



HAL
open science

Numérisation de données et aménagement du territoire, réflexions à partir de la création d'une base de données géo-historique permettant la vectorisation collaborative d'un réseau viaire régional sur le temps long

Christian Andrey Rincón Acosta

► To cite this version:

Christian Andrey Rincón Acosta. Numérisation de données et aménagement du territoire, réflexions à partir de la création d'une base de données géo-historique permettant la vectorisation collaborative d'un réseau viaire régional sur le temps long. Géographie. 2020. hal-03117009

HAL Id: hal-03117009

<https://univ-fcomte.hal.science/hal-03117009v1>

Submitted on 20 Jan 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Université de Franche-Comté
UFR SLHS - Sciences Humaines et Sociales

**Numérisation de données et aménagement du territoire :
Réflexions à partir de la création d'une base de données géo-
historique permettant la vectorisation collaborative d'un réseau
viaire régional sur le temps long.
Cas d'étude : Besançon et Dijon (1786-2019)**

Mémoire de fin d'études et rapport de stage

Diplôme National de Master
Domaine : Sciences Humaines et Sociales
Mention : Géographie, Aménagement, Environnement et Développement
Spécialité : Aide à la Décision en Aménagement Urbain et Régional

Étudiant : Christian Andrey RINCON ACOSTA

Encadrante : Claire LAGESSE

Juillet 2020

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier ma mère et mon père, qui au fil du temps m'ont donné tout leur amour et leur soutien. Ils m'ont appris à me questionner sur le monde, à apprendre quelque chose de nouveau chaque jour, à surmonter les défis de la vie quotidienne et à réaliser mes rêves. Je serai toujours ce petit fils de professeurs d'école, à qui maman et papa ont inculqué l'amour de la lecture, de la géographie, de l'histoire et de la musique.

Je désire aussi remercier ma sœur, qui est mon soutien moral, ma meilleure amie et la personne avec qui je peux toujours compter pour partager mes joies, mes tristesses et ma façon de voir et de comprendre le monde. Elle a commencé à réaliser ses rêves le même jour que j'ai commencé à réaliser les miens. Et en dépit du fait que le Canada et la France sont séparés de plusieurs milliers de kilomètres, je sais que nous serons ensemble à jamais.

J'aimerais aussi exprimer toute ma gratitude à ma directrice, madame Claire Lagesse, qui, avec sa persévérance, sa patience et son soutien inestimable, m'a orientée dans l'élaboration de ce document. En tant que maîtresse de conférences et tutrice de stage, elle a partagé ses vastes connaissances avec moi et m'a donné de précieux conseils qui seront très utiles pour le reste de ma vie.

Je tiens à témoigner ma gratitude à Hanae El Gouj, doctorante au Laboratoire ThéMA, qui m'a apporté un soutien précieux lors de mon stage. Pendant tous ces mois, elle n'a pas hésité à m'aider et à partager avec moi ses grandes connaissances.

Un grand merci à Tours, où j'ai appris le français et où j'ai aimé la vie. À Paris, où j'ai découvert mon rêve d'étudier un master en France. À Bogotá, ma chère ville, où pendant quatre longues années je me suis préparé à réaliser ce rêve. À Besançon, où ce rêve s'est réalisé et où je suis devenu une meilleure personne. À la France, le pays qui m'a ouvert les portes, qui m'a donné une éducation de grande qualité et qui je porterai toujours dans mon cœur. Et à la Colombie, pour qu'un jour nous soyons enfin un pays en paix.

Je remercie aussi, et particulièrement, les Beatles, les Rolling Stones et tous les musiciens de salsa, rock, jazz et d'autres genres musicaux qui m'ont accompagné pendant de longues journées de solitude et de mélancholie, au milieu d'une situation sans précédent pour notre planète.

Enfin, je présente mes remerciements à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidé à compléter ce document avec succès.

RÉSUMÉ : ce mémoire vise à montrer les progrès réalisés, dans le cadre du projet COVADEO, en vue de comprendre l'évolution historique de la trame territoriale de la région Bourgogne- Franche-Comté, localisée dans l'est de la France. Ceci, à travers des procédures de vectorisation collaborative de cartes anciennes à travers lesquelles les géométries correspondant aux réseaux viaires desdites cartes sont extraites. Ces informations sont à leur tour stockées dans une base de données géo-historiques, permettant de suivre l'évolution du réseau viaire régional sur le temps long. Les résultats de ce document suggèrent que les réseaux viaires sont l'un des systèmes structurants du territoire et influencent directement sa morphologie. De même, à travers ce mémoire il est possible de comprendre l'importance d'identifier les causes historiques des problèmes et enjeux territoriaux, afin de consolider de stratégies d'aménagement urbain-régional qui soient adaptées aux conditions environnementales, sociales et économiques de chaque territoire.

MOTS-CLÉS : Production collaborative de données. Vectorisation de cartes anciennes. Bases de données géo-historiques. Évolution historique des réseaux viaires. Aménagement du territoire.

ABSTRACT: in the context of the COVADEO Project, this document aims to show the progress made in understanding the historical evolution of the territorial patterns of the Burgundy-Franche-Comté region, located in eastern France. This is done through the collaborative vectorization of historical maps, which allows us extracting the geometries of each of the roads that can be observed on those maps. In turn, this information is stored in a geo-historical database by which we can track the evolution of the regional road system over time. In this regard, the present study shows that road networks are one of the systems that structure the territory and directly influence its morphology. In addition, this study allows us understanding the importance of identifying the historical causes of territorial problems and challenges, in order to establish urban and regional planning strategies adapted to the environmental, social, and economic conditions of each territory.

KEYWORDS: Crowdsourcing. Vectorization of historical maps. Geo-historical databases. Evolution of road networks over time. Land Management.

RESUMEN: el presente documento tiene como objetivo mostrar los avances que, en el marco del proyecto COVADEO, se han realizado con miras a comprender la evolución histórica de la trama territorial de la región de Borgoña- Franco-Condado, localizada al oriente de Francia. Esto, mediante ejercicios de vectorización colaborativa de mapas antiguos a través de los cuales se extraen las geometrías correspondientes a las redes viales de dichos mapas. Esta información, a su vez, es almacenada en bases de datos geo-históricas que permiten rastrear la evolución del sistema vial regional a lo largo del tiempo. Las conclusiones de este documento dejan entrever que las vías son uno de los sistemas estructurantes del territorio e influyen directamente en su morfología. Asimismo, permiten comprender la importancia de identificar las causas históricas de los problemas y desafíos territoriales, a la hora de establecer estrategias de ordenamiento urbano- regional que se adapten a los contextos ambientales, sociales y económicos de cada territorio.

PALABRAS CLAVE: Producción colaborativa de datos. Vectorización de mapas antiguos. Bases de datos geo- históricas. Evolución de redes viales a través del tiempo. Ordenamiento territorial.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE DU STAGE	2
1.1.1	Description de l'entreprise.....	2
1.1.2	Territoire et temporalité d'étude	2
1.1.3	Missions de stage	3
2	CADRE THÉORIQUE ET NOTIONS DE BASE	4
2.1	ÉNONCÉ DU PROBLÈME.....	4
2.2	OBJECTIFS	5
2.3	CADRE CONCEPTUEL	6
2.3.1	Notions sur les bases de données géo-historiques.....	6
2.3.2	Notions sur les éléments de morphologie urbaine.....	7
2.3.3	Notions sur la numérisation de ressources cartographiques	8
2.3.4	Notions sur le territoire et ses dynamiques	9
2.4	ÉTAT DE L'ART	10
2.4.1	Construction de bases de données géo-historiques et vectorisation collaborative de réseaux viaires	10
2.4.2	Identification de dynamiques historiques d'étalement urbain à partir du suivi de l'évolution des réseaux viaires.....	11
2.4.3	Le rôle des données géo-historiques dans l'aménagement du territoire et le contrôle de l'étalement urbain.....	13
3	DONNÉES ET MÉTHODE	15
3.1	ZONE D'ÉTUDE	15
3.2	DONNÉES UTILISÉES	17
3.3	MÉTHODOLOGIE	18
3.3.1	Organisation et géoréférencement des cartes anciennes	18
3.3.2	Structure de données et vectorisation	18
3.3.3	Insertion de la base de données géo-historique dans un système de gestion de bases de données- SGBD.....	19
3.3.4	Vectorisation des réseaux viaires	20
3.4	RÉSULTATS	21
3.4.1	Choix et préparation des cartes anciennes	21
3.4.2	Structure de données	24
3.4.3	Implémentation de la base de données géo-historiques.....	27
3.4.4	Vectorisation	28
4	DISCUSSION	36
4.1	ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DU TERRITOIRE À L'AIDE D'INDICATEURS CALCULÉS SUR SON RÉSEAU VIAIRE.....	37
4.1.1	Besançon.....	37
4.1.2	Dijon	39
4.2	IDENTIFICATION DE DYNAMIQUES D'ÉTALEMENT URBAIN À PARTIR DE BASES DE DONNÉES GÉO-HISTORIQUES PERMETTANT LA VECTORISATION DE RÉSEAUX VIAIRES SUR LE TEMPS LONG	40
4.2.1	Tendances historiques d'étalement urbain à Besançon	41

4.2.2	Tendances historiques d'étalement urbain à Dijon.....	43
4.2.3	Réflexions sur les dynamiques territoriales des deux cas d'étude et son évolution sur le temps long	45
5	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	46
6	BIBLIOGRAPHIE	48
7	ANNEXES.....	51
7.1	ANNEXE 1.....	52
7.2	ANNEXE 2.....	53
7.3	ANNEXE 3.....	54
7.4	ANNEXE 4.....	55
7.5	ANNEXE 5.....	56
7.6	ANNEXE 6.....	57
7.7	ANNEXE 7.....	58
7.8	ANNEXE 8.....	59
7.9	ANNEXE 9.....	65
7.10	ANNEXE 10.....	66
7.11	ANNEXE 11.....	67
7.12	ANNEXE 12.....	68
7.13	ANNEXE 13.....	69
7.14	ANNEXE 14.....	70
7.15	ANNEXE 15.....	75
7.16	ANNEXE 16.....	79
7.17	ANNEXE 17.....	83
7.18	ANNEXE 18.....	87
7.19	ANNEXE 19.....	91
7.20	ANNEXE 20.....	95
7.21	ANNEXE 21.....	99
7.22	ANNEXE 22.....	103
7.23	ANNEXE 23.....	107
7.24	ANNEXE 24.....	111
7.25	ANNEXE 25.....	115
7.26	ANNEXE 26.....	119

LISTE D'IMAGES

Image 1. Construction de données géo-historiques de la ville de Paris (1800-2000).....	14
Image 2. Région de Bourgogne- Franche-Comté.....	15
Image 3. Arrondissements de la région Bourgogne- Franche-Comté.....	16
Image 4. Cartes anciennes sélectionnées	24
Image 5. Schéma simplifié.....	25
Image 6. Diagramme	25
Image 7. Modèle Physique de Données.....	26
Image 8. Réseau vectorisé de la carte « Plan de la ville et citadelle de Besançon » (1786)	29
Image 9. Réseau vectorisé de la carte « Nouveau plan de la ville de Besançon » (1848).....	30
Image 10. Réseau vectorisé de la carte « Besançon et son territoire » (1883).....	31
Image 11. Réseau vectorisé de la carte « Besançon (Plan Siffert) » (1937)	32
Image 12. Réseau vectorisé de la carte « Nouveau Plan de la ville et des environs de Dijon » (1790)	33
Image 13. Réseau vectorisé de la carte « Plan de la ville de Dijon » (1844)	34
Image 14. Réseau vectorisé de la carte « Dijon, plan d'ensemble » (1883).....	35
Image 15. Réseau vectorisé de la carte « Plan topographique de Dijon » (1944).....	36
Image 16. Évolution démographique de Besançon	41
Image 17. Réseaux vectorisés superposés- Besançon	42
Image 18. Évolution démographique de Dijon	43
Image 19. Réseaux vectorisés superposés- Dijon	44
Image 20. Le paradigme de l'aménagement du territoire	53
Image 21. Résultats de la simulation selon les deux scénarios (influence réciproque faible ou forte)	54
Image 22. Vectorisation de l'évolution du réseau viaire de la ville de Londres (1786-2010)	55
Image 23. Indices d'étalement urbain à Grenoble	57
Image 24. Géoréférencement des cartes anciennes	58
Image 25. Classes d'association et cardinalités.....	59
Image 26. Création des classes.....	60
Image 27. Définition des classes d'association et changement des cardinalités	60
Image 28. Définition des classes primaires	60
Image 29. Création des clés étrangères	61
Image 30. Modèle Physique de Données.....	61
Image 31. Importation de la géométrie	65
Image 32. Géométrie de la commune de Besançon insérée sur PostgreSQL	66
Image 33. Résultat de la sélection des routes qui intéressent à la carte traitée	67
Image 34. Création d'une nouvelle couche pour dessiner les segments absents	68
Image 35. Présentation des deux couches à fusionner et de l'outil de fusion.....	69
Image 36. Exemple d'un Graphe.....	70
Image 37. Morceaux multiples vers morceaux uniques	71
Image 38. Sauvegarde de la couche temporelle en format GeoPackage	72
Image 39. Création du réseau permettant l'analyse des indicateurs	73
Image 40. Calcul des indicateurs sur Morpheo	74
Image 41. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1786)	75
Image 42. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1848)	76
Image 43. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1883)	77
Image 44. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1937)	78

Image 45. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1786).....	79
Image 46. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1848).....	80
Image 47. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1883).....	81
Image 48. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1937).....	82
Image 49. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1786)	83
Image 50. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1848)	84
Image 51. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1883)	85
Image 52. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1937)	86
Image 53. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1786)	87
Image 54. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1848)	88
Image 55. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1883)	89
Image 56. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1937)	90
Image 57. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1786)	91
Image 58. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1848)	92
Image 59. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1883)	93
Image 60. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1937)	94
Image 61. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Besançon (1786)	95
Image 62. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Besançon (1848)	96
Image 63. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Besançon (1883)	97
Image 64. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Besançon (1937)	98
Image 65. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1790)	99
Image 66. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1844)	100
Image 67. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1883)	101
Image 68. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1944)	102
Image 69. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1790)	103
Image 70. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1844)	104
Image 71. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1883)	105
Image 72. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1944)	106
Image 73. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1790)	107
Image 74. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1844)	108
Image 75. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1883)	109
Image 76. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1944)	110
Image 77. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1790)	111
Image 78. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1844)	112
Image 79. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1883)	113
Image 80. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1944)	114
Image 81. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1790).....	115
Image 82. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1844).....	116
Image 83. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1883).....	117
Image 84. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1944).....	118
Image 85. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Dijon (1790)	119
Image 86. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Dijon (1844)	120
Image 87. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Dijon (1883)	121
Image 88. Indicateur de centralité d'intermédialité du réseau viaire de Dijon (1944)	122

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1. Missions de stage.....	3
Tableau 2. Objectifs spécifiques et stratégies	5
Tableau 3. Quantité de cartes récupérées, selon période (siècle/année) et zone de couverture ...	17
Tableau 4. Étapes de vectorisation	20
Tableau 5. Information du catalogue pour les 8 cartes « pilote » sélectionnées.....	22
Tableau 6. Les types de cartes.....	52
Tableau 7. Indice global d'intégration (normalisation, description et exemples)	56
Tableau 8. Type de données.....	62
Tableau 9. Mise en place des données sur le SGBD	62
Tableau 10. Exemple de mise en place de données sur le SGBD	62

ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AD	Archive départemental
BD	Base de données
BFC	Bourgogne- Franche-Comté
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COMUE	Communauté d'universités et établissements
EHESS	École des hautes études en sciences sociales
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
GPS	Système mondial de positionnement
ID	Identifiant
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
Langage SQL	Langage de requête structurée
MPD	Modèle Physique de Données
MSHE	Maison des Sciences de l'Homme et de l'Environnement
NYPL	Bibliothèque Publique de New York
RGE	Référentiel Géographique à Grande Échelle
SGBD	Systèmes de gestion de bases de données
SIG	Système d'information géographique
UML	Langage de Modélisation Unifié

1 INTRODUCTION

Tout est présence. Tous les siècles sont ce présent.
Octavio Paz. *Poèmes (1935-1975)*

À l'heure actuelle, le monde est confronté à trois **enjeux fondamentaux** liés à la nécessité de (I) garantir l'**équité sociale** et la **justice spatiale** ; (II) promouvoir des pratiques de **durabilité environnementale** ; et (III) s'efforcer d'atteindre des niveaux de **productivité économique** qui soient bénéfiques pour l'ensemble de la population. En ce sens, les villes constituent un élément central au moment de faire face à ces enjeux, surtout si nous tenons compte du fait que, actuellement, plus de la moitié de la population mondiale réside dans des zones urbaines¹. Pour cette raison, il est nécessaire d'établir stratégies d'aménagement territorial, afin de protéger l'environnement, réduire la pauvreté et les inégalités, garantir les droits collectifs et promouvoir des conditions de vie adéquates pour la population urbaine croissante dans toute la planète. En définitive, comme le souligne le chercheur Yves Guermond, pour parvenir au **développement durable** à court et moyen terme, nous devons *repenser* la manière dont les villes sont planifiées et gérées dans le monde, en s'adaptant aux contextes spécifiques de chaque territoire (Guermond, Y., 2006).

En ce sens, nous devons noter que des historiens tels que Rolf Peter Sieferle, ont souligné l'utilité de décrire et d'analyser le concept de durabilité et son application à travers l'histoire, afin de fournir des réponses sur *ce qu'elle est* et *à quoi elle devrait ressembler* une pratique durable contemporaine (Sieferle, Rolf Peter, 2003). Cette perspective est conforme aux thèses de l'historien britannique Eric Hobsbawm, qui exprime l'importance non seulement de découvrir le passé, mais aussi de l'expliquer et de lui fournir un lien avec le présent, tout en considérant que **pour comprendre le présent et anticiper l'avenir, il est essentiel de comprendre le passé, mais aussi de comprendre comment ce passé est devenu le présent** (Hobsbawm, Eric, 1998). De ce point de vue, un **territoire** peut être considéré comme un **organisme vivant** (Raimbault, Juste, 2018) qui se transforme à travers des siècles en vertu des décisions politico-administratives, des pratiques économiques et socio-culturelles collectives et des phénomènes d'origine naturel ou anthropique.

Ainsi, nous observons qu'il est important d'analyser **l'évolution du territoire** sur le temps long, afin de mieux comprendre les problèmes qu'il a eu dans le passé, les enjeux qu'il a à l'heure actuelle et les défis qu'il aura dans les années à venir. De cette façon, nous observons que l'adaptation de l'aménagement au contexte spécifique de chaque territoire est une tâche dans laquelle il est nécessaire de se tourner vers le passé pour comprendre les facteurs qui ont façonné ledit territoire au fil du temps. Cette analyse, selon Alexandre Moine, doit s'effectuer en considérant le fait qu'un **territoire** constitue un **système spatial** composé d'une série d'éléments ou de sous-systèmes qui sont étroitement liés les uns aux autres, qui évoluent sur le temps, et qui correspondent à : (I) l'espace géographique, (II) ; les acteurs qui se comportent et agissent sur l'espace géographique ; et (III) les actions menées par les acteurs et qui sont influencées par les représentations que chaque individu fait de *ce qui est* et de *ce qui sera* l'espace géographique dans lequel il habite (Moine, Alexandre, 2006).

Ainsi, lors de mon stage au Laboratoire ThéMA, j'ai eu l'opportunité d'apprendre sur les processus d'analyse, compréhension et évaluation des dynamiques de transformation de ces organismes vivants –les territoires– à travers le temps. En ce sens, le stage m'a permis de fournir une assistance dans la mise en place d'une base de données géo-historique pour une vectorisation collaborative du réseau viaire de la région Bourgogne- Franche-Comté sur le temps long. Par conséquent, ce document a l'intention de présenter les activités et connaissances

¹ Selon les estimations des Nations Unies (citées par la Banque Mondiale), en 2018, 55,3% de la population mondiale résidait dans des zones urbaines (Banque Mondiale, 2020).

acquises lors du stage et, aussi, de montrer comment ces activités m'ont permis de comprendre l'importance d'analyser l'évolution des trames territoriales sur le temps long, afin d'aborder les défis et enjeux posés par les villes modernes, en matière d'aménagement du territoire, planification urbaine- régionale, durabilité des territoires et adaptation au changement climatique.

1.1 CONTEXTE DU STAGE

Le stage est encadré dans le projet **COVADEO** (Collecte, visualisation et analyse de données viaires géo-historiques), qui est un projet supporté par la région Bourgogne- Franche-Comté et dirigé par Mme Claire LAGESSE, maître de conférences à l'Université de Franche-Comté et membre de l'équipe de recherche du Laboratoire ThéMA (ESSHC, 2020). En ce sens, l'objectif principal du projet est lié à **comprendre la structuration progressive de la trame territoriale de la région Bourgogne- Franche-Comté, à travers l'analyse de l'évolution de son réseau viaire** (Lagesse, C., El Gouj, H. et Rincón, C., 2020). Cet objectif implique la mise en place d'une base de données géo-historiques à travers laquelle nous cherchons à réaliser une vectorisation collaborative du réseau viaire de la région BFC, afin d'identifier son évolution à travers les siècles et comprendre les morphologies historiques du territoire.

Ainsi, l'un des aspects les plus importants pour la mise en place du projet, est lié au besoin de collecter des cartes anciennes sur lesquelles il soit possible de lire le réseau viaire, afin de récupérer les géométries des segments routiers qui ont existé dans la BFC au cours des siècles. Cependant, nous devons noter que la récupération de ces géométries est une procédure difficile à mener, en raison du manque de numérisation des cartes anciennes régionales. À cause de ces difficultés, le projet COVADEO cherche à développer des dynamiques de *crowdsourcing*, à travers la création d'un jeu sérieux qui permettra de vectoriser les réseaux viaires des cartes anciennes, afin de consolider la base de données géo-historique susmentionnée. Ces procédures permettront d'examiner l'évolution de la morphologie viaire régionale ; analyser les évolutions historiques concernant l'accessibilité territoriale et les modes de déplacements de la population ; et mieux comprendre l'impact des décisions de planification et aménagement urbain dans la BFC (ESSHC, 2020).

1.1.1 Description de l'entreprise

ThéMA est un laboratoire de recherche axé sur les sujets de géographie théorique et quantitative, organisé à travers trois axes thématiques : (I) *Paysage et Cadre de Vie* ; (II) *Mobilités, Ville et Transport* ; et (III) *Intelligence Territoriale*. Ce laboratoire est soutenu par la COMUE Bourgogne-Franche-Comté, associant le CNRS et les Universités de Bourgogne et de Franche-Comté. En ce sens, le Laboratoire mène des recherches visant à promouvoir l'utilisation de méthodes quantitatives pour analyser les structures et dynamiques spatiales, afin de proposer des approches innovantes permettant de répondre aux défis existants en termes d'aménagement du territoire, d'amélioration de la qualité de vie de la population, et de consolidation d'un développement durable. Ceci, à travers la réalisation d'études théoriques ; l'acquisition de données sur terrain ; et le développement de méthodologies de modélisation spatiale, analyse des réseaux de transport et prospective territoriale (ThéMA- Site web du Laboratoire, 2020).

1.1.2 Territoire et temporalité d'étude

En ce qui concerne le territoire d'étude, nous devons faire une précision : le stage s'est concentré sur la région de la Bourgogne- Franche-Comté, qui sera donc la zone de référence de ce document. Mais en même temps, nous devons noter que les chapitres d'analyse qui seront présentés dans ce mémoire, utiliseront comme sous-zones d'étude les arrondissements de Besançon et Dijon, qui appartiennent à la région susmentionnée. Ceci, afin de montrer les caractéristiques, les enjeux et le fonctionnement général du travail de stage, à une micro-échelle qui

nous permettra d'entrer dans les détails, mais en conservant toujours l'idée que l'échelle du stage et du projet COVADEO est essentiellement régionale.

Ainsi, les deux sous-zones choisis dans ce document, correspondent aux arrondissements de Besançon et Dijon. Ceci, en raison du fait que ces deux villes sont deux des centres les plus représentatifs de la région BFC, en termes démographiques, environnementaux, socioculturels et économiques. Ces caractéristiques permettent aux deux villes d'avoir une influence notable sur leur environnement régional et intercommunal immédiat, ce qui se traduit par le fait qu'elles sont toutes deux l'épicentre des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) tels que le Grand Besançon Métropole et le Grand Dijon Métropole. En plus, la sélection de ces deux arrondissements a été effectuée en tenant compte du fait qu'il faut penser aux problèmes et enjeux du territoire à une échelle qui soit plutôt régionale et non pas locale.

Simultanément, nous devons souligner que cette recherche s'inscrit dans une période de temps correspondant aux années 1786-2019, en tenant compte du fait que dans cette période, nous pouvons constater une plus grande disponibilité de cartes historiques avec un niveau de détail élevé pour les deux arrondissements. Avant 1786, nous observons la présence de certaines lacunes dans ces deux zones d'étude (par exemple, des décennies voire des siècles où il existe des cartes pour Besançon mais non pas pour Dijon ou vice versa), ainsi que l'existence de cartes avec un niveau de détail inférieur (c'est-à-dire des cartes dans lesquelles nous pouvons voir les voies interurbaines, mais non pas les voies intraurbaines).

1.1.3 Missions de stage

Les activités et missions développées au long du stage sont présentées dans la table ci-dessous :

Tableau 1. Missions de stage

Source : élaboration propre.

Activités	Semaine(s)
a. Activités préliminaires	
Début de stage : rendez-vous avec Mme Claire LAGESSE ; avec Jérôme VALANCE ; avec Hanae EL-GOUJ	3
Mise à niveau en base de données et modélisation UML (notamment, diagramme de classes)	4-5
Recherche bibliographique (récupération, lecture, résumé)	4-6
b. Structure de données	
Définition de la structure de données la plus efficace pour stocker les cartes anciennes et permettre leur vectorisation. Cette procédure comprend une problématisation, création de la structure de données et consolidation d'un MPD.	6-9
c. Mise en place cette structure sur les serveurs de la MSHE	
Insertion du MPD préalablement créé sur PostgreSQL, à travers plusieurs requêtes.	7-18
d. Déployer un test à l'échelle du Laboratoire THÉMA sur une zone géographique restreinte	
Choix du territoire	14-19
Méthodologie pour le test	
Réalisation du test (répétition et amélioration)	
Communication à propos du lancement du test	
Lancement du test à l'échelle du laboratoire	27
e. Visualisation interactive des cartes	
Mettre en place une visualisation interactive du catalogue de cartes anciennes	24-29
f. Réflexion approfondie	
Evaluation des possibilités offertes par chacun des territoires en fonction de la disponibilité des données	6
Analyse des enjeux de la construction de données collaboratives pour de la donnée vraie historique (évolution des géométries au travers du temps).	6-24
Analyse des logiques de l'étalement urbain observées à travers le réseau viaire et mises en perspective avec d'autres travaux menés sur d'autres territoires.	6-27
g. Réalisation de points avec Mme Claire LAGESSE	
Points pour discuter l'état d'avancement des missions de stage, ainsi que pour examiner les difficultés ou questions qui peuvent parvenir lors du travail de stage.	Une fois par semaine

Activités	Semaine(s)
h. Activités auxiliaires	
Vectorisation des cartes à grande échelle	16-19
Séminaire de Recherche "De l'acquisition à la valorisation des big geodata du passé" - IGN (ville de Saint-Mandé)	9
i. Elaboration des documents livrables	
Consolidation du rapport (incluant : l'analyse de l'existant, l'analyse technique, l'analyse fonctionnelle, l'explicitation de la méthodologie suivie, la présentation des résultats, et la discussion et mise en perspective)	6-29
Elaboration du rendu universitaire (prise de recul, présentation de la structure et présentation de soutenance)	19-27

2 CADRE THÉORIQUE ET NOTIONS DE BASE

Le chapitre présenté ci-dessous est composé de : (I) un **énoncé du problème** qui vise à exprimer les principaux défis et difficultés à examiner durant le stage ; (II) des **objectifs du projet**, destinés à stipuler les méthodes et manières d'aborder le sujet de stage ; (III) un **cadre conceptuel** qui permettra d'avoir une notion des principaux éléments autour desquels ce document a été développé ; et (IV) un **état de l'art** qui aidera à connaître, de première main, les avancées réalisées par divers scientifiques et chercheurs en termes de recherche sur les bases de données géo-historiques, la vectorisation de cartes anciennes, le suivi de l'évolution des réseaux routiers, ainsi que la relation entre les sujets susmentionnés et les enjeux liés à l'étalement urbain et à l'aménagement du territoire.

2.1 ÉNONCÉ DU PROBLÈME

L'évaluation des phénomènes historiques constitue un outil qui a des implications pour comprendre les dynamiques et les contextes territoriaux actuels. En ce sens, le projet COVADEO a été conçu dans le but d'établir une analyse de l'évolution historique des réseaux viaries en Bourgogne-Franche-Comté et de comprendre comment la forme urbaine influence les modes de circulation de la population actuelle (Lagesse, C., El Gouj, H. et Rincón, C., 2020). Cependant, cette étude est soumise aux travaux d'analyse de cartes historiques et d'obtention de données spatio-temporelles permettant de suivre l'évolution des segments qui composent le réseau viaire régional. Ainsi, nous devons noter que pour le développement de ce genre d'analyses, il existe divers défis tels que :

- (I) L'existence de cartes historiques présentant différents niveaux de détail, zones de couvertures, échelles géographiques et états de conservation, ainsi que des différentes techniques de réalisation. La nature hétérogène de ces cartes conduit donc à la nécessité de les organiser et de les harmoniser en utilisant des outils tels que les catalogues et les bases de données.
- (II) L'absence de cartes historiques numérisées, ce qui les rend difficilement accessibles aux chercheurs et, en général, aux personnes intéressées par les enjeux historico-géographiques. Il est vrai que diverses entités telles que les archives départementales, les archives municipales, les bibliothèques et les agences d'urbanisme se sont efforcées de numériser et d'organiser les cartes historiques de différentes régions de France. Cependant, il reste encore un long chemin à parcourir pour garantir la conservation adéquate de ce type de matériel patrimonial.
- (III) Le manque de données vectorielles permettant un accès facile aux informations sur la morphologie du réseau viaire d'une zone donnée à un moment historique spécifique.

En ce sens, nous devons noter que les cartes anciennes contiennent des informations géographiques, spatiales et descriptives qui peuvent aider à comprendre l'évolution historique d'un territoire donné et les éléments naturels et artificiels qui le composent. De ce point de vue, nous devons mentionner que les données géo-historiques existantes sur les cartes peuvent être collectées, organisées et analysées à travers des bases de données géographiques, qui constituent un ensemble structuré d'information stocké sur un support informatique (Couleau-Dupont, A., 2010). Ainsi, des chercheurs tels que Benoît Costes (2017), Marc Barthelemy (2016) et Julien Perret (2016) se sont intéressés aux sujets liés à la collecte, organisation et analyse de données viaries historiques. Ceci afin d'identifier les dynamiques urbaines historiques liées à des sujets tels que la mobilité et les transports, les droits

à la construction, ainsi que les logiques d'organisation spatiale et sociale (voir le chapitre 2.4.1 de ce document). Les bases de données géo-historiques permettent donc de suivre les changements et transformations qui ont eu lieu au fil des années sur un territoire donné. Ainsi, ce document cherche à examiner ces types de bases de données et leur potentiel en termes de support aux analyses et de compréhension des logiques historiques d'expansion des zones urbaines, qui constituent un outil fondamental pour comprendre et affronter les problèmes et défis qui peuvent exister actuellement sur un territoire donné, en termes environnementaux, sociaux et économiques.

2.2 OBJECTIFS

Sur la base du problème précédemment énoncé, l'objectif principal du stage est de **mettre en place une base de données géo-historique permettant une vectorisation collaborative du réseau viaire de la région Bourgogne-Franche-Comté sur le temps long**. Cet objectif principal implique une série d'objectifs spécifiques et stratégies envisagées pour atteindre ces objectifs spécifiques (chacun des objectifs spécifiques est lié aux activités et missions de stage précédemment détaillées (voir la partie 1.1.3 de ce document)) :

Tableau 2. Objectifs spécifiques et stratégies

Source : élaboration propre.

Objectifs spécifiques	Stratégies	Activité (mission de stage)
Analyser et comprendre les principaux éléments qui caractérisent les bases de données géo-historiques.	- Identifier et étudier des documents et des auteurs intéressés par la mise en œuvre de bases de données spatio-temporelles en France et dans d'autres pays du monde.	a. Activités préliminaires
Définir une structure de données efficiente pour le stockage de cartes anciennes et permettre leur vectorisation.	- Étudier les particularités des structures de données, ainsi que les méthodes et les logiciels permettant le stockage de grandes quantités d'informations	b. Structure de données
Mettre en place la structure de données sur les serveurs de la MSHE.	- Établir un Modèle Physique de Données fondé sur la structure de données préalablement définie et sélectionner un logiciel permettant cette mise en place. - Identifier les requêtes et procédures nécessaires pour la mise en place de la structure sur les serveurs de la MSHE.	c. Mise en place structure de données
Déployer un test à l'échelle du Laboratoire ThéMA sur une zone géographique restreinte.	- Sélectionner une zone géographique spécifique ayant une quantité considérable d'information cartographique. Cette zone doit être représentative au niveau régional. - Participer à la construction d'un poster et d'un document écrit fournissant des informations sur le test, afin d'encourager les professionnels du laboratoire ThéMA à y participer. - Réaliser des procédures de vectorisation pour identifier l'évolution du réseau routier sur les cartes sélectionnées, afin de comprendre les enjeux et défis de vectorisation du projet.	d. Test à l'échelle du Laboratoire ThéMA
Mettre en place une visualisation interactive du catalogue de cartes anciennes.	- Identifier les principales caractéristiques que devrait avoir ladite visualisation interactive, ainsi que les logiciels et méthodes les plus appropriées pour cet objectif. - Travailler dans la consolidation des méthodes de visualisation interactive des cartes.	e. Visualisation interactive des cartes
Évaluer le potentiel des bases de données géo-historiques en tant qu'outil d'aide à l'aménagement du territoire.	Identifier et débattre sur les potentiels et faiblesses des bases de données géo-historiques, en termes d'identification et de suivi de l'évolution de l'étalement urbain au fil des années	f. Réflexion approfondie
Participer à des activités complémentaires qui permettent le développement des activités de stage.	Points avec Mme Lagesse, séminaires ; vectorisation à grande échelle ; rédaction des rapports.	g. Points ; h. Activités auxiliaires ; i. documents livrables

2.3 CADRE CONCEPTUEL

Les principales définitions à considérer pour ce document sont détaillées ici :

2.3.1 Notions sur les bases de données géo-historiques

2.3.1.1 Les bases de données géo-historiques et ses éléments auxiliaires

Pour comprendre la notion de **base de données géo-historique**, nous devons tout d'abord mentionner que les **données géo-historiques**, selon Benoît Costes, constituent un ensemble d'observations spatio-temporelles qui peuvent être stockées au format vectoriel ou dans une **base de données**². Ainsi, les données géo-historiques partagent les caractéristiques des données géographiques, mais elles diffèrent par le fait que si les données géographiques sont spatiales, les données géo-historiques sont spatio-temporelles, ce qui implique que peuvent faire référence à des éléments qui ont disparu au fil du temps. Cette situation rend les données géo-historiques d'une nature imparfaite, à cause de l'incertitude sur la validité des informations fournies, de la présence de lacunes dans les informations, de l'imprécision géographique, des incertitudes temporelles, etc. (Costes, Benoît, 2017).

Ces inconvénients sont dus au fait que les cartes historiques ont des origines multiples et diverses, ce qui signifie que les données vectorielles créées à partir du traitement des cartes anciennes ne sont rien d'autre qu'une interprétation donnée à un type de représentation du monde qui a été construit avec diverses méthodes. Par conséquent, au moment de travailler avec des données géo-historiques, Costes suggère la nécessité de garder à l'esprit que celles-ci auront toujours des imperfections qui, si elles ne sont pas prises en compte, peuvent conduire à de fausses interprétations et conclusions (Costes, Benoît, 2017). Sur ce point, nous devons mentionner les postulats du chercheur Julien Perret, qui non seulement affirme que les données géo-historiques sont de nature imparfaite, mais souligne également que la production de ce type de données doit être réalisée en considérant la nécessité d'identifier, qualifier, fusionner et intégrer l'ensemble des inexactitudes dans l'analyse des ressources cartographiques historiques (Perret, Julien, 2016).

Les données géo-historiques sont alors un type d'information spatio-temporelle extraite de **cartes historiques**. Pour cette raison, nous devons signaler que les cartes et les ressources cartographiques sont, selon Myriam Vendé-Leclerc, une classe de représentation graphique de la planète entière ou d'une partie de celle-ci, suivant des structures conventionnelles dont les objectifs sont liés au stockage, au traitement et à la diffusion des informations géographiques. En ces sens, il existe différents types de cartes (voir l'Annexe 1), telles que les cartes-inventaire, les cartes d'analyse, les cartes de synthèse et les cartes-système (Vendé-Leclerc, Myriam, 2017).

De même, le chercheur Rystedt Bengt souligne que les cartes contiennent deux informations de base, concernant un *emplacement* et des *attributs* qui évoluent dans le temps. Ainsi, les cartes permettent de montrer et / ou d'analyser les relations spatiales existantes entre différents objets géographiques ; décrire l'aménagement du territoire ; et fournir des informations foncières ou des informations liées à des sujets tels que le transport terrestre et / ou maritime, l'occupation du sol, la couverture végétale, les éléments géologiques, les données statistiques, etc. (Bengt, Rystedt, 2014). Au même temps, selon Benoît Costes, **les cartes et ressources cartographiques historiques** sont des outils qui permettent d'accéder à des informations historiques concernant la morphologie et la gestion des éléments du territoire (comme les réseaux viaires, la localisation des bâtiments, la distribution spatiale des parcelles, etc.), ce qui s'ajoute au fait qu'elles permettent d'identifier des informations spatiales, géométriques, toponymiques et topologiques (Costes, Benoît, 2017).

² Auteurs tels qu'Albert Chan signalent que les bases de données représentent une collection organisée et facilement accessible d'informations, qui se composent d'un certain nombre de catégories connexes (Chan, Albert, 2004).

2.3.1.2 Les systèmes de gestion de bases de données –SGBD

Comme nous l'avons vu précédemment, les bases de données géo-historiques sont un ensemble de données spatio-temporelles organisées afin de permettre le stockage et l'accès détaillé à des informations historiques spécifiques, ce qui peut être mené à travers des **systèmes de gestion de bases de données –SGBD–**. Ainsi, les SGBD, selon Georges Gardarin, constituent un ensemble de systèmes qui permettent efficacement l'insertion, la modification et la recherche de données spécifiques dans une grande masse d'informations partagée par différents utilisateurs (Gardarin, Georges, 2003). Dans le même idée, Morley et Parker affirment que les SGBD permettent la création, la conservation et l'accès aux bases de données, ce qui contribue à réduire les redondances dans les données et à augmenter leur précision (Morley, D. et Parker, C., 2015).

En outre, Gardarin souligne que les SGBD diffèrent des systèmes de fichiers, car ils sont construits à partir d'une **structure de données** qui permet de les décrire séparément à leur utilisation (c'est-à-dire aux processus de modification et de recherche des données) (Gardarin, Georges, 2003). Ainsi, les structures de données, selon John Bullinaria, constituent une forme particulière d'organisation des données afin d'effectuer des opérations spécifiques (Bullinaria, John, 2019). Cette définition est conforme aux postulats de B. Padmaja, qui affirme que les structures de données sont un schéma organisationnel qui vise à promouvoir un stockage efficace des données, en utilisant des algorithmes qui s'adaptent aux besoins spécifiques de stockage et consultation (Padmaja, B., 2018).

2.3.2 Notions sur les éléments de morphologie urbaine

2.3.2.1 Les réseaux viaires :

Les voies, en tant qu'éléments constitutifs des réseaux viaires, représentent des moyens permettant la circulation des individus et des marchandises, ce qui contribue au développement économique d'un territoire (Didier, Michel et Prud'Homme, Rémy, 2005). En ce sens, les **réseaux viaires** correspondent à l'ensemble des voies qui permettent la circulation automobile et qui incluent les autoroutes, les rues, les chemins, etc. (Patte, Lionel, 2014). Par ailleurs, ils sont constitués, dans le cas français, de différents types de voies, telles que les voies communales, les voies départementales, les voies nationales, les autoroutes de dégagement et les autoroutes de liaison. En même temps, nous devons signaler que le réseau viaire français est géré par les communes, les départements, l'État et des entités privées, selon le cas spécifique de chaque type de voies (CEPRI, 2018).

2.3.2.2 Sols artificialisés et surfaces bâties

Dans le contexte français, l'**artificialisation des sols** est liée au changement d'usage des sols avec comme catégories polaires les espaces naturels, agricoles et forestiers, opposés aux usages urbains (logement, activités économiques, commerces, loisirs, etc.) (Loisier, Anne-Catherine et Petel, Anne-Laurence, 2019). Ainsi, les sols artificiels sont considérés comme des surfaces ayant perdu leur état naturel, agricole ou forestier. Ces surfaces sont classées en deux grands groupes correspondant à : (I) les sols imperméabilisés, qui comprend les **sols bâtis** et revêtus ; et (II) les sols perméables localisés à l'intérieur des villes ou en mitage, comme les jardins, les espaces verts, les friches urbaines et les carrières (Loisier, Anne-Catherine et Petel, Anne-Laurence, 2019). À cette définition, nous devons ajouter que des auteurs tels que Colin Albizzati et al. soulignent qu'il existe une différence entre les sols bâtis et les sols artificiels destinés aux voies et chemins de fer. Les sols bâtis recouvrent donc le tissu urbain continu ou discontinu, les zones résidentielles, industrielles, commerciales et de loisir (Albizzati, Colin et al, 2017).

2.3.2.3 Les parcelles

En termes cadastrales, les **parcelles** peuvent être définies comme l'élément unitaire de propriété du sol. Elles sont formées par toute portion de terrain d'un seul tenant appartenant à un seul propriétaire ou à une même indivision. En ce sens, elles constituent un découpage territorial, et sont contenues dans une même commune, une même

section et un même lieu-dit (Atelier parisien d'urbanisme (APUR), 2016). Ainsi, les parcelles permettent de définir le propriétaire, la subdivision fiscale et l'unité élémentaire d'évaluation en non bâti (Collectivités Locales, 2016). Sur ce point, il faut mentionner qu'il y a des éléments de l'espace qui ne sont pas parcellisés par le cadastre, comme par exemple les voies et les fleuves (Atelier parisien d'urbanisme (APUR), 2016).

2.3.3 Notions sur la numérisation de ressources cartographiques

2.3.3.1 Numérisation de cartes :

La **numérisation des cartes**, selon K. Manjula, constitue un processus qui permet la création d'une version électronique d'un objet existant dans le monde réel, afin de le stocker, l'afficher et le manipuler sur un ordinateur, ainsi que le diffuser via des réseaux numériques. Ce travail implique la nécessité d'avoir préalablement géoréférencé la carte, de sorte que lors de sa numérisation, elle est liée à une table attributaire qui fournit des informations cartographiques précises (Manjula, K. et autres, 2010). A cette idée, nous devons ajouter que la numérisation des documents a une série d'objectifs liés à : (I) conserver les cartes de leur détérioration ou d'une manipulation qui pourrait nuire à leur contenu ; (II) faciliter l'accès aux cartes aux utilisateurs distants ; (III) créer une sauvegarde qui permet de conserver des cartes d'une importance particulière ; et (IV) rationaliser les coûts de conservation des cartes, notamment en termes d'espaces et de ressources nécessaires à leur entretien (BCI, 2014).

2.3.3.2 Géoréférencement

Le **géoréférencement** constitue un processus par lequel une image est associée à des coordonnées cartographiques, afin de lui donner une localisation dans l'espace (Costes, Benoît, 2017). Cette idée s'ajoute à celle exprimée par Thierry Touzet et Thierry Lallemand, qui affirment que le géoréférencement permet d'intégrer des données géographiques au sein d'un système et une projection connus en coordonnées X et Y (Touzet, Thierry et Lallemand, Thierry, 2016), ainsi qu'aux postulats de Lingli Zhu, qui souligne que le géoréférencement permet d'établir une relation entre les systèmes de coordonnées et les images satellites, aériennes et / ou terrestres (Zhu, L. et autres, 2008). En même temps, Andreas Hackeloer note que le géoréférencement est un processus qui permet d'aligner les informations géographiques dans un système de coordonnées, afin qu'elles puissent être visualisées, analysées ou comparées (Hackeloer, A. et autres, 2014). En ce sens, Hackeloer exprime que le processus de géoréférencement est généralement effectué en utilisant 3 types d'informations :

- (I) Les **informations géométriques**, qui permettent de déterminer les propriétés géométriques d'un objet, telles que la forme et la conception d'un segment viaire ;
- (II) Les **informations topologiques**, liées à la structure graphique présente sur la carte et qui correspondent à des éléments géographiques tels que les voies ou les rivières ;
- (III) Les **informations sémantiques** d'un emplacement géographique déterminé, qui incluent les noms de lieux ou de voies (Hackeloer, A. et autres, 2014).

2.3.3.3 Vectorisation de cartes historiques

La **vectorisation de cartes historiques** permet la détection efficace des changements spatiaux générés au fil du temps, ainsi que de comparer et d'analyser des informations historiques avec des informations modernes (Iosifescu, I. et autres, 2016). En ce sens, la vectorisation, selon G. Dahrmaraj, constitue un processus qui implique la création de données de position correspondant à des points, des lignes et des polygones exprimés en coordonnées X et Y, qui ont un emplacement, une relation topologique et des informations attributaires associées. Ce processus est effectué afin de numériser les cartes existantes au format papier et d'incorporer des attributs (Dharmaraj, Girija, 2005). Dans cette même idée, Marc Souris affirme que la vectorisation permet de représenter des zones, des lignes

et des points qui ont une structure géométrique composée de nœuds, d'arcs, de segments et de lignes fermées, qui sont exprimés par des coordonnées géographiques dans un système de référence (Souris, Marc, 2002).

2.3.4 Notions sur le territoire et ses dynamiques

2.3.4.1 Morphologie urbaine :

La **morphologie urbaine**, selon Patrick Schirmer, se réfère à l'étude de la forme des établissements humains à différentes échelles, afin de comprendre la structure spatiale, ses caractéristiques et son évolution. Cette étude doit être réalisée en tenant compte des informations cartographiques qui représentent la structure physique de l'environnement bâti, composé de bâtiments, d'espaces ouverts et de réseaux routiers (Schirmer, P. et autres, 2015). En plus, selon Albert Lévy, l'étude de la morphologie urbaine doit être menée en considérant cinq sous-systèmes, correspondant à :

- (I) Le *tissu urbain*, constitué par les éléments parcellaires et bâtis, ainsi que par le réseau viaire et les espaces libres ;
- (II) Le *tracé urbain*, c'est-à-dire, la forme géométrique de la ville, qu'elle soit régulière, irrégulière, orthogonale, radioconcentrique, etc. ;
- (III) Le *paysage urbain* ou *forme plastique urbaine*, qui est liée aux matériaux, textures, couleurs et silhouettes de la ville horizontale et de la ville verticale, ainsi que la présence d'éléments végétaux et minéraux ;
- (IV) La *forme sociale urbaine* ou *forme de l'espace social urbain*, qui a à voir avec le type d'occupation du sol et la localisation et concentration, tout au long de la ville, des différents groupes sociaux ;
- (V) La *forme bioclimatique et environnementale de l'espace urbain*, liée au contexte physico-géographique du lieu d'implantation de la ville (Levy, Albert, 2015).

2.3.4.2 Aménagement du territoire :

L'**aménagement du territoire**, selon Erika Salem, comporte une planification concertée permettant la consolidation des interventions politiques et techniques qui visent à promouvoir un développement organisé et harmonieux des modes de vie de la population, par rapport à un certain territoire (Salem, Erika, 2014). En ce sens, Catherine Dubois suggère que l'aménagement du territoire doit se faire en considérant une approche pluridisciplinaire, participative et démocratique permettant d'atteindre un consensus sur les modalités de gestion du territoire (Dubois, Catherine, 2009). En outre, Stig Enemark établit que l'aménagement du territoire doit tenir compte du contexte national (c'est-à-dire des dispositions institutionnelles précédemment adoptées), afin de garantir un développement environnemental, social et économique durable, sur la base de trois éléments essentiels (voir l'Annexe 2), à savoir :

- (I) Le *cadre de politique territoriale*, associé aux enjeux de marchés fonciers, fiscalité, gestion durable, contrôle de l'utilisation des sols et des ressources naturelles, garantie d'accès au sol par les populations les plus vulnérables, et prévention des phénomènes de spéculation foncière ;
- (II) Les *fonctions d'administration des sols*, qui correspondent au régime foncier, à la valeur des sols, à l'utilisation des sols et à l'aménagement du territoire ;
- (III) Les *infrastructures d'information sur les sols*, qui impliquent des informations cartographiques et cadastrales, ainsi que la relation entre les environnements bâtis et naturels (Enemark, Stig, 2007).

2.3.4.3 Étalement urbain

L'**étalement urbain**, selon Martin Simard, est lié à l'expansion excessive des villes, ce qui implique une surconsommation de ressources, due à des facteurs tels que l'apparition d'espaces urbains à faible densité destinés à des usages résidentiels, commerciaux et industriels (Simard, Martin, 2014). À cette idée s'ajoutent les thèses de

Guillaume Sainteny, qui affirme que l'étalement urbain est généré lorsque le taux d'expansion d'une ville est supérieur au taux de croissance démographique. Ainsi, lorsque le taux de surface consommée par habitant augmente, il y aura une réduction de la densité des zones urbanisées, ainsi qu'une apparition de pôles urbains périphériques et, même, une diminution du nombre total de personnes qui résident en centre-ville, ce qui produit des impacts environnementaux et une surexploitation des ressources (Sainteny, Guillaume, 2008).

2.4 ÉTAT DE L'ART

2.4.1 Construction de bases de données géo-historiques et vectorisation collaborative de réseaux viaires

Des chercheurs tels que Julien Perret, ont étudié la production collaborative de données vectorielles fondées sur les réseaux viaires de cartes anciennes et leur stockage dans des bases de données géo-historiques. Ainsi, cet auteur souligne que les bases de données géo-historiques permettent d'analyser l'évolution des zones urbaines, à partir de la modélisation des cartes historiques. Cependant, il existe dans ce genre d'analyses un défi lié au manque de numérisation et / ou de géoréférencement d'une grande partie des dites cartes. Ainsi, Perret met en évidence le rôle du *crowdsourcing* ou production collaborative de données, dans la mise en place de méthodologies visant à la numérisation de données, permettant une mesure plus efficace de l'évolution géo-historique des territoires et des structures spatiales et sociales qui les composent, y compris les réseaux viaires (Perret, Julien, 2016).

Cette production collaborative de données est réalisée afin de : (I) comprendre les enjeux territoriaux actuels et d'anticiper l'évolution des territoires dans le futur ; (II) formuler des réponses adaptées aux contextes spécifiques de chaque territoire, en tenant compte d'un cadre de durabilité et d'adaptation au changement climatique ; et (III) en raison du fait que la vectorisation de données est une procédure longue et difficile qui peut être menée plus efficacement grâce à la participation de diverses parties prenantes. Cependant, Perret prévient que les données géo-historiques sont de nature imparfaite³, raison pour laquelle il est nécessaire de montrer les choix effectués lors des phases de numérisation, géoréférencement et vectorisation des dites données, de manière à conserver les liens existants entre les sources primaires et les données générées à partir des dites sources. Ceci, afin de suivre la manière dont les données géo-historiques sont analysées et, si nécessaire, revoir les hypothèses formulées concernant le processus d'évolution du territoire étudié. Ainsi, à travers ses travaux de recherche, Perret conclut que les bases de données spatio-temporelles sont un outil qui permet de mieux comprendre l'évolution des territoires et de formuler des politiques publiques plus adaptées à leurs enjeux et besoins (Perret, Julien, 2016).

De même, nous devons souligner le travail réalisé par Benoît Costes, qui affirme que les bases de données sont un outil qui permet de décrire des espaces avec différents niveaux de détail, d'échelle et, même, de temporalité. Costes manifeste que grâce à l'organisation de données géo-historiques, il est possible d'étudier les dynamiques et évolutions des territoires. Ceci est une activité dans laquelle les cartes jouent un rôle fondamental, en tenant compte du fait qu'elles permettent d'accéder à des informations détaillées sur la gestion sociale et spatiale, en plus du suivi des pratiques et activités qui transforment ledit espace. En ce sens, Costes s'est intéressé à l'étude des réseaux géo-historiques des rues de la ville de Paris, entre la fin du XVIII^e siècle et la fin du XIX^e siècle, en partant du principe que les réseaux viaires constituent un squelette pouvant permettre l'identification et l'étude de la relation entre les formes spatiales et les pratiques sociales (Costes, Benoît, 2017).

Ainsi, sur la base de procédures collaboratives de géoréférencement et de vectorisation cartographique, Costes s'est fixé pour objectif de définir un modèle de données géo-historiques permettant de construire des informations de référence, afin de décrire l'évolution des processus spatio-temporels. Ce modèle se caractérise par la

³ Voir le sous-chapitre « Cadre conceptuel » de ce document.

constitution d'une multi-représentation de données intégrées et agrégées qui permet non seulement de faire face aux problèmes d'intégration des données spatio-temporels, mais cherche également à devenir le socle d'un référentiel géo-historique. Ces travaux ont permis à Costes d'identifier que l'un des principaux défis en termes de consolidation des bases de données géo-historiques, est lié à l'intégration de données à la fois géographiques et temporelles, ce qui conduit à des imperfections et rend nécessaire l'établissement de procédures d'appariement de données grâce auxquelles il est possible d'identifier des similitudes en termes de localisation, de forme, d'attributs ou de sémantique (Costes, Benoît, 2017).

Par ailleurs, parmi les principaux projets de construction de données géo-historiques, nous pouvons citer *GeoHistoricalData*, qui est composé d'un groupe interdisciplinaire de professionnels cherchant à analyser l'évolution territoriale de la France, ainsi que des villes de New York (États-Unis) et Milan (Italie). Ce projet vise la production collaborative de données vectorielles spatio-temporelles, afin de les stocker dans des bases de données géo-historiques et de mener des processus d'analyse permettant d'identifier l'évolution dans le temps des dynamiques territoriales des zones d'étude (Perret, Julien, 2016). Dans le cas de la France, ce groupe de recherche a travaillé sur les cartes de Cassini et sur d'autres ressources cartographiques historiques, de telle sorte qu'il y a des outils participatifs de construction de données spatio-temporelles qui ont été mises en place, afin de vectoriser les réseaux routiers existants dans lesdites cartes (Costes, Benoît, 2017).

Ces procédures de production collaborative de données ont conduit à la vectorisation de l'ensemble du réseau viaire national existant sur les cartes de Cassini. (Costes, Benoît, 2017), ainsi qu'à l'établissement de sites internet tels que *L'Arpenteur Topographe* (<http://geohistoricaldata.herokuapp.com/>), qui vise à supporter l'analyse du développement territorial, à travers l'étude de l'organisation sociale et spatiale sur le temps long (Barthelemy et autres, 2016). Aussi, nous devons mentionner le site *Building Inspector* (<http://buildinginspector.nypl.org/>) qui a pour objectif d'identifier les évolutions historiques des villes, en ce qui concerne les bâtiments, rues et quartiers (NPL Labs, 2020a). Ces sites ont été développés en collaboration avec NYPL Labs, afin de vérifier, corriger et enrichir les données existantes sur les cartes anciennes. Ceci, grâce à une validation collaborative à travers laquelle les utilisateurs examinent et, si nécessaire, corrigent les informations existantes sur les cartes qui ont été précédemment vectorisées. À travers un système de vote, cette validation vise à permettre aux utilisateurs de certifier l'exactitude des données, afin de garantir une plus grande précision dans les analyses (NYPL Labs, 2020).

De même, nous devons souligner le travail de Juste Raimbault, qui a utilisé des procédures de modélisation pour étudier les effets des infrastructures de transport sur les dynamiques territoriales. En ce sens, Raimbault a examiné la relation entre la croissance des réseaux de transport et l'augmentation de la densité de population, qui se reflète dans les changements de la morphologie urbaine au fil du temps. Ainsi, il s'est intéressé à l'examen du cas de l'Afrique du Sud, fondé sur l'utilisation de bases de données géo-historiques contenant des informations sur les réseaux ferroviaires du pays, pour la période 1880-2000. Ces études lui ont permis d'identifier des corrélations entre réseaux et territoires, en tenant compte de leur croissance, de leur répartition sur le territoire et de leur accessibilité par la population. De plus, ils l'ont amené à établir que l'étude de ce type de corrélations, complétée par l'analyse des variables socio-économiques, peut révéler l'existence de phénomènes de ségrégation et de répression. Ces phénomènes se reflètent dans la manière dont les réseaux sont répartis dans l'espace et comment ils influencent les dynamiques de déplacement de la population, conduisant à l'existence de zones où il y a plus ou moins de liberté de mouvement (Raimbault, Juste, 2018).

2.4.2 Identification de dynamiques historiques d'étalement urbain à partir du suivi de l'évolution des réseaux viaires

Comme mentionné dans le cadre conceptuel, le réseau viaire constitue un élément central qui permet des échanges sociaux et économiques, au point que des chercheurs comme Yikang Rui considèrent les voies comme les squelettes

des villes et défendent l'idée que les réseaux viaires et les usages du sol sont les deux sous-systèmes qui permettent d'identifier plus efficacement les changements morphologiques urbains à long terme (Rui, Y., 2013). Ainsi, Rui a étudié les phénomènes d'étalement urbain au fil du temps, en rastérisant les changements d'usage des sols et en vectorisant les réseaux routiers et ses expansions au cours des années. En ce sens, il a vectorisé le réseau viaire existant en 1650 dans la ville de Stockholm (Suède), afin d'appliquer deux scénarios d'étalement urbain modélisé, sous l'hypothèse d'une influence réciproque faible ou forte entre le réseau viaire et le développement de nouveaux sols urbains (voir l'Annexe 3). Ce travail l'a amené à établir que le scénario de forte influence (où l'on constate que le développement de nouveaux sols urbains dépend notamment de l'accessibilité aux voies), donne des résultats d'étalement urbain modélisé qui sont beaucoup plus proches de la réalité historique (Rui, Y., 2013).

De même, des chercheurs tels que Paolo Masucci, Kiril Stanilov et Michael Batty ont mené des recherches liées à l'analyse des dynamiques historiques d'étalement urbain, à travers l'étude de l'évolution du réseau viaire de la ville de Londres (Royaume-Uni), entre les années 1786 et 2010 (voir l'Annexe 4). Cette recherche est fondée sur le géoréférencement de neuf cartes historiques de la capitale britannique, sur lesquelles ils ont procédé à dessiner manuellement les voies observées sur chaque carte et les classer selon les normes actuelles. Ces tâches ont été complétées par des processus de calcul analytique des principales propriétés topologiques des graphes planaires, qui incluent la croissance topologique du réseau et la connectivité moyenne. Ainsi, ils ont déterminé que Londres a eu une tendance d'étalement urbain dont la structure ressemble à celle d'un arbre (Masucci AP et autres, 2013). Les résultats de cette recherche leur ont permis d'établir que la *Ceinture Verte* de Londres, en tant que stratégie d'urbanisme durable, semble être une mesure qui a ralenti la croissance des réseaux viaires et, par conséquent, a contribué à contrôler l'étalement urbain de cette ville (Masucci AP et autres, 2013).

Au même temps, les chercheurs D. Andrade, A. Souza et C. Gomes, ont réalisé des études liées à l'analyse des phénomènes d'étalement urbain dans la région de Vale do Paraíba Paulista (Brésil), basées sur l'utilisation, d'une part, d'images satellites de 1975, 1995 et 2015 qui permettent de déterminer les limites urbaines ; et, d'autre part, à partir des cartes historiques de 1977 et des bases de données du réseau routier de 2015, afin de sélectionner les voies de 2015 observables sur la carte de 1977. Par la suite, le réseau viaire filtré (1977) et le réseau routier moderne (2015) a été analysé à l'aide de calculs d'intégration viaire correspondant à l'*Indice Global d'Intégration* (voir l'Annexe 5), qui a été conçu sur la base de la *Théorie de la Syntaxe Spatiale* développée par Bill Hillier à l'*University College* de Londres (Andrade, D. et autres, 2019). Les résultats de cette recherche, selon leurs auteurs, montrent que les images satellites permettent de suivre l'étalement urbain entre 1975 et 2015, cependant, les réseaux viaires analysés pour 1977 et 2015, ainsi que l'application de l'*Indice d'Intégration Globale*, permettent de comprendre plus en détail comment le processus d'étalement urbain s'est déroulé dans cette région du pays. Ainsi, ils ont déduit que la construction d'une autoroute régionale dans les années 1970 a été un déclencheur pour la génération de phénomènes d'urbanisation dispersée (Andrade, D. et autres, 2019).

Nous devons également souligner le travail des chercheurs Luciano Gervasoni, Martí Bosch, Serge Fenet et Peter Sturm, qui ont pris les réseaux viaires comme l'un des éléments qui, avec les usages du sol, permettent de mesurer l'étalement urbain. Ceci, grâce à l'utilisation des données ouvertes, en prenant comme villes de référence Grenoble (France), le *borough* de Manhattan (New York, États-Unis) et le village de Mays Chapel (Maryland, États-Unis) (Gervasoni, L. et autres, 2017). Pour ce faire, ils ont commencé par identifier que l'étalement urbain constitue un phénomène générant des effets négatifs en termes de développement durable, ce qui les a amenés à établir l'existence de trois dimensions, correspondant à la *Dispersion*, à la *Mixité d'usages* et à l'*Accessibilité*, chacune possédant un indice qui permet de quantifier les effets de l'étalement urbain (Gervasoni, L. et autres, 2017).

Dans le cas de la dimension d'*Accessibilité*, cet indice a été calculé à partir des informations sur les réseaux viaires et les activités d'usage des sols fournies par OpenStreetMap. De cette façon, le réseau viaire a été converti en graphes, de sorte que les activités sont associées au nœud le plus proche du réseau, en partant du principe que

plus le nombre d'activités accessibles est élevé, plus le degré d'accessibilité est supérieur (Gervasoni, L. et autres, 2017). Les résultats de cette recherche (voir l'Annexe 6), leur ont permis de corroborer que : (I) Grenoble a des niveaux adéquats d'accessibilité et de diversité d'usages des sols, qui sont cependant limités par la présence de zones montagneuses, dans lesquelles, à leur tour, les niveaux les plus élevés de dispersion sont observés ; (II) Manhattan présente des niveaux élevés d'accessibilité et de diversité d'usages des sols, ainsi que de faibles taux de dispersion ; et (III) Mays Chapel présente de faibles niveaux d'accessibilité et de diversité d'usages des sols, qui augmentent cependant sur l'axe de la autoroute régional qui passe proche de ce village, où il existe également des niveaux de dispersion urbaine notables (Gervasoni, L. et autres, 2017).

De même, nous devons mentionner les travaux menés par les chercheurs Gi Ung Jang, Jin Chul Joo et Jeryang Park, qui se sont intéressés à l'étude de l'évolution des réseaux routiers sur le temps long, en prenant la ville de Séoul (Corée du Sud) comme zone d'étude. En ce sens, ces chercheurs partent de considérer les réseaux routiers comme les éléments de base qui structurent la forme urbaine et permettent la circulation des individus, ainsi que l'échange de biens et de services. Pour cette raison, ils estiment que la consolidation d'infrastructures routières résilientes est l'un des piliers qui permet d'atteindre la durabilité urbaine dans le monde. En ce sens, les chercheurs commencent par souligner qu'il est difficile d'obtenir des données spatio-temporelles des réseaux viaires de Séoul, en raison du manque de numérisation et de géoréférencement des cartes anciennes (Gi Ung Jang et al, 2020).

Cette situation les a amenés à établir que les réseaux viaires ont des caractéristiques communes qui peuvent être identifiées au cours de leurs phases de croissance et d'évolution, raison pour laquelle ces chercheurs se concentrent sur l'analyse des snapshots appartenant à 25 zones de la ville qui sont actuellement à différents stades de croissance, et ont été créées à différentes périodes historiques (années 1914, 1936, 1949 et 1963). En ce sens, les chercheurs ont procédé à l'utilisation des données SIG du réseau viaire de la ville, correspondant à l'année 2014. Celles-ci ont été traitées par des approches primaires et doubles afin d'identifier les nœuds et les arcs à analyser à travers des indicateurs tels que le *degré de centralité* et la *centralité d'intermédiarité*, ainsi que l'*analyse de vulnérabilité*. Les résultats de ces recherches leur ont permis de démontrer qu'à mesure que les villes évoluent vers des modèles décentralisés d'expansion urbaine, les infrastructures viaires présentent différents degrés de modifications, qui génèrent des impacts en termes de résilience et de durabilité (Gi Ung Jang et al, 2020).

2.4.3 Le rôle des données géo-historiques dans l'aménagement du territoire et le contrôle de l'étalement urbain

L'étude de l'évolution historique d'un territoire constitue une stratégie qui permet de comprendre ses problèmes, enjeux et défis actuels, en matière environnementale, sociale et économique. Ainsi, des auteurs tels que Julien Perret et Juste Raimbault coïncident en soulignant l'importance des données géo-historiques en termes d'aménagement, planification et gestion territoriale. En ce sens, Julien Perret manifeste que les bases de données spatio-temporelles constituent un outil qui peut aider les chercheurs, les urbanistes et les citoyens en général, à comprendre les évolutions territoriales, afin de mettre en place des outils qui contribuent à la consolidation des décisions publiques de l'ordre territorial (Perret, Julien, 2016). De même, Juste Raimbault souligne que, d'une part, l'étude de l'évolution et de la croissance d'une zone urbaine permet d'identifier les évolutions morphologiques dans le temps, ce qui en fait un centre d'intérêt pour l'aménagement du territoire. D'autre part, l'analyse de l'évolution des réseaux viaires à travers des facteurs tels que les centralités ou l'accessibilité, peut conduire à identifier l'existence de processus de planification ayant été mis en œuvre dans ces réseaux (Raimbault, Juste, 2018).

Par ailleurs, nous devons ajouter que des chercheurs comme Shlomo Angel ont étudié les phénomènes d'étalement urbain existant sur toute la planète, à partir de l'utilisation de données spatio-temporelles. Ainsi, Angel propose le *Paradigme de la Création de l'Espace*, qui se caractérise par considérer que, malgré l'adoption de politiques publiques visant à promouvoir des villes plus denses et plus compactes, l'étalement urbaine est un processus qui,

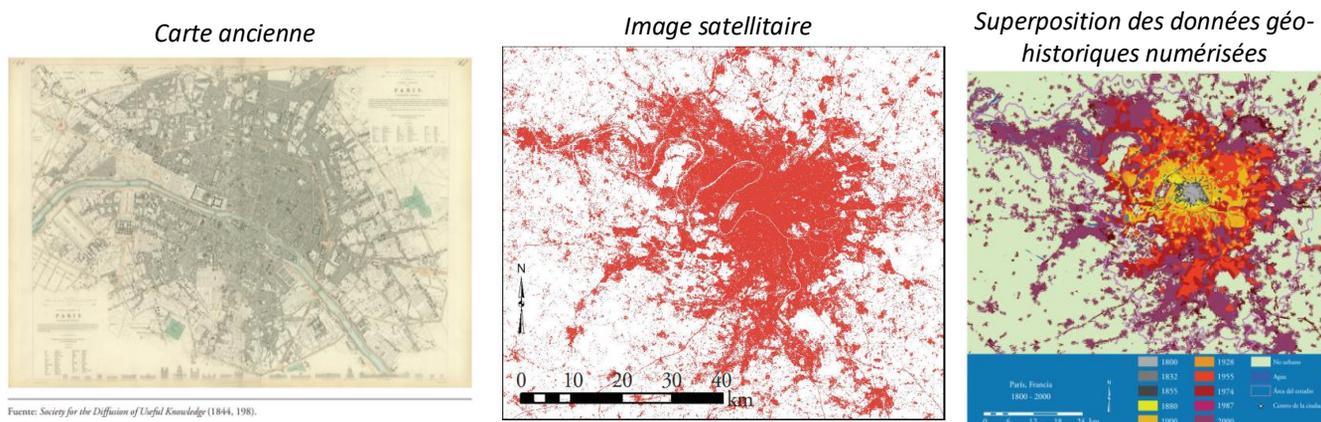
avec ou sans planification, existe et continuera d'exister. Ceci, en raison de la croissance démographique continue, ainsi que du développement de projets de logement, d'industrie et/ou de commerce dans les zones suburbaines. Par conséquent, Angel souligne qu'il n'est pas efficace de rejeter ou de refuser les phénomènes d'étalement urbain. Selon lui, ce qui est vraiment primordial, c'est d'établir des mécanismes par lesquels il soit possible de bien gérer lesdits phénomènes, afin de réduire les impacts environnementaux, climatiques et sociaux d'une expansion urbaine mal planifiée (Angel, Shlomo, 2012). Ce paradigme est fondé sur quatre propositions :

- (I) L'étalement urbain est inévitable, surtout si l'on tient compte de la croissance démographique et des phénomènes d'occupation massive des zones suburbaines ;
- (II) Les densités urbaines doivent rester dans une position de durabilité, afin que les sols ne soient pas consommés de manière inconsciente, et que les infrastructures (telles que les systèmes de transport, les réseaux de services publics locaux, etc.) ne soient pas poussées au-delà de leurs capacités ;
- (III) L'endiguement strict de l'étalement urbain favorise l'exclusion des personnes en situation de vulnérabilité socio-économique, du fait que les sols urbains et le marché du logement deviennent plus chers, ce qui rend difficile son accès par cette population ;
- (IV) Pour anticiper l'étalement urbain, il est essentiel de réserver les sols qui seront nécessaires pour la construction des réseaux viaires, des services publics locaux en réseau et des espaces publics (Angel, Shlomo, 2012).

Ce paradigme a été alimenté par Angel, à partir de l'étude de données géo-historiques obtenues par le traitement et l'analyse d'images satellites et de cartes anciennes. En ce sens, Angel et son équipe ont compilé, numérisé et analysé des ressources cartographiques appartenant à une trentaine de villes dans le monde (dont Paris), qui disposent d'informations pour les années 1800 à 2000 (voir l'image présentée ci-dessous). De la même manière, ces chercheurs ont effectué des procédures de géoréférencement, afin de pouvoir comparer des cartes qui, appartenant à la même ville, n'ont pas la même échelle géographique. Ainsi, des polygones ont été créés à partir des zones urbanisées observées sur chaque carte (c'est-à-dire, les zones où il y a des sols bâtis, espaces verts urbains et infrastructures viaires), de telle sorte que, à l'aide des statistiques démographiques historiques et du calcul de l'extension de ces polygones, les chercheurs ont établi les taux de densité démographique de chaque ville, pour chaque période étudiée (Angel, Shlomo, 2012).

Image 1. Construction de données géo-historiques de la ville de Paris (1800-2000)

Source : Angel, Shlomo, 2012, p. 176.



De cette manière, en superposant chronologiquement les polygones de chaque ville, il a été possible d'identifier les modèles de développement et d'étalement urbains qui, selon Angel, ont conduit à prouver l'existence de régularités historiques entre les différentes villes étudiées. Ces procédures ont permis à Angel de déterminer que,

quel que soit son emplacement dans le monde ou son contexte socioculturel, lorsque la population d'une ville est doublée, sa zone urbanisée est triplée, provoquant des besoins et des problèmes environnementaux et sociaux. En ce sens, Angel souligne l'importance de formuler des politiques d'aménagement du territoire qui s'adaptent et répondent aux phénomènes d'étalement urbain actuels et futurs (Angel, Shlomo, 2012).

3 DONNÉES ET MÉTHODE

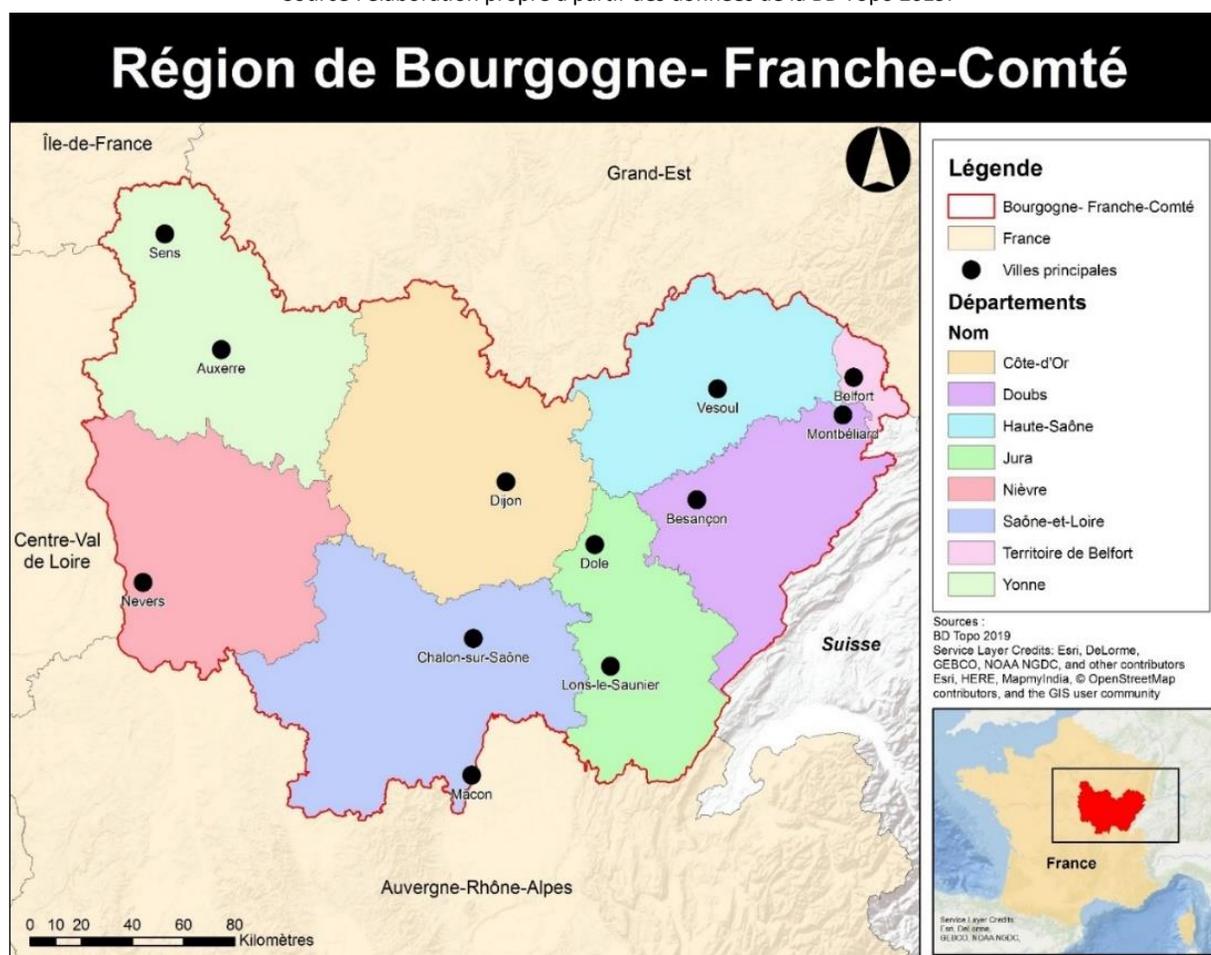
Dans cette partie, la zone d'étude sera présentée, ainsi que les données utilisées et la méthodologie suivie afin d'atteindre les objectifs détaillés dans la partie 2.2 de ce document.

3.1 ZONE D'ÉTUDE

En termes d'organisation physique et administrative, la France est constituée d'un ensemble de collectivités territoriales qui, selon l'article 72 de la **Constitution Nationale**, correspondent aux communes, départements, régions, collectivités à statut particulier et collectivités d'outre-mer (République Française, 1958). En ce sens, le travail de stage s'est développé autour d'une collectivité territoriale d'ordre régional correspondant à la Bourgogne-Franche-Comté. Cette région a une superficie de 47 800 km², une population qui dépasse 2,8 millions d'habitants, ainsi que 8 départements composés de 3 829 communes, dont seuls Besançon et Dijon ont une population qui dépasse 100 000 habitants (DRDJSCS Bourgogne- Franche- Comté, 2017). De plus, la BFC est limitrophe au nord avec la région du Grand-Est ; à l'est, avec la Suisse ; au sud, avec la région Auvergne-Rhône-Alpes ; et, à l'ouest, avec les régions Île-de-France et Centre-Val de Loire (voir la carte ci-dessous).

Image 2. Région de Bourgogne- Franche-Comté

Source : élaboration propre à partir des données de la BD Topo 2019.



Nous devons toutefois noter que les collectivités territoriales Françaises sont constituées de subdivisions d'ordre régional, départemental ou infra-départemental, telles que les **arrondissements départementaux**, qui constituent des circonscriptions administratives permettant la prestation de services déconcentrés de l'État (INSEE, 2020). Ainsi, les arrondissements départementaux sont administrés par le biais de sous-préfectures qui jouent un rôle visant à promouvoir : (I) la permanence et la représentation de l'Etat ; (II) la sécurité et la garantie de l'ordre public ; (III) la territorialisation des politiques publiques ; (IV) le soutien aux collectivités territoriales et la participation au contrôle administratif ; (V) le développement territorial ; et (VI) la coordination des services de l'Etat dans l'arrondissement (Kamel, Wassim, 2014).

En ce sens, pour bien mener les processus d'analyse des cartes historiques de la région, lors du stage nous avons décidé d'utiliser les 24 arrondissements départementaux qui composent la BFC (voir la carte ci-dessous). Ces arrondissements sont considérés comme des zones d'étude qui permettront un suivi plus efficace de l'évolution historique des réseaux viaries. Cette décision est due à deux raisons fondamentales : d'une part, les cartes anciennes collectées diffèrent les unes des autres, en ce qui concerne les échelles géographiques et les zones de couverture, ce qui oblige à établir une zone commune permettant d'harmoniser ces caractéristiques. D'une autre part, sur les 324 cartes collectées, 120 présentent un territoire supra-communale qui nous a conduit à penser à une échelle d'analyse territoriale permettant de couvrir simultanément plusieurs communes.

Image 3. Arrondissements de la région Bourgogne- Franche-Comté
 Source : élaboration propre à partir des données de la BD Topo 2019.



Par ailleurs, pour ce document nous avons choisi deux arrondissements départementaux de la région BFC (Besançon et Dijon), à travers lesquels nous présenterons en détail les activités et les méthodologies qui ont été

développées tout au long du stage. Ainsi, nous devons mentionner que l'**arrondissement de Besançon** a une superficie totale de 1947,52 km² et est composé de 256 communes (INSEE, 2020). Comme le montre la carte ci-dessus, cet arrondissement est bordé au nord par les arrondissements de Lure et Vesoul ; à l'est, par l'arrondissement de Montbéliard ; au sud-est, par l'arrondissement de Pontarlier ; et au sud-ouest, par les arrondissements de Lons-le-Saunier et Dole. De même, l'**arrondissement de Dijon** a une superficie totale de 3056,52 km² et est composé de 224 communes (INSEE, 2020). Cet arrondissement est limitrophe au nord avec la région du Grand-Est ; à l'est, avec les arrondissements de Vesoul et Dole ; au sud, avec l'arrondissement de Beaune ; et à l'ouest, avec l'arrondissement de Montbard.

3.2 DONNÉES UTILISÉES

Nous devons tout d'abord signaler l'existence de 324 cartes anciennes appartenant à la Bourgogne-Franche-Comté, qui ont été collectées et organisées à travers un catalogue qui fournit des informations sur des questions telles que : (I) la zone et le niveau de couverture ; (II) le nom du fichier dans lequel la carte est contenue, ainsi que son type (JPG, PDF, etc.) ; (III) le nom de la carte ; (IV) la période historique à laquelle appartient la carte ; (V) la période de création (qui ne correspond pas toujours à la période historique à laquelle appartient la carte) ; (VI) les sources d'information ; (VII) le contenu (par exemple, s'il existe des réseaux routiers, des zones urbaines, des zones agricoles, des réseaux hydriques, des limites physiques et administratives, etc.) ; (VIII) la description matérielle (c'est-à-dire si les éléments de base tels que le titre, la légende, l'orientation, l'échelle et la source existent ou non sur la carte) ; (IX) l'état de conservation ; et (X) d'autres sujets tels que les codes attribués à chaque carte pour son identification et analyse ultérieure (Adouane, S. et Rincón, C., 2019).

Ce catalogue est constitué de cartes à l'échelle nationale, régionale, départementale et communale couvrant l'ensemble du territoire appartenant à la BFC. En outre, lesdites cartes proviennent de diverses sources d'information, notamment des archives départementales, des archives communales, des bibliothèques municipales, des départements d'urbanisme, de l'IGN et de Gallica (catalogue d'informations numériques de la Bibliothèque nationale de France). Au même temps, il faut souligner que les cartes collectées appartiennent à des périodes historiques variées, allant de l'Époque Gallo-Romaine au XXe Siècle (voir tableau présenté ci-dessous) (Adouane, S. et Rincón, C., 2019).

Tableau 3. Quantité de cartes récupérées, selon période (siècle/année) et zone de couverture
Source : Adouane, S. et Rincón, C., 2019.

Siècle	Zone de couverture											Total
	Nationale	Région		Départements								
	France	Bourgogne	Franche-Comté	Côte d'Or	Doubs	Haute-Saône	Jura	Nièvre	Saône et Loire	Territoire de Belfort	Yonne	
IIIème											1	1
XIIème			1									1
XIIIème							1					1
XIVème			1		1							2
XVème						1						1
XVIème				1	1				2			4
XVIIème			2	1	4	1	4	1				13
XVIIIème			8	5	29	8	4			8	1	63
XIXème	4	1	4	16	14	47	12	30	12	4	4	148
XXème			6	7	13	13	8	1	2	37	3	90
Total	4	1	22	30	62	70	29	32	16	49	9	324

Ainsi, comme le montre le tableau ci-dessus, les trois siècles pour lesquels il existe une plus grande disponibilité de cartes sont le XIXe (148 cartes), le XXe (90 cartes) et le XVIIIe (63 cartes). En plus, nous pouvons entrevoir l'existence d'un plus grand nombre de cartes anciennes appartenant aux départements de la Haute-Saône (70 cartes), du

Doubs (62 cartes) et du Territoire de Belfort (49 cartes) (Adouane, S. et Rincón, C., 2019). Par ailleurs, nous devons mentionner que sur les 324 cartes du catalogue, 122 sont déjà géoréférencées.

Au même temps, nous devons souligner que, pendant le stage, nous avons utilisé une couche vectorielle qui sert de base pour identifier les segments viaires actuels et, ainsi, pouvoir déterminer leur existence ou leur absence dans les cartes anciennes. En ce sens, la couche sélectionnée est celle issue de la BD Topo 2019, faisant partie du *Référentiel Géographique à Grande Échelle (RGE)* développé par l'IGN. Cette couche couvre l'ensemble du territoire continental de la France et a été développée à l'aide de données GPS, de photogrammétrie, d'orthophotographies, de cartes à l'échelle 1 : 25000 et de la BD Carto (IGN, 2019). En outre, il convient de préciser que nous n'avons téléchargé que les données de la BD Topo 2019 correspondant au réseau routier de la région BFC, composé par bretelles, chemins, escaliers, pistes cyclables, round- points, routes empierrées, routes à 1 chaussée, routes à 2 chaussées, sentiers et autoroutes (IGN, 2019).

3.3 MÉTHODOLOGIE

Nous devons tout d'abord mentionner que les activités qui seront décrites dans ce chapitre ont été développées par une équipe de travail composée par Mme Claire LAGESSE (responsable scientifique du projet COVADEO), Hanae EL GOUJ (doctorante du Laboratoire THÉMA) et moi-même. Ainsi, la méthodologie que nous avons utilisée a consisté à 4 étapes :

3.3.1 Organisation et géoréférencement des cartes anciennes

Cette étape a consisté à organiser les 324 cartes anciennes qui ont été décrites précédemment et qui ont été récupérées à travers les **déplacements sur le terrain**, effectués afin de consulter les différentes agences et archives de la région BFC. Comme montré antérieurement, ces cartes ont été stockées sur un fichier *Excel* constituant un **catalogue** qui contient plusieurs informations sur les contenus physiques, les éléments cartographiques de base, etc. Subséquemment, ces cartes ont été **géoréférencées** en utilisant le logiciel *ArcGIS*. Cette procédure consiste à identifier un point spécifique sur l'image contenant la carte à traiter et chercher, sur une base cartographique préalablement téléchargée, la localisation réelle de ce point. Ce travail est effectué plusieurs fois afin de garantir que l'image soit géoréférencée d'une manière plus exacte (voir l'image de l'Annexe 7). Le résultat de cette procédure, correspond à l'image originale de la carte, en format *.tif*.

3.3.2 Structure de données et vectorisation

Le **catalogue** de cartes anciennes précédemment mentionné, constitue la base pour établir une structure de données qui permettra la mise en place de la base de données géo-historique. En ce sens, cette structure a été créée en tenant compte des notions sur structures de données développées par des chercheurs tels que Claire Lagesse (voir l'Annexe 8). Ainsi, nous avons utilisé les étapes suivantes :

- (I) **Étape 1 : identification du problème de base.** Cette phase consiste à rédiger le problème à résoudre, en identifiant les éléments les plus importants qui seront la base de la structure de données.
- (II) **Étape 2 : Création du schéma simplifié.** Ce schéma simplifié contient les éléments de base qui ont été identifiés à travers la problématisation précédemment rédigée. Ces éléments deviendront les classes à considérer pour la consolidation de la structure de données.
- (III) **Étape 3 : conformation du diagramme.** À partir du schéma simplifié, nous procédons à déterminer les attributs de chacune des classes, les liens existants entre les classes, les cardinalités, les clés primaires et les clés étrangères.
- (IV) **Étape 4 : création du Modèle Physique de Données.** Celui-ci nous permet d'insérer la base de données géo-historique dans un SGBD.

3.3.3 Insertion de la base de données géo-historique dans un système de gestion de bases de données- SGBD

L'insertion de la base de données géo-historique dans un **SGBD**, est effectuée afin de (I) stocker les informations collectées plus efficacement ; (II) mieux comprendre *ce qui existe* et *ce qui a existé* en termes de tronçons routiers régionaux ; et (III) éviter la duplication des données (Perret, Julien, 2016). Ainsi, il faut souligner que lors du stage, nous avons décidé d'utiliser **PostgreSQL**, qui est un **Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles Orientées Objet**⁴ développé par l'Université de Californie à Berkeley (The PostgreSQL Global Development Group, 2020). Cette procédure d'insertion doit être effectuée en utilisant le **langage SQL-Structured Query Language** (en Français : *Langage de Requête Structuré*), qui permet de gérer ce genre de bases de données relationnelles (Grin, Richard, 2008). De cette manière, l'insertion de la base de données dans le SGBD est effectuée grâce à l'utilisation d'une série de requêtes, selon les étapes suivantes :

- a. **Création du schéma** : le schéma contient la totalité de tables correspondantes aux classes qui ont été définies dans le **Modèle Physique de Données**. Ceci, en utilisant les requêtes « drop schema » et « create schema » :

```
DROP SCHEMA nom du schéma CASCADE;  
CREATE SCHEMA nom du schéma;
```

- b. **Création des tables** : ces tables contiennent les attributs de chaque classe. Ainsi, pour créer les différentes tables, nous utilisons la requête « create table » :

```
create table nom du schéma . nom de la table (  
  ID integer not null primary key,  
  Attribut 1 type de donnée,  
  Attribut 2 type de donnée  
);
```

- c. **Ajout des contraintes des clés étrangères** : ces clés étrangères permettent de relier les classes entre elles, en tenant compte des cardinalités définies dans le **Modèle Physique de Données** préalablement créé. Ceci, en utilisant les requêtes « alter table » et « add » :

```
alter table nom du schéma . nom de la table add foreign key (id_nom de la table) references  
nom du schéma . nom de la table (id) ;
```

- d. **Ajout des données aux tables** : dans cette étape, nous cherchons à utiliser la requête « insert into » afin d'insérer les données dans les tables de classe précédemment créées :

```
insert into nom du schéma . nom de la table (attribut 1, attribut 2...) values ('données de  
l'attribut 1', 'données de l'attribut 2...');
```

- e. **Ajout des données géométriques** : s'il existe des attributs géométriques, il est nécessaire de connecter PostgreSQL avec le logiciel *QGIS*, en usant l'outil de *création d'une nouvelle connexion PostGIS*. Par la suite, on utilise l'outil *DB Manager*, afin de sélectionner le schéma sur lequel nous allons travailler. Sur cet outil, nous choisissons l'onglet *d'importation de couche*, dans le but de déterminer la géométrie qui sera importée dans le SGBD. Ensuite, nous exportons la couche du territoire d'analyse en tant qu'*input* et nous sélectionnons aussi le schéma et la table dans laquelle on souhaite insérer les données géométriques, en plus d'activer les options « clé primaire » et « Colonne géométrique ». Le résultat de cette procédure nous permet de visualiser la géométrie de la zone d'étude dans PostgreSQL.

⁴ Nous devons noter que dans les SGBD relationnels, les données sont représentées dans des tables qui peuvent être liées entre elles. De plus, le fait que ce type de SGBD relationnel ait une approche orientée vers l'objet signifie qu'il représente des concepts ou des entités qui existent dans le monde « réel » (Guibert, Loïc, 2020).

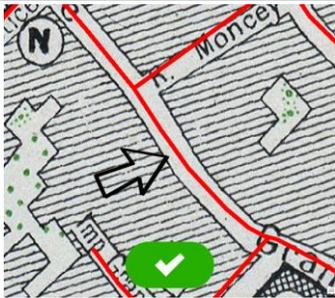
3.3.4 Vectorisation des réseaux viaires

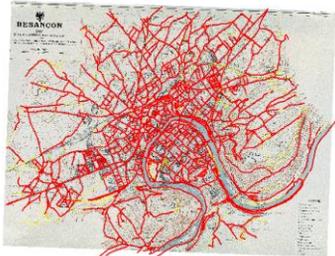
Comme présenté dans le cadre conceptuel de ce document, la **vectorisation** est une procédure à travers laquelle il est possible d'extraire l'information spatiale présente sur une ressource cartographique, afin de recueillir la géométrie en format vectoriel (Dharmaraj, Girija, 2005 et Souris, Marc, 2002). Ainsi, à travers la vectorisation des cartes anciennes, le projet COVADEO vise à extraire les géométries correspondantes aux tronçons viaires de la région, dans le but d'identifier les voies qui ont été préservées, modifiées ou ont disparues sur le temps long. Cette procédure peut aider aussi à déterminer le période d'apparition des tronçons les plus récents, à partir de la comparaison cartographique entre une version plus ancienne et une version plus récente de la même zone géographique.

Par ailleurs, nous devons noter que la vectorisation des réseaux routiers des 324 anciennes cartes se fera à travers la création d'un jeu sérieux (en anglais, *serious game*) favorisant la production collaborative ou *crowdsourcing* de données. Ce jeu est actuellement développé par différents professionnels liés au projet, de telle sorte qu'une de mes fonctions principales tout au long du stage a été de participer à la consolidation d'un test de vectorisation à l'échelle du Laboratoire ThéMA. Ce test nous permettra d'identifier les points forts et les points à corriger afin de créer et de consolider le jeu de vectorisation. Par conséquent, le présent document se limitera à montrer les notions de base, ainsi que la logique du jeu de vectorisation. Ceci, fondé sur l'utilisation de cartes pilotes qui appartiennent aux arrondissements de Besançon et Dijon. En ce sens, pour le développement de l'analyse nous utiliserons les trois étapes détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4. Étapes de vectorisation

Source : élaboration propre à partir du travail de Lagesse, C., El Gouj, C. et Rincón, C., 2020.

Étapes	Description	Méthode	Exemple
1. Visualisation	Superposition de la base vectorielle du réseau viaire actuel sur la carte ancienne précédemment géoréférencée.	Cette superposition se fera automatiquement via l'interface de jeu, sans nécessiter l'intervention des participants.	
2. Vectorisation	Identification des segments viaires historiques appartenant à chacune des cartes.	<p>Approbation de la présence du segment viaire : le jeu montrera un segment viaire au participant. Il sera chargé de dire si le segment qui est affiché est présent ou absent sur la carte ancienne (ce point est l'axe central du jeu, dans lequel il y aura une plus grande participation des joueurs).</p>	
		<p>Interprétation de la précision : le joueur déterminera si le segment est couvert exactement sur la carte, si la géométrie est décalée, ou s'il y a des modifications.</p>	

Étapes	Description	Méthode	Exemple
		<p>Correction : à travers le jeu, les segments qui ne sont pas précis seront modifiés ou redessinés.</p>	
<p>3. Validation</p>	<p>Validation de la géométrie de chaque segment à travers un consensus entre tous les joueurs.</p>	<p>Un même segment sera présenté aux différents joueurs. Ceux-ci seront chargés de parvenir à un consensus permettant d'établir si un segment viaire a une géométrie correcte (C'est-à-dire, lorsqu'on arrive à un certain nombre de joueurs ayant un consensus sur un segment donné, celui-ci sera validé par le jeu).</p>	

3.4 RÉSULTATS

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de l'implémentation de la méthodologie détaillée dans la partie 3.3 de ce document :

3.4.1 Choix et préparation des cartes anciennes

Nous avons choisi 8 cartes « pilotes » appartenant aux arrondissements de Besançon et Dijon, afin de présenter l'analyse menée au cours de ce stage. Ces 8 cartes ont été sélectionnées car elles contiennent des informations sur les réseaux viaires des zones urbaines et serviront de point de référence pour exposer et expliquer l'étendue des travaux réalisés. Comme observé dans le tableau présenté ci-dessous, ces cartes appartiennent à une période qui va de 1786 à 1944.

Tableau 5. Information du catalogue pour les 8 cartes « pilote » sélectionnées

Source : Aduane, S. et Rincón, C., 2019.

ID_Carte	Zone_associee	Nom_fichier	Nom_carte	Année	Siècle	Zone_couverture	Niveau	Periode_creation_carte	Date_début_création	Date_publication	Date_acquisition	Références	Format	Support	Sujet_de_la_carte	Contenu								Description matérielle					Echelles_Geographiques	Etat_conservation	
																Zones_naturelles	Zones_agricoles	Routes	Chemins_de_fer	Reseau_hydrrique	Points_interet	Limites_administratives	Zones_urbaines	Titre	Legende	Orientation	Echelle	Source			
2116	Côte d'Or	Dijon_1836_1844	Plan de la ville de Dijon	1844	XIX	Dijon	Communal	XIXème-Siècle de l'Industrialisation	1836	1844	11/25/2019	Lacordaire, ingénieur civil et architecte	Photos de visiteur	Disponible aux Archives Départementales de la Côte d'Or	Carte topographique	✓	X	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	Échelle de 500 mètres	Plutôt bon
2124	Côte d'Or	1790_Dijon	Nouveau Plan de la Ville et des Environs de Dijon Dédié A Son Altesse Sérénissime Monseigneur le Duc / Par Son très humble et très Obéissant Serviteur de Beaurain	1790	XVII	Dijon	Communal	XVIIIème (siècle des Lumières)	-	1790	21/10/2019	Jean de Beaurain, géographe	JPG	Disponible aux archives de Gallica	Plan topographique	X	X	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Illisible	Plutôt bon	
2126	Côte d'Or	1883_Dijon	Dijon. Plan d'ensemble / Dressé par Len. Bonnamas Secrétaire. Greffier du Conseil de Préfecture de la Côte d'Or	1883	XIX	Dijon	Communal	XIXème-Siècle de l'Industrialisation	-	1883	21/10/2019	Len. Bonnamas Secrétaire. Greffier du Conseil de Préfecture de la Côte d'Or	JPG	Géoréférencé	Plan topographique	X	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	1 : 6000	Plutôt bon	

ID_Carte	Zone_associee	Nom_fichier	Nom_carte	Année	Siècle	Zone_couverture	Niveau	Periode_creation_carte	Date_debut_creation	Date_publication	Date_acquisition	Références	Format	Support	Sujet_de_la_carte	Contenu										Description matérielle					Echelles_Geographiques	Etat_conservation
																Zones_naturelles	Zones_agricoles	Routes	Chemins_de_fer	Reseau_hydrigue	Points_interet	Limites_administratives	Zones_urbaines	Titre	Legende	Orientation	Echelle	Source				
2128	Côte d'Or	1944_Dijon	Groupement d'Urbanisme de Dijon. Plan topographique / dressé par le Cabinet Danger	1944	XX	Dijon	Communal	XXème-Siècle de l'Exploration Spatiale	1944	1944	21/10/2019	Cabinet DANGER	JPG	Géoréférencé	Plan topographique	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1 : 10000	Bon
2506	Doubs	Plan- Siffert - recadré	Besançon	1937	XX	Besançon	Communal	XXème-Siècle de l'Exploration Spatiale	1937	1937	23/9/2019	Plan Siffert (1937)	JPG	Géoréférencé	Description d'un plan	X	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	1 : 8000	Bon
2508	Doubs	Plan de la ville et citadelle 1786 G.H.J. - copie	Plan de la ville et citadelle de Besançon	1786	XVII	Besançon	Communal	XVIIIème (siècle des Lumières)	-	1786	23/9/2019	Illisibles	JPG	Disponible aux Archives départementales du Doubs	Carte descriptive	✓	X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Illisible	Plutôt mauvais
2514	Doubs	10_1848_NouveauPlan de Besac	Nouveau plan de la ville de Besançon	1848	XIX	Besançon	Communal	XIXème-Siècle de l'Industrialisation	-	1848	23/9/2019	Valluet Jeune, éditeur	JPG	Disponible aux archives Mémoire Vive	Carte descriptive	✓	X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	Illisible	Plutôt bon
2518	Doubs	plan delavelle fusionné	Besançon et son territoire	1883	XIX	Besançon et alentours	Communal	XIXème-Siècle de l'Industrialisation	-	1883	23/9/2019	DELAVELLE (Maire), M.L. ROUZET, ingénieur voyer	JPG	Disponible aux archives du Département d'Urbanisme de Besançon	Plan topographique	X	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	1 : 10000	Bon

Ces 8 cartes (voir l'image ci-dessous) ont été soumises au processus de géoréférencement expliqué au chapitre 3.3.1 de ce document, de telle sorte que nous avons déterminé l'emplacement de l'image de la carte dans le monde « réel », en utilisant un système de **projection Lambert-93**.

Image 4. Cartes anciennes sélectionnées

Source : Archive départementale du Doubs, Archive Départementale de la Côte d'Or, Gallica, Mémoire Vive, Département d'Urbanisme de Besançon.



3.4.2 Structure de données

Comme expliqué dans le chapitre 3.3.2 de ce document, la définition de la structure de données pour le stockage des données vectorisées des cartes anciennes est composée des phases présentées ci-dessous. Il faut souligner que nous avons créé cette structure en anglais, en raison de la vocation internationale du projet COVADEO.

- (I) **Identification du problème de base** : à travers la problématisation présentée ci-dessous, nous avons identifié 15 éléments centraux qui seront tenus en compte lors de la phase de définition de la structure de données.

Problématisation : Une **carte** élaborée par un **auteur**, contient des informations sur les réseaux viaires de la région Bourgogne- Franche-Comté. Cette carte a été stockée par le biais d'un **fichier** au format spécifique. Ce fichier provient d'une **source** appartenant à une commune, un département, une région et/ou un pays. La carte susmentionnée a un **niveau de détail** caractéristique et appartient à une certaine **période** historique et à une **zone de couverture** spécifique. À son tour, cette zone est encadrée dans l'une des 24 **zones d'étude** précédemment définies, correspondant aux 24 arrondissements qui composent les 8 départements de la région susmentionnée.

Au même temps, ladite zone de couverture appartient à une **commune** qui, à son tour, fait partie de l'un des **départements** qui composent les **régions** du **pays**. Il convient de noter que cette carte comporte des **éléments** tels qu'un titre, une légende, une flèche d'orientation, une échelle et une source. Elle a également un **contenu**, relative à l'existence de zones urbaines, zones agricoles, réseaux hydriques et limites administratives, ainsi qu'aux réseaux routiers constitués d'une série de **segments** qui se sont développés au fil du temps.

(II) **Création du schéma simplifié :** dans la figure du côté, nous pouvons observer les éléments de base existants dans le catalogue et qui ont été identifiés à travers la problématisation présentée précédemment

Image 5. Schéma simplifié
Source : Lagesse, C ; El Gouj, H ; et Rincón, C., 2020.

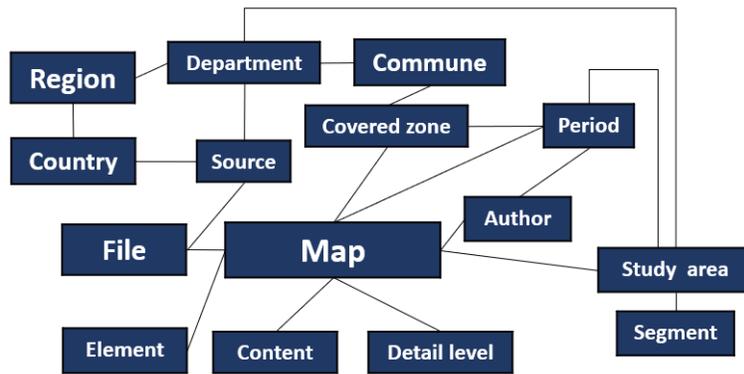
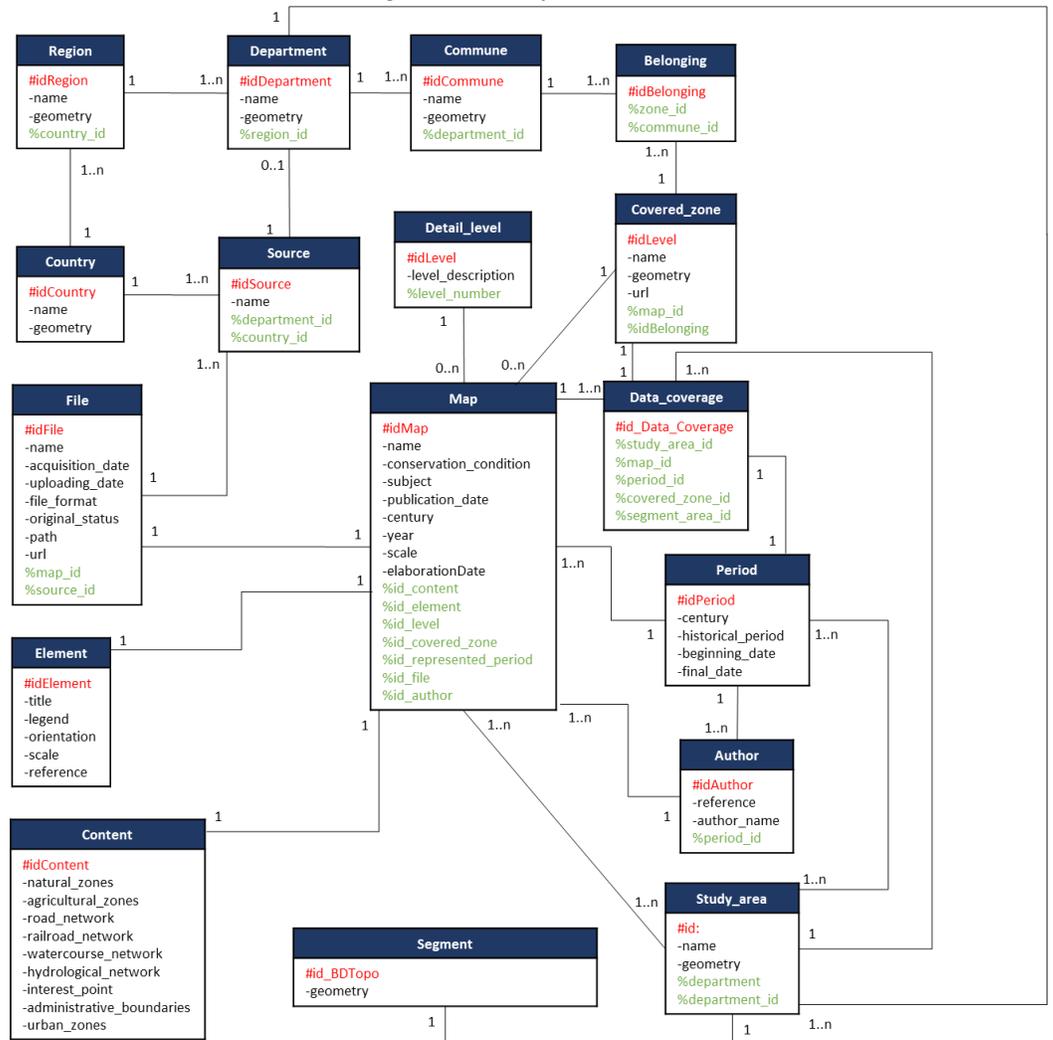


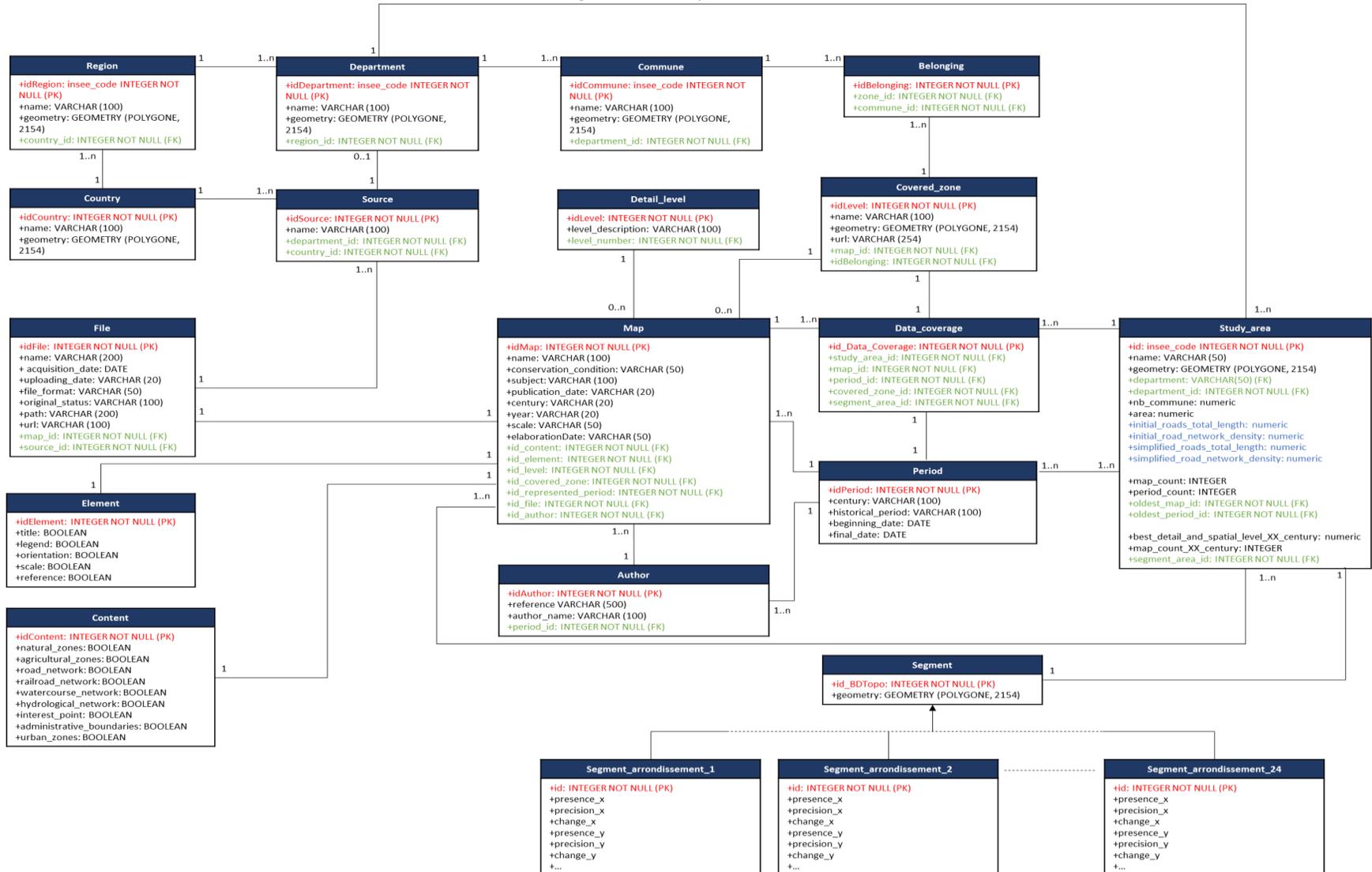
Image 6. Diagramme
Source : Lagesse, C ; El Gouj, H ; et Rincón, C., 2020.

(III) **Conformation du diagramme :** dans l'image du côté, nous pouvons observer les attributs des classes, ainsi que les liens, cardinalités, clés primaires et clés étrangères



(II) **Création du Modèle Physique de Données :** ce MPD contient les types de données et constituera le socle qui permettra d'insérer la base de données géo-historique dans le SGBD PostgreSQL (voir la figure présentée ci-dessous).

Image 7. Modèle Physique de Données
 Source : Lagesse, C. El-Gouj, H. et Rincón, C., 2020.



3.4.3 Implémentation de la base de données géo-historiques

À partir des notions mentionnées dans le chapitre 3.3.3 de ce document, nous avons suivi une série de procédures permettant d'implémenter la base de données géo-historique dans PostgreSQL. Ceci, en considérant le Modèle Physique de Données précédemment explicité.

- a. **Création du schéma** : le schéma s'appelle « `historical_maps_bfc` » et se compose de chacune des tables qui ont été créées lors de la consolidation de la structure de données décrite précédemment. Ceci, en utilisant les requêtes suivantes :

```
DROP SCHEMA historical_maps_bfc CASCADE;  
CREATE SCHEMA historical_maps_bfc
```

- b. **Création des tables** : ces tables contiennent les attributs de chaque classe (par exemple, dans le cas de la classe « `map` » présentée ci-dessous, les attributs sont : nom, état de conservation, sujet, date de publication, siècle, année, échelle et date d'élaboration). Ainsi, pour créer les différentes tables, nous avons utilisé la requête *create table*⁵ :

```
create table historical_maps_bfc.map (  
  ID integer not null primary key,  
  name varchar (100),  
  conservation_Condition varchar (50),  
  subject varchar (50),  
  publicationDate varchar (20),  
  century varchar (20),  
  year varchar (20),  
  scale varchar (50),  
  elaborationDate varchar (50)  
);
```

- c. **Ajout des contraintes des clés étrangères** : ces clés étrangères permettent de relier les classes entre elles, en tenant compte des cardinalités définies dans le **Modèle Physique de Données** (voir l'étape de définition de la structure de données de ce document). Ceci, en utilisant la requête *alter table*, comme indiqué dans l'exemple suivant, dans lequel l'ID de la table « `Content` » est ajouté en tant que clé étrangère à la table « `Map` » :

```
alter table historical_maps_bfc.map add foreign key (id_content) references  
historical_maps_bfc.content (id) ;
```

- d. **Ajout des données aux tables** : dans cette étape, nous cherchons à utiliser la requête *insert into* afin d'insérer les données du catalogue de 324 cartes dans les tables de classe précédemment créées. Dans le cas de l'exemple suivant, nous pouvons observer la requête pour remplir les informations de la carte 'Besançon et son territoire' :

```
insert into historical_maps_bfc.map (name, conservation_condition, subject, publication_date,  
century, year, scale, elaboration_date) values ('Besançon et son territoire', 'Good', 'Topographic  
map', '1883', 'XIX', '1883', '1 : 10000', 'Undetermined') ;
```

- e. **Ajout des données géométriques** : pour ajouter les données géométriques des tables *country*, *region*, *department*, *commune*, *covered zone* et *study area*, nous avons utilisé les procédures de la partie 3.3.3 (section « e. Ajout des données géométriques ») de ce document. Par exemple, dans l'image de l'Annexe 9 nous pouvons observer l'importation des données géométriques pour la commune de Besançon. Cette procédure permet donc d'insérer dans PostgreSQL les données géométriques de cette commune (voir l'image de l'Annexe 10). Cette procédure sera également appliquée aux géométries correspondantes aux données vectorielles obtenues grâce au *jeu sérieux*/ processus de *crowdsourcing* susmentionnés. De cette façon, nous

⁵ Pour les attributs « `publicationDate` » et « `elaborationDate` » nous avons utilisé le type **varchar** au lieu du type **date**, parce que dans la plupart des cas, les informations ne sont disponibles que pour l'année mais pas pour le mois et le jour au cours desquels les cartes ont été élaborées et/ou publiées. Notez cette même précision dans d'autres exemples de ce document.

pourrons insérer les données géométriques dans la classe « segment » (voir le **Modèle Physique de Données**) et, ainsi, compléter la base de données géo-historiques.

3.4.4 Vectorisation

Afin de vectoriser les 8 cartes anciennes déjà géoréférencées⁶, nous avons commencé par créer une couche de type polygone qui aura le nom de la carte à traiter. Cette couche est créée en utilisant l'outil « *create new shapefile* » et en considérant l'importance d'ajouter quatre points correspondants aux quatre coins de la carte ancienne. Subséquemment, à travers l'outil « *select by location* » nous avons fait une sélection des tronçons viaires qui sont à l'intérieur ou qui touchent la carte ancienne (voir l'image de l'Annexe 11). Cette option a été privilégiée, parce qu'elle ne modifie pas les géométries originales de la BD Topo, tandis qu'une autre option comme par exemple, faire un *clip* entre le réseau viaire et le polygone représentant la zone de couverture de la carte traitée, a des problèmes liés au fait que le clip va nécessairement couper les routes qui sont en partie en dehors du polygone créé, et cela peut créer un inconvénient au moment de faire la comparaison avec les autres cartes vectorisées.

À partir de cette sélection, nous avons créé une nouvelle couche, sur laquelle nous pouvons identifier les segments viaires de la BD Topo 2019 qui existent dans la carte ancienne traitée. Cette procédure nous a mené à faire une comparaison permanente entre la carte ancienne (soit, la couche rasterisée) et le réseau viaire (soit, la couche vectorisée). À la fin de cette sélection, nous l'avons enregistrée comme nouvelle couche. Cependant, sur les cartes anciennes il y a presque toujours des routes qui ne sont pas présentes sur la BD Topo 2019, soit parce qu'elles ont disparues ou parce qu'elles sont modifiées, soit parce que la BD Topo n'a pas identifié ce segment. Ainsi, pour dessiner ces segments sur la couche vectorielle, nous avons créé une nouvelle couche de type polyligne qui a été enregistré avec le même système de coordonnées des tronçons routiers de la BD Topo (soit, RGF 1993 Lambert-93) (voir l'image de l'Annexe 12).

Ensuite, nous avons ouvert une session d'édition permettant de dessiner les segments manquants et qui resteront enregistrés sur la couche préalablement créée. Cette procédure a été effectuée en considérant la carte ancienne et les segments de la BD Topo identifiés antérieurement (c'est-à-dire, les segments qui sont communs à la BD Topo 2019 et à la carte ancienne). Ainsi, ces deux procédures nous ont permis de créer deux couches : l'une, contenant les segments de la BD Topo 2019 qui ont été identifiés sur la carte ancienne traitée, et l'autre, contenant les segments qui sont absents sur la BD Topo et qui ont été donc dessinés. Ces deux couches ont été fusionnées à travers l'outil « *merge* » (voir l'image de l'Annexe 13). Le résultat de ce procès est une nouvelle couche qui contient le réseau viaire correspondant à la carte ancienne traitée. Sur cette couche finale, nous avons créé une nouvelle colonne nommée « présence », sur laquelle nous avons donné un code « 1 » pour les segments existants sur la BD Topo 2019 et « 0 » pour les segments absents.

3.4.4.1 Résultats de la vectorisation

La vectorisation des 8 cartes nous a permis d'identifier qu'il y a généralement un plus grand accord entre les segments viaires situés dans les zones urbaines existantes sur les cartes et les tronçons viaires de la BD Topo 2019. Cette caractéristique est particulièrement visible dans les centres historiques, ce qui permet de déduire que, au moins depuis la fin du XVIII^e siècle, ces zones de Besançon et de Dijon ont eu très peu d'interventions urbaines. En revanche, nous observons des différences plus importantes entre les réseaux viaires appartenant aux zones rurales des cartes et les segments routiers de la BD Topo 2019. Cela est dû en partie au fait que la plupart de ces zones rurales ont été urbanisées au fil du temps. Cependant, le fait qu'aucune similitude ne soit identifiée entre les réseaux viaires rurales

⁶ Nous devons préciser que dans le projet COVADEO, la vectorisation des cartes de la BFC se fera à travers le jeu sérieux. En conséquence, ce traitement de vectorisation donné aux 8 cartes sélectionnées pour ce document a été effectué afin d'évaluer les potentiels existants en termes d'analyse de réseaux anciens dans la région.

des différentes cartes suggère que durant les XVIIIe, XIXe et XXe siècles, il peut y avoir eu des changements constants en termes d'usage des sols agricoles et forestières.

Compte tenu de cette introduction générale, nous présenterons ci-dessous les résultats concrets de vectorisation pour les deux cas d'étude :

3.4.4.1.1 Besançon

Dans la première carte traitée, nous avons comparé le réseau viaire de 1786 avec celui de 2019. Ainsi, nous observons qu'il y a une très faible coïncidence en termes de voies rurales dans les deux périodes. En revanche, en ce qui concerne le Centre Historique et le quartier Battant, nous avons trouvé un grand nombre de voies appartenant à la BD Topo 2019 et qui peuvent être observées dans la carte de 1786. C'est-à-dire, à la fin du XVIIIe siècle ces zones de la ville avaient déjà une morphologie assez similaire à celle qui y existe actuellement.

Image 8. Réseau vectorisé de la carte « Plan de la ville et citadelle de Besançon » (1786)

Source : élaboration propre à partir des données de l'AD du Doubs et de la BD Topo 2019.



En outre, nous commençons à observer une plus grande coïncidence entre les segments viaires de la carte de 1848 et ceux de la BD Topo 2019, en ce qui concerne les voies rurales qui sont proches à la zone urbaine. Cependant, nous devons souligner que la zone urbaine de la ville ne semble pas avoir beaucoup augmenté entre 1786 et 1848.

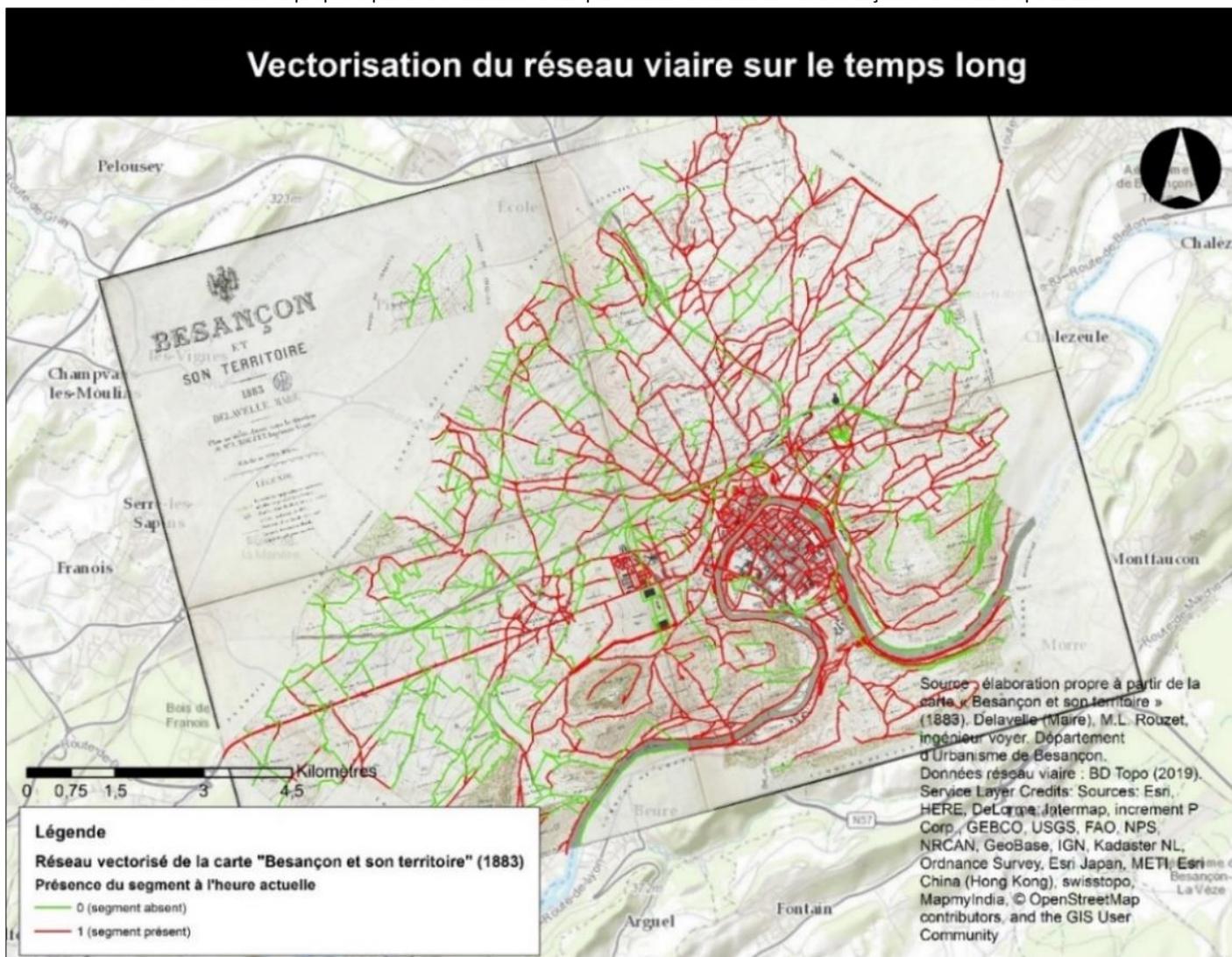
Image 9. Réseau vectorisé de la carte « Nouveau plan de la ville de Besançon » (1848)
 Source : élaboration propre à partir des données Mémoire Vive et de la BD Topo 2019.



Par ailleurs, vers 1883 nous commençons à voir une zone urbaine développée au-delà du centre historique. Également, nous observons une plus grande coïncidence entre les voies rurales et les segments actuels de la BD Topo.

Image 10. Réseau vectorisé de la carte « Besançon et son territoire » (1883)

Source : élaboration propre à partir des données du Département d'Urbanisme de Besançon et de la BD Topo 2019.



Dans la carte de 1937 présentée ci-dessous, nous commençons à identifier une plus grande consolidation de la zone urbaine, de telle sorte qu'il y a très peu de différences entre les segments viaires de la carte susmentionnée et ceux de la BD Topo 2019. Nous observons notamment que les routes secondaires et locales des quartiers tels que La Butte et Les Chaprais, étaient déjà beaucoup plus consolidées en 1937 par rapport à 1883.

Image 11. Réseau vectorisé de la carte « Besançon (Plan Siffert) » (1937)

Source : élaboration propre à partir des données du Département d'Urbanisme de Besançon et de la BD Topo 2019.

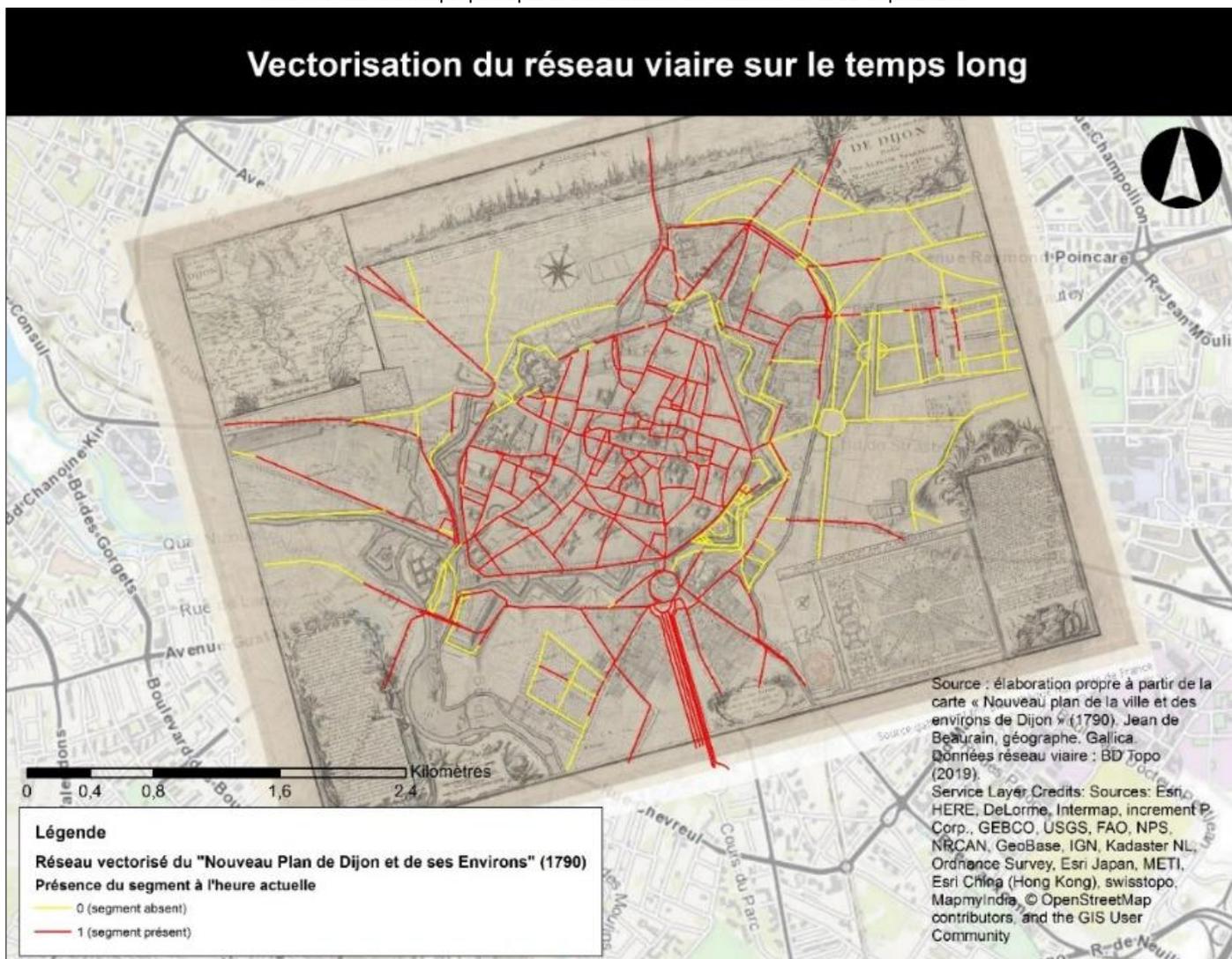


3.4.4.1.2 Dijon

En ce qui concerne la capitale de la Côte-d'Or, dans la carte de 1790 présentée ci-dessous, nous pouvons identifier une grande coïncidence entre les voies urbaines de la carte et les segments actuels de la BD Topo 2019. Par ailleurs, comme pour Besançon en 1786, nous observons qu'à Dijon il y a très peu de coïncidences entre les voies rurales de 1790 et celles de la base vectorielle moderne.

Image 12. Réseau vectorisé de la carte « Nouveau Plan de la ville et des environs de Dijon » (1790)

Source : élaboration propre à partir des données de Gallica et de la BD Topo 2019.



Dans la carte ci-dessous, nous observons qu'il existe encore de nombreuses différences autour des voies rurales historiques par rapport aux segments viaires de la BD Topo 2019. Par ailleurs, à partir de la comparaison entre les cartes de 1790 et 1844, nous notons que durant cette période, il y a eu très peu de phénomènes d'étalement urbain.

Image 13. Réseau vectorisé de la carte « Plan de la ville de Dijon » (1844)

Source : élaboration propre à partir des données de l'AD de la Côte-d'Or et de la BD Topo 2019.



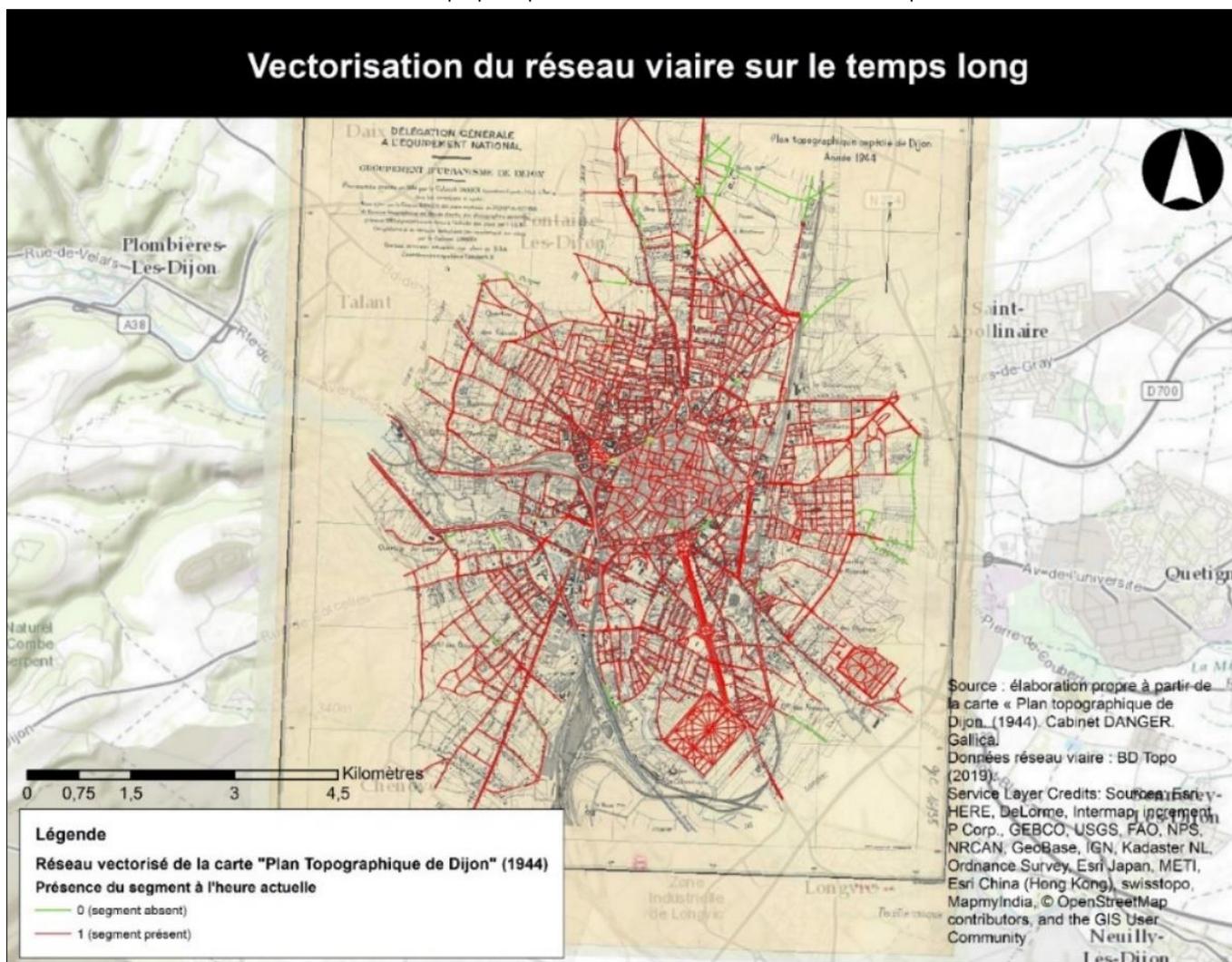
En 1883 nous commençons à percevoir le développement urbain de nombreuses zones qui étaient rurales sur les cartes précédentes (notamment, quartiers comme Les Perrières, Montchapet et Motmuzard). De même, nous devons noter la grande similitude entre les voies de ladite carte et les segments de la BD Topo 2019, ce qui nous permet de penser que cette ville avait déjà une grande vitalité à la fin du XIXe siècle.

Image 14. Réseau vectorisé de la carte « Dijon, plan d'ensemble » (1883)
Source : élaboration propre à partir des données de Gallica et de la BD Topo 2019.



Enfin, comme le montre la carte suivante, en 1944, Dijon avait déjà un développement viaire urbain qui se reflète dans le fait qu'il n'y a presque aucune différence entre les segments viaires de ladite carte et les voies appartenant à la BD Topo 2019 moderne.

Image 15. Réseau vectorisé de la carte « Plan topographique de Dijon » (1944)
 Source : élaboration propre à partir des données de Gallica et de la BD Topo 2019.



4 DISCUSSION

Ensuite, nous discuterons les principaux résultats de la vectorisation des 8 cartes anciennes précédemment détaillées, ainsi que le potentiel des processus de numérisation des données en termes d'aménagement du territoire. Cette discussion prendra comme base les notions de morphologie urbaine, d'aménagement du territoire et d'étalement urbain décrites au chapitre 2.3.4 du présent document. Ainsi, en premier lieu, nous analyserons l'évolution du territoire à l'aide d'indicateurs calculés sur son réseau viarie ; et, en deuxième lieu, nous réfléchirons sur le potentiel des bases de données géo-historiques et de la vectorisation de cartes anciennes pour identifier les phénomènes historiques d'étalement urbain. Enfin, nous discuterons les aspects les plus remarquables obtenus à partir des deux sujets d'analyse sélectionnés (indicateurs sur les réseaux viaires et identification des phénomènes d'étalement urbain).

4.1 ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DU TERRITOIRE À L'AIDE D'INDICATEURS CALCULÉS SUR SON RÉSEAU VIAIRE

Pour analyser l'évolution historique des réseaux viaires de Besançon et Dijon, nous avons utilisé une série d'indicateurs qui, comme détaillé dans l'Annexe 14 du présent document, sont basés sur la **Théorie des Graphes**. En ce sens, nous devons noter que des chercheurs tels que Claire Lagesse se sont intéressés à l'étude des réseaux viaires, en considérant ces réseaux comme des graphes sur lesquels il est possible de calculer des **indicateurs**, afin de caractériser et d'analyser les territoires (Lagesse, Claire, 2015). Ainsi, nous pouvons souligner qu'il existe deux grandes catégories d'indicateurs, qui correspondent aux **indicateurs locaux** (calculés en tenant compte de la géométrie et de la typologie de la voie et de son entourage direct) et **globaux** (calculés pour chaque voie dans l'ensemble du réseau) (Lagesse, Claire et al, 2016). À partir de ces notions et des éléments décrits dans l'Annexe 14, dans ce sous-chapitre nous réfléchirons sur l'évolution des réseaux viaires de Besançon et Dijon entre 1786 et 2019.

4.1.1 Besançon

4.1.1.1 Indicateurs locaux

4.1.1.1.1 Degré

Selon Lagesse et al., cet indicateur permet d'observer le degré des éléments d'un réseau, afin de définir son importance dans la connectivité de celui-ci (Lagesse, Claire et al, 2016). Ainsi, sur les cartes de l'Annexe 15, nous pouvons voir que les voies de la Boucle qui vont du Pont Battant vers la Citadelle (direction nord-ouest – sud-est), ont un indicateur de degré plus élevé. Cette caractéristique est courante dans les quatre années étudiées (1786, 1848, 1883 et 1937) et nous permet d'entrevoir l'importance que la Citadelle a eu dans le développement urbain de la ville à travers l'histoire. Ceci, en raison du fait que les voies susmentionnées ont une plus grande longueur et permettent de se déplacer à travers la Boucle, ce qui contraste avec le fait que les voies qui vont du Pont de la République vers le Fort de Chaudanne (direction nord-est – sud-ouest) ont un degré inférieur.

Nous constatons aussi que les voies parallèles au Doubs ont un degré élevé, ce qui montre l'importance qu'elles ont eue en termes de connectivité, sur le temps long. Par contre, dans le quartier Battant nous observons qu'il y a des voies qui n'existent plus à l'heure actuelle, mais qui avaient un indicateur de degré élevé, ce qui indique que les connectivités dans ce secteur ont changé tout au long des années. Enfin, nous devons souligner le haut degré que présente la Rue de Dole, ce qui nous permet de remarquer l'importance que cette route a eu pour la ville en termes de connectivité du réseau viaire, notamment, à partir l'année 1883 et jusqu'à l'heure actuelle.

4.1.1.1.2 Degré de desserte

Le degré de desserte d'une voie, se réfère au nombre de voies qu'elle n'intersecte pas à une extrémité, ce qui nous permet d'identifier le degré d'accessibilité des voies qui composent un réseau viaire (Lagesse, Claire, 2015). Ainsi, comme le montrent les cartes de l'Annexe 16, les voies du centre historique de Besançon qui vont du Pont Battant vers la Citadelle (direction nord-ouest – sud-est), avaient un plus grand degré de desserte dans les années 1786 et 1848, mais elles ont perdu cette importance en 1937. Cette situation se produit également dans les voies qui ont un indicateur élevé de degré (telles que la Rue de Dole) et s'explique par le fait que ce sont des voies sur lesquelles d'autres voies de second ordre tendent à converger. Par ailleurs, en comparant le degré et le degré de desserte, nous pouvons conclure qu'à Besançon, les voies qui ont un rôle plus important en termes de connectivité (c'est-à-dire qui permettent d'aller d'un endroit à un autre plus rapidement) sont la Rue de Dole, la Rue de Belfort et, dans le cas du centre historique, la rue Mégevand et les voies parallèles du Doubs (telles que l'Avenue Arthur Gaulard).

4.1.1.1.3 Espacement

L'indicateur d'espacement nous permet d'identifier les voies qui ont plus ou moins de connectivité. En d'autres termes, cet indicateur montre l'espace moyen entre deux intersections sur un même élément (Lagesse, Claire, 2015). En ce sens, les cartes de l'Annexe 17 montrent que dans les années 1786, 1848, 1883 et 1937, les voies rurales de Besançon ont tendance à avoir un espacement plus élevé par rapport aux voies urbaines. Par exemple, sur la carte de 1786, nous constatons que les voies des deux zones urbaines existantes à cette date (La Boucle et le quartier du Battant) ont un degré d'espacement plus faible. Cette même situation est observée dans les cartes les plus récentes, dans lesquelles nous identifions que, lorsque la zone s'éloigne du centre historique, elle a un degré d'espacement plus élevé. Cela s'explique par le fait que dans les zones à faible développement urbain, il y a généralement moins de voies, ce qui nous permet d'entrevoir le rôle que cet indicateur pourrait avoir en termes de contribution à l'identification de zones plus ou moins urbanisées.

4.1.1.1.4 Orthogonalité

Cet indicateur concerne la géométrie des intersections entre les voies, de sorte que lorsque l'indicateur est plus proche de 1, la connexion est plus perpendiculaire. Cet indicateur permet d'identifier les grands axes viaires de circulation rapide, dont l'indice d'orthogonalité sera plus proche de 0, tandis que les segments viaires locaux auront une orthogonalité plus proche de 1 (Lagesse, Claire, 2015). En ce sens, comme nous l'observons dans les cartes de l'Annexe 18, les voies qui peuvent être observées dans les cartes mais pas dans la BD Topo 2019 (c'est-à-dire les voies qui n'existent pas actuellement), ont tendance à avoir un indicateur proche de 1. Cet indicateur nous permet d'entrevoir que ces voies disparues avaient une vocation plutôt locale, ce qui peut être l'une des raisons pouvant expliquer leur disparition au cours du temps. Comme le montrent les quatre cartes de l'Annexe 18, les voies ayant un indice d'orthogonalité proche de 1 sont réparties dans toute la ville, sans observer une zone avec une prévalence plus élevée de ce type de voie.

4.1.1.2 Indicateurs globaux

4.1.1.2.1 Centralité de proximité

L'indicateur de centralité de proximité nous permet d'identifier la proximité entre une voie donnée et son réseau. Autrement dit, plus l'indicateur de proximité d'une voie est élevé, plus elle permettra l'accès au reste du réseau (Lagesse, Claire, 2015). En ce sens, sur les cartes de l'Annexe 19, nous observons qu'en 1786, les voies de la Boucle avaient un indicateur de proximité plus important. Cette situation s'est modifiée au fil du temps, de telle sorte que dans les années 1883 et 1937, les voies ayant l'indicateur de proximité le plus élevé se situaient à l'extérieur de La Boucle, notamment dans les quartiers de La Butte, le Battant et Les Chaprais. Au contraire, dans les cartes susmentionnées, nous pouvons voir que les voies situées dans des zones de faible densité linéaire ont tendance à avoir moins de proximité, en raison du peu de connexions qu'elles ont avec le reste du réseau. De même, nous observons que les voies de connexion régionale tels que la Rue de Dole et la Rue de Belfort perdent leur niveau de proximité lorsqu'elles s'éloignent des zones urbaines (où il existe une densité linéaire plus élevée).

4.1.1.2.2 Centralité d'intermédiarité

La centralité d'intermédiaire représente la somme des chemins les plus courts, entre chaque couple de sommets du graphe (Lagesse, Claire, 2015). En ce sens, comme nous pouvons le voir sur les cartes de l'Annexe 20, à Besançon, les principales voies urbaines (telles que la Rue de Dole et la Rue de Belfort), ont tendance à avoir des indicateurs intermédiaires élevés, ce qui est logique, surtout si nous considérons qu'il s'agit de voies à connectivité élevée qui permettent un déplacement plus efficace au sein du réseau. Cette situation n'a pas évolué au fil des années, ce qui nous permet de penser que, malgré l'étalement urbain, les zones les plus actives de la ville, en termes de connectivité, continuent de se situer autour de La Boucle, de la Rue de Dole et de la Rue de Belfort.

4.1.2 Dijon

4.1.2.1 Indicateurs locaux

4.1.2.1.1 Degré

Comme le montrent les cartes de l'Annexe 21, les voies du centre historique de Dijon avaient un indicateur de degré élevé dans les années 1790 et 1844. Ce degré élevé a diminué dans cette zone pour les années 1883 et 1944, dates auxquelles les voies des zones nord et sud-ouest de la ville ont commencé à avoir un degré plus élevé. Une telle situation pourrait indiquer que le centre historique de la ville a perdu son importance en termes de connectivité, alors que Dijon se développait. Parmi les voies qui actuellement ont un degré plus élevé et, par conséquent, une plus grande connectivité, nous pouvons distinguer l'Avenue Victor Hugo / boulevard de Troyes, qui relie Dijon à des villes telles que Troyes. Nous devons aussi mettre en évidence le fait que la Cours Générale de Gaulle a un indicateur de degré faible, bien qu'elle soit une voie à plusieurs chaussées. Parallèlement à cette voie nous observons la Rue de Longvic, qui a moins de chaussées, mais qui a un haut indicateur de degré, ce qui nous permet de constater l'importance que cette rue a pour la ville en termes de connectivité (cette voie permet notamment de relier Dijon à des villes telles que Lons-le-Saunier).

4.1.2.1.2 Degré de desserte

A partir des cartes présentées dans l'Annexe 22 de ce document, nous observons une tendance similaire à celle existant dans l'indicateur de degré précédemment détaillé. Cette tendance tient au fait que les voies du centre historique de Dijon avaient un haut degré de desserte en 1790 et 1844, mais elles ont perdu cette caractéristique en 1883 et 1944. Cette situation nous permet de penser que, en termes de développement urbain, cette zone de la ville a perdu son importance au cours des années, au même temps que d'autres zones de la ville commençaient à se développer. Ainsi, en faisant une comparaison entre l'indicateur de degré précédemment détaillé et l'indicateur de degré de desserte, nous pouvons conclure que les voies les plus importantes en termes de connectivité pour le réseau viaire de Dijon sont l'avenue Victor Hugo / Boulevard de Troyes, la Rue de Longvic et l'Avenue du Drapeau / Avenue de Langres.

4.1.2.1.3 Espacement

Comme nous pouvons le corroborer dans les cartes de l'Annexe 23, à Dijon, les voies rurales et / ou les voies les plus éloignées du centre historique ont tendance à avoir un espacement plus élevé. Cette caractéristique est commune dans les quatre cartes des années 1790, 1844, 1883 et 1944, ce qui nous permet d'entrevoir comment au fil des années une expansion urbaine a été générée à partir dudit centre historique. Nous devons aussi noter qu'en 1844, l'espacement était plus considérable dans les voies de la partie nord de Dijon, alors qu'il y avait une densité linéaire plus élevée au sud de la ville. Par ailleurs, pour l'année 1944 nous observons que les voies de la partie ouest de la ville ont un espacement plus faible, indiquant un développement urbain plus consolidé sur l'axe est de Dijon durant les premières décennies du XXe siècle.

4.1.2.1.4 Orthogonalité

Dans les cartes de l'Annexe 24, nous pouvons percevoir qu'à Dijon, les voies dont l'indicateur d'orthogonalité est plus proche de 1 correspondent généralement aux segments viaires qui peuvent être identifiés sur les cartes, mais pas dans la BD Topo 2019 (c'est-à-dire les voies qui n'existent pas à l'heure actuelle). Cette caractéristique est particulièrement notable dans les cartes des années 1790, 1844 et 1883. Cependant, nous devons souligner que sur la carte de 1944, il y a un grand nombre de voies qui existent dans la BD Topo 2019 et dont l'indicateur est proche de 1. Ces voies sont localisées notamment dans les zones de développement urbain les plus récentes, ce qui nous permet de penser que ce sont des zones à forte vocation locale et éloignées des grands axes de circulation rapide de la ville.

4.1.2.2 Indicateurs globaux

4.1.2.2.1 Centralité de proximité

Comme nous pouvons le voir sur les cartes de l'Annexe 25, les voies du centre historique de Dijon ont maintenu une centralité de proximité élevée au cours des quatre années étudiées (1790, 1844, 1883 et 1944). Cela peut s'expliquer par le fait que ladite ville a connu un étalement urbain dans les quatre directions, grâce au fait qu'il n'existe pas d'éléments hydrographiques ou orographiques pouvant constituer une barrière naturelle empêchant l'artificialisation du territoire. En ce sens, nous pouvons voir que lorsque nous nous éloignons du centre historique (qui est également le centre géographique de la ville), il y a plus des voies ayant un indicateur de proximité faible. Celles-ci sont situées principalement au sud et au sud-est de Dijon, ce qui correspond aux quartiers Bourroches, Parc-Chevreur et Fontaine d'Ouche.

4.1.2.2.2 Centralité d'intermédiation

Dans les cartes de l'Annexe 26, nous pouvons identifier que les voies ayant un indicateur d'intermédiaire élevé ont aussi une haute connectivité (voir les indicateurs du degré et du degré de desserte présentés ci-dessus). Cette caractéristique a été maintenue au fil des siècles, notamment, dans des voies telles que la Rue de Longvic et la Rue Chabot Charny (qui sont deux des voies qui permettent de relier plus efficacement les différents arcs qui composent le réseau viaire de Dijon). Nous devons aussi mettre en évidence que, sur les cartes de 1883 et 1944, les zones ayant une forte densité linéaire ont tendance à avoir de faibles indicateurs d'intermédiation. Cela renforce l'idée exprimée précédemment que ces voies sont situées dans des zones à forte vocation locale et qu'elles sont éloignées des autoroutes les plus importantes de la ville.

4.2 IDENTIFICATION DE DYNAMIQUES D'ÉTALEMENT URBAIN À PARTIR DE BASES DE DONNÉES GÉO-HISTORIQUES PERMETTANT LA VECTORISATION DE RÉSEAUX VIAIRES SUR LE TEMPS LONG

Comme nous l'avons vu dans la section 2.4 de ce document, des chercheurs tels que Benoît Costes et Yikang Rui considèrent que les réseaux viaires sont les squelettes des villes, nous permettant d'identifier les changements morphologiques et les transformations des relations entre les formes spatiales et les pratiques sociales au fil du temps (Rui, Y., 2013 et Costes, B., 2017). De même, nous avons cité le travail de Shlomo Angel, qui a numérisé et étudié les réseaux viaires des cartes anciennes appartenant à 30 villes du monde, afin d'identifier les tendances historiques d'étalement urbain (Angel, Shlomo, 2012). Nous avons détaillé aussi les recherches de Paolo Masucci et al., qui ont analysé les dynamiques d'étalement urbain de la ville de Londres, à travers l'étude de l'évolution de son réseau viaire entre 1786 et 2010 (Masucci AP et autres, 2013).

Ainsi, nous nous sommes intéressés à offrir une perspective sur le développement de méthodologies permettant de mesurer l'étalement urbain dans les périodes antérieures au 20e siècle et / ou dans des années où il n'y a pas de disponibilité d'images aériennes ou satellites permettant de suivre les changements morphologiques dans une ville donnée. Ceci, en utilisant des données viaires produites à travers la vectorisation de cartes anciennes et leur stockage dans des bases de données géo-historiques. Cette étude, comme nous l'avons observé dans les différents auteurs cités, peut être réalisée en superposant un réseau viaire ancien à un réseau viaire plus récent. En ce sens, pour effectuer cette analyse, nous utiliserons les réseaux viaires vectorisés correspondant aux 8 cartes historiques de Besançon et Dijon que nous avons analysées dans ce document. Ces réseaux viaires seront comparés au réseau routier actuel, qui correspond aux données vectorielles fournies par la BD Topo 2019. De même, les données viaires seront contrastées avec les chiffres historiques de croissance démographique, afin de permettre une meilleure compréhension des dynamiques d'expansion de Besançon et Dijon au fil du temps.

De cette manière, nous cherchons, à partir de cette analyse, à discuter sur l'importance de la vectorisation des réseaux viaires comme méthode pour répondre à des questions telles que :

- (I) Dans quelle direction s'est-elle agrandie ? ;
- (II) Quels sont les quartiers ou secteurs urbains les plus anciens d'une ville donnée ? ;
- (III) Quels sont les zones dans lesquels il y a eu plus ou moins d'intervention urbaine et / ou de transformations morphologiques ? ;
- (IV) Où et en quelles années y a-t-il eu des pressions urbanistiques dans la ville donnée (par exemple, à cause d'une forte demande de sols à urbaniser, associée à une haute croissance démographique) ? ;
- (V) Quelles sont les tendances d'étalement urbain possibles qu'une certaine ville pourrait avoir dans les années à venir, compte tenu de son évolution historique ?

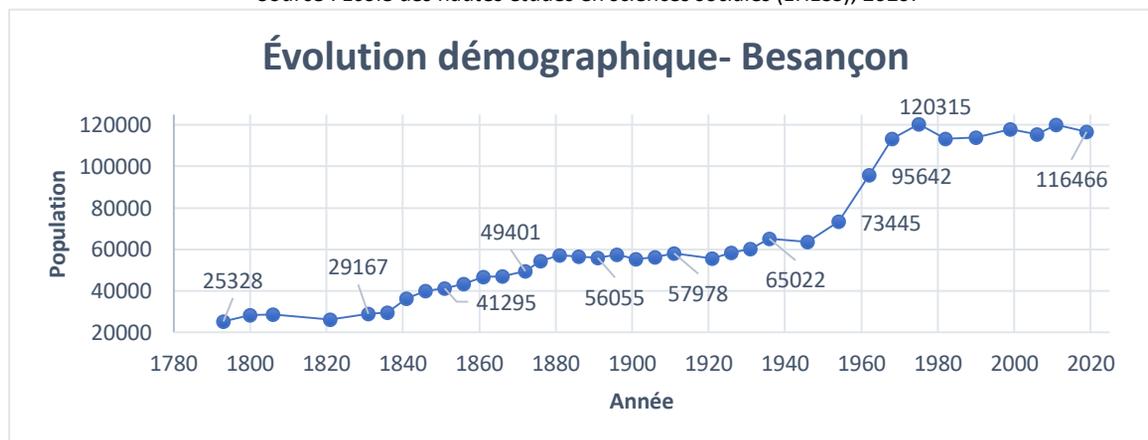
Ensuite, nous présenterons l'analyse spécifique réalisée à Besançon et Dijon :

4.2.1 Tendances historiques d'étalement urbain à Besançon

Comme le montre l'image ci-dessous, Besançon comptait 25 000 habitants à la fin du 18e siècle, et a atteint 50 000 personnes dans les années 1870. Plus tard, au cours des dernières décennies du 19e siècle et des premières décennies du 20e siècle, la ville a maintenu une stabilité démographique, représentée par un chiffre qui n'a dépassé 60 000 habitants que dans les années 1930. De la fin des années 1950 aux années 1970, la ville a connu une forte croissance démographique, qui a connu son pic en 1975, lorsque la ville comptait 120 000 habitants. Depuis cette date, jusqu'aujourd'hui, la ville s'est stabilisée en termes démographiques, avec une population actuelle d'environ 117 000 habitants. En ce sens, nous pouvons souligner que cette ville s'est caractérisée, tout au long de l'histoire, par un faible taux de croissance démographique. Ceci, compte tenu du fait qu'entre 1790 et 1870, Besançon a mis 80 ans à doubler sa population (passant de 25 000 à 50 000 habitants). Par la suite, il a fallu encore 90 ans pour doubler à nouveau (passant de 50 000 habitants dans les années 1870 à 100 000 dans les années 1960) (École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020).

Image 16. Évolution démographique de Besançon

Source : École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020.

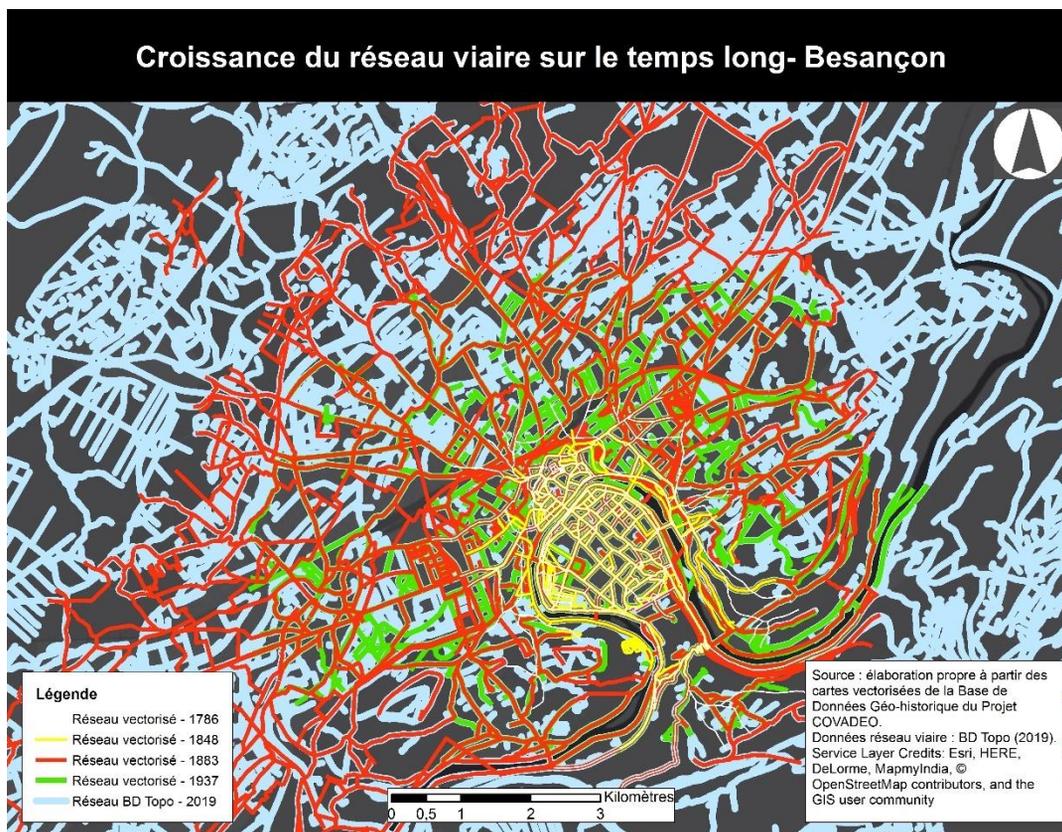


Par ailleurs, sur la carte présentée ci-dessous, nous avons superposé les couches vectorielles de Besançon correspondant aux réseaux viaires des années 1786, 1848, 1883, 1937 et 2019. En ce sens, nous observons qu'entre les années 1780 et 1840 il y a eu une faible croissance de la zone urbaine (routes blanches et jaunes, correspondant aux années 1786 et 1848), ce qui contraste avec le fait que, pendant cette période, la ville est passée de 25 000 habitants à 40 000 personnes (voir le graphique ci-dessus). Cette croissance démographique des premières décennies du XIXe siècle peut cependant se refléter dans le fait que, pour la seconde moitié de ce siècle, à Besançon, une expansion a commencé à se produire dans les quartiers de La Butte et Les Chaprais (avec une densité linéaire plus élevée des voies rouges correspondantes à l'année 1883). Par la suite, nous avons identifié qu'en 1937 il y a eu un développement des zones qui, en 1883, avaient une faible densité linéaire (cela se voit, en particulier, dans des quartiers tels que Les Chaprais, Les Clairs-Soleils, Montrapon et La Butte). Enfin, avec la couche viaire de l'année 2019,

nous constatons que les zones les plus éloignées du centre historique (correspondant à des quartiers comme Les Tilleroyes, Montboucon, Planoise et Velotte) sont d'un développement plus récent (probablement, généré par le boom démographique que la ville a eu dans la seconde moitié du 20e siècle).

Image 17. Réseaux vectorisés superposés- Besançon

Source : élaboration propre à partir des données des cartes anciennes vectorisées et de la BD Topo 2019.



De cette façon, nous allons répondre aux cinq questions posées au début de ce sous-chapitre :

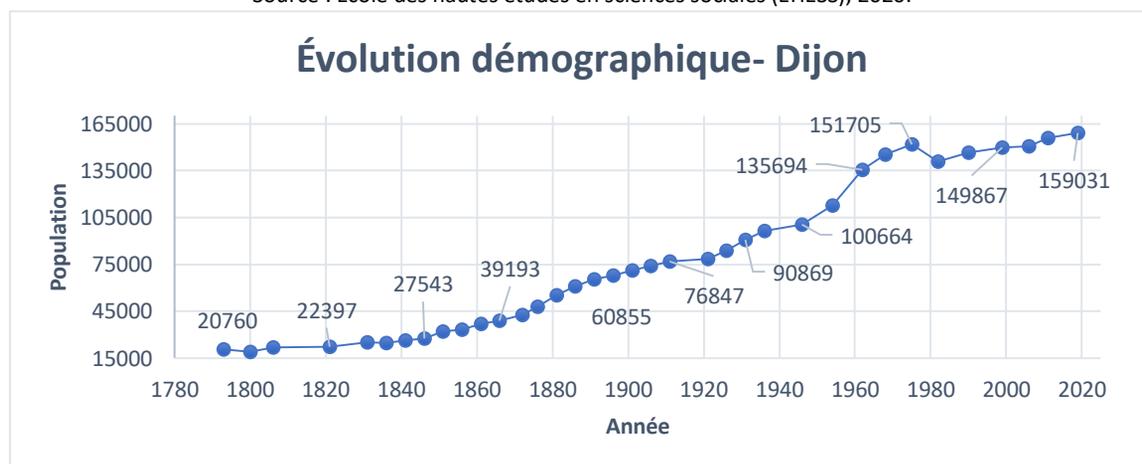
- (I) **Direction de l'étalement urbain** : Besançon s'est développée autour de la zone de la Boucle, et particulièrement, sur les zones sud-ouest et nord-est du centre historique. Cela signifie qu'à l'heure actuelle, la ville a la forme d'une ligne diagonale qui s'étend du nord-est (quartiers de Palente et d'Orchamps) au sud-ouest (quartiers de Planoise et Châteaufarine).
- (II) **Quartiers les plus anciens de la ville** : centre historique et quartiers Battant, Les Chaprais et La Butte.
- (III) **Zones avec plus ou moins de transformations morphologiques** : nous observons que de 1786 à 2019, la zone du centre historique a conservé une morphologie stable, tandis que les autres zones de la ville ont été modifiées au fil du temps (plusieurs d'entre elles sont passés d'un usage rural à un usage urbain).
- (IV) **Où et en quelles années y a-t-il eu des pressions urbanistiques** : à partir de la carte et du graphique d'évolution démographique présentés précédemment, nous pouvons en déduire qu'au cours des premières décennies du XIXe siècle, il y a eu une croissance démographique qui a conduit la ville à se développer au-delà du centre historique et du quartier Battant. Cette pression démographique a conduit à l'urbanisation de quartiers comme Les Chaprais et La Butte au cours de ces années. Par la suite, le boom démographique de la seconde moitié du 20e siècle se reflète dans le fait qu'entre 1937 et 2019, la ville s'est largement développée, s'étendant au-delà du vieux centre historique.
- (V) **Tendances d'étalement urbain possibles, compte tenu du développement urbain historique** : il est probable que la ville continuera de s'étendre vers le nord-est et vers le sud-ouest. Cependant, sur la carte, nous observons qu'il existe une forte densité linéaire dans des zones qui sont éloignées du centre

historique (notamment, près des communes de Pirey et École-Valentin), ce qui semble indiquer l'existence de phénomènes de suburbanisation. Ces phénomènes seraient cohérents avec le fait que, durant les dernières années, la ville a connu une certaine diminution de son nombre d'habitants.

4.2.2 Tendances historiques d'étalement urbain à Dijon

Comme nous pouvons le voir dans l'image ci-dessous, Dijon comptait 20 000 habitants à la fin du XVIIIe siècle et a atteint les 50 000 personnes à la fin des années 1870. Plus tard, la ville a dépassé les 70 000 habitants au début du XXe siècle. Des années 1920 aux années 1970, la ville a connu une forte croissance démographique, passant de 78 000 habitants à plus de 150 000 personnes. Par la suite, à la fin des années 1970, il y a eu une diminution de la population, cependant, du début des années 1980 à nos jours, la ville a connu une nouvelle croissance démographique, d'une telle sorte que, actuellement, la ville a une population de presque 160 000 habitants. En ce sens, nous pouvons souligner que cette ville s'est caractérisée, tout au long de l'histoire, par des taux de croissance démographique élevés qui, actuellement, semblent s'être stabilisés. Ceci, compte tenu du fait qu'entre 1790 et 1870, Dijon a mis 80 ans pour doubler sa population (passant de 20 000 à 40 000 habitants). Par la suite, il a fallu 50 ans pour doubler à nouveau (passant de 40 000 habitants dans les années 1870 à 80 000 dans les années 1920). Enfin, la ville a presque doublé à nouveau en 50 ans (passant de 80 000 habitants dans les années 1920 à 150 000 dans les années 70), mais ce taux s'est stabilisé durant les derniers 50 ans (École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020).

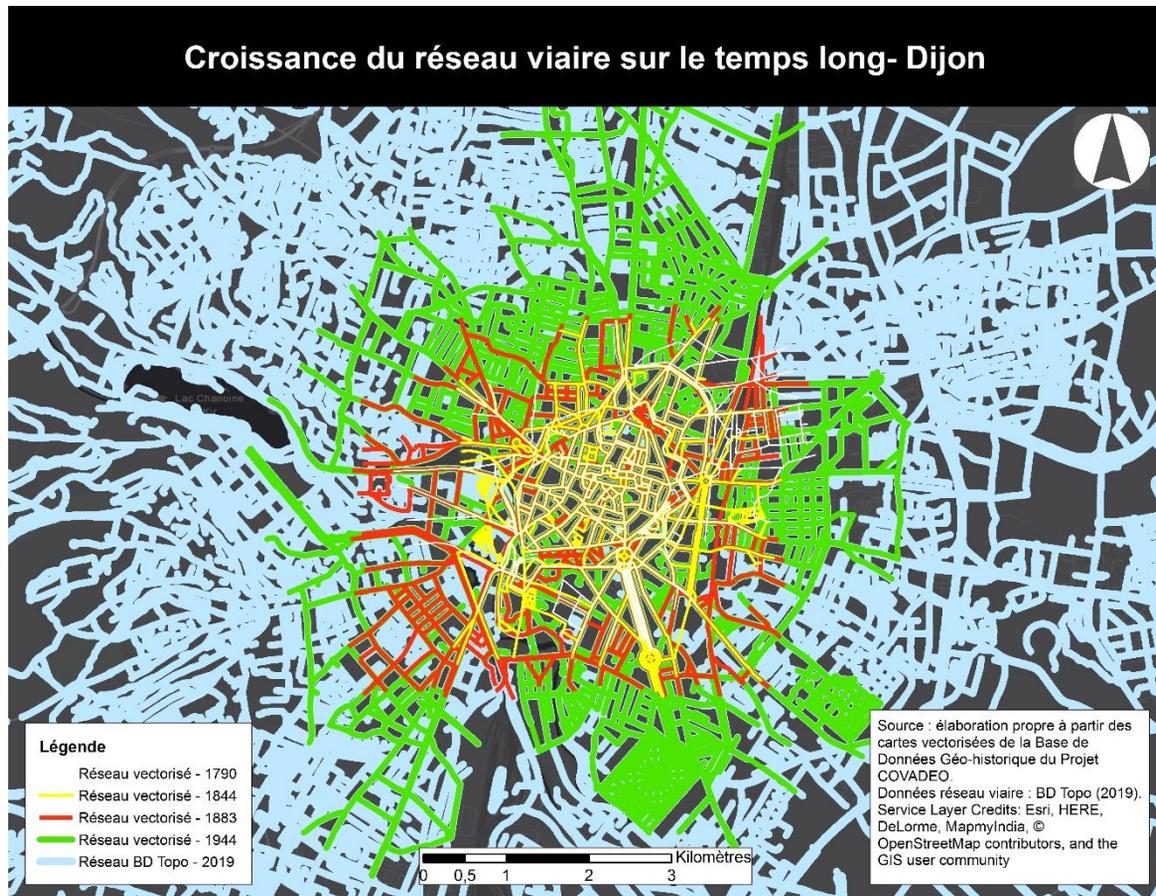
Image 18. Évolution démographique de Dijon
Source : École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020.



Par ailleurs, dans la carte présentée ci-dessous, nous avons superposé les couches vectorielles de Dijon correspondant aux réseaux viaires des années 1790, 1844, 1883, 1944 et 2019. En ce sens, nous observons que Dijon a connu un étalement urbain plus importante durant la seconde moitié du 19e siècle (dans le réseau viaire rouge, correspondant à 1883, nous pouvons voir que la ville a grandi bien au-delà de son ancien centre historique), quelque chose qui coïncide avec le boom démographique qui a eu lieu dans la ville depuis les années 1850 (voir l'image ci-dessus). De plus, l'extension des réseaux viaires en 1944 est congruente avec le fait que Dijon a connu une forte croissance démographique au cours de la première moitié du XXe siècle, passant de 70000 habitants à 100000 habitants lors de cette période (École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020). De même, l'extension des réseaux viaires en 2019, ainsi que leur forte densité linéaire, nous permettent d'établir le fort développement urbain qu'a connu la capitale de la Côte-d'Or au cours des 70 dernières années. Ceci est cohérent avec le fait que dans cette période, la ville a eu une augmentation approximative de 50 000 habitants (École des hautes études en sciences sociales (EHESS), 2020). Durant ces dernières 70 années, l'étalement urbain s'est concentré notamment dans la partie ouest de la ville, qui avait eu un faible taux d'urbanisation dans les premières décennies du XXe siècle (selon les indicateurs précédemment détaillés dans la section 4.1).

Image 19. Réseaux vectorisés superposés- Dijon

Source : élaboration propre à partir des données de Gallica et de la BD Topo 2019.



De cette façon, nous allons répondre aux cinq questions posées au début de ce sous-chapitre :

- (I) **Direction de l'étalement urbain** : Dijon s'est développée autour du centre historique, ce qui s'est traduit par un étalement urbain uniforme dans les quatre directions (nord, sud, est et ouest). Cela signifie que, actuellement, le centre historique est situé au cœur géographique de la ville.
- (II) **Quartiers les plus anciens de la ville** : correspondent au centre historique, ainsi qu'à des quartiers comme Faubourg-Nord et Faubourg-Sud.
- (III) **Zones avec plus ou moins de transformations morphologiques** : nous observons que de 1790 à 2019, la zone ouest du centre historique a conservé une morphologie stable, tandis que les autres zones de la ville ont été modifiées au fil du temps (beaucoup d'entre elles sont passées d'un usage rural à un usage urbain).
- (IV) **Où et en quelles années y a-t-il eu des pressions urbanistiques** : à partir de la carte et de l'image concernant l'évolution démographique présentées précédemment, nous pouvons en déduire qu'au cours des dernières décennies du XIXe siècle, la croissance démographique a conduit la ville à s'étendre au-delà du centre historique. Par la suite, le boom démographique de la seconde moitié du 20e siècle se reflète dans le fait qu'entre 1944 et 2019, la ville s'est largement développée dans les quatre directions.
- (V) **Tendances d'étalement urbain possibles, compte tenu du développement urbain historique** : la ville est susceptible de continuer à se développer dans les quatre directions. Ceci, en tenant compte des tendances historiques et du fait que la ville continue de croître en population, bien qu'à un rythme plus lent par rapport aux premières décennies du XXe siècle. De plus, sur la carte nous observons qu'il y a des zones à forte densité linéaire dans les zones les plus éloignées du centre historique, ce qui semble indiquer que des phénomènes de suburbanisation se produisent, en particulier dans la partie est (près de la commune de Quetigny).

4.2.3 Réflexions sur les dynamiques territoriales des deux cas d'étude et son évolution sur le temps long

À travers les deux analyses réalisées dans les sous-chapitres 4.1 et 4.2 de ce document, nous pouvons souligner que les indicateurs calculés sur le réseau viaire permettent de lire et de comprendre les dynamiques d'occupation et de transformation du territoire. Cette caractéristique est essentielle lors de l'établissement de politiques d'aménagement du territoire qui soient adaptées aux morphologies historiques d'une zone donnée. Par exemple, à travers les deux analyses menées à Besançon et à Dijon, nous avons découvert que des indicateurs tels que l'espacement, la centralité de proximité et la centralité intermédiaire, peuvent aider à identifier quels quartiers sont plus ou moins denses (ceci, à partir de l'idée qu'à moindre densité linéaire, moins d'urbanisation). Ce type d'analyse pourrait être utile, par exemple, au moment d'identifier des phénomènes de suburbanisation pouvant générer des impacts environnementaux sur un territoire donné. De même, des indicateurs tels que l'orthogonalité et l'espacement peuvent nous aider à identifier des zones à faible densité, dont les segments viaires ne permettent pas des déplacements efficaces au sein du réseau. Cela pourrait être utile, par exemple, pour mesurer les impacts de la construction d'une autoroute à côté d'une zone résidentielle à faible densité. En outre, nous devons souligner que des indicateurs tels que le degré et le degré de desserte peuvent nous aider à identifier quelles sont les zones les moins connectées au reste du réseau. Cette analyse pourrait être utile, par exemple, lors de la planification de nouvelles voies permettant de relier les quartiers isolés et / ou ceux ayant plus des problèmes de communication et d'accessibilité au reste de la ville.

Par ailleurs, nous devons aussi souligner que la vectorisation de réseaux viaires temporelles appartenant à une même ville, est une alternative intéressante à travers laquelle il est possible de retracer les dynamiques d'étalement urbain sur le temps long. Ceci, compte tenu du fait que la vectorisation de cartes anciennes à partir de la même base vectorielle (par exemple, de la BD Topo 2019), nous permet d'identifier quels segments viaires actuels peuvent être observés sur les cartes historiques. Ainsi, grâce à l'utilisation des identifiants d'un segment viaire, nous pouvons suivre ce segment sur différentes cartes appartenant à des époques différentes. Comme nous l'avons vu dans la section 3.4.3 de ce document, lors du projet COVADEO nous avons considéré ces identifiants des segments viaires, comme la clé primaire de la table « segment », qui fait partie du Modèle de Données Physiques qui nous a permis d'insérer les données des cartes anciennes dans le SGBD PostgreSQL.

Nous devons noter aussi que l'analyse de réseaux viaires temporelles est utile pour les périodes où il n'y a pas d'autre type d'information permettant d'identifier les morphologies du territoire (par exemple, à des époques où il n'y avait pas d'outils de photographie aérienne ou satellite). Ainsi, l'analyse de réseaux viaires temporelles peut nous aider à étudier l'étalement urbain d'un territoire donné, par exemple, au moment de : (I) identifier les quartiers ou les zones urbaines les plus anciennement développés ; (II) déterminer quelles zones rurales et quelles zones d'importance écologique ont le plus souffert à cause des phénomènes d'étalement urbain et à quelle période de l'histoire ; (III) établir quelles sont les zones urbaines qui ont fait plus l'objet d'interventions urbanistiques à travers l'histoire. Ceci, à partir de l'identification de changements importants dans la morphologie du réseau viaire de ces zones ; et (IV) préciser quelles ont été les circonstances historiques qui expliquent la morphologie actuelle d'une zone urbaine spécifique.

De même, la vectorisation des réseaux viaires temporelles et leur insertion dans des bases de données géo-historiques, est utile en termes d'aménagement du territoire. Ceci, compte tenu du fait que ces procédures nous permettent de :

- a) Comprendre le cadre historique et morphologique autour duquel s'est déroulé le développement urbain d'un territoire.
- b) Établir quelles ont été les relations historiques entre les environnements bâtis et les environnements naturels (par exemple, en termes de comment et quand les espaces ruraux ou les zones d'importance

environnementale ont été artificialisés). Ce type d'analyse revêt une importance particulière en termes d'aménagement du territoire, surtout si nous considérons que l'étude des relations entre les milieux bâtis et les milieux naturels constitue l'un des piliers fondamentaux de l'aménagement du territoire (voir l'Annexe 2) (Enemark, Stig, 2007).

- c) Utiliser des indicateurs calculés sur les réseaux viaires numérisés à travers la vectorisation des cartes anciennes. Ces processus nous permettent d'identifier les tendances de croissance physique d'une ville, afin de les contraster avec les taux historiques de croissance démographique. Ce type d'analyse peut nous amener à reconnaître l'existence de phénomènes d'étalement urbain impliquant la nécessité de développer des politiques d'aménagement du territoire. Ceci, afin de contrôler l'utilisation indiscriminée des sols et des ressources naturelles, ainsi que de prévenir les phénomènes de suburbanisation qui génèrent des impacts environnementaux et sociaux sur le territoire.

Dans le cas spécifique de Besançon et de Dijon, l'analyse d'indicateurs calculés sur leurs réseaux viaires historiques, ainsi que l'étude des tendances d'étalement urbain sur le temps long, nous ont permis de mieux comprendre les dynamiques territoriales des deux villes : d'une part, à Besançon, nous avons identifié que la Citadelle a eu une importance dans le développement urbain historique de la ville. De même, nous avons établi que le centre historique a subi peu de transformations urbaines au cours des 200 dernières années et continue d'être une zone de grande vitalité et importance en termes de connectivité et de densité linéaire. Et ce malgré l'étalement urbain qu'a connue la capitale du Doubs, notamment dans les zones sud-ouest et nord-est de la ville. D'un autre côté, nous avons vu que, contrairement à Besançon, à Dijon, le centre historique a perdu une certaine importance en termes de connectivité au sein du réseau, à mesure que d'autres quartiers de la ville se sont développés. Ainsi, à Dijon, nous observons que l'étalement urbain s'est produit dans les quatre directions cardinales, sans que de grandes différences de densité linéaire ne soient observées entre l'une ou l'autre zone de la ville.

Par ailleurs, à Besançon et à Dijon nous avons pu identifier un étalement urbain particulièrement forte à partir des années 1930 jusqu'aujourd'hui, ce qui implique que pendant une grande partie des XXe et XXIe siècles, de grandes surfaces rurales ont été artificialisées. De même, nous devons constater que dans les deux cartes présentées précédemment, il existe des zones qui ne font pas partie de la zone urbaine consolidée (c'est-à-dire de la ville elle-même), mais qui ont une densité linéaire particulièrement élevée dans le réseau viaire de 2019. Cette caractéristique semble indiquer que tant à Besançon qu'à Dijon, des phénomènes de suburbanisation se sont produits (et continuent de se produire) au cours du temps. Ces phénomènes ont exercé une pression sur des zones d'importance écologique, telles que le Doubs et la Forêt de Chailluz (à Besançon), et le Val- Suzon et la Vallée de la Combe à la Serpent (à Dijon). Ces dynamiques d'étalement urbain et de suburbanisation obligent les deux villes à promouvoir l'aménagement du territoire et la consolidation de politiques territoriales permettant la protection et la conservation des écosystèmes.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Étudier, expliquer et analyser le passé, ainsi qu'identifier les facteurs qui ont conduit ce passé à devenir le présent, est une stratégie qui, comme l'affirme Eric Hobsbawm (1998), nous permet de comprendre le présent et d'anticiper l'avenir. En ce sens, l'examen des facteurs historiques qui ont conduit le monde à avoir l'aspect qui le caractérise actuellement, constitue une voie par laquelle il nous est possible d'établir l'origine des difficultés qui affligent les sociétés d'aujourd'hui, ainsi que de trouver des réponses aux ces problèmes. Quels facteurs géographiques et environnementaux ont conduit un groupe social à s'installer sur un certain territoire et non sur un autre ? Quels ont été les impacts territoriaux produits par les dynamiques d'échange culturel et socio-économique entre deux villes ? Quelles implications la construction d'une autoroute a-t-elle eu sur l'étalement urbain historique d'un certain territoire ? Quelle influence un certain événement historique a-t-il eu sur la morphologie actuelle d'un territoire ? La réponse à ces types de questions ne peut être donnée que par une compréhension du passé, c'est pourquoi nous pouvons affirmer que l'étude de l'histoire constitue aujourd'hui plus que jamais une stratégie décisive pour formuler

des politiques d'aménagement du territoire qui soient vraiment adaptées aux facteurs historiques qui ont façonné les territoires que nous habitons.

Par ailleurs, à travers ce document, nous avons pu découvrir que les réseaux viaires nous permettent d'analyser et de comprendre la manière dont une société donnée a occupé un territoire à travers l'histoire. De plus, nous avons identifié que les réseaux viaires permettent d'identifier les relations socio-économiques et les interactions entre les sociétés humaines et leurs environnements naturels. Ces caractéristiques ont conduit des auteurs tels que Benoît Costes (2017) et Yikang Rui (2013), à affirmer que les réseaux viaires sont les squelettes qui structurent et façonnent les territoires. De cette manière, nous pouvons affirmer que les cartes historiques dans lesquelles il est possible de lire les réseaux viaires, jouent un rôle prépondérant dans l'identification des dynamiques, morphologies et transformations qui se sont produites dans un territoire au fil du temps. Pour cette raison, il est important de numériser et de préserver les cartes et les ressources cartographiques anciennes, afin de préserver une mémoire historique qui rende compte de la manière dont, à travers l'histoire, les sociétés humaines ont occupé les territoires, ainsi que de la façon dont ces sociétés ont compris le monde.

Cependant, l'étude du passé ne doit pas se limiter à des tâches de conservation et de numérisation de documents anciens. Il est nécessaire de valoriser ces documents, afin d'extraire et d'analyser les informations qu'ils contiennent. Ainsi, dans le cas des cartes anciennes, nous devons souligner l'importance des processus de vectorisation permettant de numériser les réseaux viaires d'un territoire donné, afin de comprendre leur évolution à travers l'histoire. Cette vectorisation, comme nous l'avons vu tout au long de ce document, doit être soutenue par l'utilisation de bases de données géo-historiques permettant de stocker, d'organiser et de consulter des données viaires temporels. En ce sens, les bases de données géo-historiques constituent une référence à travers laquelle il nous est possible d'identifier chaque segment appartenant à un réseau viaire, afin d'établir le moment où ce segment est apparu, disparu et / ou transformé. Dans une perspective globale, les bases de données géo-historiques sont un outil grâce auquel il nous est possible d'étudier et d'analyser les morphologies qui ont caractérisé un territoire au cours des siècles, ainsi que les dynamiques d'occupation, de consommation et d'artificialisation de sols.

Pour ces raisons, dans le projet COVADEO, nous nous sommes intéressés à comprendre la structuration progressive de la trame territoriale de la région BFC, à travers l'analyse de l'évolution de son réseau viaire. En ce sens, nous avons découvert que la vectorisation de cartes anciennes n'est pas une tâche facile, en raison de difficultés telles que le manque de numérisation des ressources cartographiques. Par conséquent, dans le cadre de ce projet, nous avons cherché à promouvoir des méthodologies de production collaborative de données viaires. Ceci, en consolidant un jeu sérieux de vectorisation collaborative nous permettant d'obtenir les géométries des réseaux viaires des cartes anciennes que nous avons collectées durant le projet. Ainsi, à partir de ces données vectorielles, nous cherchons à analyser et à comprendre la structuration progressive de la région, ainsi que les facteurs historiques qui ont conduit à la BFC à avoir la morphologie actuelle qui le caractérise.

De même, nous devons souligner que, dans ce document, nous avons analysé 8 des cartes collectées dans le cadre du projet COVADEO. Ceci, afin de comprendre les méthodologies et les potentiels dérivés de la vectorisation de cartes anciennes de la région BFC. Comme nous l'avons vu tout au long de ce document, ces tâches ont impliqué : (I) la collecte et l'organisation des cartes anciennes et des informations qu'elles contiennent ; (II) la création d'une structure de données nous permettant d'organiser la base de données géo-historiques ; (III) la mise en place des informations cartographiques dans un SGBD, grâce à la création d'un Modèle de Données Physiques fondé sur la structure de données précédemment créée ; et (IV) la vectorisation, dans laquelle nous avons procédé à l'identification et à la numérisation de chacun des tronçons viaires appartenant au réseau routier des 8 cartes sélectionnées. En ce sens, nous avons choisi deux des villes les plus représentatives de la région, Besançon et Dijon, afin de présenter et d'expliquer l'ampleur des travaux menés, au niveau régional, pendant la période de stage.

De cette façon, l'analyse effectuée dans les deux villes étudiées nous a permis de tirer une série de conclusions :

- a) Les bases de données géo-historiques permettent un traitement plus adéquat de grandes quantités d'informations géographiques. En effet, nous avons découvert que les cartes anciennes disposent d'une grande quantité d'informations liées aux segments viaires. Comme l'affirment des auteurs tels que Benoît Costes (2017) et Georges Gardarin (2003), ces informations ne peuvent être traitées efficacement qu'en utilisant un SGBD permettant le stockage, la modification et la recherche de grandes quantités d'information.
- b) L'analyse des réseaux viaires vectorisés nous permet de lire et de comprendre les dynamiques d'occupation et de transformation d'un territoire dans le temps. Ceci, en utilisant des indicateurs de calcul, tels que le degré, le degré de desserte, l'espacement, l'orthogonalité, la centralité de l'intermédiation et la centralité de la proximité.
- c) La vectorisation des réseaux viaires de cartes anciennes et leur insertion dans des bases de données géo-historiques, est une procédure ayant un potentiel en termes d'analyse et de compréhension des morphologies et des dynamiques territoriales existants à une époque antérieure au XXe siècle et / ou aux années où elle n'existait pas d'outil satellitaires ou aériens permettant de comprendre la trame territoriale d'un lieu spécifique. Ce type d'analyse peut être optimisé grâce à l'utilisation de données démographiques et statistiques.
- d) Dans le cas de Besançon et de Dijon, la vectorisation des réseaux viaires historiques et leur insertion dans des bases de données spatio-temporelles nous a permis d'identifier les tendances d'occupation et transformation du territoire, ainsi que l'évolution des caractéristiques de ces réseaux viaires, en termes d'accessibilité, de proximité et d'espacement.
- e) La réalisation d'analyses fondées sur la vectorisation de réseaux viaires historiques, nous permet d'identifier quelles sont les zones urbaines les plus anciennes ; quelles zones rurales ont subi plus d'impacts à cause de l'artificialisation de sols ; quelles zones urbaines ont subi les changements morphologiques les plus importants ; et quels facteurs historiques expliquent la forme actuelle d'une ville spécifique.

En définitive, comme souligné par Benoît Costes (2017), Marc Barthelemy (2016) et Julien Perret (2016), les bases de données géo-historiques sont un outil indispensable au moment de formuler des politiques publiques adaptées aux besoins et contextes de chaque territoire. Autrement dit, ce type d'analyse joue un rôle fondamental en termes d'aménagement du territoire, car il nous permet d'identifier l'impact du développement urbain sur l'environnement naturel. Ainsi, en comprenant les facteurs historiques qui ont généré les morphologies territoriales actuelles, nous pouvons établir plus efficacement l'origine des problèmes environnementaux et socio-spatiaux qui affectent actuellement un territoire donné. Ceci, en considérant qu'il est nécessaire de comprendre que ces problèmes, dans une large mesure, ont été produits par la manière dont nous avons historiquement occupé les territoires que nous habitons.

Cependant, ce document ne vise pas à montrer l'analyse historique comme une formule magique qui résoudra tous les problèmes existants dans les territoires. Son objectif, plus spécifiquement, a été de montrer l'importance de nous tourner vers le passé, l'étudier et le comprendre, afin de *repenser* les villes. Ce genre d'analyse historique peut nous aider à établir des politiques d'aménagement du territoire et d'urbanisme mieux adaptées aux problèmes et défis actuels, en termes de durabilité environnementale, d'adaptation au changement climatique, d'équité sociale, de justice spatiale et de productivité économique.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Adouane, S. et Rincón, C. (2019). Diagnostic des ressources cartographiques sur le temps long, mené à l'échelle de la région de Bourgogne-Franche- Comté. Besançon : Université de Franche- Comté.
- Albizzati, Colin et al. (2017). Caractérisation des espaces consommés par le bâti en France métropolitaine entre 2005 et 2013. Insee Références, 73-85.

- Andrade, D. et autres. (2019). Temporal analysis of urban expansion in the municipality of the Paraíba Paulista Valley. Mercator.
- Angel, Shlomo. (2012). Planet of Cities. New York : Lincoln Institute of Land Policy.
- Atelier parisien d'urbanisme (APUR). (2016). Parcelle cadastrale. Paris : Atelier parisien d'urbanisme (APUR).
- Banque Mondiale. (02 mai 2020). Population urbaine (% du total). Obtenu à partir de [donnees.banquemondiale.org: https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2018&start=1960&view=chart](https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2018&start=1960&view=chart)
- Barthelemy et autres. (2016). GeoHistoricalData. Paris : Journées BiblioPat 2016.
- BCI. (2014). Guide de gestion d'un projet de numérisation. Montréal : Bureau de Coopération Interuniversitaire.
- Bengt, Rystedt. (2014). Cartographie. CFC.
- Bullinaria, John. (2019). Data structures and algorithms. Birmingham : University of Birmingham.
- CEPRI. (2018). Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation. Orléans : Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation.
- Collectivités Locales. (2016). Description du fichier des propriétés non bâties. Paris : Collectivités Locales.
- Costes, Benoît. (2017). Vers la construction d'un référentiel géographique ancien : un modèle de graphe agrégé pour intégrer, qualifier et analyser des réseaux géohistoriques. Paris : Université de Paris-Est.
- Couleau-Dupont, A. (2010) Systèmes d'information de gestion. Paris: Nathan.
- Dharmaraj, Girija. (2005). Algorithms for Automatic Vectorization of Scanned Maps. Calgary : University of Calgary.
- Didier, Michel et Prud'Homme, Rémy. (2005). Infrastructures de transport, mobilité et croissance. Paris : Conseil d'Analyse Économique.
- DRDJSCS Bourgogne- Franche- Comté. (2017). Région de Bourgogne- Franche- Comté. Portrait et chiffres-clés. Dijon : Préfecture de la Région Bourgogne- Franche- Comté.
- Dubois, Catherine. (2009). Le paysage, enjeu et instrument de l'aménagement du territoire. BASE (Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement), 309-316.
- École des hautes études en sciences sociales (EHESS). (2020). Notices communales (Besançon et Dijon). Paris : École des hautes études en sciences sociales (EHESS).
- Enemark, Stig. (2007). Integrated Land-Use Management for Sustainable Development. Aalborg : Aalborg University.
- ESSHC. (15 mai 2020). Preliminary Programme. Obtenu à partir de [https://esshc.socialhistory.org/: https://esshc.socialhistory.org/conference/programme?day=82&time=219&session=4450&room=362](https://esshc.socialhistory.org/https://esshc.socialhistory.org/conference/programme?day=82&time=219&session=4450&room=362)
- Gardarin, Georges. (2003). Bases de données. Paris : Éditions Eyrolles.
- Gervasoni, L. et autres. (2017). Calculating spatial urban sprawl indices using open data. Paris : HAL.
- Gi Ung Jang et al. (2020). Capturing the Signature of Topological Evolution from the Snapshots of Road Networks. Hindawi Complexity.
- Grin, Richard. (2008). Langage SQL. Nice : Université de Nice Sophia-Antipolis.
- Guermond, Y. (2006). Repenser l'urbanisme par le développement durable ? Natures, sciences, sociétés, 80-83.
- Guibert, Loïc. (25 mai 2020). Modélisez et implémentez une base de données relationnelle avec UML. Obtenu à partir d'OpenClassRooms : <https://openclassrooms.com/fr/courses/4055451-modelisez-et-implementez-une-base-de-donnees-relationnelle-avec-uml>
- Hackeloeer, A. et autres. (2014). Georeferencing: a review of methods and applications. Annals of GIS, 61-69.
- Hobsbawm, Eric. (1998). On history. Londres : Abacus.
- IGN. (2019). BD Topo- Descriptif du contenu. Paris : Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).
- INSEE. (26 mai de 2020). Arrondissement. Obtenu à partir de [insee.fr : https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1912](https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1912)
- INSEE. (26 mai 2020). Géographie administrative et d'étude. Obtenu à partir de [l'insee.fr : https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/arrondissement/ARR251-besancon](https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/arrondissement/ARR251-besancon)
- Iosifescu, I. et autres. (2016). Towards a comprehensive methodology for automatic vectorization of raster historical maps. e-Perimtron, 57-76.
- Kamel, Wassim. (2014). Le métier de sous-préfet d'arrondissement au XXIe siècle. Paris : Centre des Hautes Études du Ministère de l'Intérieur.
- Lagesse, C., El Gouj, H. et Rincón, C. (2020). Mise en place d'une base de données géo-historique pour une vectorisation collaborative du réseau viaire de la région Bourgogne- Franche-Comté sur le temps long. Besançon : Laboratoire ThéMA.

- Lagesse, Claire. (2015). Lire les Lignes de la Ville. Paris : Université Paris Diderot-Paris VII.
- Lagesse, Claire. (2018). Bases de données. Besançon : Université de Franche- Comté.
- Lagesse, Claire. (2019). Utilisation de la théorie des graphes pour lire une ville à travers son réseau viaire. Besançon : Université de Bourgogne-Franche-Comté.
- Lagesse, Claire et al. (2016). Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris. Flux, 33-49.
- Levy, Albert. (2015). La forme urbaine comme forme complexe. Une introduction à la morphologie urbaine. En S. Franceschelli, M. Gribaudi, & H. et Le Bras, Morphogenèse et dynamiques urbaines (págs. 20-35). Lyon : PUCA.
- Loisier, Anne-Catherine et Petel, Anne-Laurence. (2019). Les enjeux de l'artificialisation des sols : diagnostic. Paris : Comité pour l'économie verte.
- Manjula, K. et autres. (2010). Digitizing the Forest Resource Map Using ArcGIS. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 300-306.
- Masucci AP et autres. (2013). Limited Urban Growth: London's Street Network Dynamics since the 18th Century. PLoS ONE.
- Moine, Alexandre. (2006). Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. L'espace géographique, 115-132.
- Morley, D. et Parker, C. (2015). Understanding computers. Boston: Cengage Learning.
- NYPL Labs. (2020). GeoHistoricalData. Obtenu à partir de geohistoricaldata.herokuapp.com: <http://geohistoricaldata.herokuapp.com/>
- NPL Labs. (2020a). Building Inspector. Obtenu à partir de buildinginspector.nypl.org: <http://buildinginspector.nypl.org/>
- Padmaja, B. (2018). Lecture notes on data structures. Dundigal : Institute of Aeronautical Engineering.
- Patte, Lionel. (2014). Une typologie routière réformée et élargie. Bron : CEREMA.
- Perret, Julien. (2016). Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines. Paris : Université de Paris-Est.
- Raimbault, Juste. (2018). Caractérisation et modélisation de la co-evolution des réseaux de transport et des territoires. Paris : Université Paris 7 Denis Diderot.
- République Française. (1958). Constitution du 4 octobre 1958 instituant la Ve République. Paris : Legifrance.
- Rui, Y. (2013). Urban Growth Modeling Based on Land-use Changes and Road Network Expansion. Stockholm : Royal Institute of Technology.
- Sainteny, Guillaume. (2008). L'étalement urbain. Responsabilité & environnement, 7-18.
- Salem, Erika. (2014). Planification territoriale et développement durable : quelles avenues pour la ville de Sept-Îles ? Sherbrooke : Université de Sherbrooke.
- Schirmer, P. et autres. (2015). A multiscale classification of the urban morphology. Journal of Transport and Land Use, 101-130.
- Sieferle, Rolf Peter. (2003). Sustainability in a World History Perspective. En B. & Benzing, Exploitation and Overexploitation in Societies (págs. 123-141). Münster : IUAES-Series.
- Simard, Martin. (2014). Étalement urbain, empreinte écologique et ville durable. Y a-t-il une solution de rechange à la densification ? Cahiers de géographie de Québec, 331-352.
- Souris, Marc. (2002). Les principes des systèmes d'information géographique. Paris: Institut de Recherche pour le Développement.
- The PostgreSQL Global Development Group. (2020). PostgreSQL 13beta1 Documentation. Berkeley : The PostgreSQL Global Development Group.
- ThéMA- Site web du Laboratoire. (15 mai 2020). Laboratoire TheMA. Obtenu à partir de <http://thema.univ-fcomte.fr/>: <https://www.google.com/search?q=site+d%27internet&oq=site+d%27internet&aqs=chrome..69i57j0l7.4163j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Touzet, Thierry et Lallemand, Thierry. (2016). Méthodologie Nationale pour le géoréférencement et la numérisation des cartes d'État Major minutes au 1:40000. Paris : IGN.
- Vendé-Leclerc, Myriam. (2017). Cartographie et sémiologie graphique. Nouméa : Université de la Nouvelle-Calédonie.
- Zhu, L. et autres. (2008). Georeferencing multi-temporal and multi-scale imagery in photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 225-230.

7 ANNEXES

7.1 ANNEXE 1

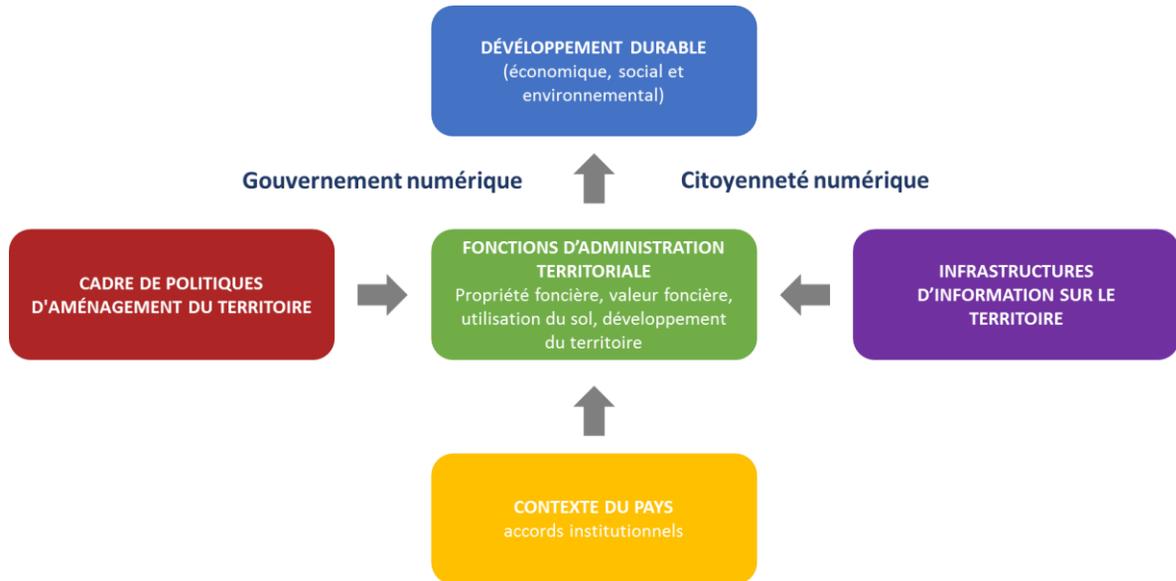
Tableau 6. Les types de cartes
Source : Vendé-Leclerc, Myriam, 2017.

Regarder	Les besoins	Les types de cartes	Ce qu'elles montrent	La progression
1) Localiser	Situer Placer Trouver	La carte inventaire (cartes topographiques, cartes routières, atlas...)	Un territoire Une localisation Une situation Une forme Une répartition	Réfléchir ou observer
2) Décrire	Classer Comparer Évaluer	La carte d'analyse (cartes thématiques)	Un phénomène Une distribution Un mouvement Une structure simple	Interpréter
3) Saisir	Combiner Interpréter Comprendre	La carte de synthèse (combinaison des précédentes : cartes régionales, cartes écologiques, cartes d'aménagement...)	Un milieu géographique Une région Un processus historique Une combinaison de phénomène	Modéliser
4) Découvrir	Révéler Corréler Structurer	La carte système (cartes chorématiques, cartes animées...)	Une structure complexe Une dynamique Un type spatial Une théorie	Décider ou rêver

7.2 ANNEXE 2

Image 20. Le paradigme de l'aménagement du territoire

Source : Enemark, 2007.



7.3 ANNEXE 3

Image 21. Résultats de la simulation selon les deux scénarios (influence réciproque faible ou forte)

Source : Rui, 2013.

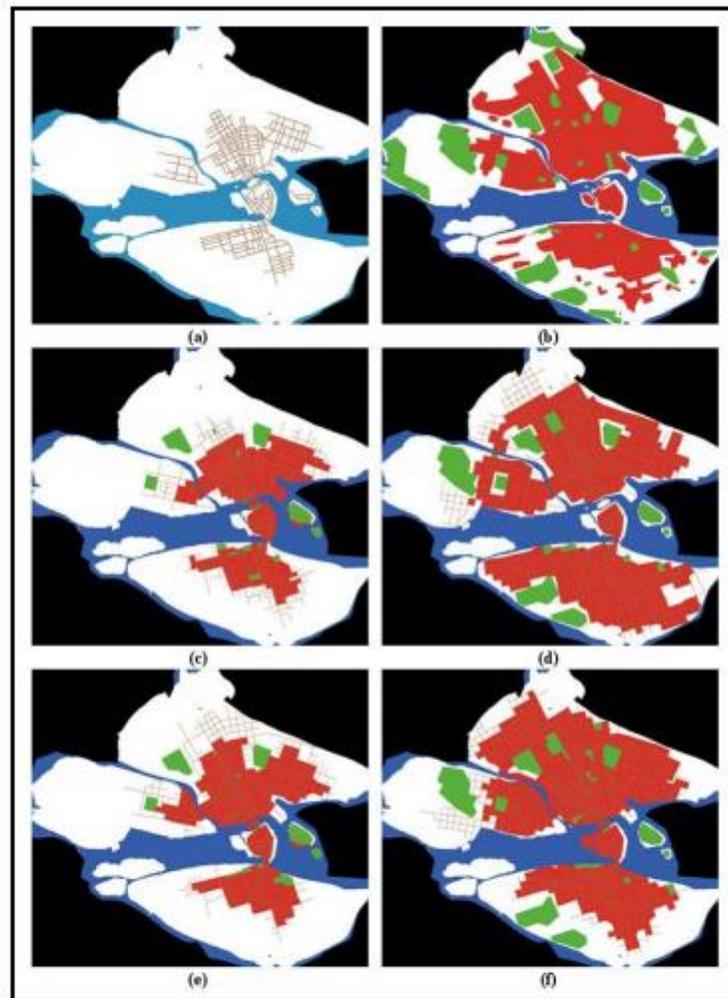
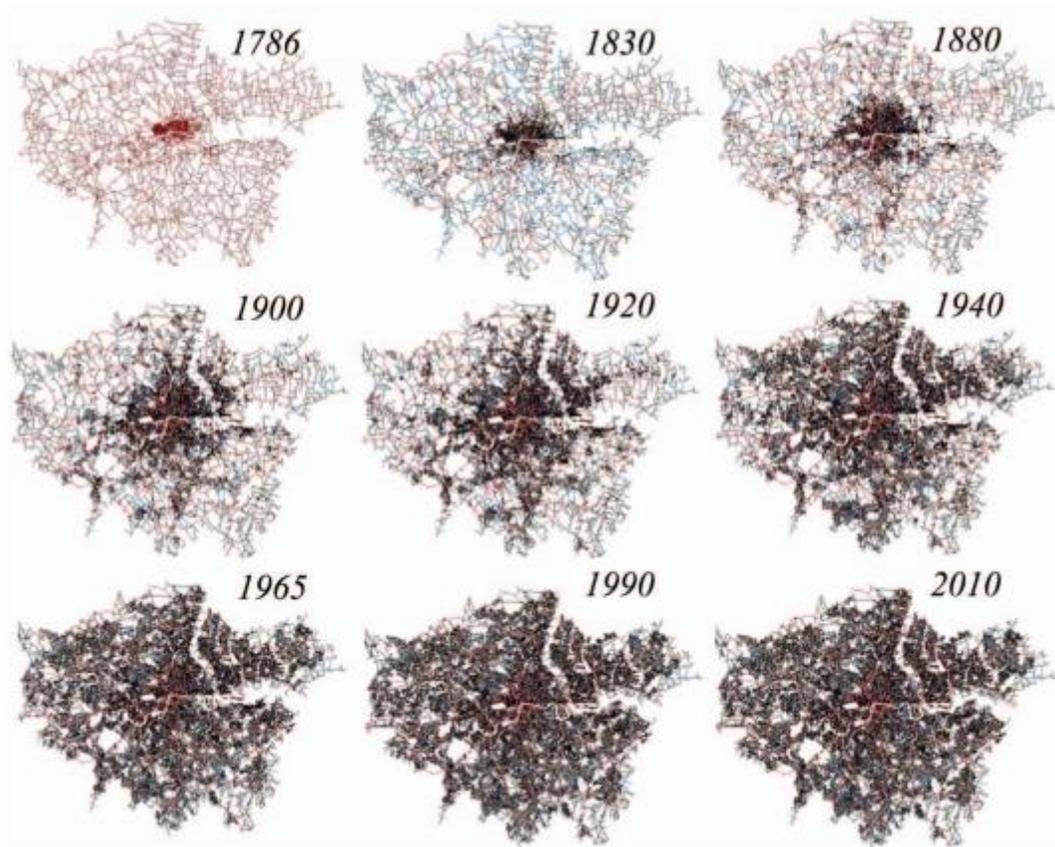


Figure 5.2: Simulation results under different scenarios.
(a) Street maps back to 1650's. (b) Urban areas and green areas in 1913.
Simulation results under scenario I at $t1$ (c) and $t2$ (d).
Simulation results under scenario II at $t1$ (e) and $t2$ (f).

7.4 ANNEXE 4

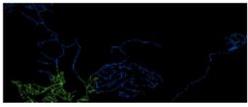
Image 22. Vectorisation de l'évolution du réseau viaire de la ville de Londres (1786-2010)
Source : Masucci et autres, 2013.



7.5 ANNEXE 5

Tableau 7. Indice global d'intégration (normalisation, description et exemples)

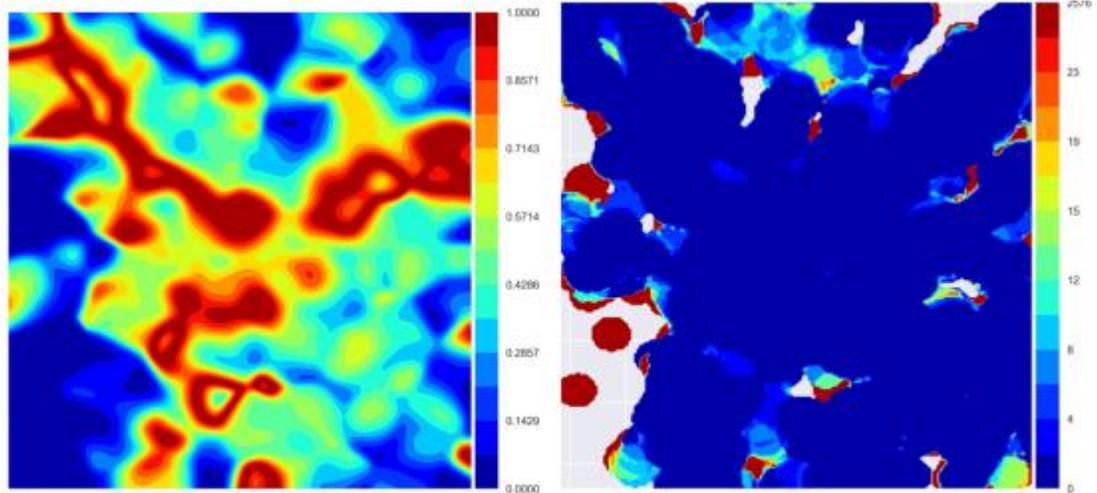
Source : Andrade et autres, 2019.

Couleurs	Intégration	Description	Exemple
Bleu	Faible	Faible connectivité de voies urbaines. Cette catégorie montre des grandes distances, ce qui peut suggérer l'existence de dispersions urbaines et possibles occupations récentes.	
Vert	Faible/ modérée	Connectivité moyenne des voies urbaines. Emplacements éloignés suggérant l'existence de zones urbaines en cours de consolidation.	
Jaune	Modérée	Connectivité moyenne des voies urbaines (entre faible et fort). Cette catégorie présente des distances moyennes suggérant l'existence de zones urbaines dans un processus avancé de consolidation.	
Orange	Modérée/ Forte	Connectivité des voies urbaines. Cette catégorie suggère l'existence de zones urbaines consolidées et intégrées, généralement situées à côté des voies urbaines avec une forte connectivité d'intégration.	
Rouge	Forte	Connectivité forte entre les routes urbaines. Suggère des zones urbaines consolidées avec une forte intégration des routes urbaines	

7.6 ANNEXE 6

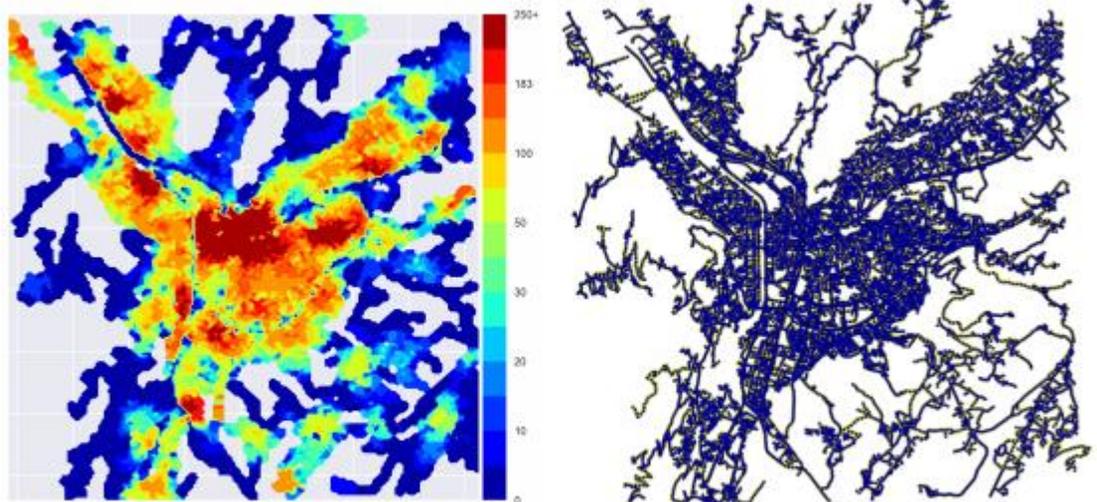
Image 23. Indices d'étalement urbain à Grenoble

Source : Gervasoni et autres, 2017.



(a) Land use mix indices

(b) Dispersion indices



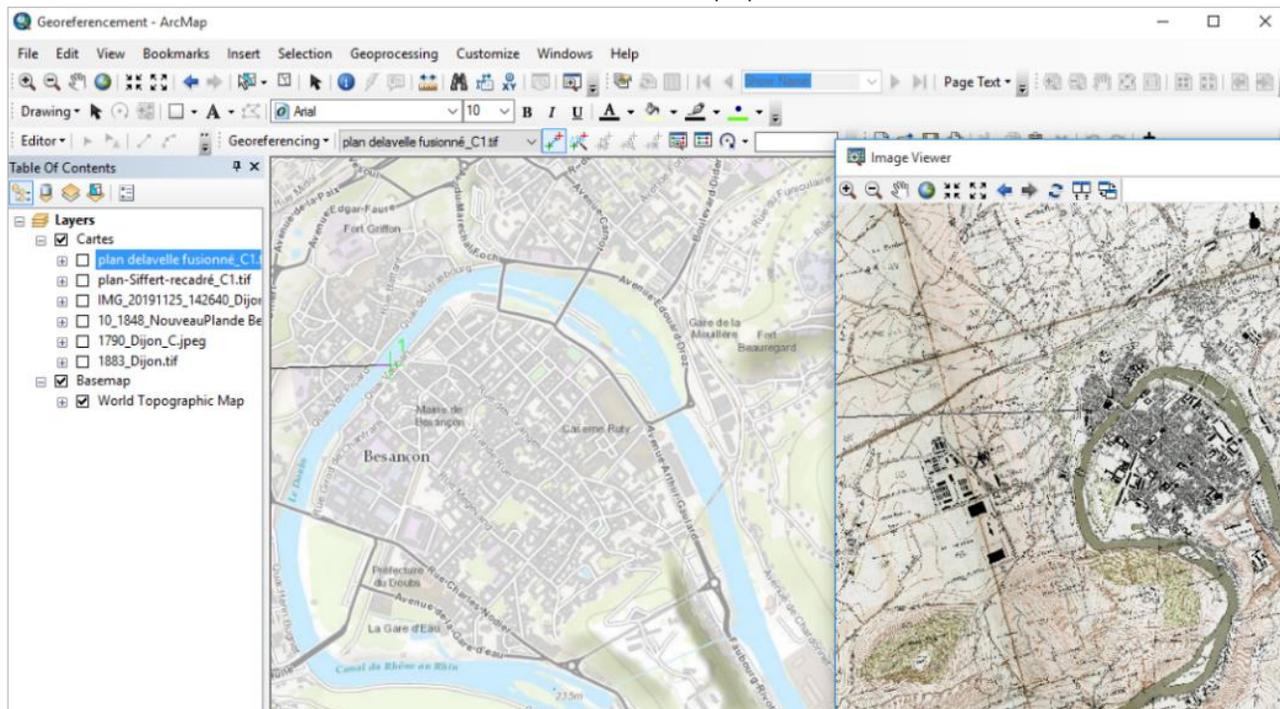
(c) Accessibility indices

(d) Street network

7.7 ANNEXE 7

Image 24. Géoréférencement des cartes anciennes

Source : élaboration propre



7.8 ANNEXE 8

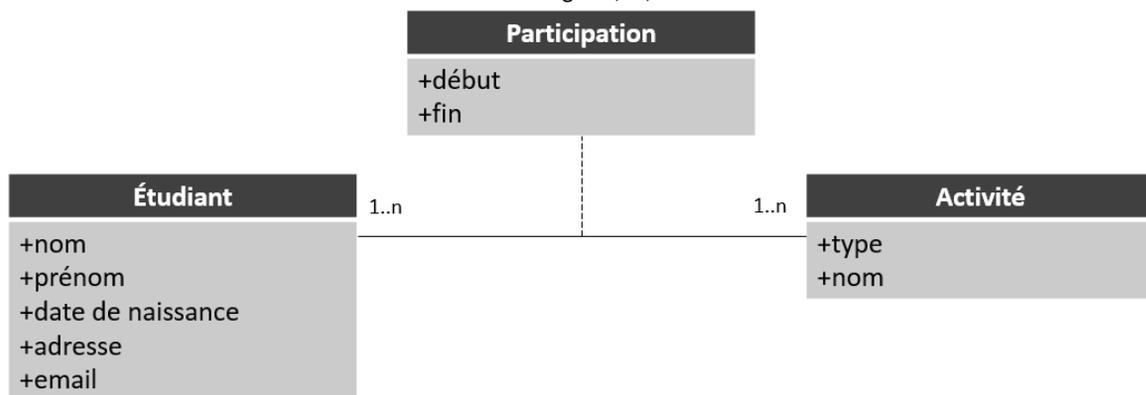
SYNTHÈSE SUR LES STRUCTURES DE DONNÉES ET LA MISE EN PLACE DE BASES DE DONNÉES

Des chercheurs tels que Claire Lagesse se sont intéressés aux questions liées à la création de **structure de données** permettant la mise en place de **bases de données**. En ce sens, selon Lagesse, le stockage des données permet de définir une structure qui organisera ces données en fonction des usages à venir. Ainsi, la création de ce type de structures se fait en tenant compte du langage UML, qui est constitué d'un ensemble de diagrammes permettant d'examiner les composants d'un projet et leurs liens (Lagesse, Claire, 2018). De cette manière, pour la construction des diagrammes, nous devons considérer les éléments suivants (Lagesse, Claire, 2018) :

- (I) **Les classes** : qui correspondent aux différentes notions qui seront considérées au moment de mettre en place la base de données (comme par exemple, *étudiants* et *activités*).
- (II) **Les attributs** : c'est-à-dire, les informations sur les objets des classes, qui ne dépendent pas d'autres objets de la même classe ou d'autres classes (par exemple, des informations personnelles telles que le nom, le prénom, la date de naissance et l'email). Chaque attribut d'une classe a une valeur unique et obligatoire, afin que chaque objet puisse être identifié sans provoquer d'erreurs ou de confusion. Cette valeur unique et obligatoire est connue comme la clé primaire.
- (III) **Les associations** : qui concerne les liens entre les objets d'une même classe ou des objets appartenant à des classes différentes (par exemple, l'étudiant *X* participe à l'activité *B*).
- (IV) **Les classes d'association** : c'est-à-dire, les liens entre les attributs (par exemple, pour générer une association entre les classes *étudiants* et *activités*, nous devons créer une classe d'association qui s'appellera *participation* (voir l'image ci-dessous)). Cette classe d'association s'enchaînera aux deux classes (*étudiants* et *activités*), à travers des clés étrangères qui seront identifiées avec le symbole « % ».

Image 25. Classes d'association et cardinalités

Source : Lagesse, C., 2018.

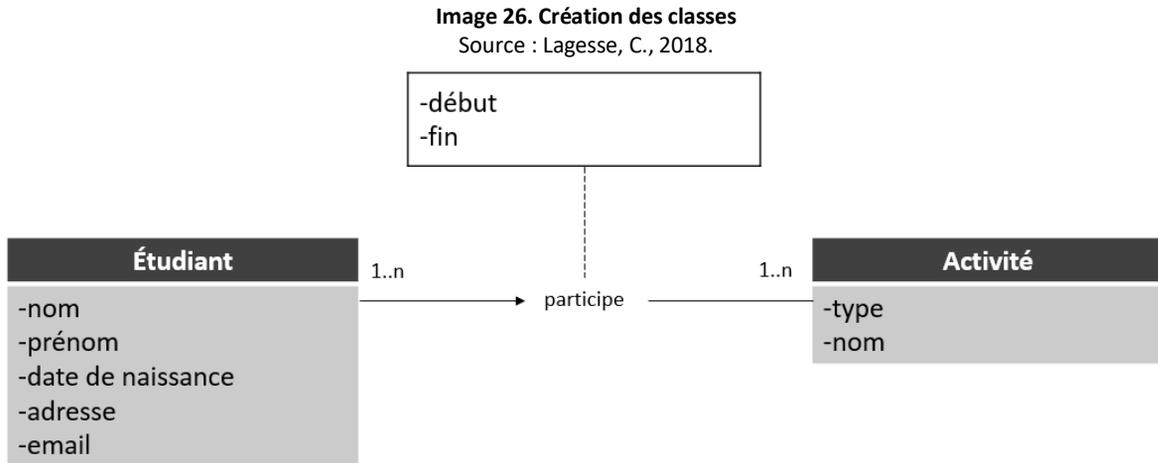


- (V) **Les cardinalités** : qui permettent de montrer la quantité de liens qu'il peut y avoir entre les objets (par exemple, 1 à *plusieurs*⁷ étudiants peuvent participer à 1 à *plusieurs* activités) (voir l'image ci-dessus) (Lagesse, Claire, 2018).

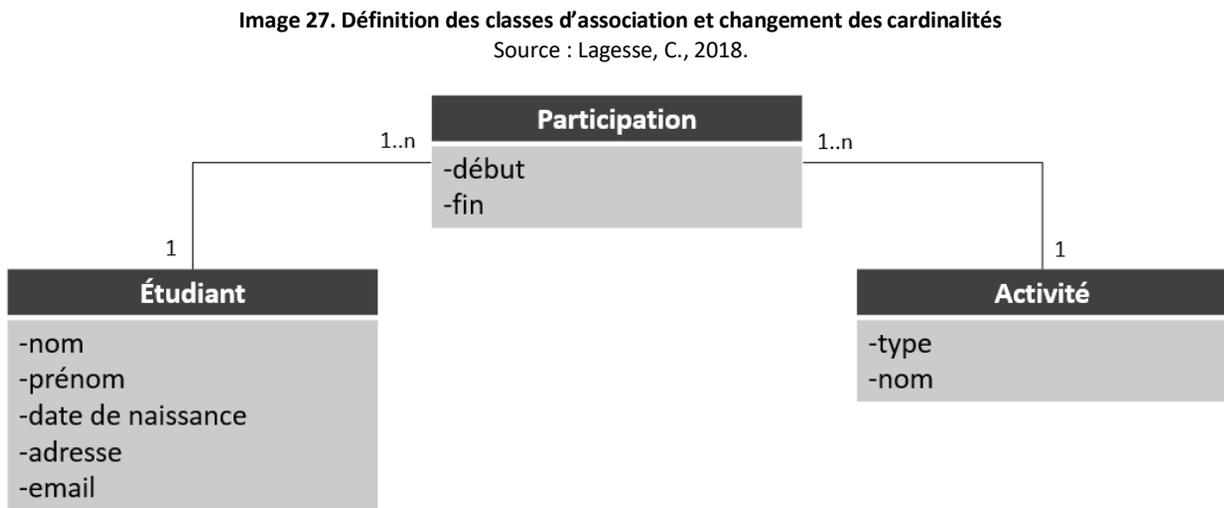
De cette manière, selon Lagesse il existe plusieurs étapes permettant la création de ce type de structures de données (Lagesse, Claire, 2018) :

⁷ Dans ce document, la notion « 1 à plusieurs » est représentée comme « 1..n ».

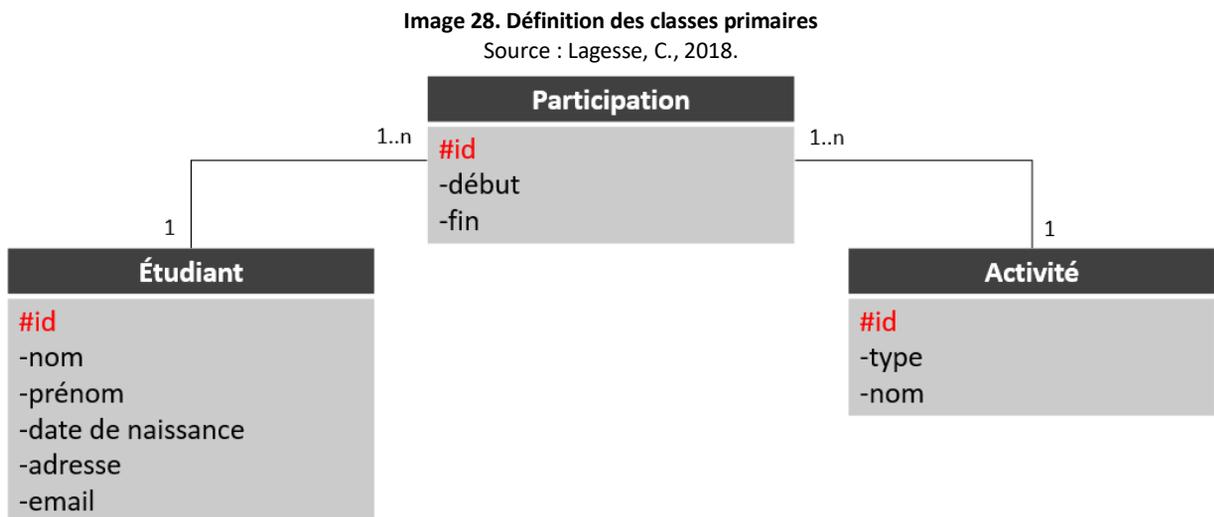
- a. **Étape 1** : création des classes, avec les attributs, les liens, les cardinalités et les attributs portés par les liens.



- b. **Étape 2** : définition des classes d'association et changement des cardinalités

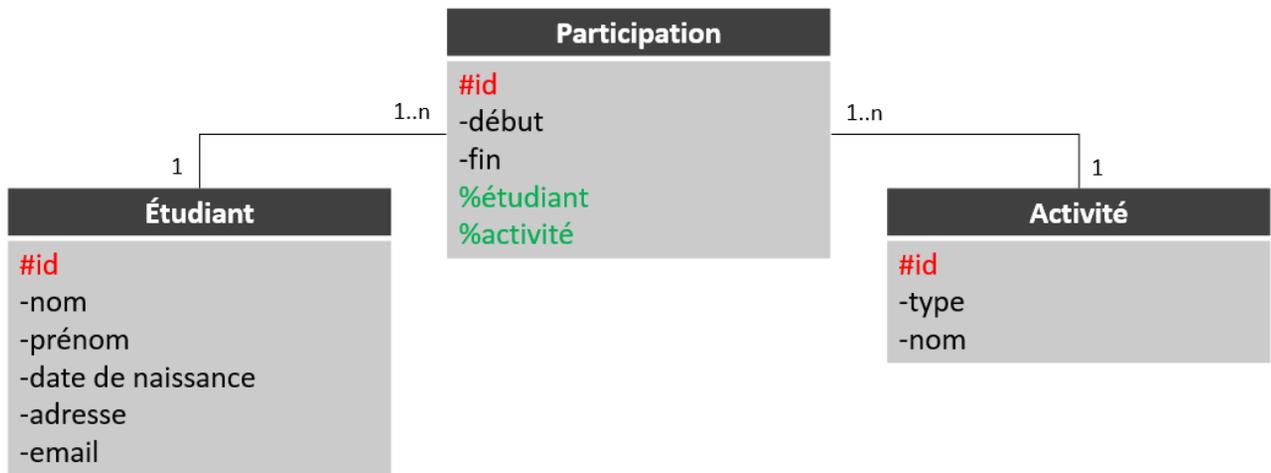


- c. **Étape 3** : définition des clés primaires.



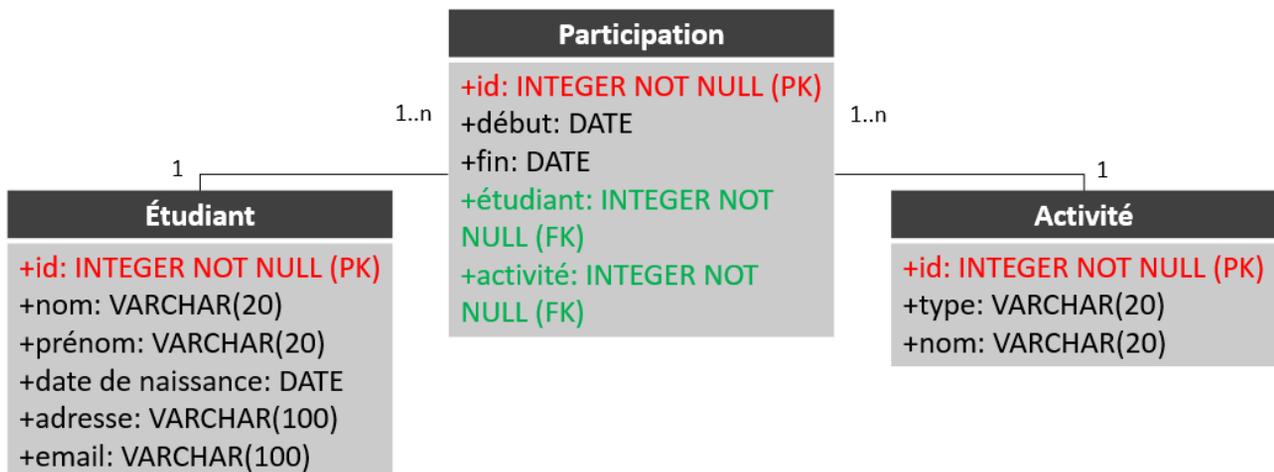
d. **Étape 4** : création des clés étrangères.

Image 29. Création des clés étrangères
Source : Lagesse, C., 2018.



Par ailleurs, pour la mise en place de la base de données dans un SGBD, nous devons utiliser le langage SQL qui permettra de transformer les **classes** en **tables**. Chacun des attributs des classes correspondra à une colonne de la table et chaque enregistrement sera une ligne de cette table. En ce sens, pour la mise en place d'une base de données dans un SGBD, nous devons transformer la structure de données préalablement créée en un **Modèle Physique de Données** (voir l'image ci-dessous).

Image 30. Modèle Physique de Données
Source : Lagesse, C., 2018.



Ce Modèle Physique de Données permet d'identifier les classes, les attributs et le type de donnée de chaque attribut, qui peut correspondre à des textes, des numéros, des dates ou d'information booléenne (« vrai » ou « faux ») (voir la table ci-dessous).

Tableau 8. Type de données

Source : Guibert, L., 2020.

Type de données		Précision, taille ou format	Description
Textes	CHAR(p)	p : nombre de caractères	Texte de taille fixe (p caractères), complété par des espaces à droite si besoin.
	VARCHAR(p)	p : nombre de caractères	Texte de taille variable (p caractères maximum)
	LONGVARCHAR ou TEXT	-	Texte de taille variable illimitée
Numéros	SMALLINT	2 octets (16 bits)	Plage de valeur : -32768 - +32767
	INTEGER	4 octets (32 bits)	Plage de valeur : -2147483648 - +2147483647
	BIGINT	8 octets (64 bits)	Plage de valeur : -9223372036854775808 - +9223372036854775807
	NUMERIC(p)	Variable	Nombre positif ou négatif avec un maximum de p chiffres
	DECIMAL(p,s)	-	Nombres décimaux
Dates	DATE	AAA-MM-JJ	Stocke une date (sans information horaire)
	TIME	hh :mm : ss.nnn	Stocke une heure (sans la date)
	TIMESTAMP	AAAA-MM-JJ hh :mm : ss.nnn	Stocke une date et l'heure
Vrai/ faux	BOOLEAN	-	Stocke information vraie ou fausse

Ainsi, dans la table suivante nous présenterons les principales phases et requêtes du langage SQL qui permettent la mise en place des données dans un SGBD (par exemple, PostgreSQL) :

Tableau 9. Mise en place des données sur le SGBD

Source : Guibert, L., 2020.

Phase	Requête
Création du schéma	DROP SCHEMA et CREATE SCHEMA
Création des tables	CREATE TABLE
Ajout des contraintes des clés étrangères	ALTER TABLE ... ADD FOREIGN KEY
Ajout des valeurs	INSERT INTO ... VALUES
Mise à jour des clés étrangères	UPDATE ... SET

En utilisant le Modèle Physique de Données préalablement détaillé, nous présenterons ci-dessous un exemple de mise en place de données dans un SGBD. Ceci, en prenant compte des phases et requêtes présentées dans la table ci-dessus :

Tableau 10. Exemple de mise en place de données sur le SGBD

Source : élaboration propre

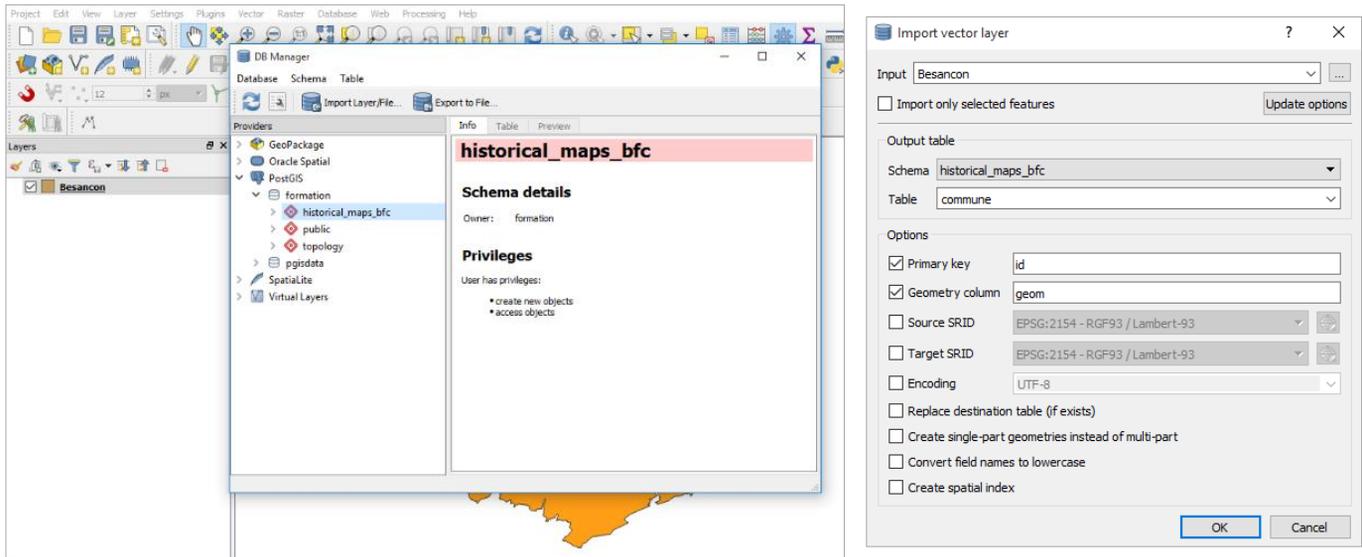
Phase	Requêtes
1. Création du schéma	DROP SCHEMA activites_scolaires CASCADE; CREATE SCHEMA activites_scolaires
2. Création des tables	create table activites_scolaires.etudiant (ID integer not null primary key , nom varchar (20) , prénom varchar (20) , dateDeNaissance date ,

Phase	Requêtes
	<pre> adresse varchar(100), email varchar(100)); create table activites_scolaires.activite (ID integer not null primary key, type varchar (20), nom varchar (20)); create table activites_scolaires.participation (ID integer not null primary key, debut date, fin date); </pre>
3. Ajoute des contraintes des clés étrangères	<pre> ALTER TABLE activites_scolaires.participation ADD etudiant_id int; ALTER TABLE activites_scolaires.participation ADD foreign key (etudiant_id) references activites_scolaires.etudiant (id) ; ALTER TABLE activites_scolaires.participation ADD activite_id int; ALTER TABLE activites_scolaires.participation ADD foreign key (activite_id) references activites_scolaires.activite (id) ; </pre>
4. Ajout des valeurs	<p>Table des étudiants :</p> <pre> INSERT INTO activites_scolaires.etudiant (nom, prénom, dateDeNaissance, adresse, email) VALUES ('Labbé', 'Adama', '01-02-1990', '114 Rue Colbert', 'adama.labbe@mail.com') ; INSERT INTO activites_scolaires.etudiant (nom, prénom, dateDeNaissance, adresse, email) VALUES ('Reiland', 'Maryse', '04-06-1992', '37 Rue du Cygne', 'maryse.reiland@mail.com') ; INSERT INTO activites_scolaires.etudiant (nom, prénom, dateDeNaissance, adresse, email) VALUES ('Sabard', 'Mariana', '06-11-1991', '32 Rue de la Scellerie', 'mariana.sabard@mail.com') ; INSERT INTO activites_scolaires.etudiant (nom, prénom, dateDeNaissance, adresse, email) VALUES ('Betancourt', 'Mélanie', '01-02-1990', '43 Rue de la Préfecture', 'melanie.betancourt@mail.com') ; INSERT INTO activites_scolaires.etudiant (nom, prénom, dateDeNaissance, adresse, email) VALUES ('Gueye', 'François', '14-07-1992', '74 Rue Jean Jaurès', 'francois.gueye@mail.com') </pre> <p>Table des activités :</p> <pre> INSERT INTO activites_scolaires.activite (type, nom) VALUES ('sportive', 'baseball') ; INSERT INTO activites_scolaires.activite (type, nom) VALUES ('artistique', 'musique') ; INSERT INTO activites_scolaires.activite (type, nom) VALUES ('sportive', 'basketball') ; INSERT INTO activites_scolaires.activite (type, nom) VALUES ('sportive', 'football') ; INSERT INTO activites_scolaires.activite (type, nom) VALUES ('artistique', 'danse') </pre> <p>Table de participation :</p> <pre> INSERT INTO activites_scolaires.participation (début, fin) VALUES ('17-01-2020', '17-07-2020') </pre>

Phase	Requêtes
	<p>INSERT INTO activites_scolaires.participation (début, fin) VALUES ('18-01-2020', '18-07-2020')</p> <p>INSERT INTO activites_scolaires.participation (début, fin) VALUES ('19-01-2020', '19-07-2020')</p> <p>INSERT INTO activites_scolaires.participation (début, fin) VALUES ('20-01-2020', '20-07-2020')</p> <p>INSERT INTO activites_scolaires.participation (début, fin) VALUES ('21-01-2020', '21-07-2020')</p>
<p>5. Mise à jour des clés étrangères</p>	<p>UPDATE activites_scolaires.participation SET etudiant_id = (select id from activites_scolaires.etudiant where nom = 'Labbé' and prénom = 'Adama') where debut = '17-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET activite_id = (select id from activites_scolaires.activite where nom = 'baseball') where début = '17-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET etudiant_id = (select id from activites_scolaires.etudiant where nom = 'Reiland' and prénom = 'Maryse') where debut = '18-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET activite_id = (select id from activites_scolaires.activite where nom = 'musique') where début = '18-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET etudiant_id = (select id from activites_scolaires.etudiant where nom = 'Sabard' and prénom = 'Mariana') where debut = '19-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET activite_id = (select id from activites_scolaires.activite where nom = 'basketball') where début = '19-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET etudiant_id = (select id from activites_scolaires.etudiant where nom = 'Betancourt' and prénom = 'Mélanie') where debut = '20-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET activite_id = (select id from activites_scolaires.activite where nom = 'football') where début = '20-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET etudiant_id = (select id from activites_scolaires.etudiant where nom = 'Gueye' and prénom = 'François') where debut = '21-01-2020';</p> <p>UPDATE activites_scolaires.participation SET activite_id = (select id from activites_scolaires.activite where nom = 'danse') where début = '21-01-2020'</p>

7.9 ANNEXE 9

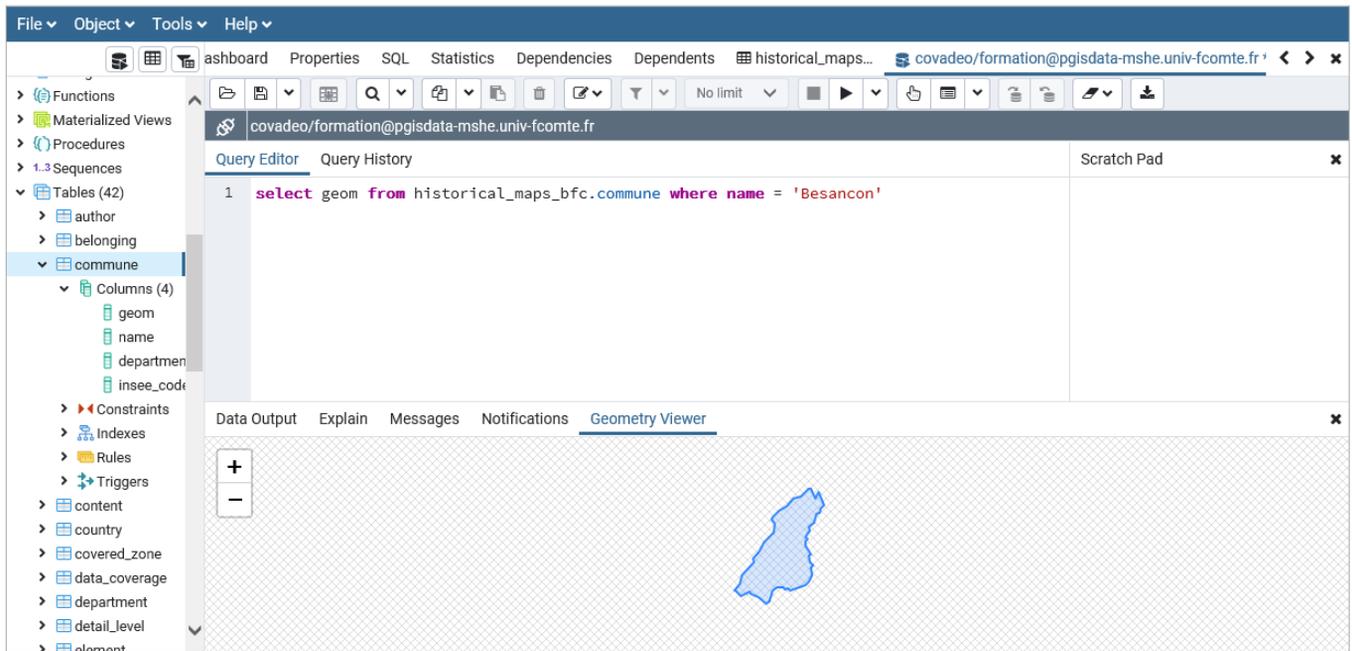
Image 31. Importation de la géométrie
Source : Lagesse, C. El-Gouj, H. et Rincón, C., 2020.



7.10 ANNEXE 10

Image 32. Géométrie de la commune de Besançon insérée sur PostgreSQL

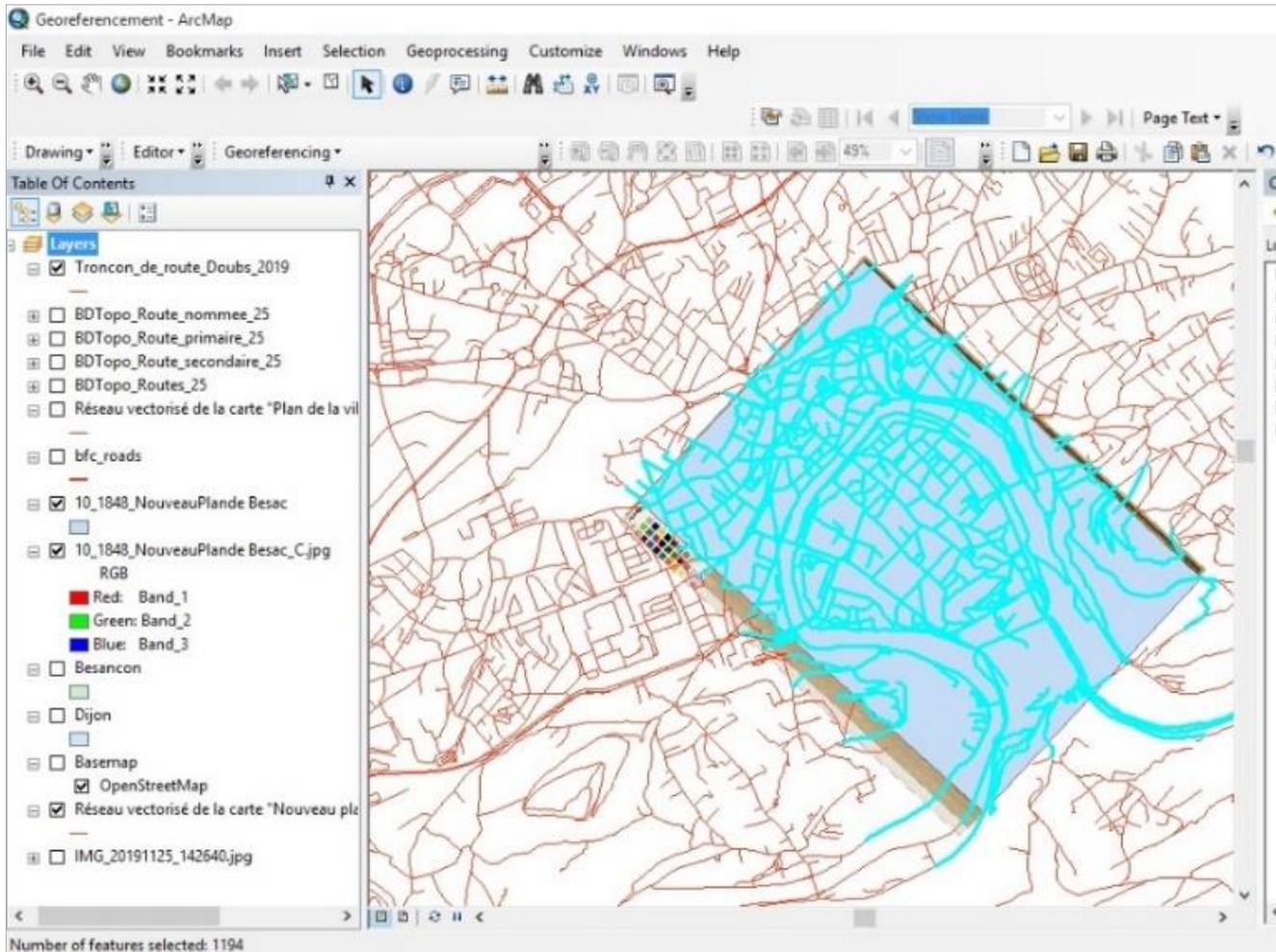
Source : Lagesse, C. El-Gouj, H. et Rincón, C., 2020.



7.11 ANNEXE 11

Image 33. Résultat de la sélection des routes qui intéressent à la carte traitée

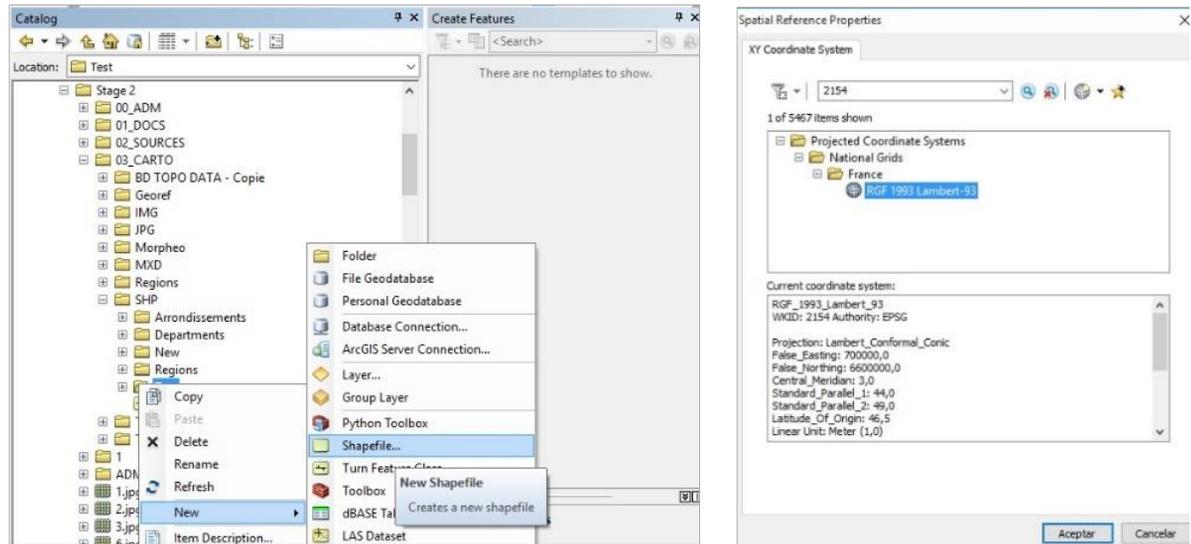
Source : élaboration propre.



7.12 ANNEXE 12

Image 34. Création d'une nouvelle couche pour dessiner les segments absents

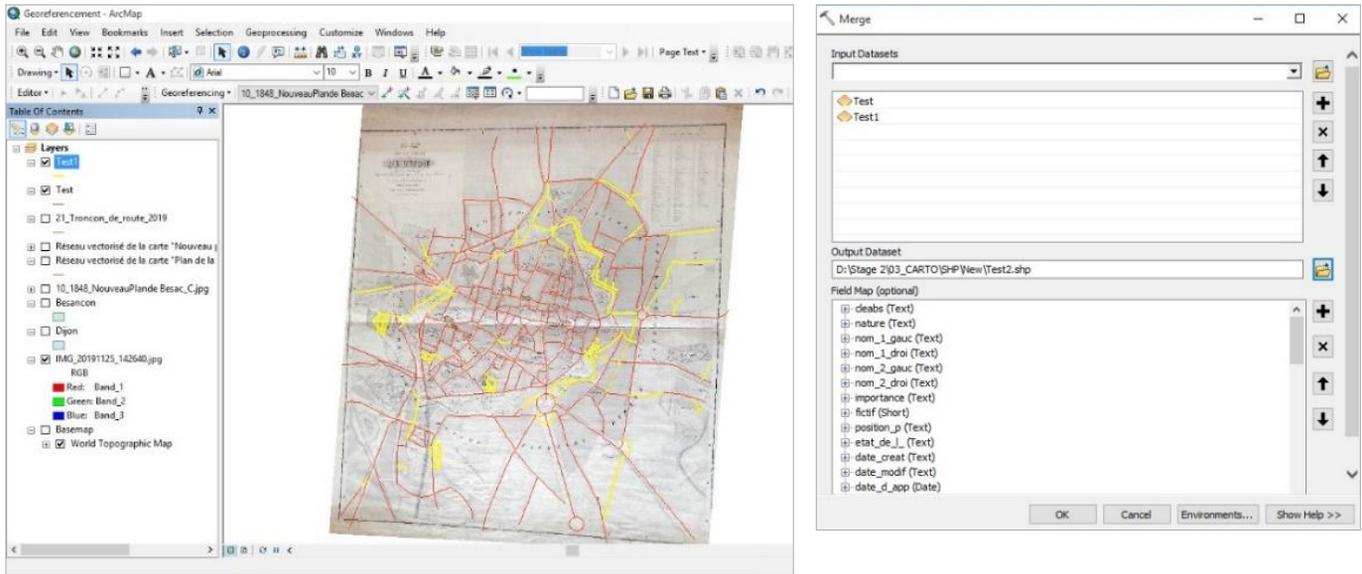
Source : élaboration propre.



7.13 ANNEXE 13

Image 35. Présentation des deux couches à fusionner et de l'outil de fusion

Source : élaboration propre.



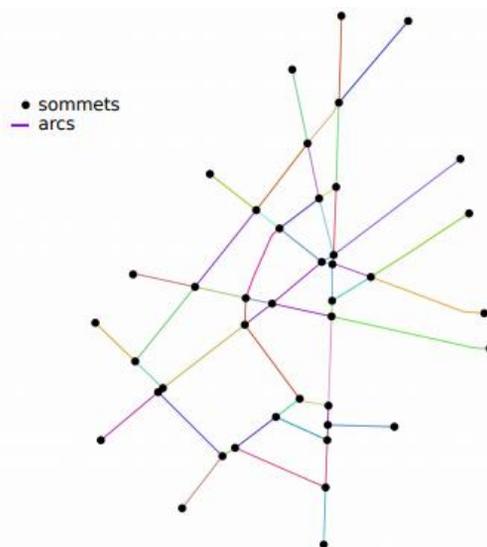
7.14 ANNEXE 14

Méthode pour analyser un territoire à l'aide d'indicateurs calculés sur son réseau viaire

Pour analyser les réseaux viaires des 8 cartes vectorisées (voir partie 3.4 de ce document), nous avons utilisé six indicateurs d'analyse territoriale. Ces indicateurs ont été examinés par des chercheurs comme Claire Lagesse, qui s'est intéressée à la **théorie des graphes**. Cette théorie mathématique est née du problème du *Pont de Königsberg* (qui consiste à trouver un chemin permettant de traverser les six points de la ville) et a été étudié par le mathématicien Léonard Euler (1707-1783) (Lagesse, Claire, 2015). En ce sens, la **théorie des graphes** cherche à examiner l'interaction entre les sommets (ou nœuds) et les arcs (ou liens) qui, ensemble, constituent un graphe dont la structure est similaire à celle d'un réseau (voir graphique ci-dessous). En considérant que les sommets et les arcs sont des éléments spatialisés, la théorie des graphes vise à étudier les caractéristiques et les hiérarchies existantes entre les différents sommets et les arcs qui composent le réseau (Lagesse, Claire, 2019).

Image 36. Exemple d'un Graphe

Source : Lagesse, Claire, 2019.



En ce sens, des chercheurs tels que Claire Lagesse, Philippe Bonnin, Patricia Bordin et Stéphane Douady ont utilisé la **théorie des graphes** pour effectuer des analyses territoriales, à travers le calcul d'indicateurs sur les réseaux viaires qui composent ces territoires. Ces indicateurs visent à mesurer la centralité des éléments appartenant à un graphe, afin d'identifier ceux qui ont le plus d'influence au sein du réseau (Lagesse, Claire et al, 2016). Ainsi, il existe d'indicateurs tels que :

- **Indicateurs classiques :**

- ✓ **Longueur** : qui fait référence à la mesure de longueur de chacun des arcs composant le réseau, de sorte qu'il existe une hiérarchie entre eux.
- ✓ **Degré** : il s'agit du nombre d'arcs attachés à un sommet.
- ✓ **Utilisation** : cela concerne le nombre de « chemins » qui traversent un nœud. Plus il y a de « chemins » qui le traversent, plus le nœud sera stressé.
- ✓ **Centralité d'intermédiarité** : cet indicateur est basé sur l'identification de tous les chemins possibles entre deux sommets. Ainsi, la centralité d'intermédiarité mesure le nombre de fois qu'un nœud est traversé par un chemin entre deux sommets.
- ✓ **Centralité de proximité** : indicateur basé sur la mesure de la somme des chemins les plus simples d'un arc à tous les autres. En ce sens, l'arc le plus central est celui qui nous permet d'aller plus efficacement et plus facilement vers tous les autres arcs (Lagesse, Claire, 2019).

- **Indicateurs complémentaires :**

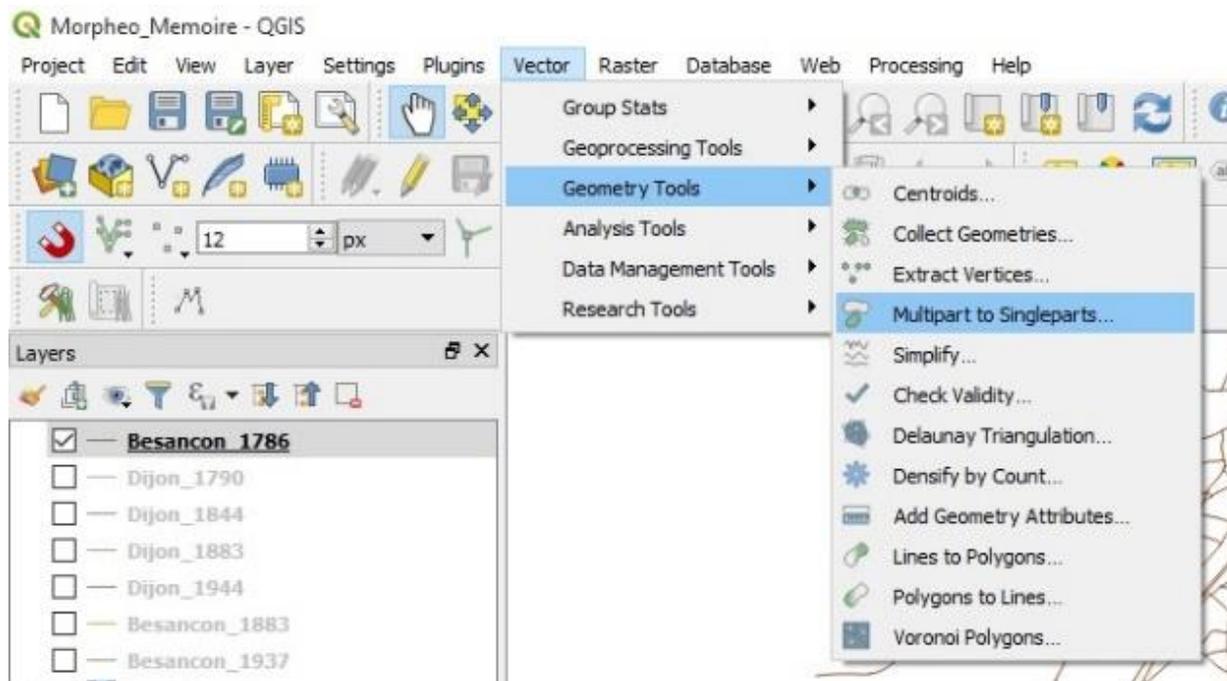
- ✓ **Connectivité** : Somme de tous les arcs connectés à l'arc considéré pour le calcul.
- ✓ **Degré de desserte** : indicateur issu de la soustraction entre connectivité et degré.
- ✓ **Espacement** : indicateur résultant de la division de la longueur sur le niveau de connectivité. Lorsque l'espacement est faible, la densité linéaire est forte et vice-versa.
- ✓ **Orthogonalité** : indicateur qui détermine avec quels angles de connexion un arc est inclus dans le réseau. Plus le degré d'orthogonalité est élevé, moins l'arc aura d'importance dans le réseau (Lagesse, Claire, 2019).

En ce sens, nous devons souligner que ces indicateurs peuvent être calculés en utilisant Morpheo 3, qui constitue un plugin du logiciel QGIS. Ainsi, pour ce document nous avons calculés des indicateurs tels que : (I) le degré, (II) le degré de desserte, (III) l'espacement, (IV) l'orthogonalité, (V) la centralité de proximité, et (VI) la centralité d'intermédiarité. Ces indicateurs ont été calculés à travers la procédure suivante :

- Prendre les couches correspondantes aux réseaux viaires vectorisés des 8 cartes anciennes, appartenant à Besançon et Dijon (ces couches doivent avoir une projection dans le système EPSG 3857).
- Utiliser les outils de géométrie de QGIS (plus précisément l'outil nommé « Morceaux multiples vers morceaux uniques »), afin de transformer les couches viaires des 8 cartes anciennes (voir l'image ci-dessous). Cette procédure permet de créer une couche temporelle nommée « single parts ».

Image 37. Morceaux multiples vers morceaux uniques

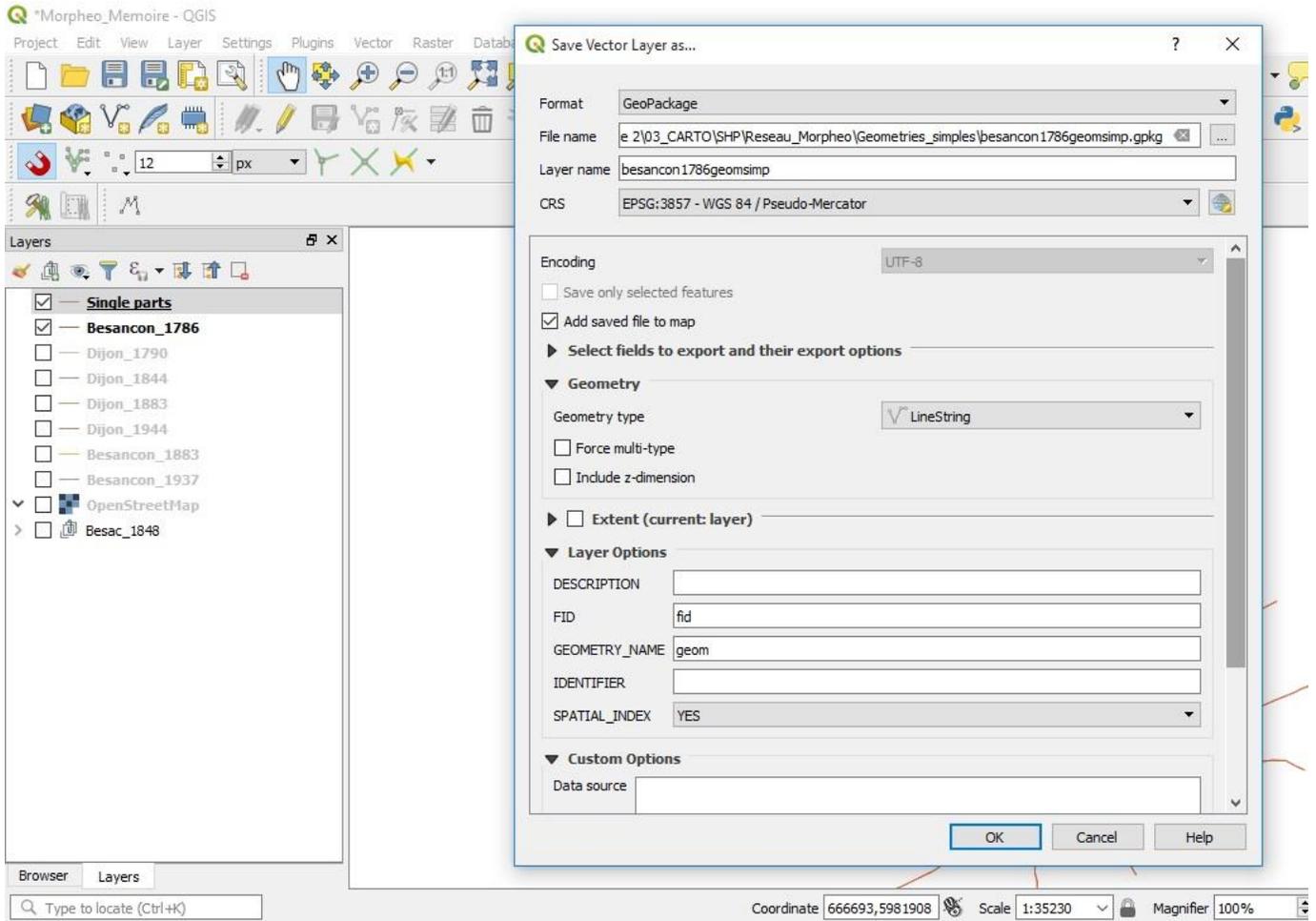
Source : QGIS- capture d'écran.



- Exporter la couche temporelle « single parts » en format GeoPackage du type *stringline*. Vérifier que la couche soit en projection 3857 (voir l'image ci-dessous).

Image 38. Sauvegarde de la couche temporelle en format GeoPackage

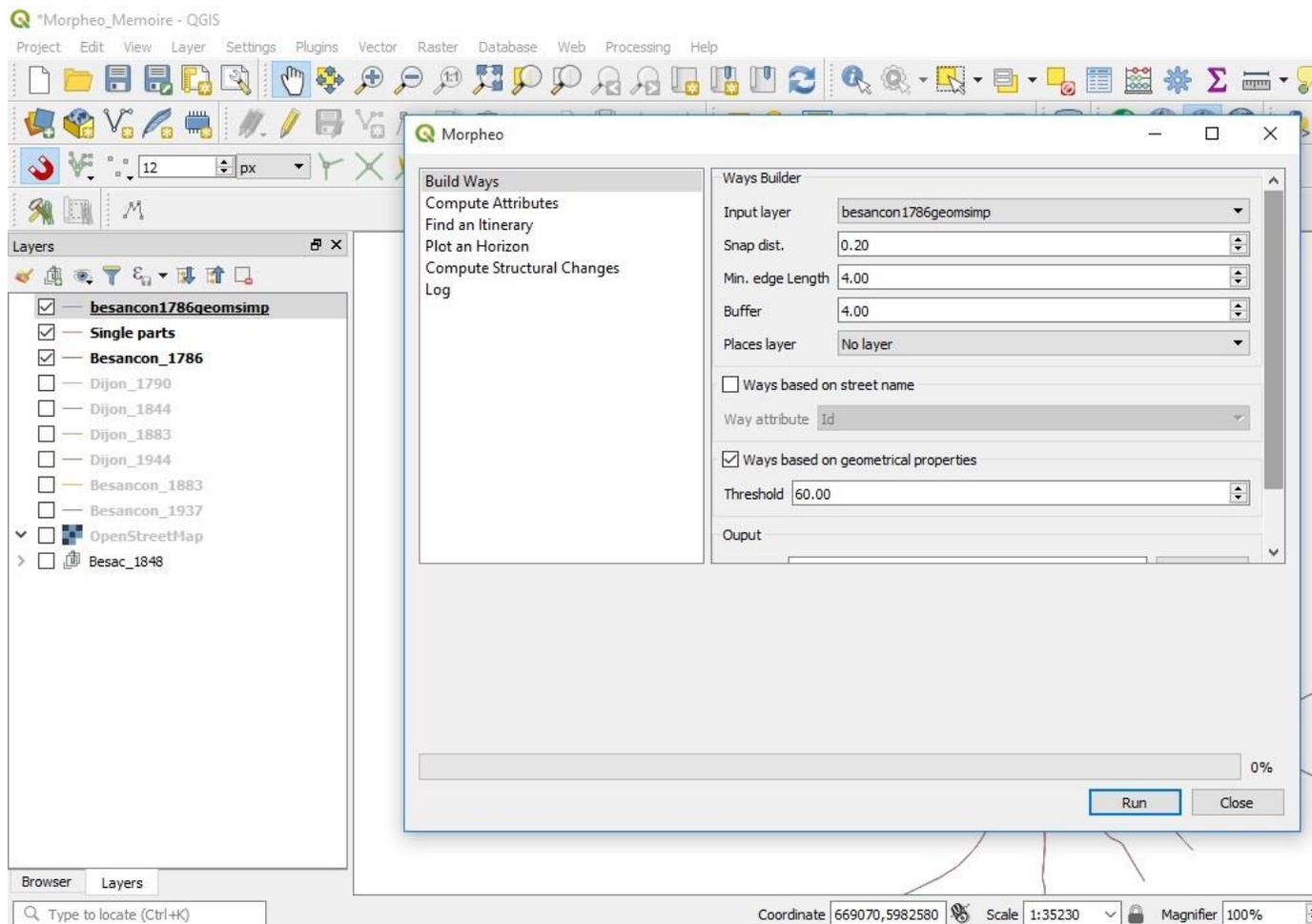
Source : QGis- capture d'écran.



- d. Consolider le réseau sur lequel nous calculerons les indicateurs d'analyse. Ceci, à travers l'outil « Build Ways » sur Morpheo (voir l'image ci-dessous).

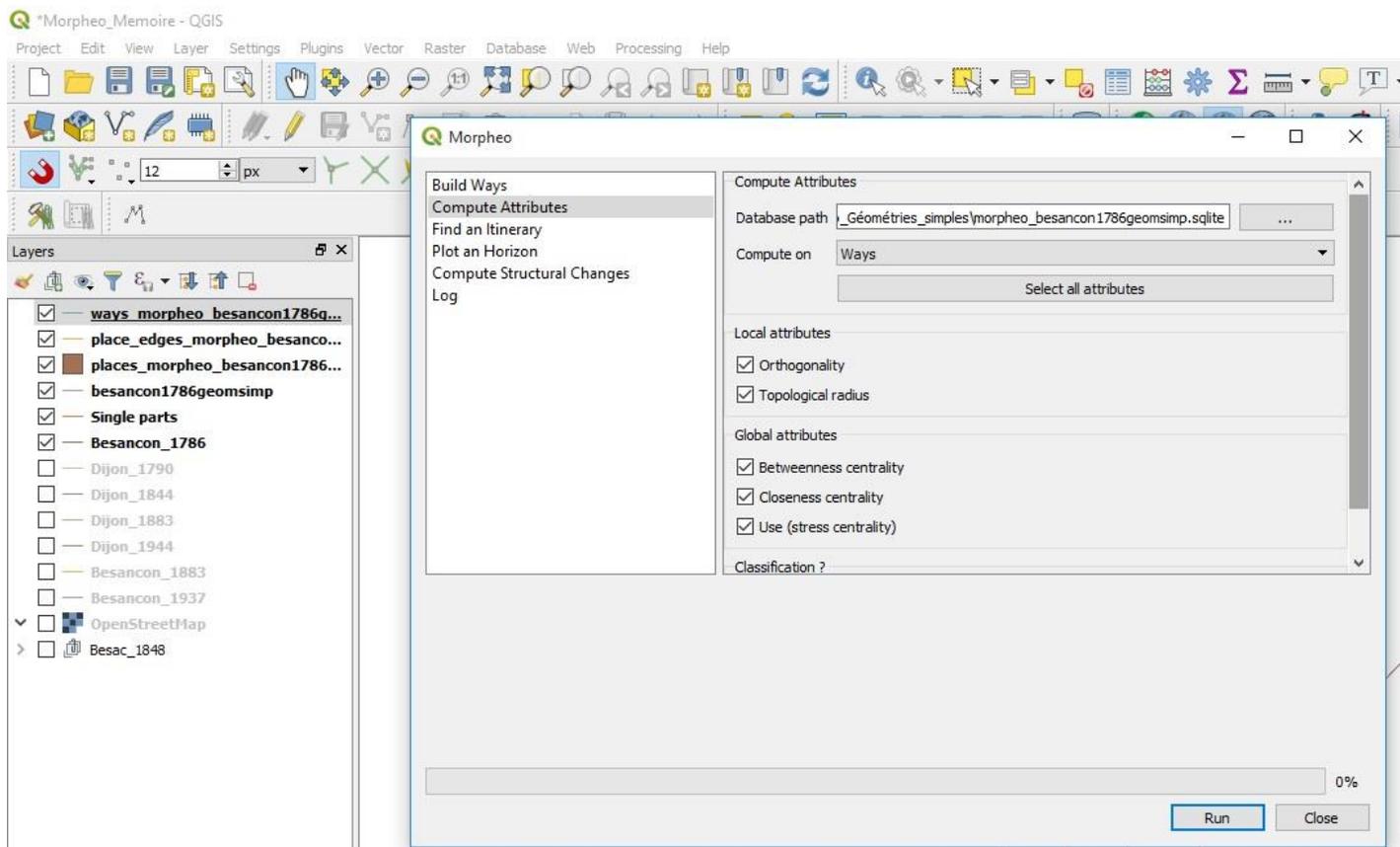
Image 39. Création du réseau permettant l'analyse des indicateurs

Source : QGis- capture d'écran.



- e. Calculer les attributs locaux (orthogonalité) et globaux (centralité d'intermédiarité, espacement et centralité des proximités) sur Morpheo. Ce processus nous permettra de remplir la table des attributs de la couche « ways_morpheo_Géométries_simples » préalablement créée, avec toutes les données nécessaires pour procéder aux tâches de création des cartes (voir l'image ci-dessous). Ces calculs nous ont permis de consolider les cartes et analyses présentées dans la partie 4 de ce document.

Image 40. Calcul des indicateurs sur Morpheo
Source : QGIS- capture d'écran.



7.15 ANNEXE 15

INDICATEUR DE DEGRÉ- BESANÇON

Image 41. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1786)
Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.



Image 42. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1848)

Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.



Image 43. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.

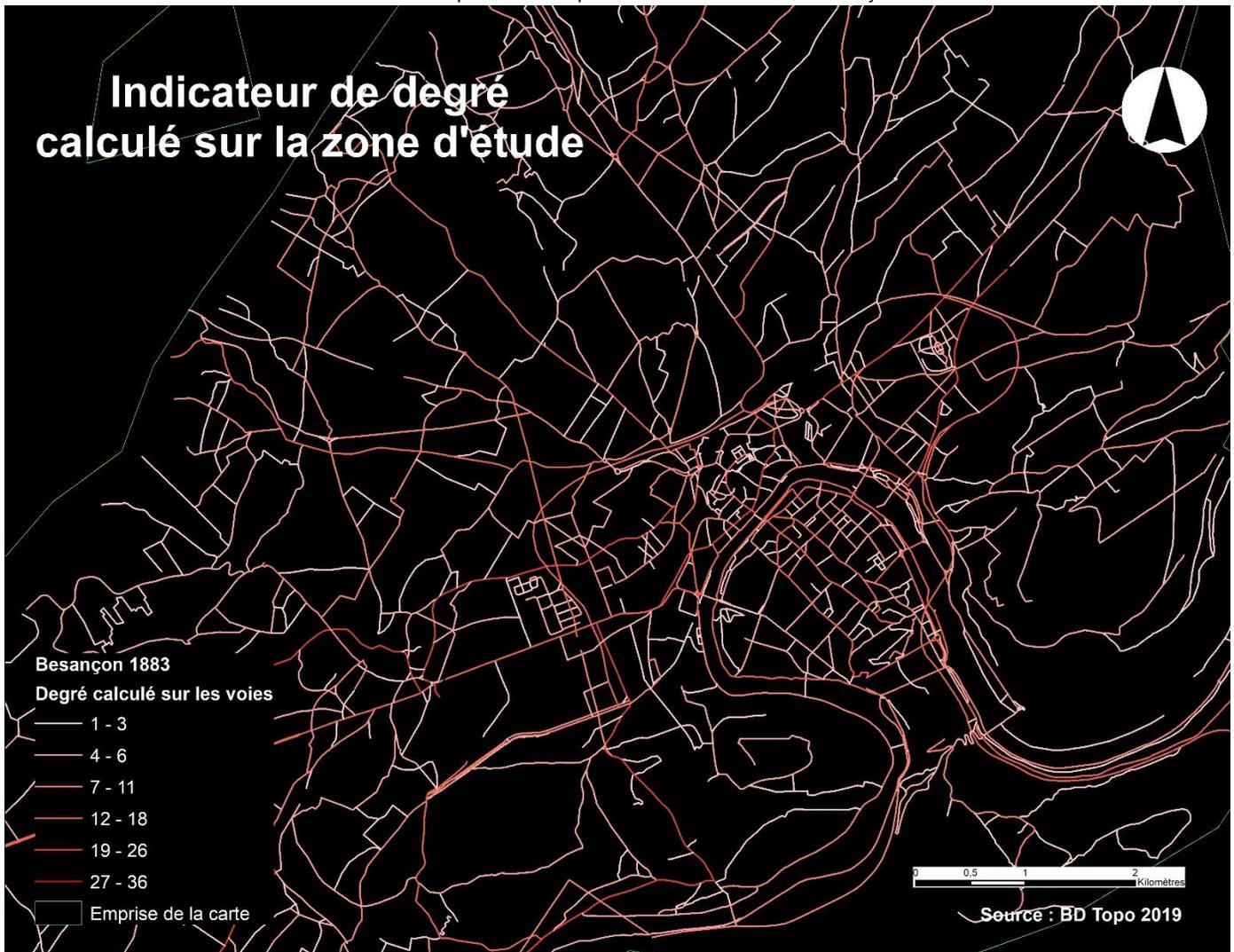


Image 44. Indicateur de degré du réseau viaire de Besançon (1937)
Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



7.16 ANNEXE 16

INDICATEUR DE DEGRE DE DESSERTE- BESANÇON

Image 45. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1786)

Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.



Image 46. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1848)

Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.



Image 47. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



Image 48. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Besançon (1937)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



7.17 ANNEXE 17

INDICATEUR D'ESPACEMENT- BESANÇON

Image 49. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1786)
Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.

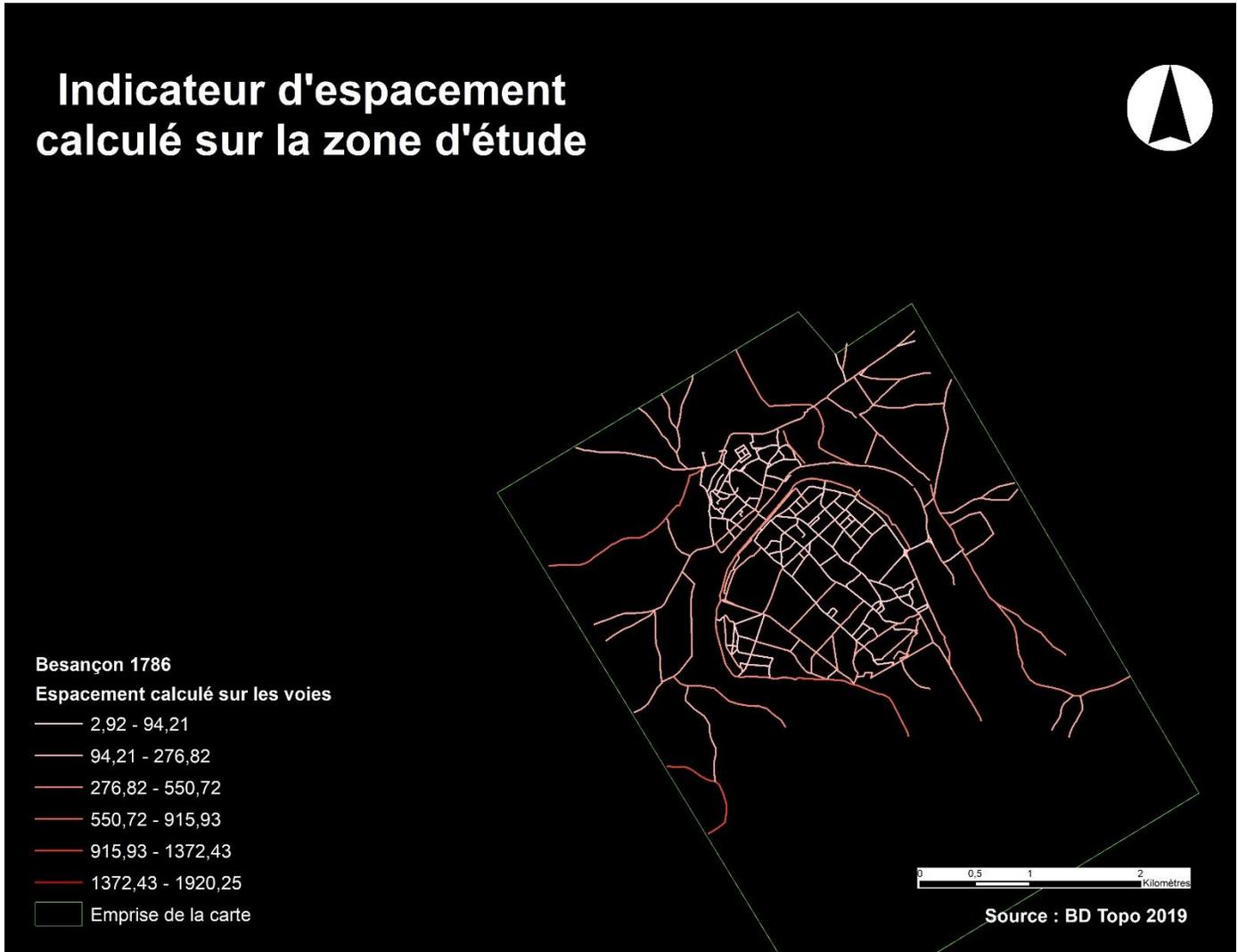


Image 50. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1848)

Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.

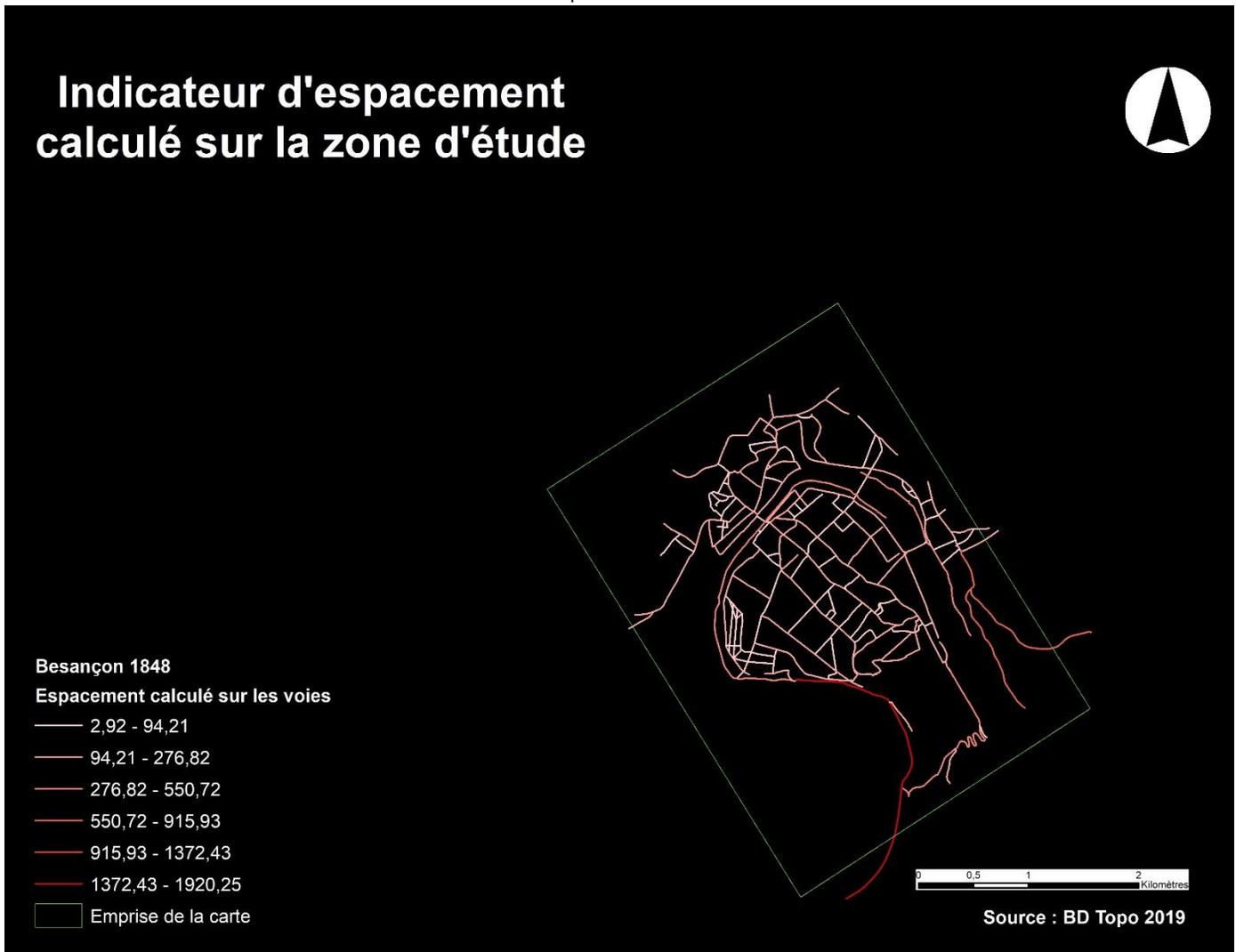


Image 51. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.

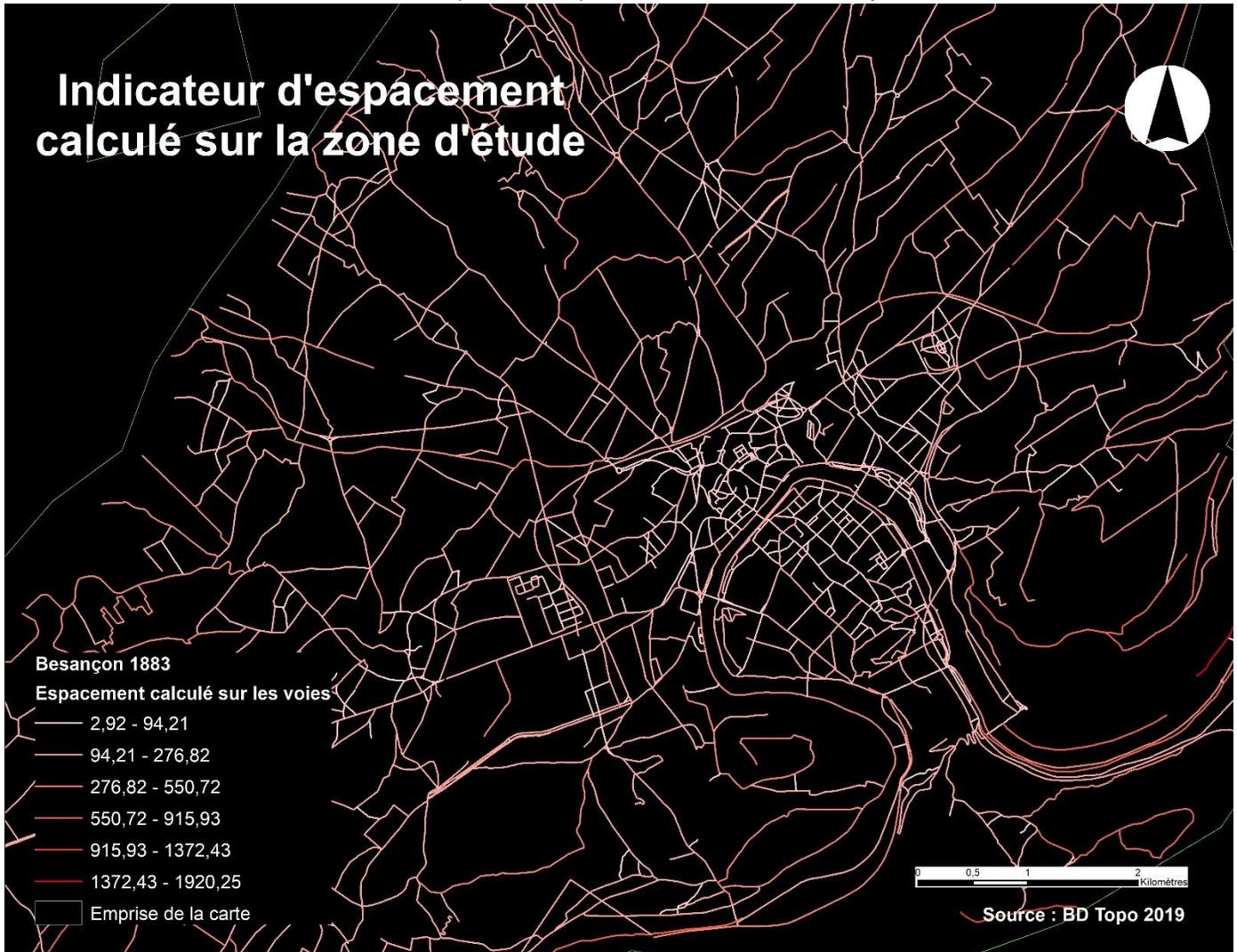
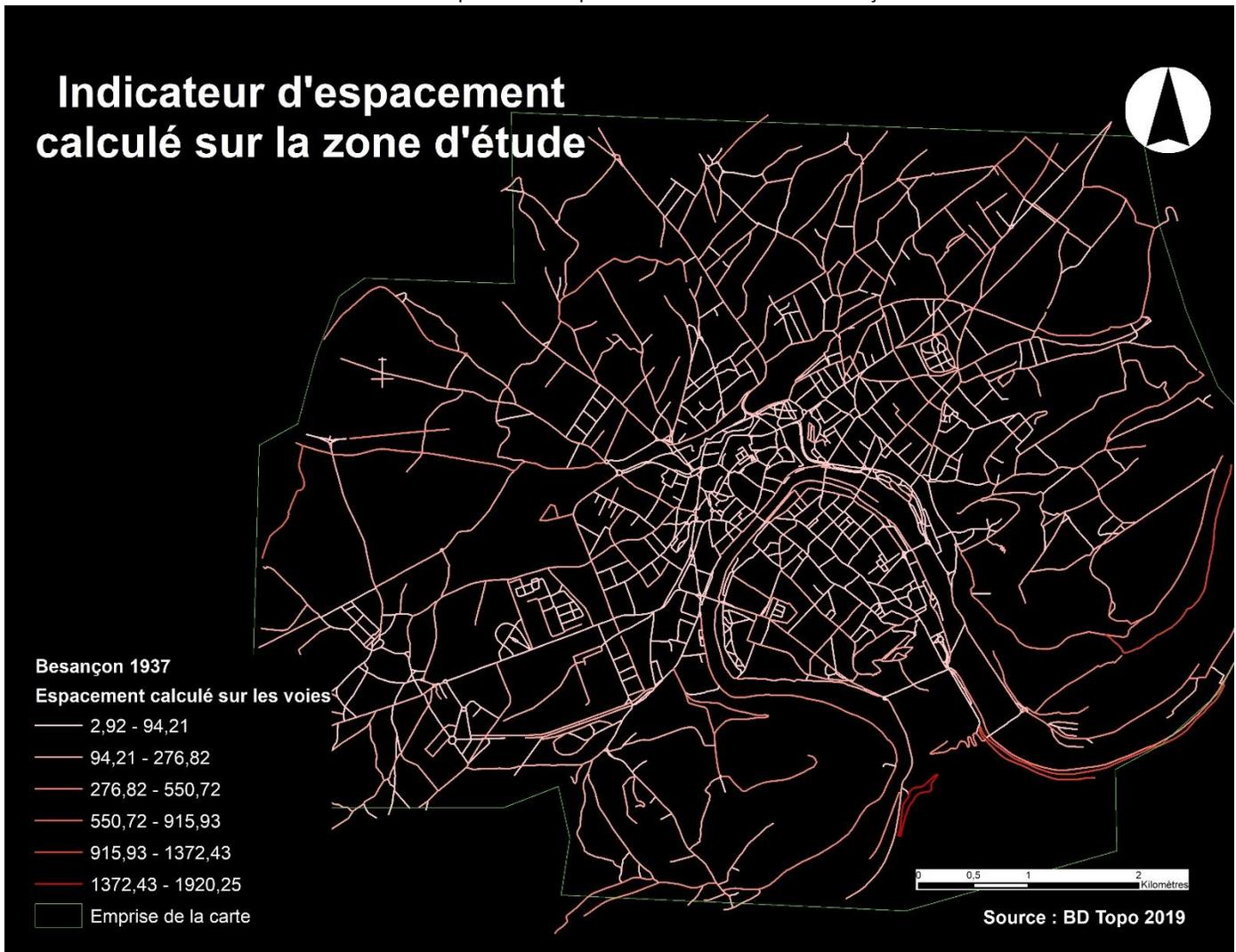


Image 52. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Besançon (1937)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



7.18 ANNEXE 18

INDICATEUR D'ORTHOGONALITE- BESANÇON

Image 53. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1786)
Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.



Image 54. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1848)

Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.



Image 55. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1883)
Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.

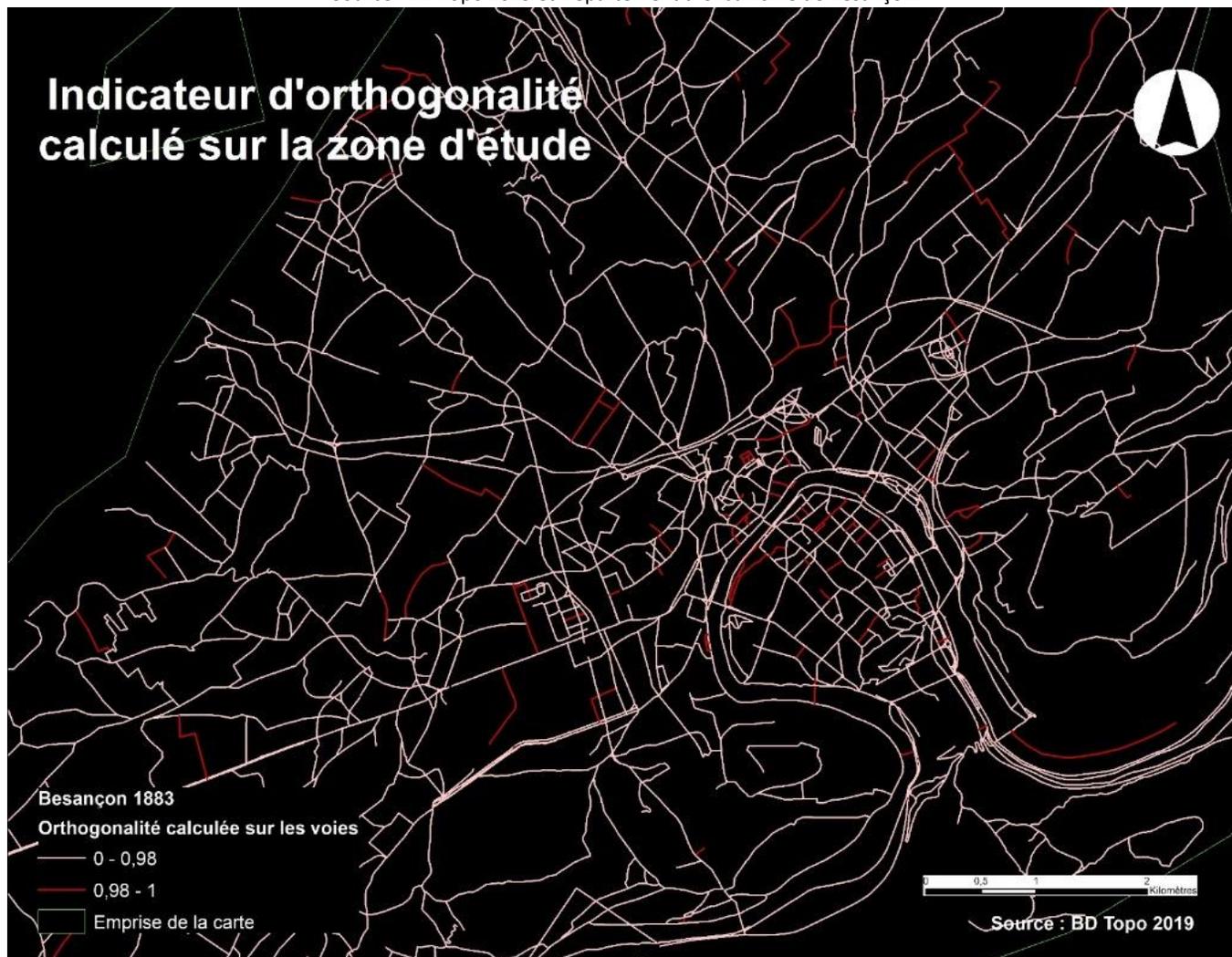
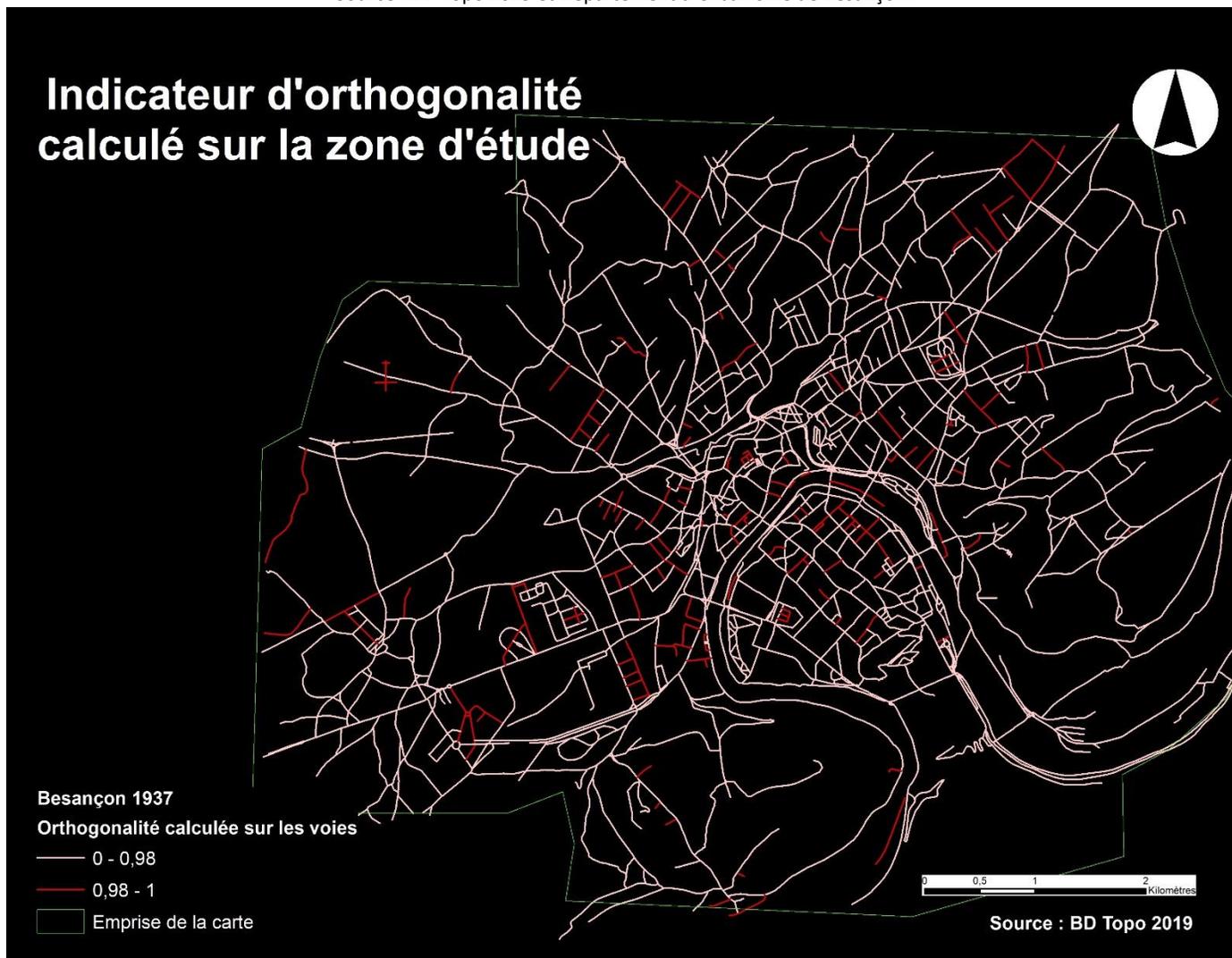


Image 56. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Besançon (1937)
Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



7.19 ANNEXE 19

INDICATEUR DE CENTRALITE DE PROXIMITE- BESANÇON

Image 57. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1786)
Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.

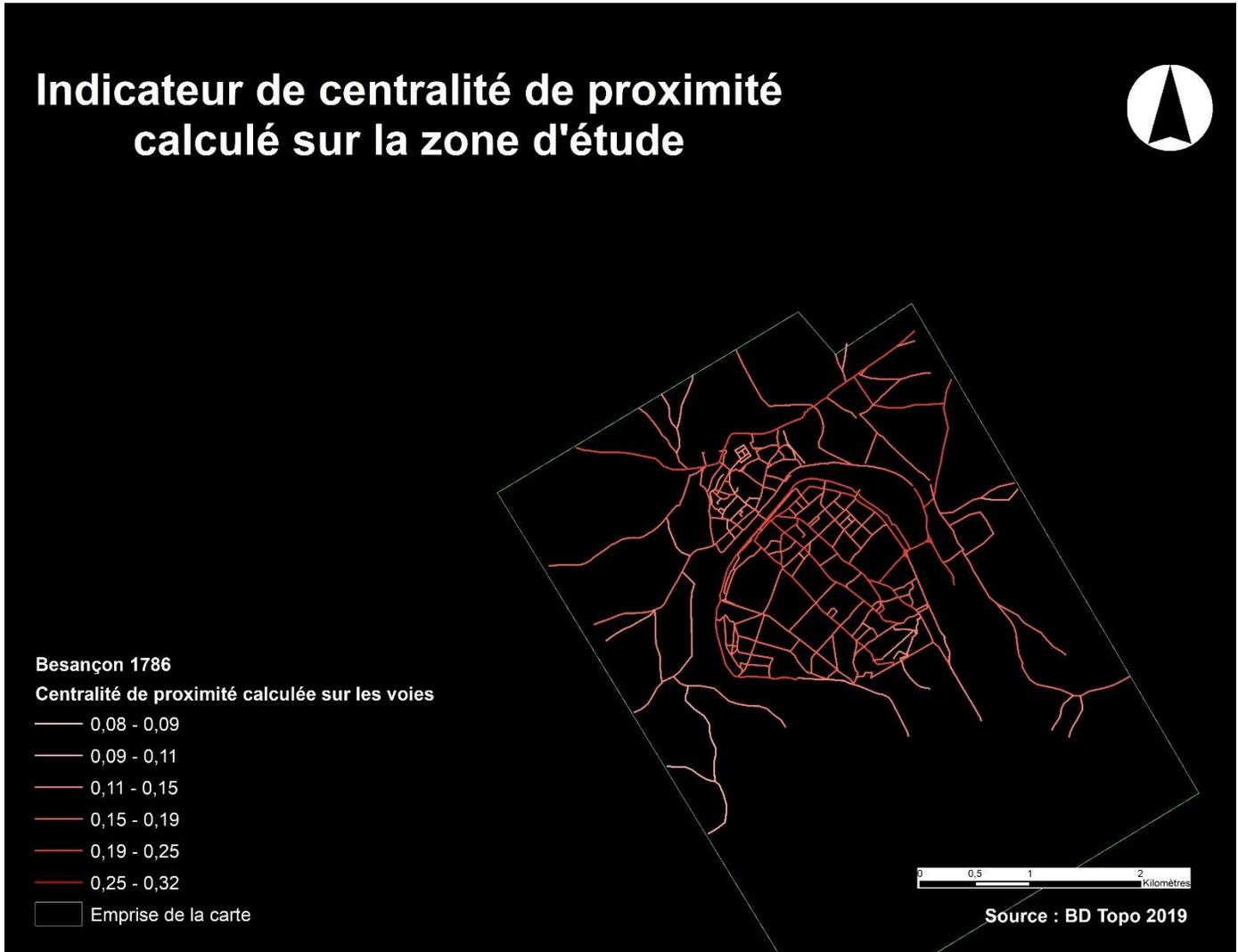


Image 58. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1848)

Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.

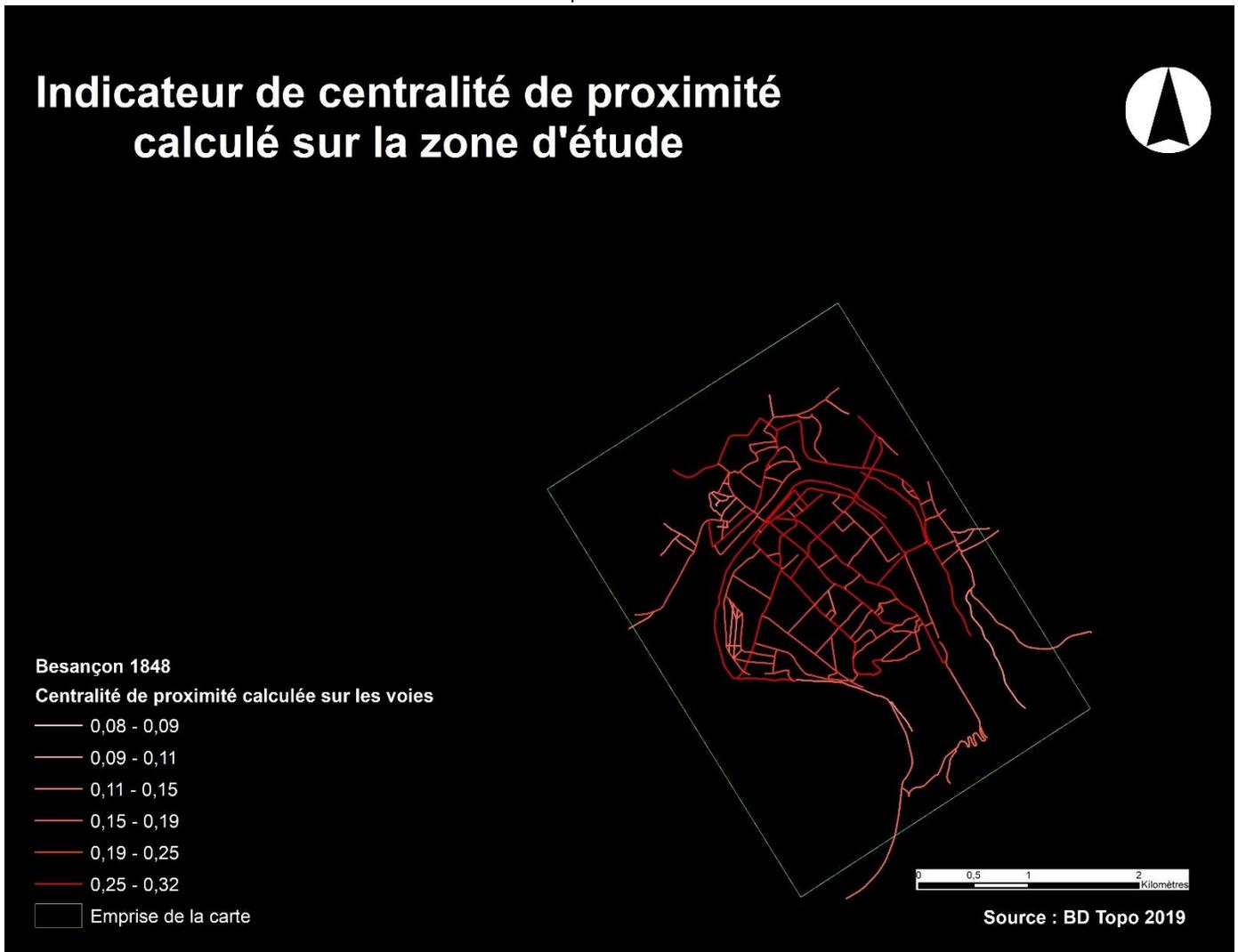


Image 59. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.

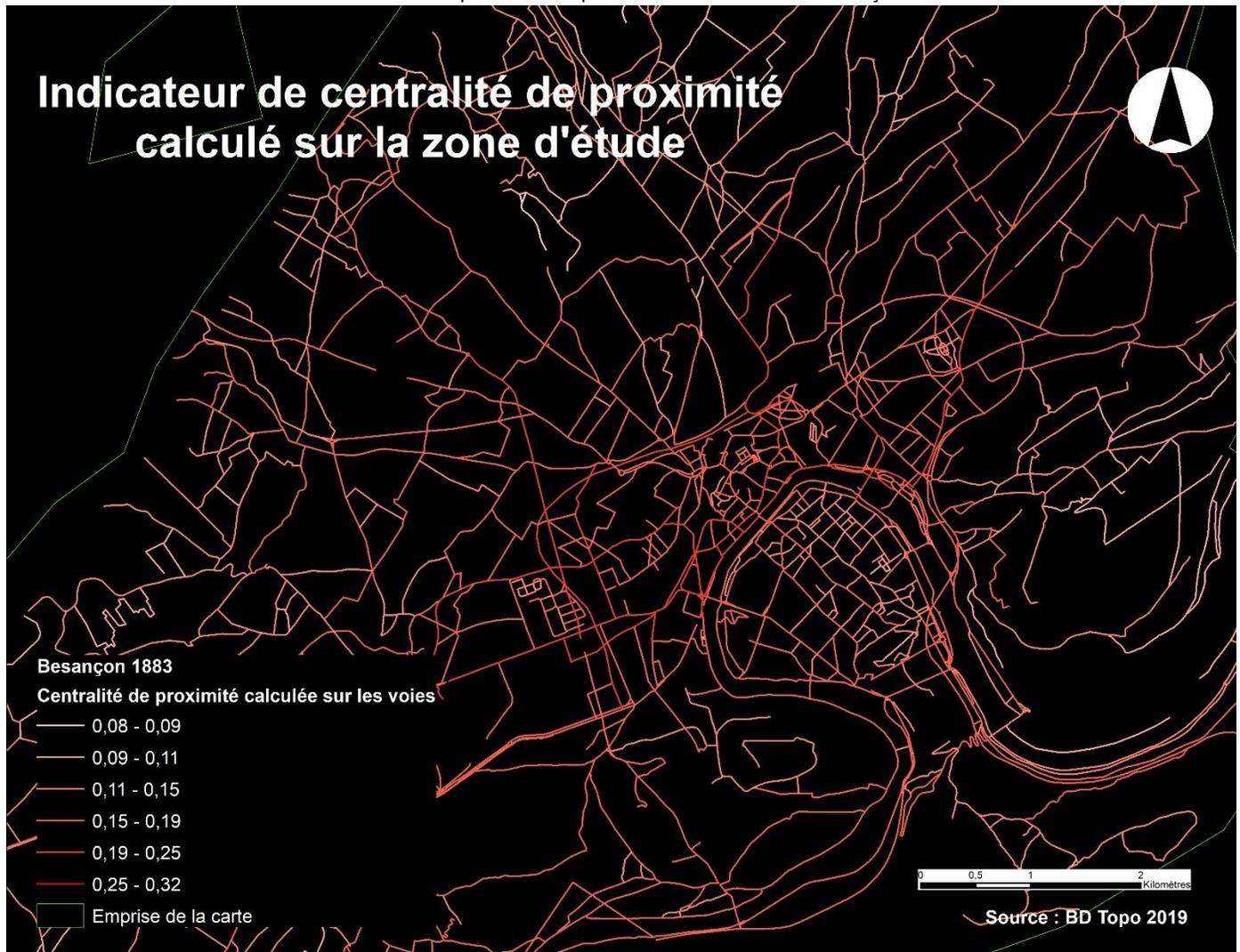
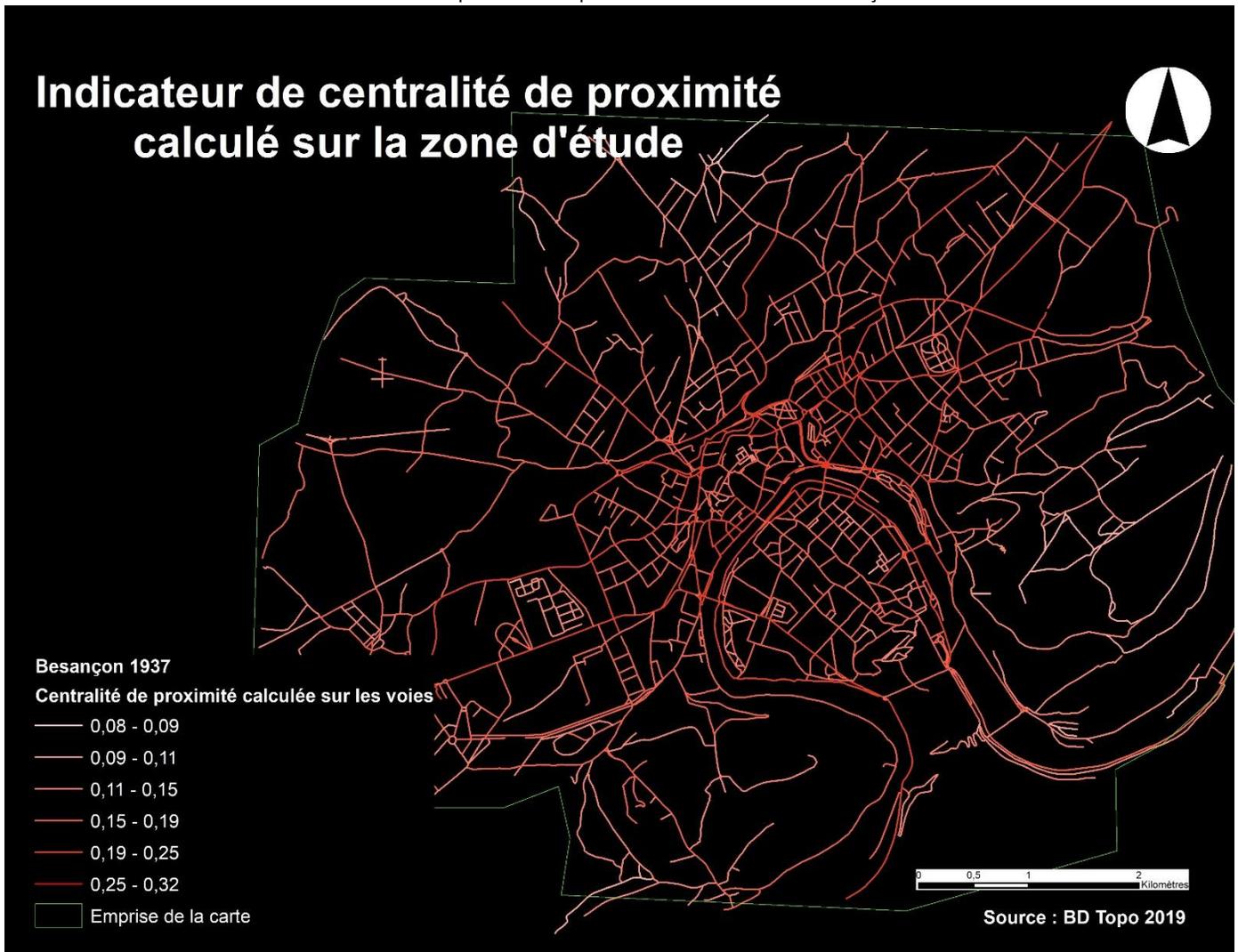


Image 60. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Besançon (1937)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



INDICATEUR DE CENTRALITE D'INTERMEDIARITE- BESANÇON

Image 61. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Besançon (1786)
Source : BD Topo 2019 et l'AD du Doubs.

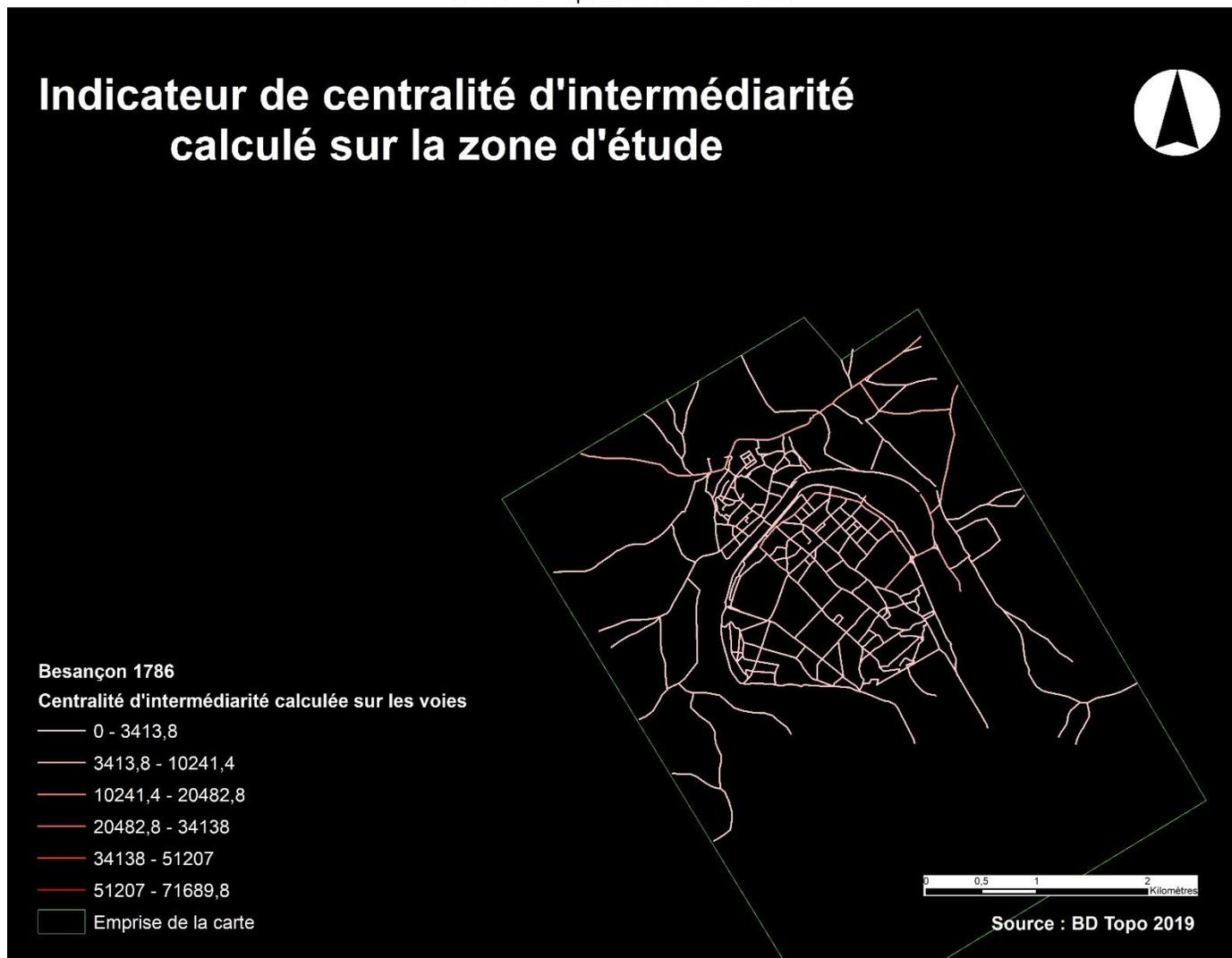


Image 62. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Besançon (1848)
Source : BD Topo 2019 et Mémoire Vive.

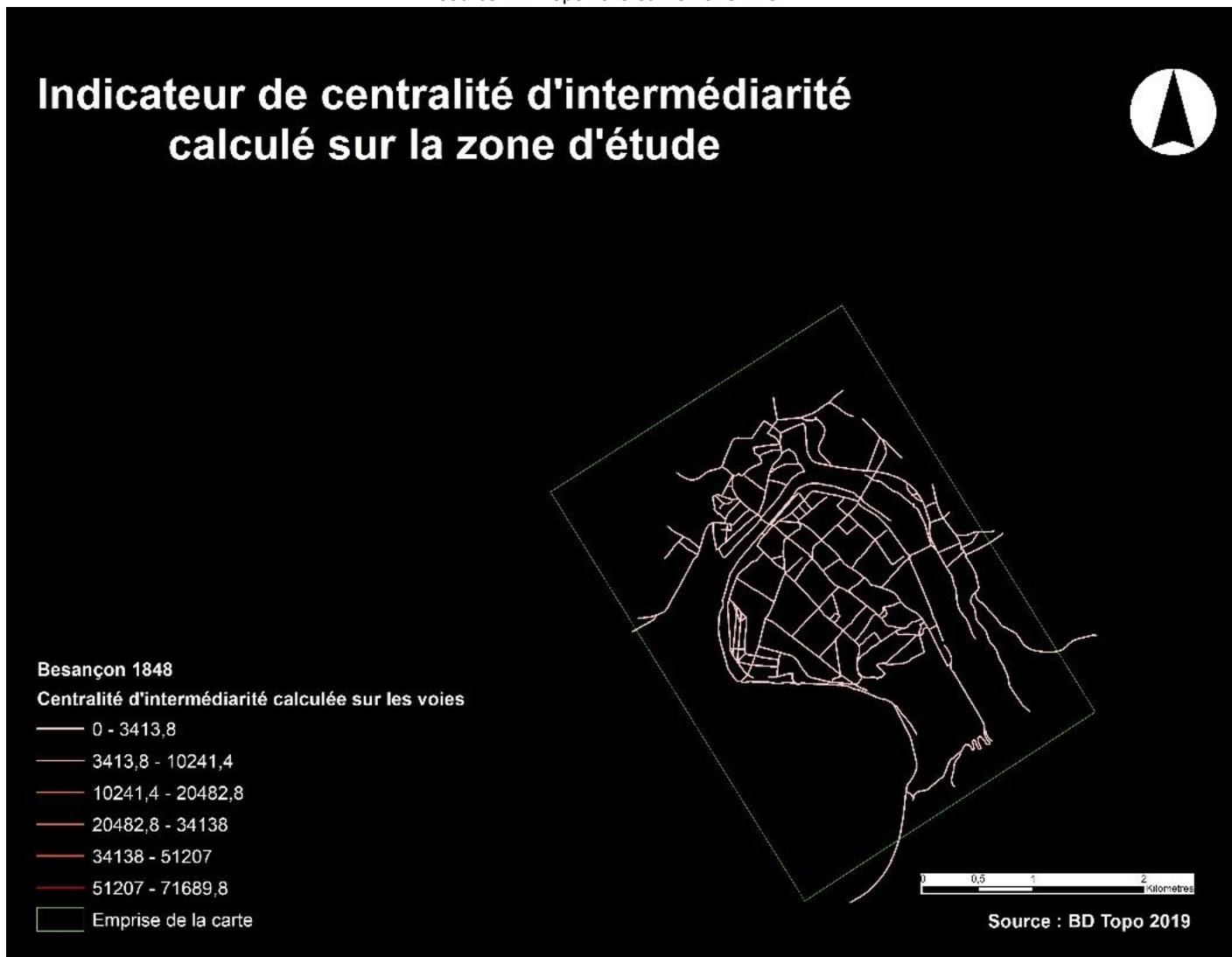


Image 63. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Besançon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.

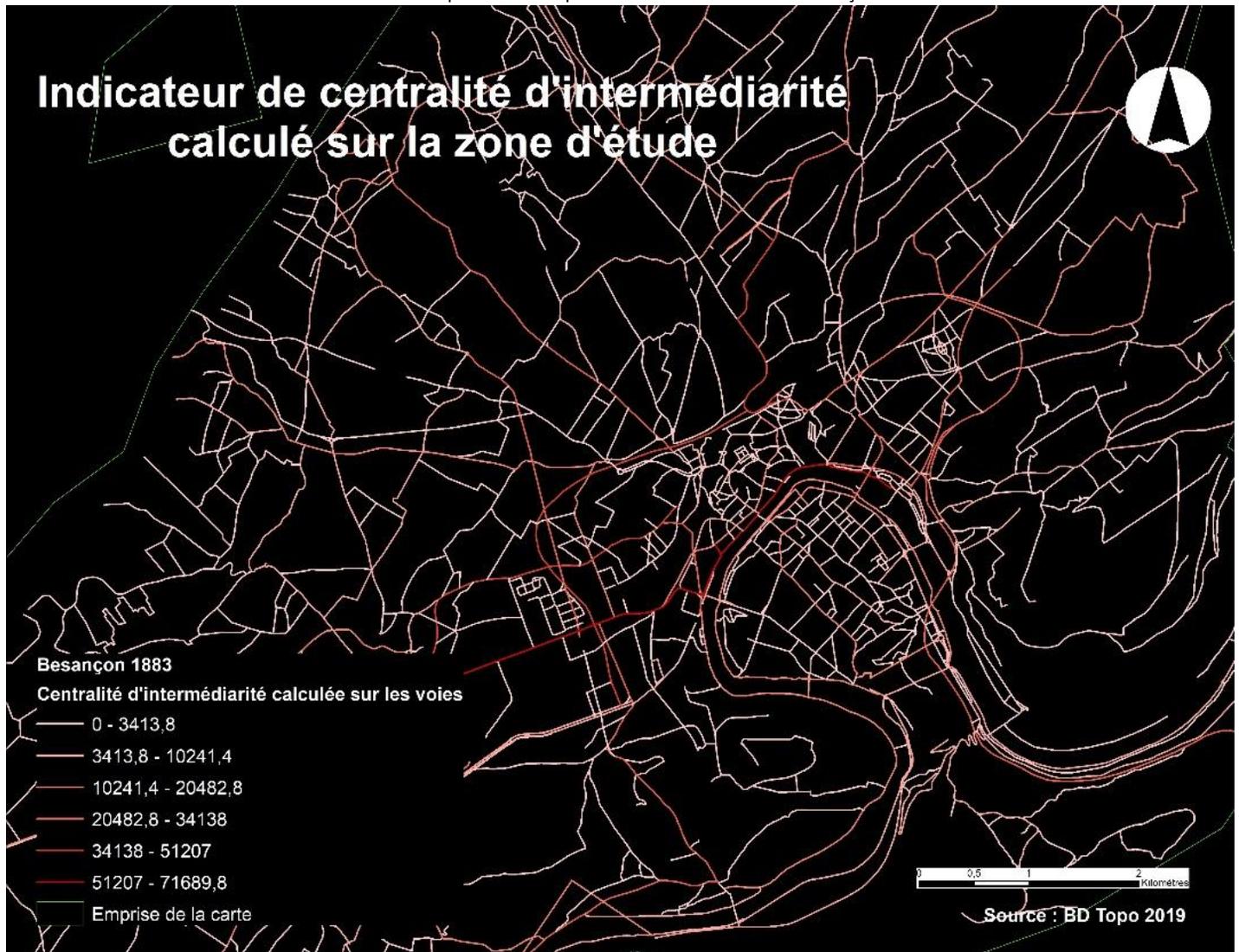
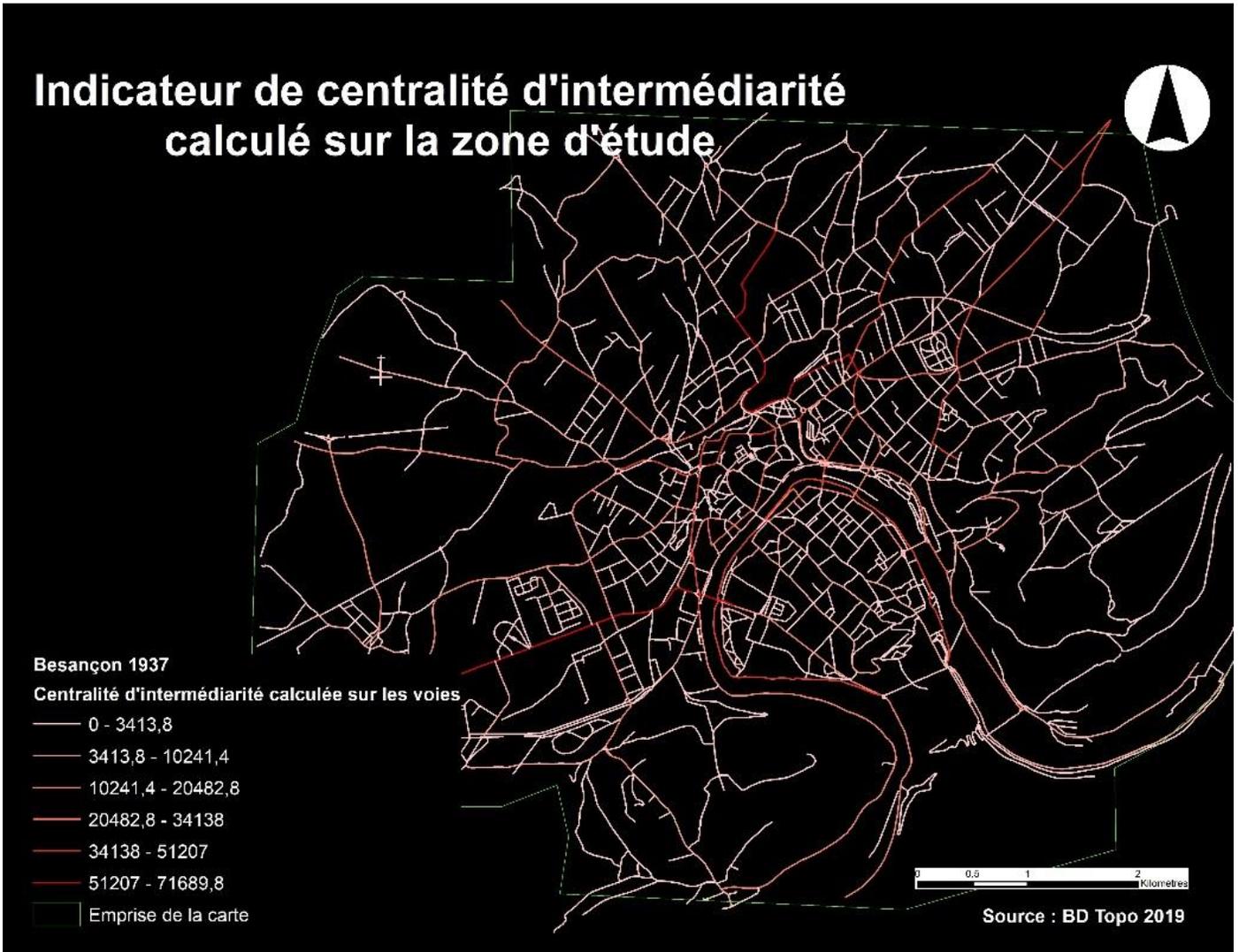


Image 64. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Besançon (1937)
Source : BD Topo 2019 et Département d'Urbanisme de Besançon.



7.21 ANNEXE 21

INDICATEUR DE DEGRE- DIJON

Image 65. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

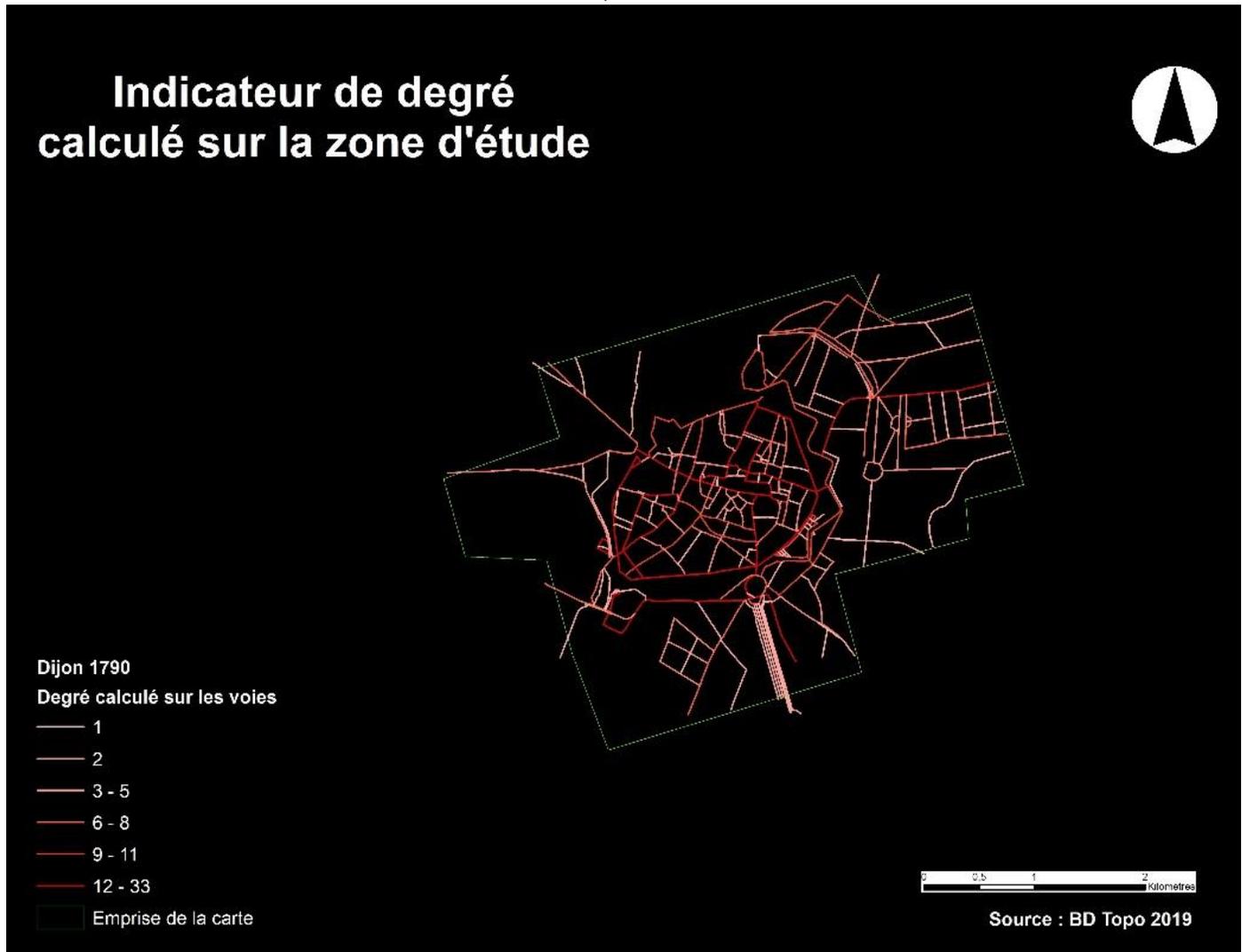


Image 66. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.

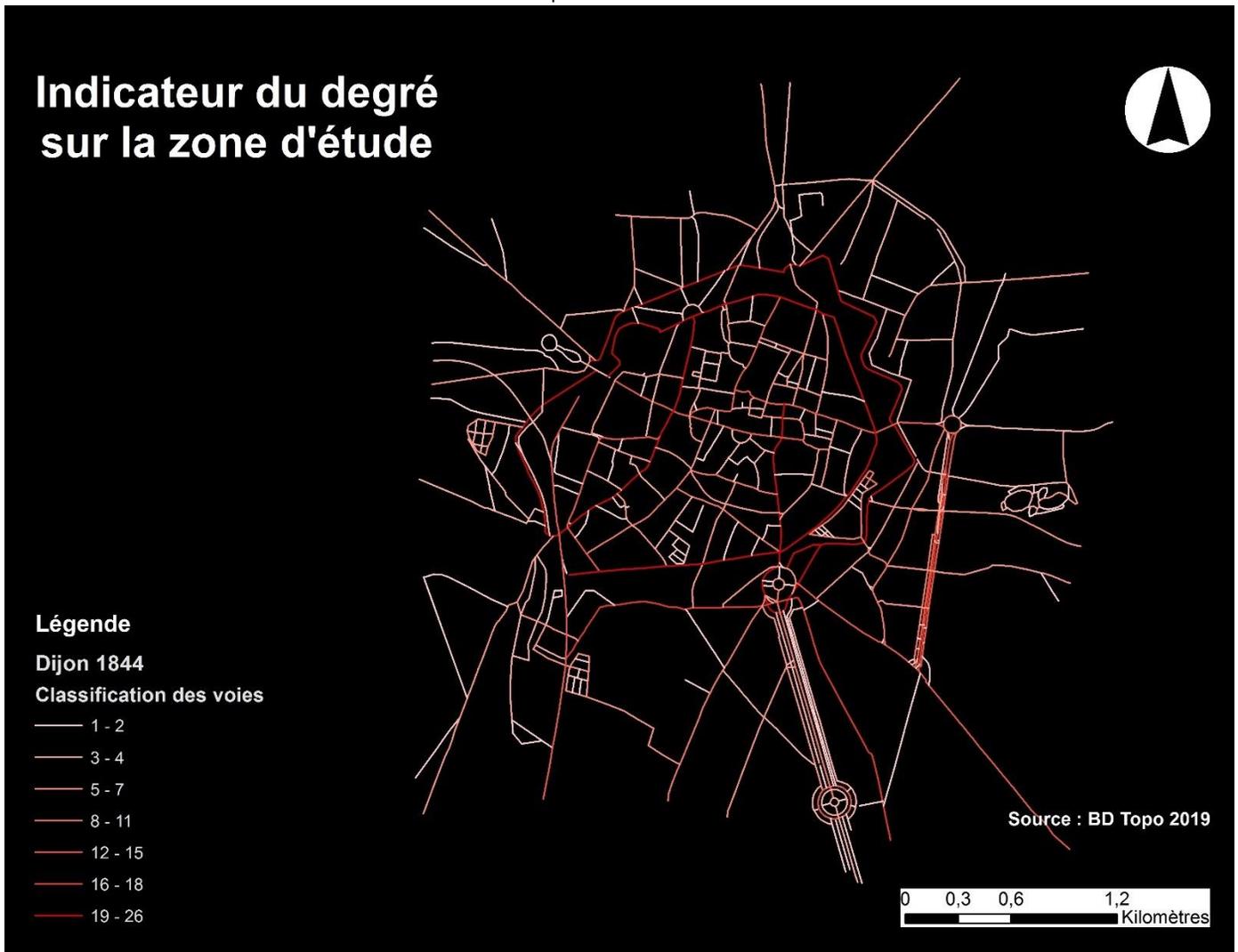


Image 67. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.

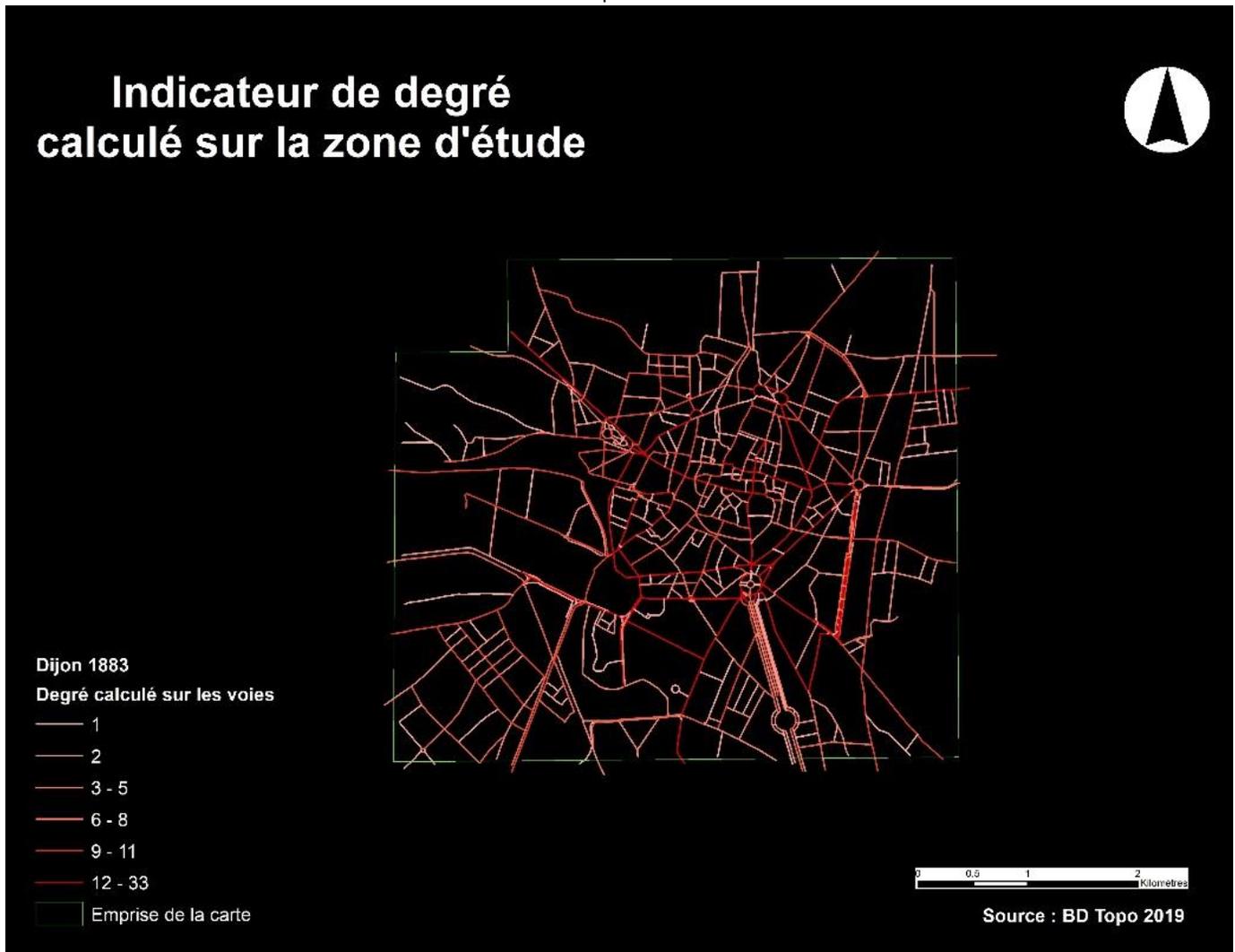
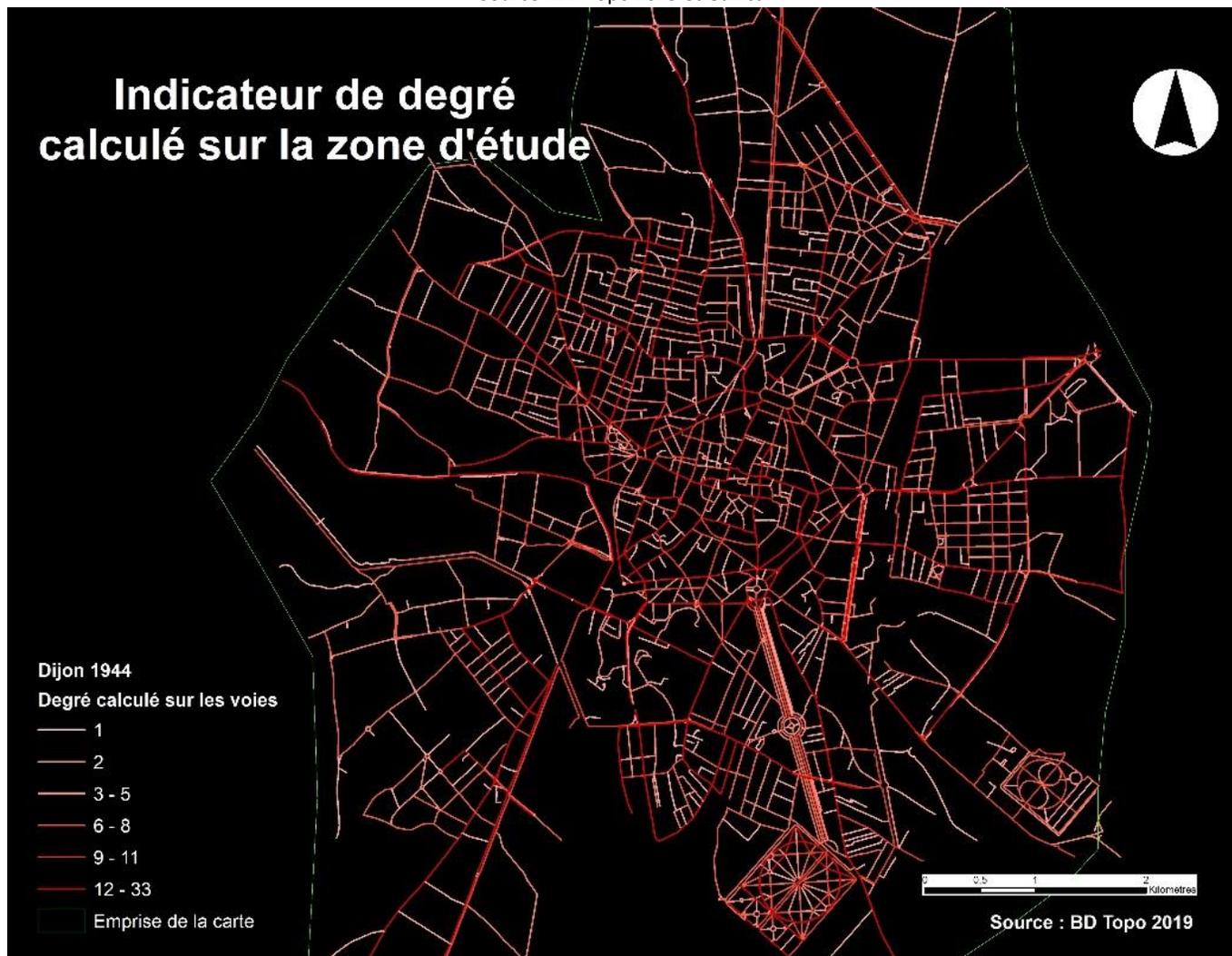


Image 68. Indicateur de degré du réseau viaire de Dijon (1944)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



7.22 ANNEXE 22

INDICATEUR DE DEGRE DE DESSERTE- DIJON

Image 69. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.



Image 70. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.



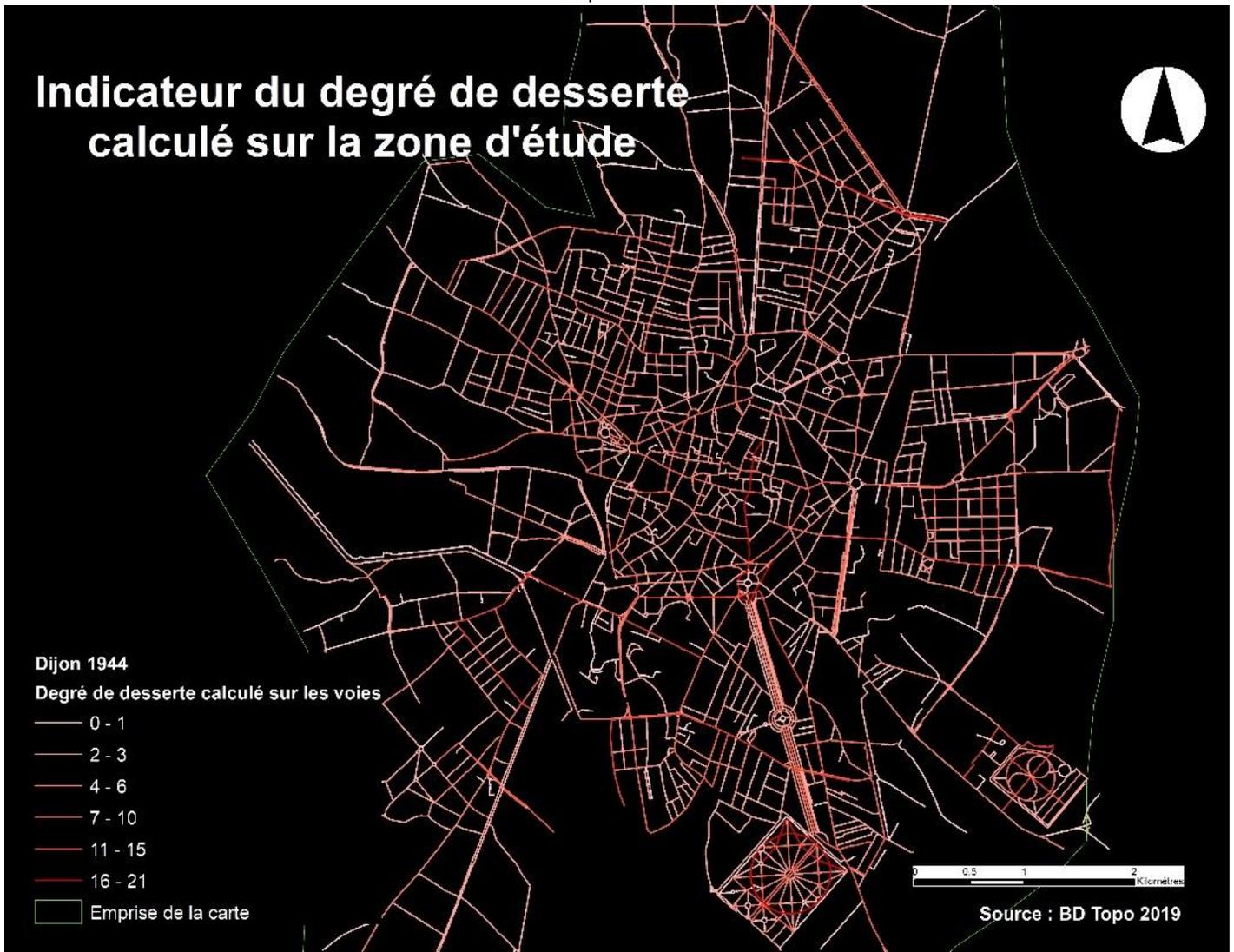
Image 71. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



Image 72. Indicateur de degré de desserte du réseau viaire de Dijon (1944)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



7.23 ANNEXE 23

INDICATEUR D'ESPACEMENT- DIJON

Image 73. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

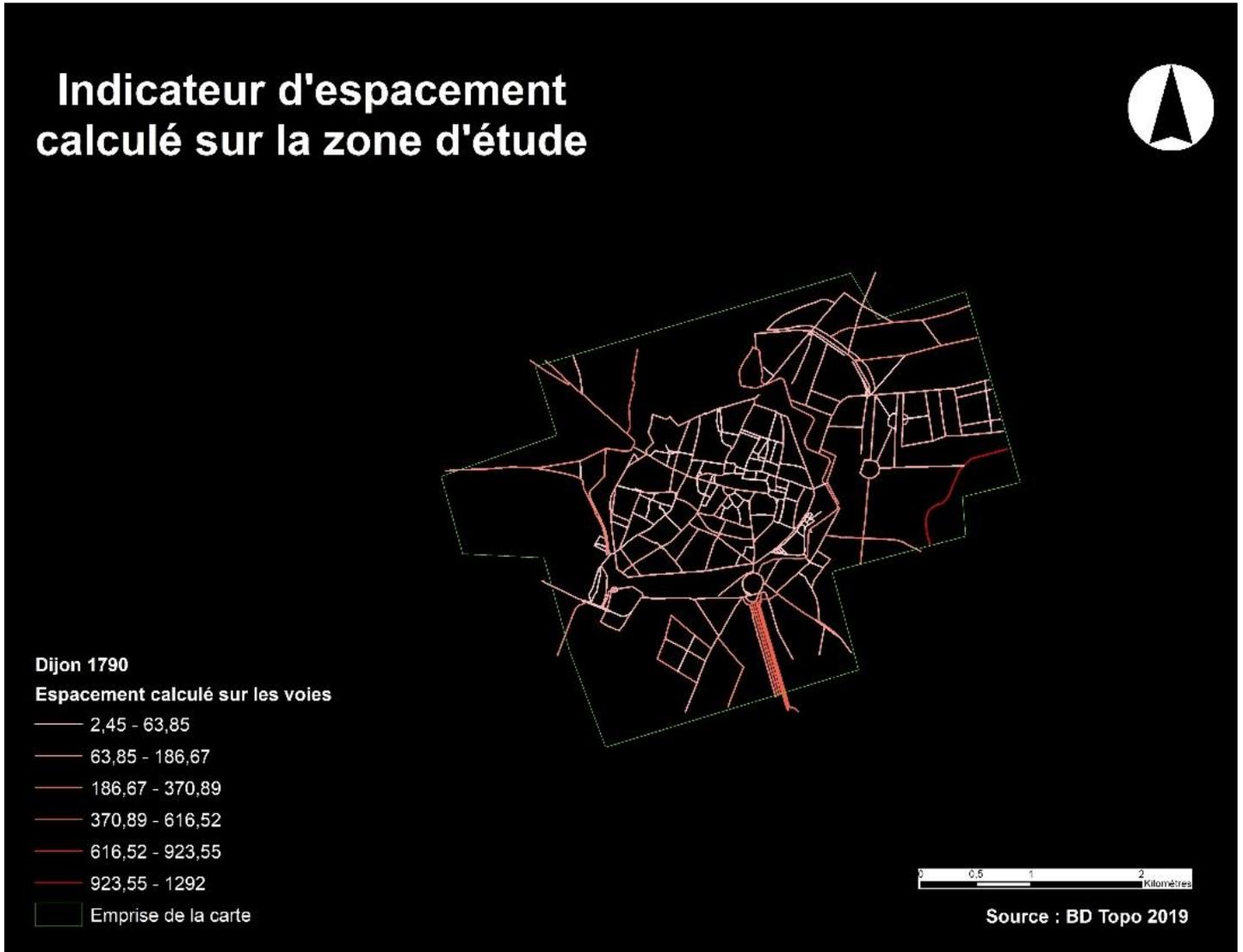


Image 74. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.

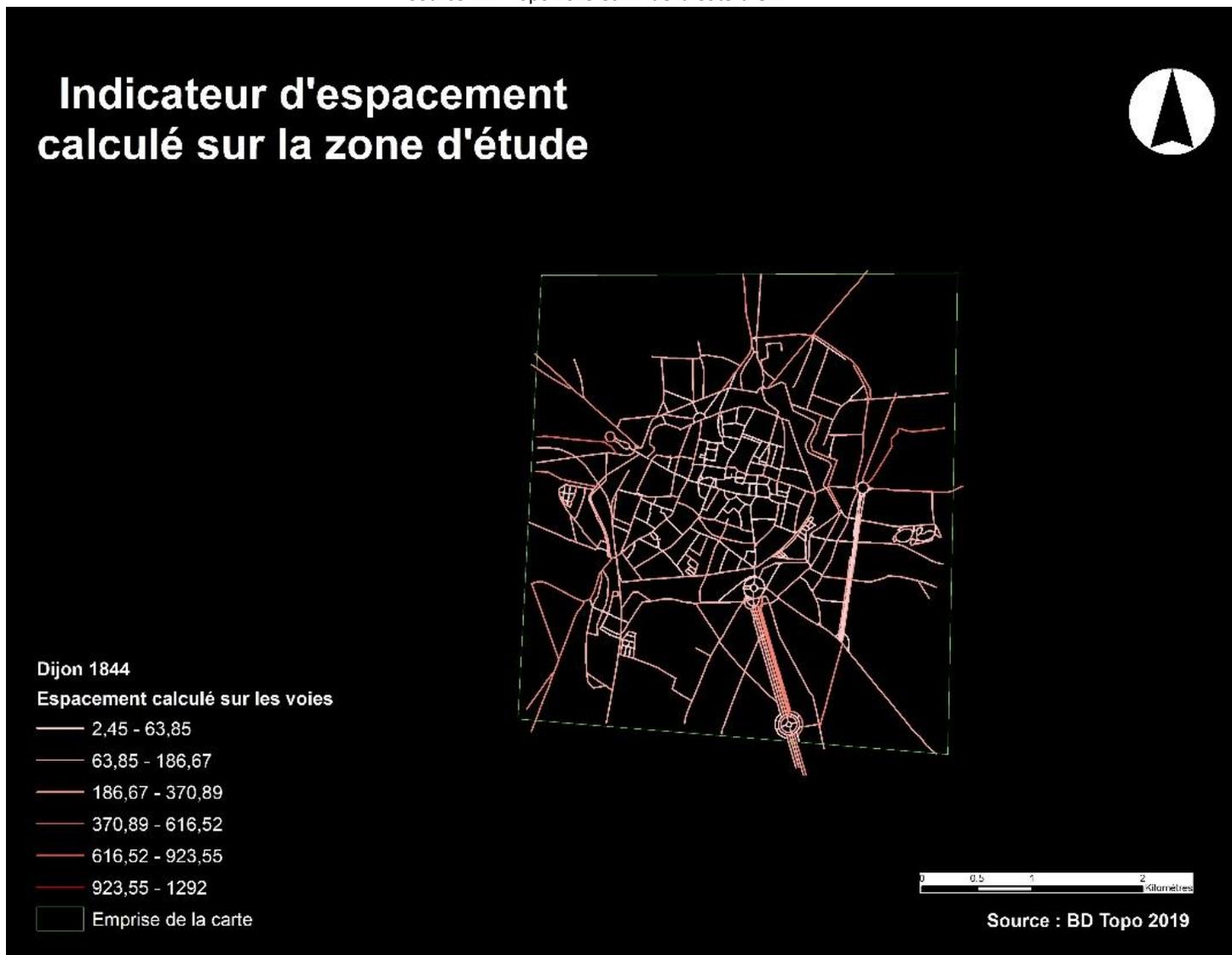


Image 75. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.

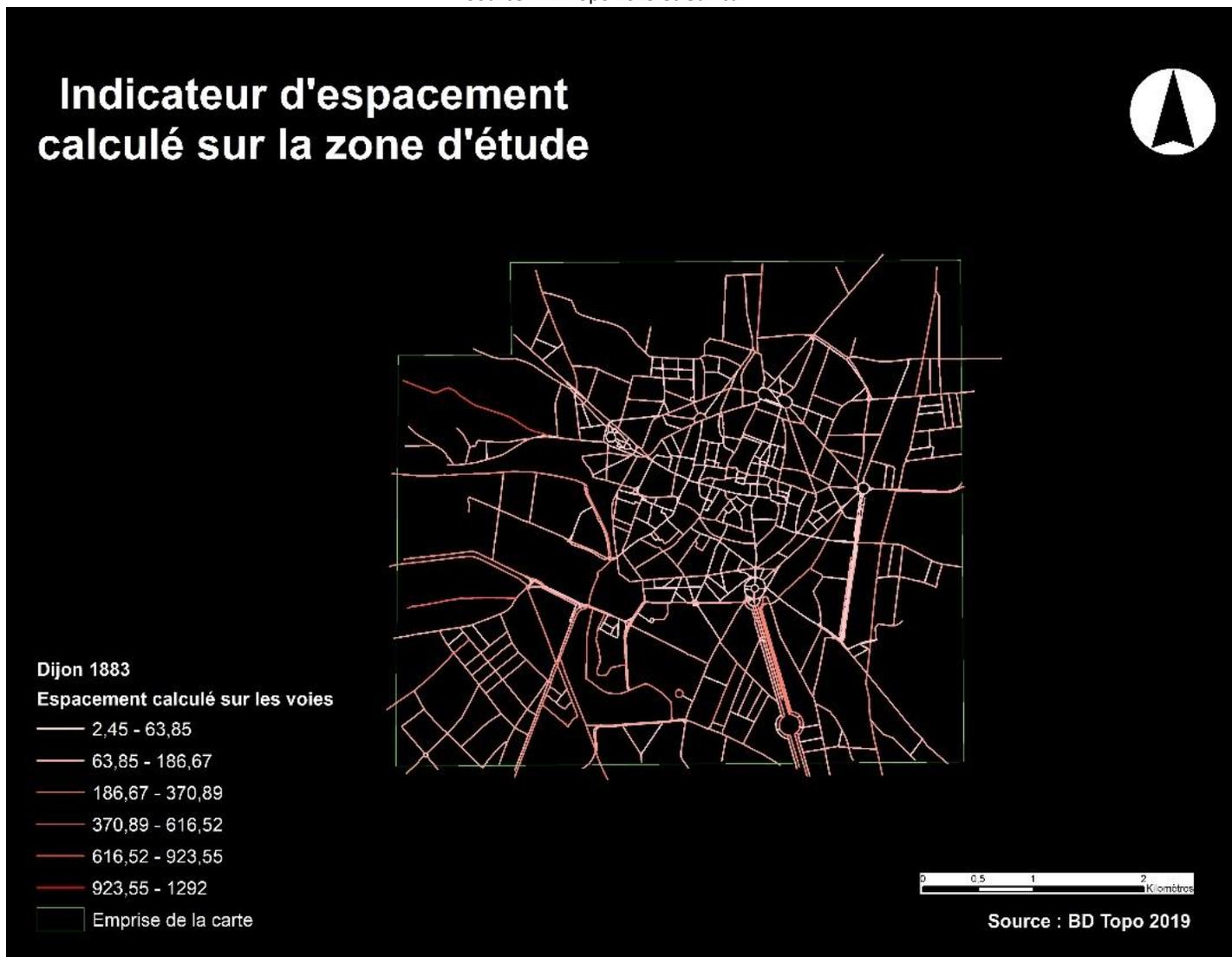
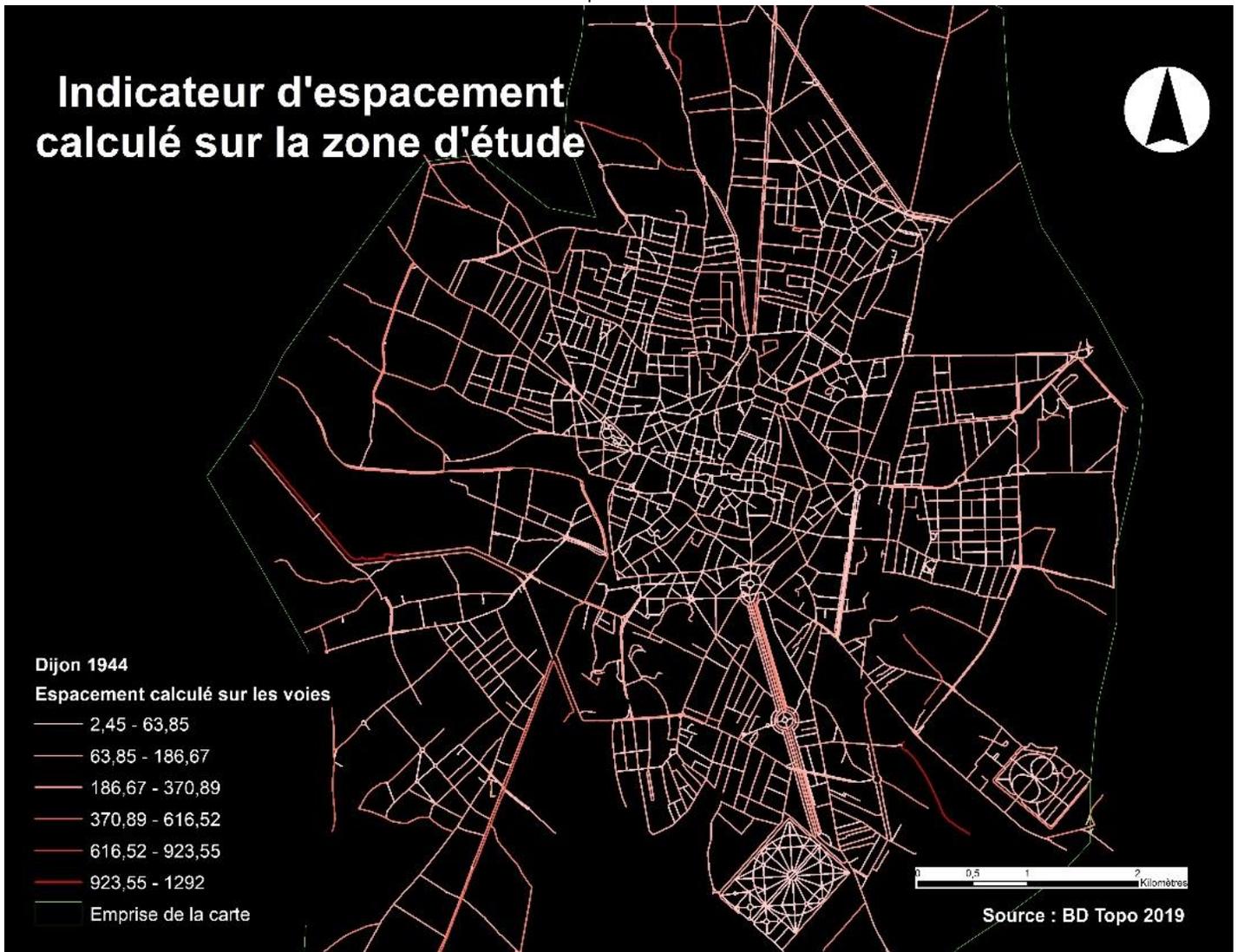


Image 76. Indicateur d'espacement du réseau viaire de Dijon (1944)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



INDICATEUR D'ORTHOGONALITE- DIJON

Image 77. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

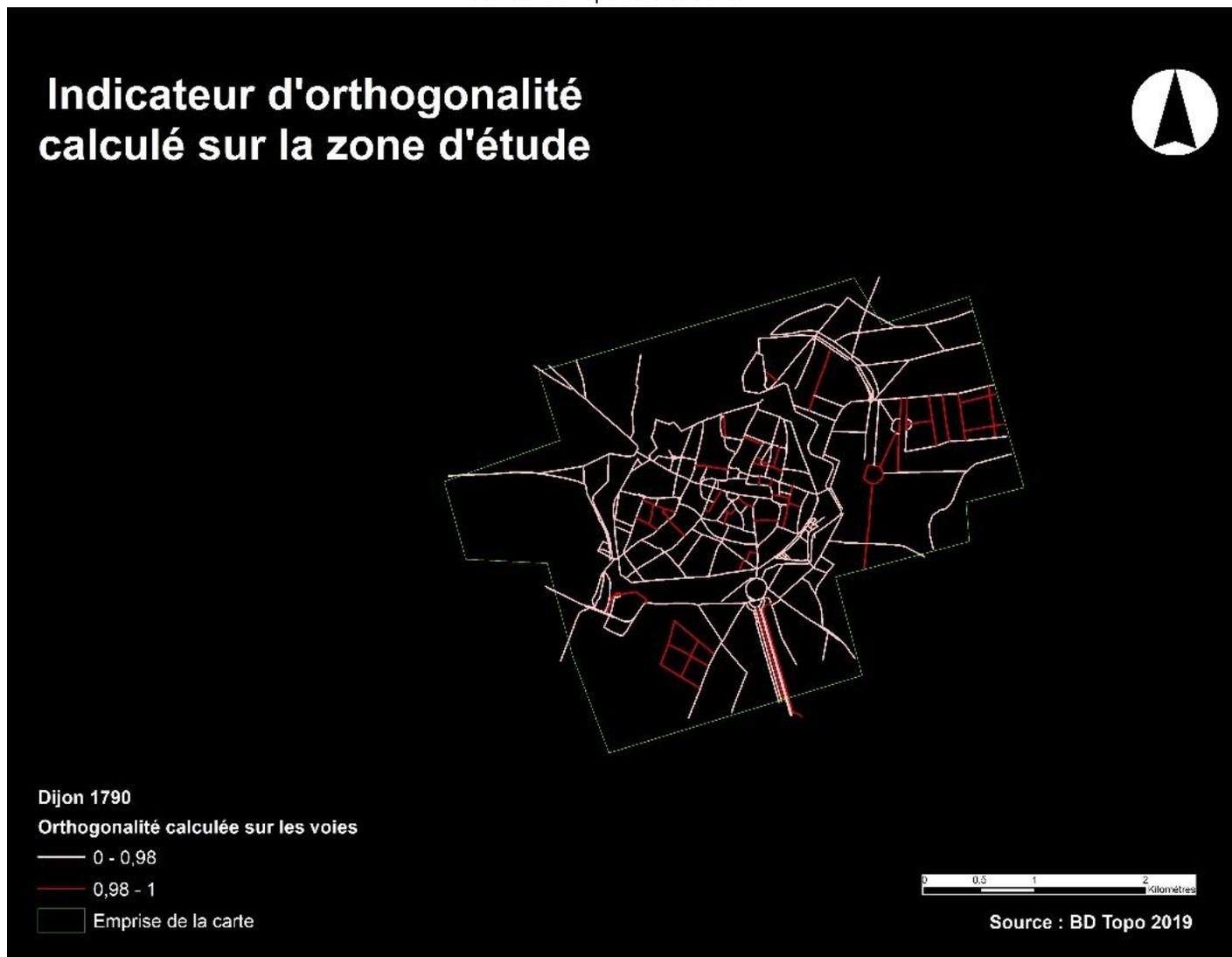


Image 78. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.

Indicateur d'orthogonalité calculé sur la zone d'étude



Dijon 1844

Orthogonalité calculée sur les voies

— 0 - 0,98

— 0,98 - 1

□ Emprise de la carte



Source : BD Topo 2019

Image 79. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1883)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.

Indicateur d'orthogonalité calculé sur la zone d'étude



Dijon 1883

Orthogonalité calculée sur les voies

— 0 - 0,98

— 0,98 - 1

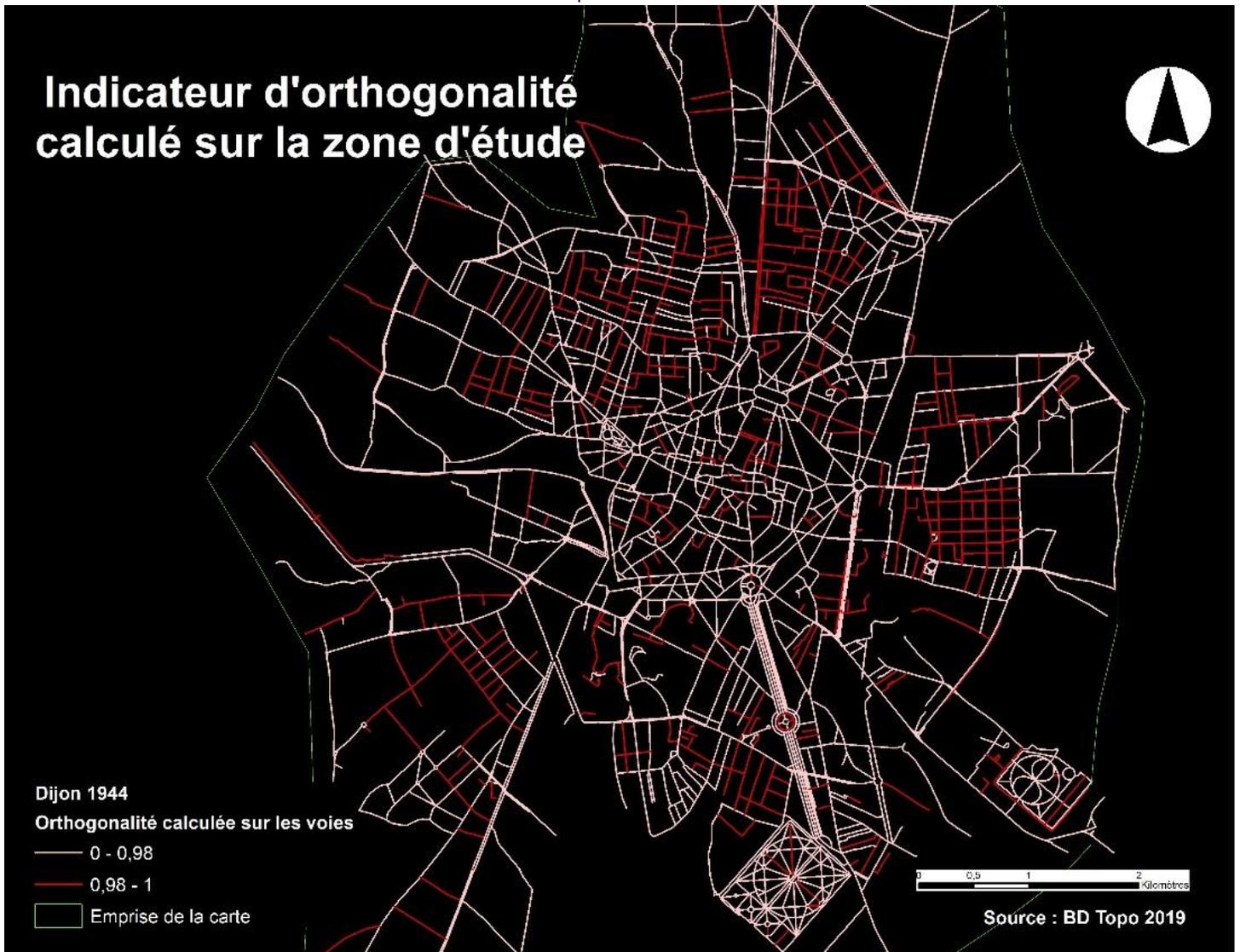
□ Emprise de la carte



Source : BD Topo 2019

Image 80. Indicateur d'orthogonalité du réseau viaire de Dijon (1944)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



7.25 ANNEXE 25

INDICATEUR DE CENTRALITE DE PROXIMITE- DIJON

Image 81. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

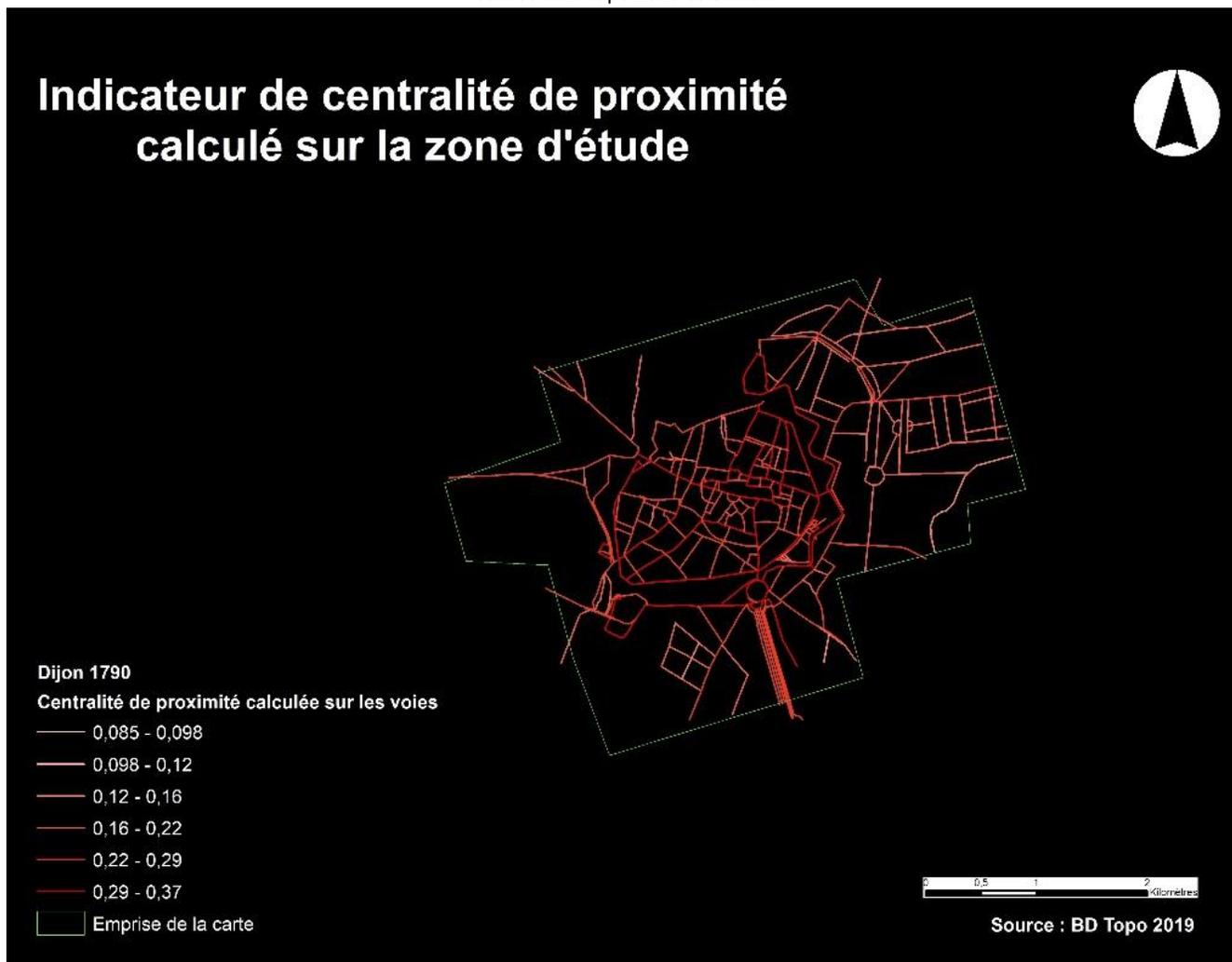


Image 82. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.

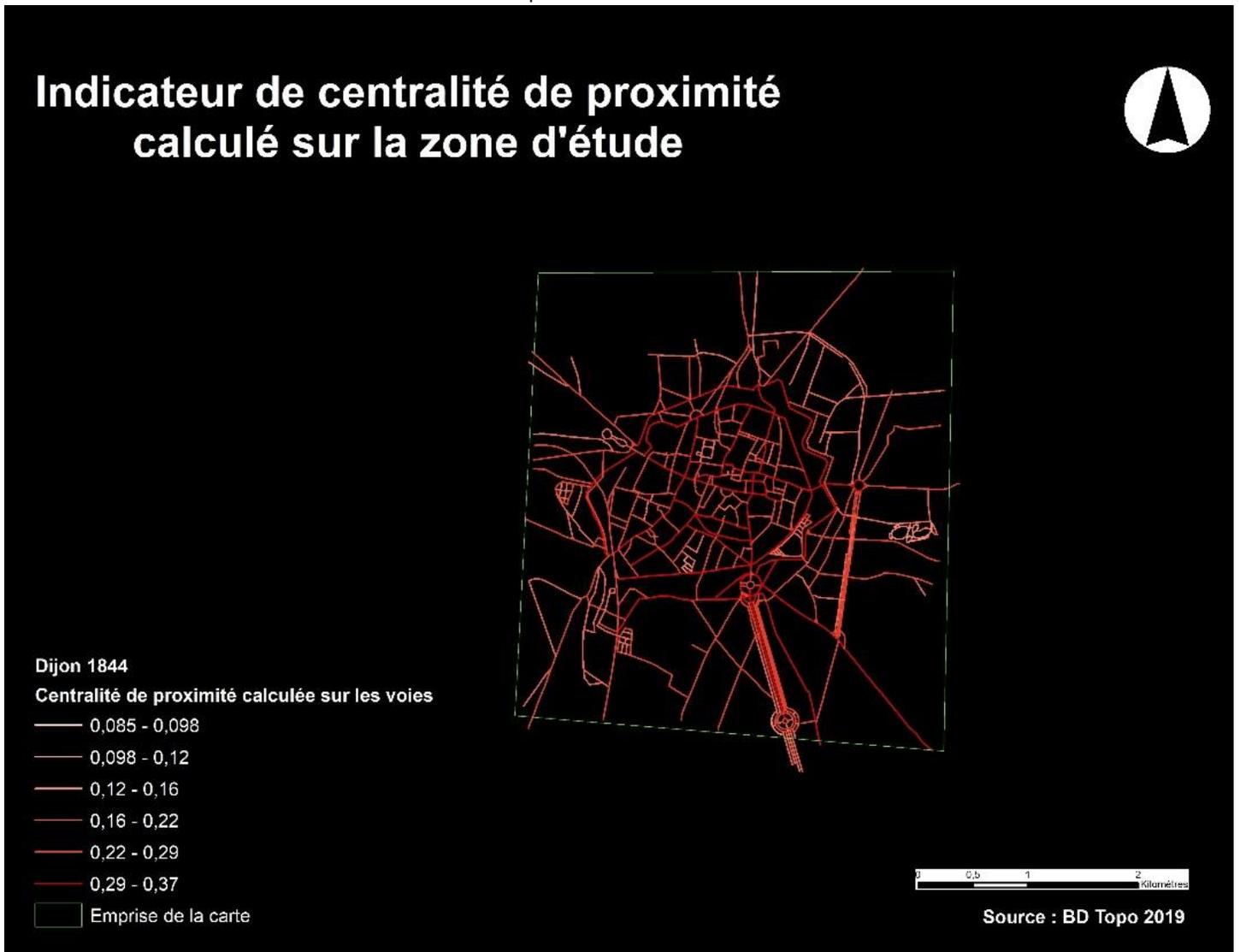


Image 83. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1883)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

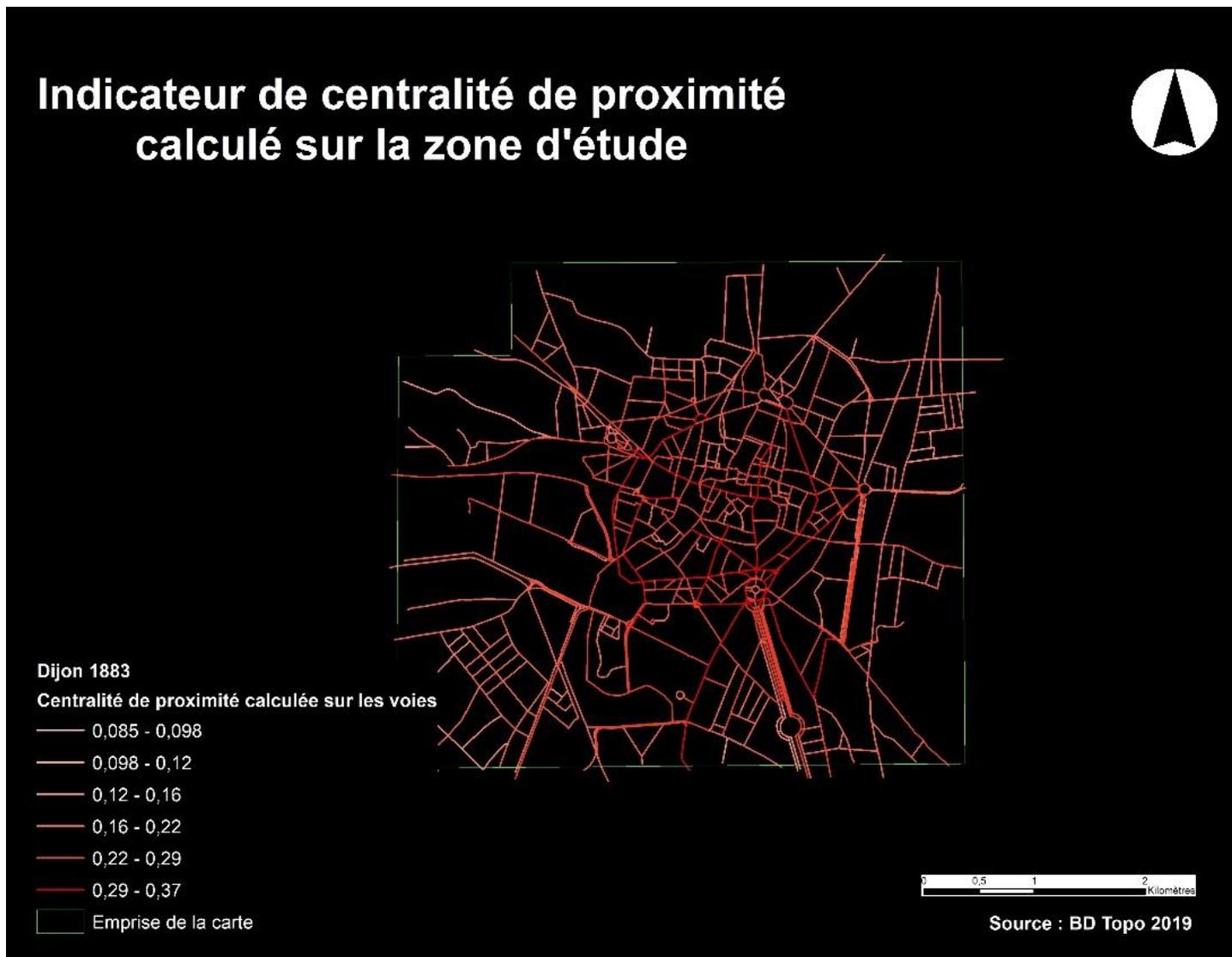
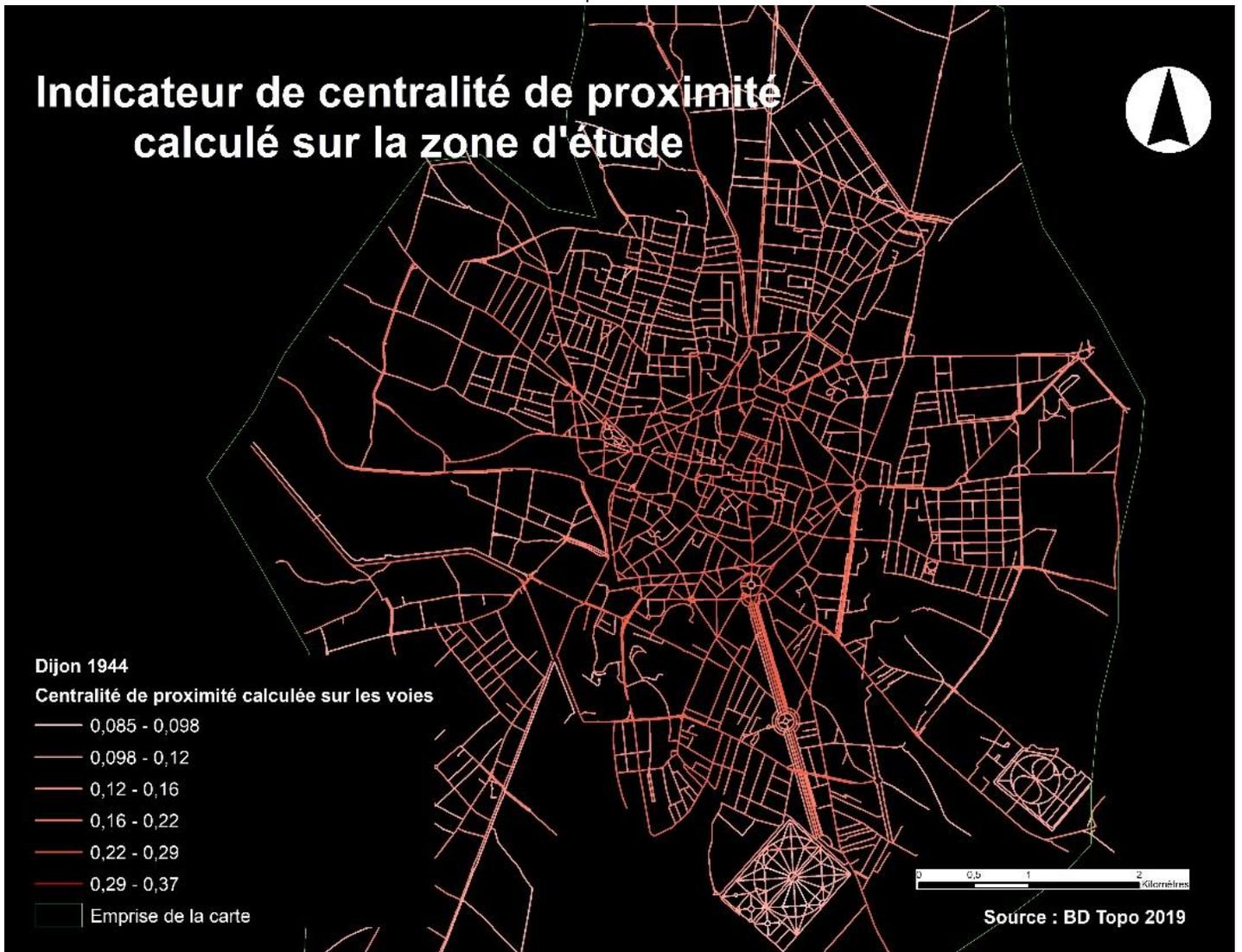


Image 84. Indicateur de centralité de proximité du réseau viaire de Dijon (1944)

Source : BD Topo 2019 et Gallica.



INDICATEUR DE CENTRALITE D'INTERMEDIARITE- DIJON

Image 85. Indicateur de centralité d'intermédiarité du réseau viaire de Dijon (1790)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

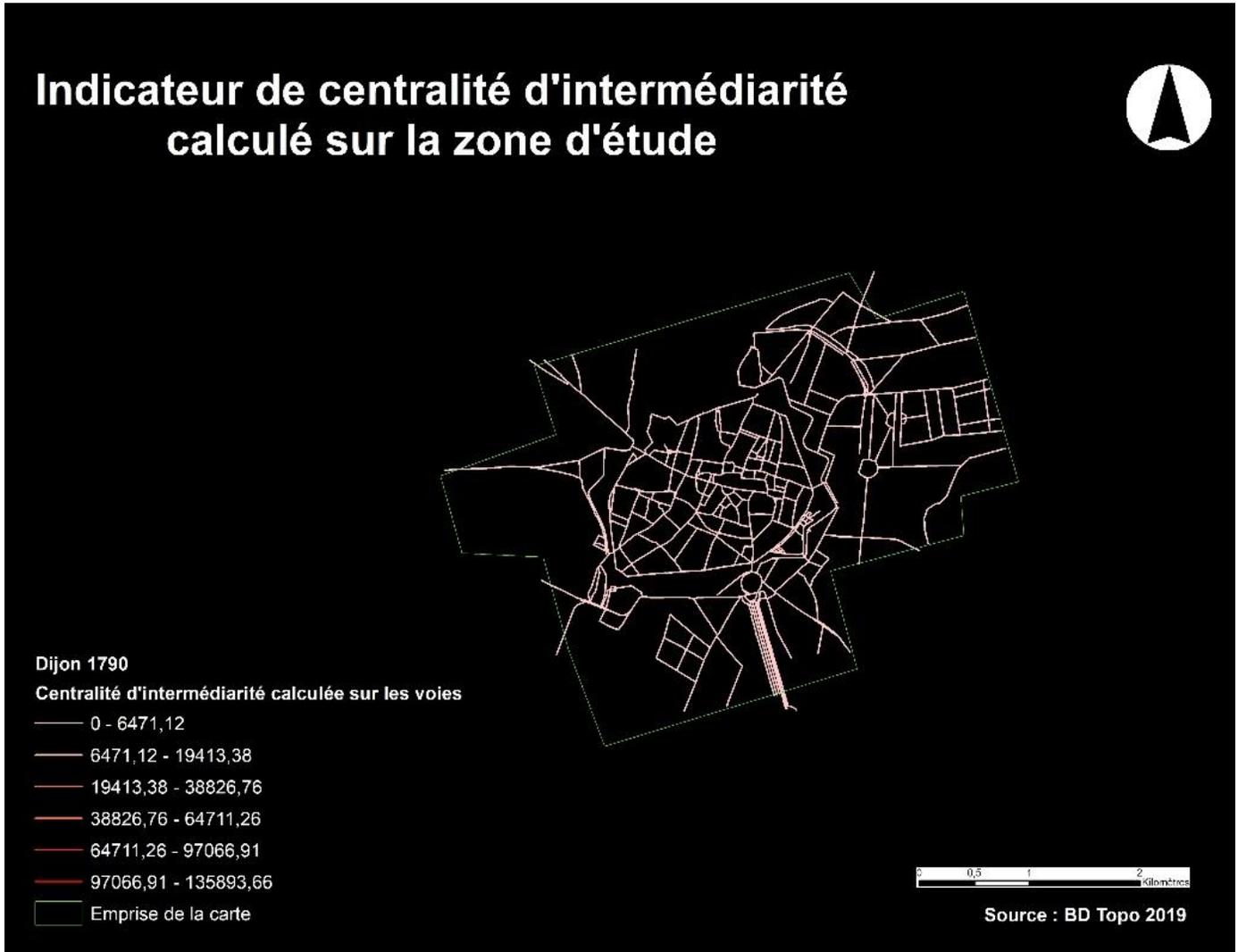


Image 86. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Dijon (1844)

Source : BD Topo 2019 et AD de la Côte-d'Or.

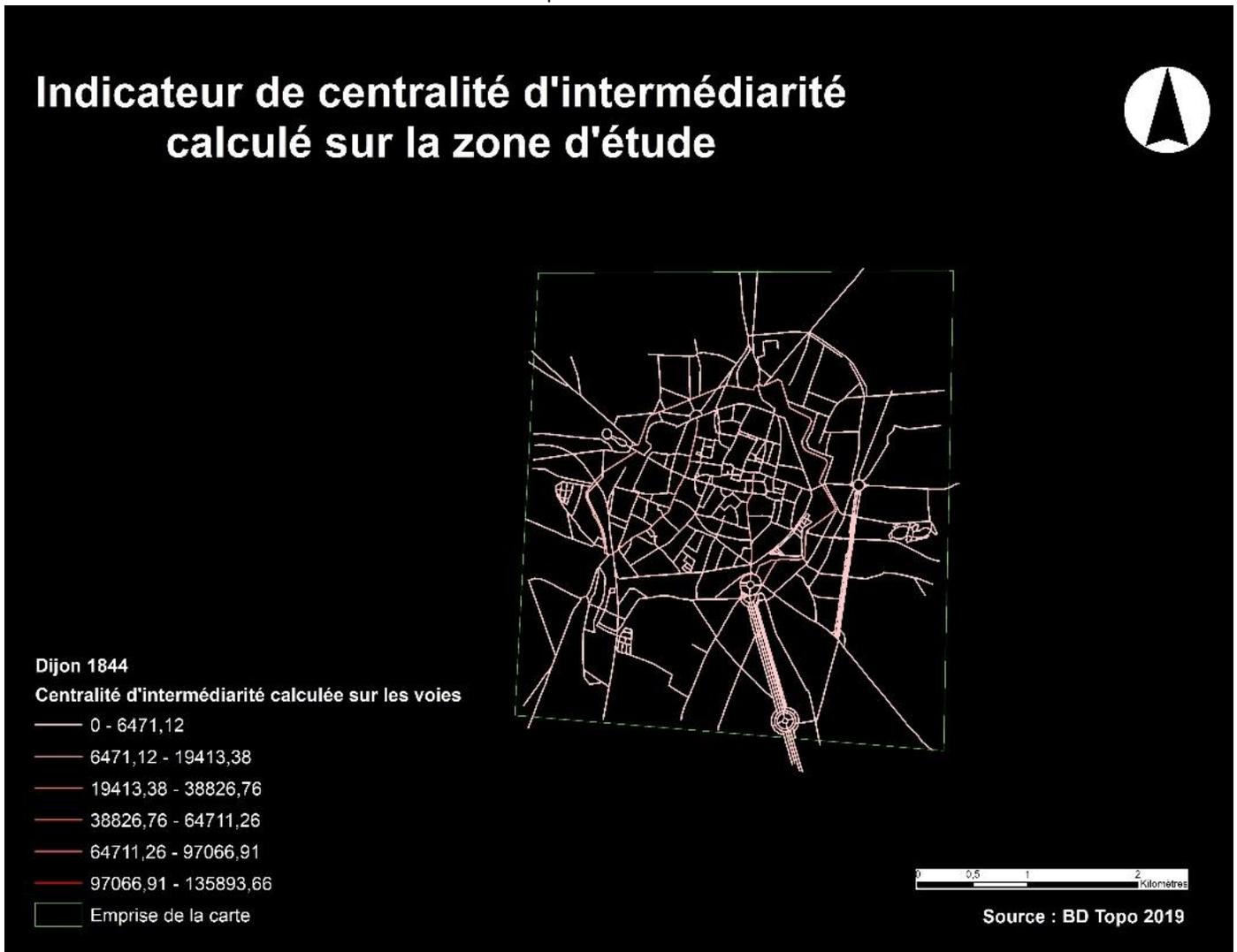


Image 87. Indicateur de centralité d'intermédiation du réseau viaire de Dijon (1883)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

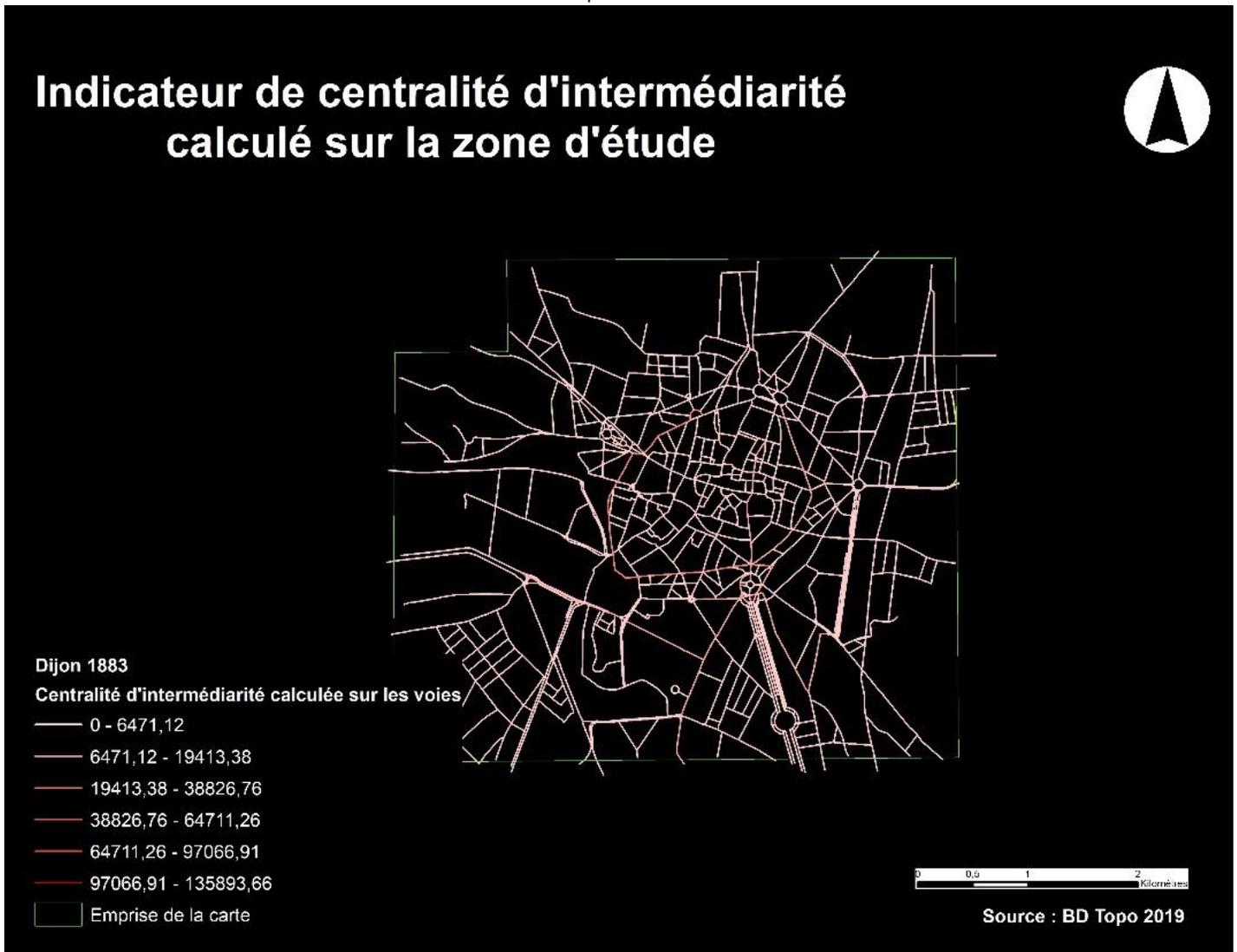


Image 88. Indicateur de centralité d'intermédiarité du réseau viaire de Dijon (1944)
Source : BD Topo 2019 et Gallica.

