies	56
1.3.1.2	Le choix des indicateurs	57
	Indicateurs locaux	57
	Indicateurs globaux	59
1.3.1.3	Procédures informatiques de construction des voies et de calcul des indicateurs	60
1.3.2	Protocole d'analyse	63
1.3.2.1	Couverture temporelle des analyses	63
1.3.2.2	Analyses synchroniques et diachroniques	63
1.3.2.3	Emprises spatiales considérées	64
	2 - Analyses morphologiques des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier	67
	Apports en termes de caractérisation de la morphogenèse de réseaux historiques au travers du temps	67
	3- Analyses diachroniques de l'évolution des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier	69
	4- Propriétés structurelles invariantes dans l'espace et le temps	69
1.3.2.4	Représentation des résultats	70
1.3.2.5	Appariement des résultats des indicateurs pour les analyses diachroniques	71
1.4	Synthèse du chapitre 1	75
Chapitre 2 - Analyses morphologiques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier à différentes dates		
79		
2.1	Illustration des apports de chaque indicateur pour l'analyse de réseaux viaires anciens	80
2.1.1	Apports en termes de caractérisation de la forme des réseaux à une seule date	80
2.1.1.1	Le degré des voies des réseaux du 20 ^{ème} siècle	81
2.1.1.2	L'espacement des voies des réseaux du 19 ^{ème} siècle	84
2.1.1.3	L'orthogonalité des voies des réseaux du 18 ^{ème} siècle	86
2.1.2	Apports en termes de caractérisation de la forme des réseaux à différentes dates	88
2.1.2.1	Dijon : degré de desserte en 1790, 1883 et 1944	88
2.1.2.2	Besançon : centralité d'intermédiarité en 1786, 1883, et 1937	91
2.1.2.3	Pontarlier : centralité de proximité en 1692, 1842 et 1931	93
2.2	Analyses des réseaux viaires contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier	95
2.2.1	Dijon	95
2.2.1.1	Contexte historique et géographique	95

2.2.1.2	La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré	96
2.2.1.3	Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité	97
2.2.1.4	L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité	99
2.2.1.5	Les voies traversantes identifiées au moyen du degré de desserte	100
2.2.1.6	Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies.....	101
2.2.1.7	La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies	103
2.2.2	Besançon	104
2.2.2.1	Contexte historique et géographique	104
2.2.2.2	La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré	106
2.2.2.3	Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité	107
2.2.2.4	L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité	108
2.2.2.5	Les voies traversantes identifiées au moyen du degré de desserte	109
2.2.2.6	Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies.....	110
2.2.2.7	La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies	110
2.2.3	Pontarlier.....	112
2.2.3.1	Contexte historique et géographique.....	112
2.2.3.2	La hiérarchie des voies identifiée au moyen du degré	114
2.2.3.3	Les voies essentielles identifiées au moyen de la centralité d'intermédiarité	115
2.2.3.4	L'ancienneté des voies étudiée au moyen de la centralité de proximité	116
2.2.3.5	Les voies traversantes identifiées au moyen du degré de desserte	118
2.2.3.6	Les motifs viaires élémentaires identifiés par l'orthogonalité des voies.....	120
2.2.3.7	La densité locale du réseau mesurée par l'espacement des voies	122
2.3	Synthèse du chapitre 2	124
Chapitre 3 - Analyses diachroniques des réseaux viaires de Dijon, Besançon et Pontarlier		
entre le 17^{ème} et le 21^{ème} siècle.....		125
3.1	Suivi des évolutions à l'échelle de chaque voie.....	126
3.1.1	Propriétés locales des voies	126
3.1.1.1	Le réseau viaire de Dijon (1690 - 2019)	127
3.1.1.2	Le réseau viaire de Besançon (1696 - 2019)	133
3.1.1.3	Le réseau viaire de Pontarlier (1692 - 2019).....	139
3.1.2	Centralités des voies	144
3.1.2.1	Le réseau viaire de Dijon (1690 - 2019)	144
3.1.2.2	Le réseau viaire de Besançon (1696 - 2019)	145
3.1.2.3	Le réseau viaire de Pontarlier (1692 - 2019).....	145
3.2	Suivi de l'évolution des centralités à l'échelle du réseau viaire.....	152
3.2.1	Evolution de la distribution spatiale des centralités des voies	154
3.2.2	Evolution de la distribution statistique des centralités des voies	161
3.3	Permanences et changements des structures viaires dans le temps	165
3.3.1	Identification du squelette initial du réseau (qui persiste au cours du temps).....	165
3.3.2	Apparition ou disparition de segments ou de voies.....	167
3.3.3	Identification de voies persistantes	172
3.3.4	Evolution de la centralité de proximité résultant de l'apparition ou de la disparition de segments de rue.....	175
3.4	Synthèse du chapitre 3	177

Chapitre 4 - Propriétés structurelles des réseaux viaires invariantes dans l'espace et le temps.....	179
4.1 Propriétés structurelles étudiées	180
4.1.1 Lois d'échelle	181
4.1.2 Propriétés de "petit monde"	184
4.2 Propriétés structurelles des réseaux viaires historiques et contemporains de Dijon, Besançon et Pontarlier	185
4.2.1 Lois d'échelle sur l'hypergraphe viaire	186
4.2.1.1 Propriétés deux à deux de l'hypergraphe viaire	186
4.2.1.2 Propriétés de l'hypergraphe par rapport à l'emprise spatiale du réseau viaire	193
4.2.2 Propriétés de "petit-monde" des degrés des voies et des nœuds	197
4.2.2.1 Degré des voies	197
4.2.2.2 Degré des nœuds	201
4.2.3 Lois d'échelle relatives à la longueur et à l'espacement des voies	206
4.2.3.1 Longueur des voies	207
4.2.3.2 Espacement des voies	211
4.3 Synthèse du chapitre 4	215
Conclusion de la partie 1	217
<u>Deuxième partie : Approche-typo-morphologique des réseaux viaires urbains</u>	
Introduction de la partie 2	221
Chapitre 5 - Typo-morphologies urbaines : aperçu des méthodes et principaux résultats.....	223
5.1 Typo-morphologies de formes de villes	225
5.2 Typo-morphologies de trames viaires	231
5.2.1 Trames viaires archétypales	231
5.2.2 Classifications qualitatives de trames viaires	233
5.2.3 Classifications quantitatives de trames viaires	235
5.2.3.1 Des typo-morphologies basées sur des indicateurs quantitatifs	236
5.2.3.2 Des typo-morphologies associées à des processus d'évolution	242
5.3 Synthèse du chapitre 5	245
Chapitre 6 - Identification de morphotypes de voies et des processus d'évolution associés.....	247
6.1 Identification de motifs viaires à partir du croisement d'indicateurs deux à deux.....	249
6.1.1 Espacement et orthogonalité	251
6.1.2 Degré et espacement	254
6.1.3 Orthogonalité et degré	257
6.2 Une typo-morphologie des voies en huit classes.....	258
6.2.1 Voies radiales / linéaires	265
6.2.2 Voies concentriques	265
6.2.3 Voie convergentes/divergentes	266
6.2.4 Voies ramifiées	267

6.2.5	Voies orthogonales/ diagonales.....	268
6.2.6	Voies transversales.....	269
6.2.7	Voies intercalaires.....	269
6.2.8	Voies cellulaires.....	270
6.2.9	Essai d'application pour décrire l'évolution des réseaux viaires des trois villes étudiées	271
6.3	Confrontation de la typo-morphologie aux résultats d'une classification ascendante hiérarchique.....	272
6.4	Synthèse du chapitre 6	284
Conclusion de la partie 2		285
Introduction de la partie 3		289
<u>Troisième partie : Simulation de la morphogénèse des réseaux viaires</u>		
Chapitre 7 - Un aperçu des expériences de simulation de la morphogénèse viaire		291
7.1	Modèles origine-destination	293
7.1.1	Modèles intégrant des logiques de déplacement.....	293
7.1.2	Modèle incluant la demande de déplacement	294
7.1.3	Propriétés des réseaux simulés par les modèles origine-destination	297
7.2	Modèles de reproduction et de complétion de textures (motifs, patterns).....	297
7.2.1	L-Systèmes.....	298
7.2.2	Modèles basés sur des algorithmes d'apprentissage.....	299
7.2.3	Propriétés des réseaux simulés par les modèles de reproduction et de complétion de textures.....	302
7.3	Modèles de génération de tissus urbains	303
7.3.1	Modèles informatiques d'aide à la conception de projets urbains.....	303
7.3.1.1	Génération marginale ou arbitraire du réseau viaire	303
7.3.1.2	Assistance numérique pour la conception de réseaux viaires.....	306
7.3.2	Modèles à base de règles.....	309
7.3.2.1	Modèles basés sur des règles d'évolution empiriques	309
7.3.2.2	Modèles de morcellement.....	311
7.3.3	Propriétés des réseaux simulés par les modèles de génération de tissus urbains	313
7.4	Modèles topologiques et morphologiques à base de graphes	314
7.4.1	Modèles de coévolution du réseau viaire et de la population.....	316
7.4.2	Modèles de syntaxe spatiale	319
7.4.3	Modèles d'optimisation	320
7.4.3.1	Optimisation coût-bénéfice	321
7.4.3.2	Optimisation topologique et morphologique	324
7.4.4	Propriétés des réseaux simulés par les modèles topologiques et morphologiques à base de graphes	328
7.5	Synthèse du chapitre 7	329
Chapitre 8 - Proposition d'un modèle de simulation de la morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph		333
8.1	Cadres méthodologique, conceptuel, et heuristique.....	335
8.1.1	Cadre méthodologique.....	335

8.1.2	Cadre conceptuel	335
8.1.3	Cadre heuristique	336
8.2	Le modèle de Courtat (2012) comme socle de réflexion	336
8.2.1	Principes du modèle	336
8.2.2	Formalisation du modèle	338
8.2.2.1	Initialisation du modèle	339
8.2.2.2	Etape 1 : Tirage de Q nœuds candidats et calcul du potentiel autour du réseau existant	340
	Calcul du champ de potentiel autour du réseau existant	340
	Tirage de Q nœuds candidats - Simulation Monte-Carlo	343
8.2.2.3	Etape 2 : Sélection d'un nœud parmi les Q nœuds candidats	344
8.2.2.4	Etape 3 : Connexion du nœud sélectionné au réseau existant	344
	Déterminer l'ensemble de voisinage visible VN	344
	Déterminer le voisinage relatif RN du nouveau nœud dans l'ensemble de voisinage visible VN	345
	Ordonner les connexions possibles	345
	Définir le nombre n' de connexions acceptées parmi les n connexions possibles	345
	Paramètres supplémentaires	346
8.2.2.5	Fin de la simulation	346
8.2.3	Récapitulatif des paramètres et variables du modèle de Courtat (2012)	347
8.2.4	Tentatives de simulation à partir du modèle de Courtat (2012)	348
8.2.4.1	Types de réseaux viaires pouvant être simulés	348
8.2.4.2	Morphotypes de voies qu'il est possible de simuler	352
8.2.5	Intérêts et limites du modèle Courtat (2012)	355
8.3	Proposition d'un nouveau modèle de morphogénèse de réseaux viaires : WayMorph.357	
8.3.1	Principes généraux de WayMorph intégralement repris du modèle de Courtat (2012)	358
8.3.1.1	Optimisation globale et locale	358
8.3.1.2	L'évolution itérative	358
8.3.1.3	L'aléa	359
8.3.2	Aspects innovants de WayMorph vis-à-vis du modèle de Courtat (2012)	359
8.3.2.1	Initialisation adaptative	360
8.3.2.2	Attachement préférentiel selon le degré des voies	360
8.3.2.3	Restriction d'angle	361
8.3.2.4	Rattachement aux nœuds d'extrémité	363
8.3.2.5	Choix de l'échelle d'application de chaque mécanisme	364
8.3.2.6	Evolution séquentielle du réseau	365
8.3.3	La formalisation des mécanismes	366
8.4	Récapitulatif des variables et paramètres du modèle WayMorph	367
8.4.1	Paramètres	368
8.4.2	Variables et données d'entrée	369
8.4.3	Données de sortie (outputs)	370
8.4.4	Interface	370
8.5	Paramétrage initial du modèle WayMorph.....	372
8.5.1	Estimation des valeurs des paramètres spécifiques au modèle WayMorph	373
8.5.2	Modification des valeurs par défaut des paramètres de la fonction de potentiel du modèle de Courtat (2012)	375
8.5.3	Paramétrage par défaut du modèle WayMorph	376
8.6	Synthèse du chapitre 8	378

Chapitre 9 - Evaluation, calibrage et validation du modèle WayMorph379

9.1	Evaluation du modèle.....	381
9.1.1	Positionnements pour l'évaluation de WayMorph	381
9.1.1.1	Bref aperçu des protocoles d'évaluation existants.....	381
9.1.1.2	Possibilités d'application de ces protocoles à l'évaluation de WayMorph.....	382
9.1.2	Analyse de stabilité de WayMorph	383
9.1.2.1	Protocole d'analyse de stabilité adopté	384
9.1.2.2	Evaluation visuelle de la stabilité du modèle.....	386
	À l'échelle du graphe viaire.....	386
	À l'échelle des voies	390
9.1.2.3	Quantification de la variabilité des résultats de simulation	391
9.1.2.4	Détermination du seuil de stabilité	395
9.1.2.5	Bilan de l'analyse de stabilité	398
9.1.3	Analyse exploratoire de sensibilité de WayMorph	398
9.1.3.1	Protocole d'analyse de sensibilité adopté	398
	Tests réalisés	400
	Présentation et lecture des résultats	401
	Choix des valeurs de paramètres à tester	402
	Choix des réseaux d'initialisation à tester	404
9.1.3.2	Sensibilité à la modification des valeurs des paramètres.....	405
	Sensibilité au paramètre d'organisation P_e	405
	Sensibilité au paramètre de construction ω	407
	Sensibilité aux paramètres relatifs à la densification et l'étalement du réseau	409
	Sensibilité aux paramètres angulaires	420
	Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation des paramètres.....	424
9.1.3.3	Sensibilité au réseau d'initialisation	425
9.1.4	Synthèse de l'évaluation du modèle	429
9.2	Calibrage et validation empirique du modèle	430
9.2.1	Positionnements et protocoles	430
9.2.1.1	Protocole de calibrage du modèle WayMorph.....	430
	Un bref aperçu des protocoles de calibrage existants.....	430
	Protocole de calibrage proposé pour le modèle WayMorph.....	431
9.2.1.2	Protocole de validation du modèle WayMorph	431
	Un bref aperçu des protocoles de validation existants.....	431
	Protocole de validation proposé pour le modèle WayMorph	432
9.2.2	Calibrage et validation empirique de la simulation des morphotypes de voies	432
9.2.2.1	Voies radiales/linéaires.....	433
	Calibrage pour la simulation de voies radiales/linéaires	433
	Validation de la simulation de voies radiales.....	434
9.2.2.2	Voies concentriques.....	436
	Calibrage pour la simulation de voies concentriques	436
	Validation de la simulation de voies concentriques	438
9.2.2.3	Voies convergentes/divergentes	438
	Calibrage pour la simulation de voies convergentes/divergentes	438
	Validation de la simulation de voies convergentes/divergentes	438
9.2.2.4	Voies ramifiées	441
	Calibrage pour la simulation de voies ramifiées	441
	Validation de la simulation de voies ramifiées	442

9.2.2.5	Voies orthogonales/diagonales	444
	Calibrage pour la simulation de voies orthogonales/diagonales	444
	Validation de la simulation de voies orthogonales/diagonales	445
9.2.2.6	Voies transversales	447
	Calibrage pour la simulation de voies transversales	447
	Validation de la simulation de voies transversales	448
9.2.2.7	Voies Intercalaires	450
	Calibrage pour la simulation de voies intercalaires	450
	Validation de la simulation de voies intercalaires.....	451
9.2.2.8	Voies cellulaires	453
	Calibrage pour la simulation de voies cellulaires	453
	Validation de la simulation de voies cellulaires	453
9.2.3	Synthèse du calibrage et de la validation empirique du modèle	456
9.3	Synthèse de chapitre 9	457
Chapitre 10 - Simulation des réseaux viaires de différentes formes de villes		459
10.1	Simulation de formes de villes simples.....	460
10.1.1	Typo-morphologie de formes de villes considérées.....	460
10.1.2	Médina.....	464
	10.1.2.1 Paramétrage	464
	10.1.2.2 Appréciation qualitative de la forme globale	464
	10.1.2.3 Analyses morphologiques.....	466
10.1.3	Village-Rue.....	467
	10.1.3.1 Paramétrage	467
	10.1.3.2 Appréciation qualitative de la forme globale	468
	Analyses morphologiques	469
10.1.4	Rue-plume	470
	10.1.4.1 Paramétrage	470
	10.1.4.2 Appréciation qualitative de la forme globale	472
	Analyses morphologiques	473
10.1.5	Ville fuseau-quadrillée.....	473
	10.1.5.1 Paramétrage	473
	Appréciation qualitative de la forme globale.....	475
	Analyses morphologiques	475
10.1.6	Ville quadrillée.....	476
	10.1.6.1 Paramétrage	476
	10.1.6.2 Appréciation qualitative de la forme globale	477
	10.1.6.3 Analyses morphologiques.....	478
10.1.7	Ville quadrillée avec enceinte.....	479
	10.1.7.1 Paramétrage	479
	10.1.7.2 Appréciation qualitative de la forme globale	481
	10.1.7.3 Analyses morphologiques.....	482
10.1.8	Ville radio-quadrillée	483
	10.1.8.1 Paramétrage	483
	10.1.8.2 Appréciation qualitative de la forme globale	484
	10.1.8.3 Analyses morphologiques.....	485
10.1.9	Ville radioconcentrique	486
	10.1.9.1 Paramétrage	486
	10.1.9.2 Appréciation de la forme globale	488

10.1.9.3	Analyses morphologiques.....	489
10.1.10	Etude des propriétés structurelles des réseaux simulés	490
10.1.10.1	À l'échelle des nœuds et des voies	491
	Degré des nœuds	491
	Degré des voies	491
	Longueur des voies	491
	Espacement des voies	492
10.1.10.2	À l'échelle des graphes viaires	497
	Valeurs médianes.....	497
	Relations scalantes (deux à deux).....	497
10.2	Simulation de formes de villes plus complexes	499
10.2.1	Présentation des scénarios.....	499
10.2.2	Simulation d'une ville monocentrique compacte.....	502
10.2.2.1	Paramétrage	502
10.2.2.2	Résultats de simulation et analyses morphologiques	503
	Degré.....	504
	Espacement.....	505
	Orthogonalité.....	508
	Centralité de proximité	508
	Centralité d'intermédiarité	511
	Degré de desserte	511
10.2.2.3	Etude des propriétés structurelles	514
	À l'échelle des nœuds et des voies	514
	À l'échelle des graphes viaires	520
10.2.3	Simulation d'une ville monocentrique axialisée.....	522
10.2.3.1	Paramétrage du scénario.....	522
10.2.3.2	Résultats de simulation et analyses morphologiques	524
	Degré.....	524
	Espacement.....	525
	Orthogonalité.....	525
	Centralité de proximité	525
	Centralité d'intermédiarité	530
	Degré de desserte	530
10.2.3.3	Etude des propriétés structurelles	533
	À l'échelle des nœuds et des voies	533
	À l'échelle des graphes viaires	536
10.3	Synthèse du chapitre 10	540
	Conclusion de la partie 3	541
	Conclusion générale.....	543
	Discussion	543
	Une approche interdisciplinaire	543
	Apports empiriques	543
	Apports méthodologiques.....	544
	Apports théoriques.....	545
	Perspectives.....	545
	Perspectives liées au modèle	545

Perspectives thématiques	546
Ouverture	549
Bibliographie	551
Liste des figures	585
Liste des tableaux	607
Liste des annexes	609
Annexes.....	611
Annexes chapitre 1.....	613
Annexes chapitre 2.....	619
Annexes chapitre 3.....	636
Annexes chapitre 4.....	654
Annexes chapitre 6.....	659
Annexes chapitre 9.....	665
Annexes chapitre 10.....	678
Table des matières.....	689