HAL open science

OPTIMISER LA GESTION CONJOINTE DE LA VOIRIE ET DES RÉSEAUX ENTERRÉS À L'AIDE DE LA GÉOMATIQUE : conception d'un référentiel spatial de voirie

Antonin Pavard

To cite this version:

Antonin Pavard. OPTIMISER LA GESTION CONJOINTE DE LA VOIRIE ET DES RÉSEAUX ENTERRÉS À L'AIDE DE LA GÉOMATIQUE : conception d'un référentiel spatial de voirie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paris Est - Marne-la-Vallée; Ecole Spéciale des Travaux Publics - ESTP; Ecole des Ponts - ParisTech, 2020. Français. NNT : . tel-03245375

HAL Id: tel-03245375

https://hal.science/tel-03245375

Submitted on 1 Jun 2021

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

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

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

et réalisée à l'IRC (ESTP-Paris)

pour obtenir le grade de docteur en Sciences de l'Ingénieur

OPTIMISER LA GESTION CONJOINTE DE LA VOIRIE ET DES RÉSEAUX ENTERRÉS À L'AIDE DE LA GÉOMATIQUE : conception d'un référentiel spatial de voirie

Constructibilité à l'interface entre route et réseaux de distribution

Thèse dirigée par le professeur Bruno Tassin

Présentée et soutenue publiquement le 12 novembre 2020

Par **Antonin PAVARD**

Devant un jury composé de Mesdames et Messieurs :

Patricia Bordin, Chercheuse à l'ESTP-Paris, co-encadrante
Brice Delaporte, Adjoint au Directeur des Affaires Techniques à Routes de France, examinateur
Anne Dony, Enseignante-chercheuse à l'ESTP-Paris, co-encadrante
Lena Sanders, Directrice de Recherche du CNRS, examinatrice
Michèle St-Jacques, Professeure à l'École de Technologie Supérieure, rapporteur
Bruno Tassin, Professeur à l'École des Ponts ParisTech, directeur de thèse
Thomas Thévenin, Professeur à l'Université de Bourgogne, rapporteur

Thèse financée par la Fondation de l'ESTP-Paris

Remerciements

Ces trois dernières années, j'ai été confronté à une question classique que l'on pose à tous les doctorants « *mais en fait, pourquoi as-tu décidé de faire une thèse ?* ». Moi-même, je me suis régulièrement posé cette question, et il m'a bien fallu trois ans pour y répondre. Voici ma réponse :

Je n'ai pas décidé de faire une thèse, mais plutôt, j'ai décidé de faire de la recherche. Avant de me lancer dans la thèse, j'ai découvert et évolué dans la recherche à travers les rôles d'ingénieur d'études puis de chargé d'études indépendant. Durant sept années, j'ai rencontré et collaboré avec des acteurs de la recherche : des chercheurs dont c'est l'activité principale bien sûr, mais aussi des ingénieurs, techniciens et administratifs qui accompagnent les chercheurs au quotidien. Certain.e.s, par leur implication, leur partage, leur vision du monde de la recherche, et plus globalement de la vie, m'ont donné envie de poursuivre sur cette voie. Pour cela, je remercie tous les membres de l'UMR Géographie-cités, et tout particulièrement les personnes avec lesquelles j'ai le plus collaboré : Sophie Baudet-Michel, Anne Bretagnolle, Véronique Degout, Edwige Dubos-Paillard, Marianne Guérois, Martine Laborde, Liliane Lizzi, Saber Marrouchi, Hélène Mathian, Lena Sanders, et bien sûr, Joël Boulier, celui qui m'a lancé le défi de la thèse.

J'ai vu dans la thèse une autre façon de m'investir et de découvrir la recherche. En d'autres termes, réaliser une thèse était l'occasion de vivre différemment la recherche, de débuter une nouvelle aventure. Puisqu'il est question d'aventure, je dirais qu'une thèse c'est un peu comme naviguer en pleine mer : on peut toujours partir seul, mais avec le risque de ne pas arriver à bon port, ou de ne pas arriver du tout. Un doctorant, c'est un marin débutant, qui parfois connait déjà la mer mais n'a jamais eu l'occasion de gouverner un navire. Il doit alors être entouré d'autres marins plus aguerris qui connaissent toutes les subtilités de la navigation. J'ai eu la chance de lever l'ancre bien accompagné. Je remercie très sincèrement Patricia Bordin et Anne Dony de m'avoir accompagné pour cette traversée aussi bien par temps calme que par tempêtes. Nos discussions qu'elles aient été scientifiques, sociétales, philosophiques ou encore personnelles ont enrichi cette belle expérience. J'adresse également mes remerciements à Bruno Tassin pour avoir accepté de diriger cette thèse et de m'avoir accompagné notamment lors des réunions du comité de thèse. J'apparente ces réunions aux escales essentielles aux grands voyages maritimes. Ils permettent au doctorant de faire le point sur son parcours passé et à venir, ainsi que de se ravitailler en nouvelles informations et questions. Ainsi je remercie vivement tous les membres du comité de thèse pour le temps qu'ils m'ont accordé, et les savoirs qu'ils ont partagés : Pascal Aussant de GRT Gaz, Joël Boulier de l'Université Paris 1, Jean-Pierre Christory consultant expert voirie, Dimitri Durin d'Eurovia, Michel Hardy de GRT Gaz, Laurent Royon de l'Université Paris 7 ainsi que Jean Waryn de Valentin Entreprise. Au-delà, je remercie tous les professionnels qui ont pris le temps de me rencontrer ou d'échanger avec moi à distance. La liste étant longue, je me contrains ici à ne citer que les institutions en espérant être le plus exhaustif possible : Les services voirie et SIG des villes de Drancy, de le Perray-en-Yvelines et de l'EPT du Grand Orly Seine et Bièvre ; le

service SIG de la ville de Rouen ; les services voirie, équipements et assainissement du département du Val-de-Marne ; la division de la planification de l'état des infrastructures de la Ville de Québec ; le service des infrastructures du Réseau Routier de la ville de Montréal ; la direction technique et industrielle de GRDF ; la direction technique d'Enedis ; les membres de Routes de France.

Au même titre qu'un marin a besoin d'équipements pour prendre la mer, un doctorant a besoin d'un environnement propice, d'un financement et de matériel pour mener à bien ses recherches. Je remercie sincèrement la Fondation de l'ESTP-Paris pour avoir financé les trois années de thèse, ainsi qu'Eric Croquesel Directeur de l'IRC et toute l'équipe de l'Institut pour m'avoir accueilli. Mes remerciements vont notamment à Layella Ziyani pour avoir pris le temps de me former aux matériaux bitumineux et d'avoir partagé avec moi les TPs. Je remercie également les doctorants de l'IRC avec lesquels j'ai partagé de bons moments et de belles discussions, ainsi qu'aux nombreux stagiaires qui ont égayé le quotidien du laboratoire du printemps à l'automne. Bien sûr, je remercie tout particulièrement les stagiaires qui ont travaillé avec moi et qui ont contribué à l'avancement de ma thèse : Manon Deshayes, Fahima Khelifa, Sara Barbouchi et Ouafia Hakkoum. Je n'oublie pas celle qui a donné de son temps, de sa bonne humeur et de sa voix à la Recherche, Dorothée Thorailler. Plus largement, je remercie également les collègues des différents services de l'ESTP-Paris avec lesquels j'ai pris plaisir à discuter.

Pour poursuivre dans la métaphore, ce manuscrit peut s'apparenter à un carnet de bord retraçant les trois années de thèse. Il ne serait pas ce qu'il est sans les relectures ponctuelles ou complètes de nombreuses personnes. Je tiens alors à remercier à nouveau mes encadrantes pour leur relecture de fond, ainsi que Joël Boulier et Jean-Pierre Christory pour leur relecture ciblée sur les parties propres à leurs spécialités. Je remercie vivement aussi Aurélien et mon père pour leur relecture marathon de toutes les parties de ce travail, ainsi que Ryma, Natalia et Marianne pour leur relecture ciblée et leur soutien notamment dans les moments les plus critiques. Toutes ces contributions m'ont permis de soumettre mon travail dans de bonnes conditions à un jury pluridisciplinaire. J'exprime toute ma gratitude à Michèle St-Jaques et à Thomas Thévenin d'avoir accepté le rôle de rapporteur ainsi qu'à Brice Delaporte et à Lena Sanders pour leur participation au jury en tant qu'examinateurs.

Finalement, je remercie toutes les personnes, famille, amis, collègues anciens et présents qui m'ont accompagné dans cette aventure académique, professionnelle et ô combien humaine !

Résumé – Abstract

Résumé : La densification des réseaux de distribution en sous-sols urbains exige de fréquentes interventions ; celles-ci génèrent des impacts sur les chaussées et leurs dépendances composant l'infrastructure routière, que l'on nomme communément « voirie ». Au-delà de leurs coûts financiers les interventions occasionnent des désagréments pour les usagers (entrave à la circulation, niveau sonore, etc.) et tendent à fragiliser la structure des éléments de la voirie. Cette thèse a pour objectif de s'interroger sur l'optimisation de ces interventions et d'améliorer la coordination des intervenants en s'appuyant sur des référentiels spatiaux alimentés de données relatives à la voirie et à son environnement. Ces informations sont collectées, intégrées et modélisées dans un Système d'Information Géographique où sont géo-référencés la voirie et ses éléments constitutifs. Pour cela, un processus de modélisation est mis en place, en quatre étapes, et permettant aux gestionnaires de voirie d'améliorer graduellement les connaissances liées à leurs voiries (qu'elles soient sommaires ou avancées) : 1/ dans un premier temps, nous décrivons les éléments constitutifs de la voirie pour en proposer une vision compatible et harmonisée entre les intervenants ; 2/ à partir de l'analyse de données géographiques existantes, nous identifions ensuite différentes approches de modélisation de voirie selon les cas étudiés et les besoins des gestionnaires. Nous proposons ainsi un référentiel spatial de voirie, pour lequel est développée une méthode de production automatique de données surfaciques. Le référentiel est enrichi d'un traitement spécifique des intersections routières afin de rendre interopérables les données surfaciques produites avec des données linéaires préexistantes ; 3/ en s'appuyant sur une analyse comparative des structures, des matériaux et des dégradations de la voirie, nous proposons un enrichissement du référentiel de l'infrastructure par des données utiles à la gestion des différents éléments de voiries ; 4/ enfin, des applications thématiques permettent de valider la pertinence du processus de modélisation développé. Par ailleurs, cette exploitation ouvre sur des perspectives de recherche sur les choix constructifs de la voirie selon la présence ou non de réseaux enterrés à l'aide d'une analyse des interactions spatiales entre voiries et réseaux.

Mots-clés : Voirie, Maintenance, Démarche modélisatrice, Référentiel spatial, SIG

Abstract: The densification of urban basements by distribution networks leads to frequent interventions. These interventions generate impacts on the pavements and the dependencies of the road infrastructure, which are also called "roads". In addition to the financial costs generated, each intervention involves inconvenience for users (obstruction to traffic, noise, etc.) and tends to weaken the structure of road components. This thesis aims to question the optimization of these interventions and improve the coordination of stakeholders. To do this, it relies on spatial repositories fed with data on roads and their environment. This information is collected, integrated and modeled in a Geographic Information System where the road and its constituent elements are georeferenced. A modeling process is developed, in four steps, and allowing road managers to gradually improve knowledge related to their roads (whether basic or advanced): 1 / first we describe the constituent elements of the road to offer a compatible and harmonized vision between the stakeholders; 2 / from the analysis of existing geographic data, we then identify different road modeling approaches depending on the cases studied and the needs of managers. Thus, we propose a spatial framework of roads, for which a method of automatic production of surface data is developed. The framework is enriched with a specific treatment of road intersections in order to make the surface data produced with pre-existing linear data interoperable; 3 / from a comparative analysis of the structures, materials and degradation of the road, we propose an enrichment of the infrastructure framework with data useful for the management of the various road elements; 4 / finally, thematic applications make it possible to validate the relevance of the modeling process developed. Moreover, this exploitation opens up research perspectives on the constructive choices of roads according to the presence or not of underground networks using an analysis of the spatial interactions between roads and networks.

Key words: Road, Road maintenance, Modelling process, Spatial framework, GIS

Sommaire

Tables des illustrations et tableaux *14*
Glossaire *20*
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes *26*

Introduction générale *30*

Partie I : La voirie routière urbaine – Vers une démarche d'optimisation des interventions sur voirie et réseaux enterrés *40*
Introduction 42
1. Une voirie, des voiries – Définition de la voirie urbaine à partir d'une analyse des différentes conceptions 43
2. La voirie selon les approches de génie civil et génie urbain – Délimitation et compréhension de l'objet géographique et technique 56
3. La voirie urbaine, un espace d'intervention multi-intervenants : Qui gère la voirie urbaine ? 73
4. L'optimisation des interventions sur la voirie urbaine : Une démarche adaptative pour un processus de modélisation en géomatique 86
Conclusion Partie I 95

Partie II : Modéliser l'implantation en sursol de la voirie urbaine : pourquoi et comment construire des objets géographiques voirie pour les SIG ? *99*
Introduction 101
5. La voirie, des objets géographiques à leur représentation dans les SIG 103
6. Les choix constructifs des bases de données géographiques surfaciques existantes 117
7. Proposition méthodologique : construire une base de données géographique surfacique de voirie dans les SIG 133
8. Proposition méthodologique : mettre en cohérence des données de voirie surfaciques et linéaires .. 152
Conclusion Partie II 163

Partie III : Du sursol à l'implantation en sous-sol : Quelles informations sur l'infrastructure de voirie urbaine et comment les intégrer dans un SIG ? *167*
Introduction 169
9. La voirie selon sa forme : Quels choix structurels ? 170
10. La voirie selon son aspect : Quels choix de revêtements ? 182
11. La voirie dans tous ses états : Quelles informations sur les dégradations et comment les collecter ? 204
12. Mieux connaitre la voirie : Comment enrichir une base de données spatiale de voirie par des informations sur les matériaux et dégradations ? 220
Conclusion Partie III 232

Partie IV : Apport des données géographiques de voirie – Application à l'analyse des relations spatiales entre voiries et réseaux techniques enterrés *235*
Introduction 237
13. Comment analyser les relations spatiales entre voiries et réseaux – Données et méthode 238
14. Où sont enfouis les réseaux techniques ? 252
15. Ouverture sur les choix structurels voiries-réseaux et la maintenance de la voirie 264
Conclusion Partie IV 275

Conclusion générale *277*

Bibliographie *285*
ANNEXES *303*

Tables des illustrations et tableaux

Liste des figures

Figure 1-1 – Exemples d'approches de la voirie 51
Figure 1-2 – Synthèse de définition de la voirie urbaine 54
Figure 2-1 – Espace voirie, assiette, délaissés de voirie 59
Figure 2-2 – L'évolution du profil en travers de la voirie urbaine de 1975 à aujourd'hui 59
Figure 2-3 – Différentes affectations des chaussées 60
Figure 2-4 – Configurations des chaussées 61
Figure 2-5 – Exemples d'aménagement des trottoirs 62
Figure 2-6 – Exemples d'espaces dédiés au stationnement 62
Figure 2-7 – Les accotements 63
Figure 2-8 – Espaces dédiés à la sécurité des usagers 63
Figure 2-9 – Espaces ou ouvrages dédiés à la bonne tenue de l'infrastructure routière 64
Figure 2-10 – Équipements ou accessoires routiers 65
Figure 2-11 – Espaces ou éléments d'agrément 65
Figure 2-12 – Autres ouvrages dédiés à la circulation 66
Figure 2-13 – Synthèse de la composition de la voirie en sursol 67
Figure 2-14 – Exemples d'aménagement selon la hiérarchie de la voirie 68
Figure 2-15 – La voirie dans le sol 70
Figure 2-16 – Synthèse de la perception de la voirie selon les approches génie urbain et civil 72
Figure 3-1 – Gestion de la voirie depuis les années 1990 74
Figure 3-2 – Les principaux rôles dans le cadre d'un projet d'aménagement de voirie 79
Figure 3-3 – Synthèse : approche du gestionnaire de voirie 82
Figure 3-4 – Synthèse : approche du gestionnaire de voirie 84
Figure 4-1 – Différentes affectations des chaussées 88
Figure 4-2 – Adaptation du cycle de modélisation d'accompagnement 90
Figure 4-3 – Un processus de modélisation adaptatif 93
Figure 4-4 – Synthèse démarche de thèse 94
Figure 5-1 – Modélisation de la voirie par ses axes de circulation 105
Figure 5-2 – Processus de généralisation 105
Figure 5-3 – Différents niveaux de généralisation selon l'échelle de représentation 106
Figure 5-4 – Modélisation de la voirie par son emprise au sol 107
Figure 5-5 – Exemples de données voirie surfaciques 109
Figure 5-6 – Modélisation de la voirie par les volumes occupés en sursol 111
Figure 5-7 – Extrait du PCRS de Strasbourg 112
Figure 5-8 – Modélisation la voirie par les volumes occupés en sous-sol 113
Figure 5-9 – Les différentes dimensions et modélisations de la voirie 115
Figure 6-1 – Correspondance objets graphiques et objets géographiques 118
Figure 6-2 – Exemples de données surfaciques de voirie 119
Figure 6-3 – Données surfaciques de voirie de Victoria – Canada 121
Figure 6-4 – Données surfaciques de voirie de Copenhague – Danemark 122
Figure 6-5 – Attribution de l'intersection à un axe (a– cas simple, b– cas ambigu) 123
Figure 6-6 – Les deux types d'objets graphiques intersections 124
Figure 6-7 – Cahier des normes de Paris – Exemple des intersections 126
Figure 6-8 – Le cas des carrefours non giratoires de Bordeaux 127
Figure 6-9 – Les grands types d'intersection 127
Figure 6-10 – Exemples de modélisations des intersections proches 128
Figure 6-11 – Décomposition des objets graphiques intersection 129
Figure 6-12 – Montréal : Construction des objets et sous-objets graphiques intersection 130
Figure 6-13 – Exemples de modélisations des intersections en T / Y et étoile (Montréal) 131
Figure 7-1 – Voirie estimée et écarts constatés : Exemple de Cachan 136
Figure 7-2 – Ville de Québec : voirie estimée 137
Figure 7-3 – Étapes de première itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris 139
Figure 7-4 – Voirie manquante : Exemple du 13ème arrondissement de Paris 140
Figure 7-5 – Étapes de deuxième itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris 141
Figure 7-6 – Étapes troisième itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris 142

Figure 7-7 – Construction des tronçons de voirie surfacique par photo-interprétation : Exemple de Cachan 144
Figure 7-8 – Construction des équipements et dépendances par photo-interprétation : Exemple de Cachan 145
Figure 7-9 – Comparaison trois bases de données voirie surfacique (ex. cas d'étude) 146
Figure 7-10 – Relation statistique entre données Référence et données Base Cadastrale / Certu 148
Figure 7-11 – Cartographie des résidus du modèle 149
Figure 8-1 – Cas de Bordeaux, Paris et San Francisco, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie 154
Figure 8-2 – Cas de Copenhague, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie 154
Figure 8-3 – Cas de Victoria, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie 155
Figure 8-4 – Modélisation proposée, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie 155
Figure 8-5 – Processus de tessellation 156
Figure 8-6 – Modélisation des tronçons surfaciques de voirie 157
Figure 8-7 – Construction des points sources 157
Figure 8-8 – Diagramme de Voronoï à partir de points intermédiaires selon une distance uniforme aux intersections 158
Figure 8-9 – Construction finale des tronçons surfaciques 158
Figure 8-10 – Résultats de la mise en œuvre de la méthode sur trois villes 159
Figure 8-11 – Exemples de résultats pour les intersections en croix et en T 160
Figure 8-12 – Découpage selon la forme ou morphologie de l'intersection 160
Figure 8-13 – Densité du linéaire, les cas particuliers 161
Figure 8-14 – Cas des échangeurs autoroutiers 162
Figure 9-1 – Structure type d'une chaussée 171
Figure 9-2 – Comparaison des procédures de dimensionnement de Lille et Toulouse 172
Figure 9-3 – Les six familles de structures de chaussée 177
Figure 9-4 – Synthèse modèle de données 181
Figure 10-1 – Chaussée et trottoir après intervention sur réseaux 187
Figure 10-2 – Nature des matériaux modulaires 190
Figure 10-3 – Couleurs et dimensions des matériaux modulaires 191
Figure 10-4 – Appareillage ou calepinage des matériaux modulaires 192
Figure 10-5 – Les trois familles de matériaux non modulaires 193
Figure 10-6 – Couleurs et finitions des matériaux non modulaires 195
Figure 10-7 – Difficultés de rénovation des revêtements colorés 196
Figure 10-8 – Les matériaux non modulaires : l'obtention de leurs caractéristiques 197
Figure 10-9 – Exemples de courbes granulométriques (Asphalte, BBSG, BBDr) 198
Figure 10-10 – Application d'un revêtement bitumineux 199
Figure 10-11 – Amplitude des épaisseurs des revêtements bitumineux 200
Figure 10-12 – Synthèse modèle de données complémentaire 203
Figure 11-1 – Les déformations structurelles 205
Figure 11-2 – Les fissurations de fatigue 206
Figure 11-3 – Exemples de matériel de mesure de déflexion à grand rendement 214
Figure 11-4 – Exemple d'outil d'auscultation équipé d'un LiDAR 216
Figure 11-5 – Exemple de véhicule pour l'auscultation visuelle des trottoirs 217
Figure 11-6 – Synthèse intégration des éléments de dégradation dans le modèle de données 218
Figure 12-1 – Extrait d'une fiche d'auscultation 224
Figure 12-2 – Echelles d'auscultation 225
Figure 12-3 – Comparaison de trois méthodes de levé géolocalisé (Tablette, GPS et Orthophoto) 227
Figure 12-4 – Photographie de revêtement avec étalon de couleur et règle de mesure 229
Figure 12-5 – Construction d'une base de données géographique des levés 230
Figure 13-1 – Terrains d'analyses : Cachan et Rouen (France) 242
Figure 13-2 – Terrains d'analyses : Victoria (Canada) 243
Figure 13-3 – Corpus de données voirie pour Victoria (CA), Cachan (FR) et Rouen centre-ville (FR) 244
Figure 13-4 – Décomposition des donnés surfacique de voirie 245
Figure 13-5 – Classe et niveau de précision des données selon le type de réseau technique 246
Figure 13-6 – Schéma de la démarche et de sa mise en oeuvre 249

Figure 14-1 – Exemple de localisation du réseau d'électricité de basse tension à Cachan 253
Figure 14-2 – Exemple : longueurs équivalentes de réseaux 259
Figure 15-1 – Exemple de répartition des points de levé 264
Figure 15-2 – Exemple d'extrapolation d'information 265
Figure 15-3 – Répartition statistique des revêtements à matériau unique ou composé 265
Figure 15-4 – Répartition statistique des principaux revêtements présents à Cachan 266
Figure 15-5 – Exemples d'usages de revêtement de voirie à Cachan 266
Figure 15-6 – Répartition spatiale des revêtements à Cachan 268
Figure 15-7 – Réparation de la voirie : remblayage de tranchée et réparation par patch 270
Figure 15-8 – Les dégradations de voirie : déformations, fissurations et arrachements 271
Figure 15-9 – Présence de réseau et état de la voirie 272
Figure A-1 - Exemples de Boulevards à Paris 308
Figure A-2 - Exemples d'Avenues à Paris 308
Figure A-3 - Exemples de rues à Meaux (77) et Champigny (94) 309
Figure B-1 – Gestion de la voirie avant décentralisation 313
Figure B-2 – Exemple de chevauchements entre les subdivisions et intercommunalités 315
Figure B-3 – Gestion de la voirie après la réforme de décentralisation 320
Figure D-1 – Régression linéaire : principe de la droite de régression 325
Figure D-2 – Régression linéaire : déterminer les droites de régression de Y et de X 325
Figure E-1 – Comparaison des résultats Certu et Base Cadastrale en Ile-de-France 328
Figure E-2 – Relation statistique entre les écarts d'emprise voirie (Base Cadastrale – Certu) et la surface bâtie 328
Figure E-3 – Comparaison trois bases de données voirie surfacique (ex. Bordeaux) 329
Figure E-4 - Corrélation entre Surface voirie Référence et Surface voirie BC 333
Figure E-5 - Corrélation entre Surface chaussée référence et Surface voirie Certu 334
Figure F-1 – Découpage des intersections et, création des tronçons surfaciques 335
Figure F-2 – Création des points aux extrémités des tronçons linéaires 335
Figure F-3 – Exemple de cellules de Voronoï à partir des points d'intersection 336
Figure F-4 – Diagramme de Voronoï à partir des points aux intersections 336
Figure F-5 – Construction des points sources 337
Figure F-6 – Diagramme de Voronoï à partir de points intermédiaires selon une distance uniforme aux intersections 337
Figure F-7 – Cas des petits tronçons 338
Figure F-8 – Illustration du calcul du diagramme de Voronoï s'appuyant sur un rayon de zone tampon variable autour des intersections 339
Figure F-9 – Limites de la méthode pour les espaces de voirie hors intersection 339
Figure F-10 – Ajout de points (pas de 10m) 340
Figure F-11 – Construction de points sur le linéaire à intervalle régulier 340
Figure F-12 – Diagramme de Voronoï selon la disposition des points sources 341
Figure F-13 – Projection des points sources (tampons et intermédiaires) entre un tronçon A et un tronçon B 341
Figure F-14 – Projection répétée 342
Figure F-15 – Remplacement des points sources par calcul des centroïdes 342
Figure F-16 – Mise en œuvre de la seconde itération 343
Figure F-17 – Exemples de résultats pour les intersections en croix et en T 343
Figure F-18 – Découpage selon la forme ou morphologie de l'intersection 344
Figure F-19 – Densité du linéaire : les cas particuliers 345
Figure H-1 – Niveau de service de la voirie et stratégie d'entretien 349
Figure I-1 – Exemple fiche matériau de Lille Métropole 351
Figure I-2 – Exemple fiche matériau du Grand Lyon 352
Figure I-3 – Exemple fiche matériau de Bordeaux Métropole 354
Figure I-4 – Exemple fiche matériau de la Mairie de Toulouse 356
Figure K-1 – Extrait de la méthode d'essai LPC N°38-2 – Mode opératoire M6 361
Figure K-2 – Exemple de fiche d'auscultation de trottoir (CERIU) 365

Liste des tableaux

Tableau 1-1 – Classification de la voirie à partir de ISAMBERT, 1825 45
Tableau 1-2 – De la classification d'Isambert à la classification contemporaine 46
Tableau 2-1 – Synthèse de la hiérarchisation de la voirie 69
Tableau 3-1 – Groupements intercommunaux (EPCI fiscalité propre) 76
Tableau 5-1 – Nombre de tronçons de voirie de Montréal selon le revêtement et la structure 114
Tableau 6-1 – Types de tracés de voirie aux intersections selon les municipalités 120
Tableau 6-2 – Schématisation des objets graphiques intersections par municipalité selon les tracés 125
Tableau 6-3 – Exemple des autres types d'intersections 128
Tableau 7-1 – Résultats comparaison à tronçons équivalents 147
Tableau 8-1 – Les relations spatiales entre les objets graphiques linéaires et surfaciques 153
Tableau 9-1 – Hypothèse de durée de service des infrastructures 173
Tableau 9-2 – Classification du trafic sur une année (JMA) 174
Tableau 9-3 – Classification du trafic en cumulé sur 20 ou 30 ans 174
Tableau 9-4 – Correspondance entre vocation des voies et classes de trafic 175
Tableau 9-5 – Agressivité selon la classe de trafic 175
Tableau 9-6 – Usage des structures dans trois métropoles 178
Tableau 9-7 – Structures de trottoir 179
Tableau 9-8 – Synthèse des critères de dimensionnement 180
Tableau 10-1 – Comparaison des caractéristiques recherchées pour les revêtements de voirie selon les trois catégories d'acteurs (usagers, riverains, gestionnaires) 183
Tableau 10-2 – Caractéristiques des revêtements selon les propriétés d'usage 185
Tableau 10-3 – Classification des matériaux selon les gestionnaires ou organismes 188
Tableau 10-4 – Différentes présentations des revêtements à liant bitumineux 197
Tableau 10-5 – Les différents revêtements à liant hydrauliques 201
Tableau 10-6 – Synthèse des critères et modalités généraux pour le choix d'un revêtement 202
Tableau 10-7 – Synthèse des avantages et inconvénients des matériaux modulaires et non modulaires 203
Tableau 11-1 – Les arrachements en surface 207
Tableau 11-2 – Les remontées ou mouvements de matériaux 208
Tableau 11-3 – Typologie des dégradations selon les causes 209
Tableau 11-4 – Notation et définition de l'état des chaussées selon la méthode IQRN 211
Tableau 11-5 – Méthode et périodicité de contrôle par les départements (Réponses de 46 départements) 215
Tableau 12-1 - Les éléments de voirie levés et leurs attributs 221
Tableau 12-2 – Liste des matériaux levés et leurs codes 222
Tableau 12-3 - Liste des dégradations à lever et leurs codes 223
Tableau 12-4 – Répartition des tronçons de voirie selon leur taille (Cachan) 225
Tableau 12-5 – Comparaison des caractéristiques des trois outils 228
Tableau 13-1 – Synthèse choix des terrains selon la disponibilité des données 239
Tableau 13-2 – Longueur des canalisations principales selon les réseaux 247
Tableau 13-3 – Méthodologie d'analyse : données utilisées 251
Tableau 14-1 – Synthèse de la localisation des réseaux sous voirie 252
Tableau 14-2 – Répartition des voiries selon leur classe administrative : Cachan et Rouen centre-ville 254
Tableau 14-3 – Répartition des voiries selon leur classe hiérarchique : Victoria 254
Tableau 14-4 – Répartition des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Cachan et Rouen centre-ville 255
Tableau 14-5 – Répartition des réseaux techniques rapportée à la surface des voiries : Cachan et Rouen centre-ville 256
Tableau 14-6 – Répartition des réseaux d'assainissement selon la classe hiérarchique de la voirie : Victoria 256
Tableau 14-7 – Composition des voiries de Cachan et Rouen centre-ville 257
Tableau 14-8 – Composition des voiries de Victoria 257
Tableau 14-9 – Répartition des réseaux selon les éléments constitutifs des voiries : Cachan, Rouen centre-ville et Victoria 258

Tableau 14-10 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations d'assainissement à Victoria 260
Tableau 14-11 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations d'assainissement, d'électricité, et de gaz à Cachan 261
Tableau 14-12 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations de gaz à Rouen (centre-ville) 261
Tableau 14-13 – Synthèse des résultats sur Cachan, Rouen centre-ville et Victoria 263
Tableau B-1 – Groupements intercommunaux (EPCI fiscalité propre) 320
Tableau C-1 – Affectation des largeurs selon le type de voie 322
Tableau C-2 – Tableau des largeurs des zones tampons à attribuer aux tronçons 322
Tableau D-1 – Exemple de construction de l'équation d'une droite de régression 326
Tableau E-1 – Surface voirie et comparaison des trois bases de données 331
Tableau E-2 – Surface voirie et comparaison des trois BD à tronçons équivalents 332
Tableau J-1 – Synthèse des domaines d'emploi 358
Tableau J-2 – Synthèse choix des matériaux pour chaque espace 359
Tableau J-3 – Synthèse matériaux de surface et usages 360
Tableau M-1 – Répartition des conduites principales d'assainissement selon leur type 367
Tableau M-2 – Répartition des fourreaux principaux d'électricité selon leur type 368
Tableau N-1 – Répartition des conduites principales d'assainissement selon la vocation de voirie à Victoria (BC) 369
Tableau N-2 – Répartition des conduites principales des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Rouen 369
Tableau N-3 – Répartition des conduites principales des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Cachan 370
Tableau O-1 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Victoria 371
Tableau O-2 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Rouen centre-ville 371
Tableau O-3 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Cachan 372
Tableau P-1 – Exemple de tableau élémentaire d'origine, et des variables prises en compte pour les ANOVA 373
Tableau P-2 – Exemple de tableau de recensement 374
Tableau P-3 – Exemple de résumé statistique 374
Tableau Q-1 – Résultat ANOVA sur le réseau d'assainissement de Victoria 376
Tableau Q-2 – Résultat ANOVA sur le réseau d'assainissement de Cachan 377
Tableau Q-3 – Résultat ANOVA sur le réseau d'électricité de Cachan 377
Tableau Q-4 – Résultat ANOVA sur le réseau de gaz de Cachan 378
Tableau Q-5 – Résultat ANOVA sur le réseau de gaz de Rouen centre-ville 378
Tableau R-1 – Exemple de tableau élémentaire d'origine, et des variables prises en compte pour construire le tableau de contingence 379
Tableau R-2 – Exemple de tableau de contingence 379
Tableau R-3 – Construction du tableau de profils en lignes 380
Tableau R-4 – Construction du tableau de profils en colonnes 380
Tableau R-5 – Construction du tableau des effectifs théoriques 381
Tableau R-6 – Construction du tableau des écarts à l'indépendance 381
Tableau S-1 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'assainissement à Victoria 384
Tableau S-2 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'assainissement à Cachan 385
Tableau S-3 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'électricité à Cachan 386
Tableau S-4 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon de gaz à Cachan 387
Tableau S-5 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon de gaz à Rouen centre-ville 388
Tableau T-1 – Revêtement de voirie à Cachan selon les éléments constitutifs 389
Tableau T-2 – Synthèse de localisation des réseaux technique selon l'élément constitutif de la voirie et le revêtement de voirie 390
Tableau U-1 – Synthèse état de la voirie de Cachan : tranchée remblayée et réparation patch 392
Tableau U-2 – Synthèse état de la voirie de Cachan : Dégradations 392

Glossaire

Accotement	Partie de la voirie s'étendant de la limite de la chaussée à la limite de l'assiette.
Adhérence	Désigne la contribution du revêtement de chaussée au frottement pneu/revêtement ou semelle/revêtement. Il s'agit d'un coefficient de frottement mesuré dans des conditions spécifiques ou normalisées. L'adhérence désigne le caractère de la texture d'un revêtement permettant aux usagers de ne pas glisser (piéton) ou de maintenir la stabilité des véhicules (usager véhiculé), dans toutes les conditions météorologiques.
Agglomération	Renvoi dans cet ouvrage aux délimitations urbaines définie par un arrêté du maire, et identifiées par les panneaux d'indication d'entrée en ville.
Agressivité du trafic	Paramètre définissant les dommages causés par le passage d'un essieu de référence d'une charge déterminée.
Application (base de données)	Relations entre deux ensembles de données (un ensemble de départ et un ensemble d'arrivée, et lorsque tous les éléments de l'ensemble de départ sont reliés à des éléments de l'ensemble d'arrivée.
Arase de terrassement	Limite de la partie supérieure des terrassements (PST) sur laquelle est construite une chaussée
Assiette (de voirie)	Correspond à la surface utile au bon fonctionnement de la voirie
Auscultation (de voirie)	Démarche visant à analyser l'état de la chaussée à l'aide d'un repérage manuel ou automatique.
Bande cyclable	« *Voie exclusivement réservée aux cycles à deux ou trois roues sur une chaussée à plusieurs voies*. » (Code de la route 2010)
Bande d'arrêt d'urgence	« *Partie d'un accotement située en bordure de la chaussée et spécialement réalisée pour permettre, en cas de nécessité absolue, l'arrêt ou le stationnement des véhicules*. » (Code de la route 2010)
Bande dérasée	Partie de la voirie constituée à partir du bord géométrique de la chaussée d'une surlargeur de chaussée d'une structure similaire à celle de la chaussée, et d'une partie stabilisée ou revêtue. Sa largeur varie selon le type de voirie entre 1,75 mètre et 2,50 mètres. (Certu 2009)
Berme	Partie de la voirie généralement non carrossable. Elle varie selon les équipements qu'elle reçoit (ex. dispositifs de retenue d'eau et d'assainissement, équipements d'exploitation et de sécurité, signalisation, ou encore éclairage). (Certu 2009)
Carrefour ou intersection	« *Zone d'échange, aménagée ou non, entre deux ou plusieurs voiries, permettant aux véhicules le passage de l'une à l'autre*. » (Cerema 2016)
Chaussée (de voirie)	« *Partie(s) de la route normalement utilisée(s) pour la circulation des véhicules* » (Code de la route 2010)
Chaussée propre	Chaussée à l'usage exclusif des véhicules de transport collectifs. (Cerema 2016)
Chemin et sentier	Renvoi à un espace de circulation réservé « *à la communication entre divers fonds, ou à leur exploitation* ».

Constructibilité	« (Démarche) visant à fournir, dès le lancement du projet, une assurance raisonnée quant à l'atteinte des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie » (Gobin 2010)
Corps de chaussée	Correspond à l'ensemble des couches de fondation et de base
Couche d'assise	Couche permettant de reporter les sollicitations du trafic sur toute la surface de la plateforme support
Couche de forme	Correspond à une couche de sol rapportée ou traitée en place. Elle est destinée à constituer une assise satisfaisante en termes de portance, et d'homogénéité pour supporter la structure d'une route et le trafic des engins de chantier.
Couche de liaison	Correspond à une couche déposée sur la couche de base. Elle permet la circulation des véhicules avant la mise en place de la couche de roulement. Elle permet également d'imperméabiliser l'assise et de protéger les propriétés mécaniques, thermiques et hydrauliques de la structure.
Couche de roulement	Correspond à la couche superficielle d'une chaussée. C'est celle sur laquelle s'exercent directement les agressions extérieures telles que le trafic
Couche de surface	Correspond à l'ensemble formé par la couche de roulement et la couche de liaison d'une chaussée.
Dégradations structurelles	Dégradations ayant atteint les couches inférieures (couche d'assise) d'une chaussée
Dégradations superficielles	Dégradations limitées aux couches supérieures (revêtement) d'une chaussée.
Délaissés de voirie	Correspond aux espaces bordant l'assiette de voirie et appartenant au domaine routier mais sans utilité directe pour le fonctionnement de l'infrastructure.
Dépendances (de voirie)	Ensemble des accessoires indissociables d'une infrastructure (routière), dès lors qu'ils contribuent à son bon fonctionnement ainsi qu'à la sécurité des usagers.
Devers	Inclinaison de la voirie dans sa largeur de façon à faciliter l'évacuation des eaux pluviales vers l'extérieur. (Setra 2006)
Digitalisation (en géomatique)	Opération consistant à produire des données vectorielles (des points) à partir d'un support visuel (ex. photographie aérienne). En d'autres termes, il s'agit d'attribuer à chaque point des coordonnées X et Y dans un système de coordonnées géographiques.
Dimensionnement	Calcul visant à déterminer les épaisseurs des couches de la structure d'une chaussée, nécessaires afin de respecter en tous points, les valeurs limites de contrainte et de déformation des matériaux.
Domaine routier public	« *Ensemble des biens du domaine public de la commune, affectés aux besoins de la circulation terrestre, à l'exception des voies ferrées*. »
Durée de service (de voirie)	Est la durée au cours de laquelle il n'est pas prévu de réaliser d'entretien structurel.
Flache	Est une dégradation ponctuelle de chaussée de type affaissement hors rive.

Fossé et talus	Ouvrages destinés à recueillir les eaux de la voirie et celles qui s'écoulent naturellement des fonds supérieurs. Le fossé ne fait pas l'objet d'un aménagement particulier.
Galerie et arcades	Espaces piétonniers généralement couverts et longeant une chaussée (arcades) ou traversant un espace bâti (galerie).
Généralisation	Processus consistant à adapter la représentation des objets géographiques sur une carte selon le but, le thème et l'échelle de la représentation. (Béguin et al. 2017)
Génie civil	Discipline couvrant toutes les techniques de construction civile : des travaux publics et du bâtiment.
Génie urbain	Discipline couvrant les techniques et démarches en amont ou en aval encadrant les constructions en milieu urbain.
Gestion (de voirie)	Regroupe toutes les opérations administratives et techniques de la conception de la voirie à sa maintenance.
Grande voirie	Ensemble des voies fluviales et des voies ferroviaires.
Gué	Endroit de cours d'eau suffisamment peu profond pour permettre qu'on le traverse sans nager. En voirie, il s'agit d'une « route » qui franchit un cours d'eau dans son lit.
Infrastructure (routière)	Ensemble des installations et des équipements aménagés de façon durable, permettant la bonne organisation de l'activité routière.
Macrotexture	Premier paramètre permettant de qualifier l'adhérence d'un revêtement, et est mesurée en millimètres. Elle représente la profondeur moyenne de la texture et renseigne sur la capacité du revêtement à évacuer l'eau de ruissellement entre pneu ou semelle et revêtement. Plus précisément, la macrotexture peut être définie comme des irrégularités de surface de dimensions comprises entre 0,1 mm et 20 mm verticalement et entre 0,5 mm et 50 mm horizontalement. La macrotexture est visible à l'œil nu.
Maintenance (de voirie)	Regroupe les opérations visant à maintenir les performances de la voirie sur toute sa durée de service.
Microtexture	Second paramètre qualifiant l'adhérence, et correspondant au coefficient de frottement entre pneu ou semelle et revêtement. Comme la macrotexture, la microtexture est définie par des irrégularités de surface, mais de dimensions moindres (de 0,001 mm à 0,5 mm verticalement et inférieures à 0,5 mm horizontalement). La microtexture ne s'observe pas à l'œil nu, mais peut être perçue au toucher.
Modélisation d'accompagnement	Démarche modélisatrice fondée sur une dynamique d'échanges entre différents acteurs (profanes, techniciens, académiques, et institutionnels). Elle s'appuie sur une confrontation régulière de la modélisation aux savoirs des acteurs de façon à améliorer progressivement le processus de modélisation.
Parking	Places de stationnement situées en dehors de l'emprise du domaine routier.

Patrimoine (voirie)	Un bien immobilisé et exploité par une organisation afin d'assurer un service, tel que permettre la mobilité.
Petite voirie	Ensemble des voies terrestres hors voies ferroviaires
Photogrammétrie	Méthode reposant sur l'exploitation de la parallaxe entre deux photographies d'un même territoire prises selon des angles différents, et permettant ainsi de bénéficier d'une vue stéréoscopique, et de construire des données superposables à la photographie (Lillesand, Kiefer, et Chipman 2015)
Photo-interprétation	Processus consistant à identifier visuellement les espaces que l'on souhaite étudier à partir de photographies relevées à l'aide d'un appareil photographique grand angle embarqué dans un avion réalisant une trajectoire à basse altitude.
Piste cyclable (chaussée cyclable)	« *Chaussée exclusivement réservée aux cycles à deux ou trois roues* » (Code de la route 2010). Le plus souvent elle est séparée physiquement des autres espaces de voirie.
Place de stationnement	« *Zone spécialement aménagée pour permettre le stationnement des véhicules de toute nature* » le long des chaussées (Cerema 2016).
Planéité	Correspond aux dénivellations longitudinales, c'est-à-dire dans le sens de circulation, de surface du revêtement des espaces piétonniers et cyclables. La planéité est décrite selon la taille des ondulations. La planéité dépend des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre.
Plateforme support de chaussées	Sol terrassé destiné à recevoir une chaussée routière.
Portion de voirie	Correspond à l'ensemble des dimensions d'un tronçon de voirie (Cf. Portion de territoire (Bordin 2006)).
Profil en travers	Coupe transversale de la chaussée mettant en évidence la composition de l'infrastructure dans toute sa largeur et permettant d'identifier les éléments constitutifs.
Réparabilité (d'un revêtement)	Capacité de réhabilitation d'un revêtement : en d'autres termes, la plus ou moins grande facilité à réparer une partie d'un revêtement.
Réseau viaire	Renvoi à la fonction support des mobilités de la voirie.
Résidus statistiques	Ecarts entre des valeurs produites par un modèle statistique et des valeurs observées.
Section courante ou tronçon (de voirie)	Partie de voirie située entre deux intersections routières, ou entre une extrémité et une intersection. (Cerema 2016)
Sollicitations tangentielles	Sollicitations mécaniques liées aux mouvements de véhicules et à la répartition des charges sur un coté des essieux lorsque les véhicules effectuent un virage. (Hamlat 2007)
Températures de service	La gamme de température sur laquelle la chaussée est sollicitée dans son environnement et qui peut varier selon les saisons.
Terrain nominal	« *Une image de l'univers, à une date donnée, à travers le filtre défini par la spécification de produit*. » (David et Fasquel 1997)

Terre-plein (central)	« *Bande de terrain ou dispositif physique au sol, d'une certaine largeur, destinée à délimiter diverses parties de la plate-forme affectée à des usagers différents*. » (Cerema 2016)
Tessellation	Est une opération mathématique consistant à recouvrir l'ensemble d'un espace par des objets géométriques non superposés.
Trottoir	« *Accotements spécialement aménagés pour les piétons. Ils sont généralement surélevés par rapport à la chaussée*. » (Cerema 2016)
Uni	L'uni correspond à la planéité pour les espaces destinés aux usagers motorisés.
Voie (de circulation)	« *Subdivision (matérialisée ou non) de la chaussée ayant une largeur suffisante pour permettre la circulation d'une file de véhicules*. » (Cerema 2016)
Voie de bus	« *Voire réservée aux transports collectifs. Elle fait partie de la chaussée. Elle peut être ouverte à d'autres usagers*. » (Cerema 2016)
Voirie urbaine / rurale	Ensemble de la voirie localisée en / hors agglomération selon la définition du Code de la route.
Objet géographique	Objets inscrits sur un territoire et pouvant être décrits par des coordonnées géographiques
Objet graphique	Objets décrivant des objets géographiques dans un système d'information géographique à l'aide d'éléments géométriques (point, ligne, polygone).
Objet technique	Objets pouvant être décrits par les éléments techniques leur permettant d'assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été construits.

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

Afnor	Association française de normalisation
AMO	Assistant Maître d'Ouvrage
ANOVA	Analysis of variance
AT / AC	Asphalte pour trottoir / Asphalte pour chaussée
BAU	Bande d'Arrêt d'Urgence
BB	Béton bitumineux
BBDr	Béton bitumineux Drainant
BBE	Béton bitumineux à l'émulsion
BBM	Béton bitumineux mince
BBME	Béton bitumineux à module élevé
BBSG	Béton bitumineux semi-grenu
BBTM	Béton bitumineux très mince
BC	Béton coulé
BCMC	Béton de ciment mince collé
BD	Base de données
BDD	Bande Dérasée de Droite
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
BIM	Building Information Modeling
BT	Basse tension
CAO	Conception assistée par ordinateur
CAUE	Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
CG3P	Code Général de la Propriété des Personnes Publiques
CIM	City Information Modeling
Cnig	Conseil national de l'information géographique
CSPS	Coordinateur de sécurité et de protection de la santé
DGFiP	Direction Générale des Finances Publiques
DICT	Déclaration d'intention de commencement des travaux
DIR	Direction Interdépartementales des Routes
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DT	Déclaration de projet de travaux
DVDC	(projet sur) la Durée de vie des chaussée
EP	Enquête Publique
EP	Eaux pluviales
EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
EPT	Etablissement Public Territorial
ESTP	Ecole Spéciale des Travaux Publics
ESU	Enduit superficiel d'usure
EU	Eaux usées
FURET	Furtivité Urbaine Réseaux Et Travaux
GEPUR	Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier
GNT	Grave non traité
GPS	Global Positioning System
HTA	Haute tension

IDRRIM	Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité
IGN	Institut National de l'Information Géographique
Insee	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IQRD	Image de Qualité des Réseaux routiers Départementaux
IQRN	Image de la Qualité du Réseau routier National
IRC	Institut de recherche en constructibilité
IREX	Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation
JMA	Journalier moyen annuel
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
MAJIC	Mise À Jour des Informations Cadastrales
MAPTAM	(Loi de) modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles
MBCF	Matériau bitumineux coulé à froid
MIDND	Mâchefer d'incinération de déchets non dangereux
MOA	Maître d'Ouvrage
MOE	Maître d'Œuvre
MTLB	Matériau traité au liant bitumineux
MTLH	Matériau traité au liant hydraulique
Ng	Note globale
NOTRe	(Loi pour une) Nouvelle Organisation Territoriale de la République
Np	Note patrimoine
Ns	Note surface
ONR	Observatoire National de la Route
PCRS	Plan de Corps de Rue Simplifié
PFSC	Plateforme Support de Chaussées
PL	Poids Lourd
PMR	Personne à mobilité réduite
PST	Partie Supérieure des terrassements
RTGE	Référentiels Très Grande Echelle
SEM	Société d'Economie Mixte
Setra	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SIG	Système d'Information Géographique
SMA	Système Multi-Agents
SPL	Société Publique Locale
TC	Trafic Cumulé
UN	(réseau) unitaire
VRNS	Voirie Routière Non Structurelle
VRS	Voirie Routière Structurelle

« *Quand on voyage vers un objectif, il est très important de prêter attention au chemin. C'est toujours le chemin qui nous enseigne la meilleure façon d'y parvenir, et il nous enrichit à mesure que nous le parcourons.* » (Paulo Coelho, Le Pèlerin de Compostelle, 1987)

Introduction générale

Dans les années 2000, la France a connu plusieurs incidents majeurs suite à des interventions sur voirie à proximité de réseaux techniques. En 2007,une explosion de gaz a notamment eu lieu à Bondy en Seine-Saint-Denis suite à l'arrachement d'une conduite gazière lors de travaux sur voirie (Le Monde 2007 ; Libération 2007). Au-delà des dégâts matériels – voirie éventrée et bâtiments soufflés – le bilan humain fut également lourd avec plusieurs blessés et un décès. Dans un rapport de 2011, le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, aujourd'hui Ministère de la transition écologique, identifiait d'autres accidents majeurs (MEDDE 2011) :

- en décembre 2007, une explosion d'une conduite de gaz suite à des travaux de forage sur voirie a conduit à l'effondrement d'un immeuble à Noisy le Sec (Seine-Saint-Denis) (AFP 2007) ;
- en février 2008, le centre-ville de Lyon (Rhône) a été marqué par l'explosion d'une canalisation de gaz lors d'une intervention sans tranchée sur réseau (Le Monde 2008) ;
- enfin, de nombreux autres incidents ont lieu chaque année et concernent des travaux à proximité de réseaux électriques.

Ces accidents ont en commun la détérioration de canalisations dont la localisation était mal ou non renseignée lors d'une intervention sur voirie. Ceci amène naturellement à s'interroger sur la qualité des données décrivant les infrastructures de réseaux techniques vis à vis des voiries.

La voirie routière révèle en fait une complexité qui amène à appréhender plusieurs dimensions simultanément (spatiale, esthétique, pratique, ou encore politique). Cette complexité est d'autant plus signifiante en milieu urbain qu'une grande variété de modes de transport et de réseaux d'équipement s'y côtoient. Lors des dernières décennies, l'émergence de nouveaux moyens de déplacement – et le retour d'anciens (tramway) – a conduit à repenser la voirie notamment urbaine alors que son développement s'est longtemps articulé autour de l'automobile (Héran 2015 ; Papon et De Solère 2009). Ainsi, le législateur et les aménageurs cherchent aujourd'hui à rendre interopérables les différents modes de transport (Héran 2017) en réorganisant la voirie qu'ils se partagent pour répondre aux différents besoins (Augello 2001). Cette transformation tend à intégrer de plus en plus les aménageurs et les urbanistes dans les projets. La voirie accueille également d'autres équipements, tels que les réseaux techniques de distribution évoqués initialement. Ces derniers sont parfois anciens (eau ou d'assainissement) ou plus récents (gaz et électricité[1]), auxquels se sont ajoutés depuis le début des années 2000 les réseaux de télécommunication ou ceux de géothermie, par exemple. Certains de ces équipements ont été

[1] Signature entre l'Etat et EDF du protocole du 25 août 1992 relatif à l'insertion des réseaux électriques dans l'environnement

installés dès l'origine sous la voirie (eau, assainissement ou gaz) tandis que d'autres ont été historiquement déployés par voie aérienne (électricité ou télécommunication). Toutefois, certains pays ont fait le choix par la suite d'enfouir progressivement l'ensemble de leurs réseaux techniques sous la voirie, et ce pour diverses raisons.

L'enfouissement des réseaux a commencé en milieu urbain, principalement pour des critères esthétiques (Begoc 2000), fonciers (Barles et Guillerme 1994) ou pour gagner de la place en surface (Mozol 2013). Par la suite, des incidents, notamment d'origine naturelle, ont conduit à systématiser l'enfouissement des réseaux, comme en France où la tempête Lothar de 1999 a entrainé la détérioration de nombreuses installations électriques et de télécommunication aériennes. Au Canada, la Province de Québec a été touchée en janvier 1998 par un phénomène climatique exceptionnel appelé « crise du verglas » qui a privé des centaines de milliers de personnes d'électricité et de télécommunication, parfois pendant plus de cinq semaines. Ces évènements ont eu pour effet de relancer les politiques d'enfouissement des réseaux dans les deux pays pour des raisons techniques et de sécurité (Sénécal et al. 2002 ; Gautreau 2009).

L'enfouissement des réseaux techniques présente certaines contraintes. Leur densification en sous-sol conduit à un surencombrement de l'espace et parfois à l'affaiblissement des sols pouvant engendrer des effondrements. (Barles et Guillerme 1994) dénombraient, par exemple, une trentaine de réseaux techniques sous les carrefours de la voirie parisienne, et même une cinquantaine pour ceux de la voirie du quartier de la Défense. Au-delà, cette densification du sous-sol entraine une multiplication des interventions sur la voirie, que ce soit pour les implanter ou pour les entretenir. Ces interventions sont sources de nuisances pour les riverains et les usagers de la voirie. Par exemple, une augmentation de plus de 32% des chantiers sur voirie a été constatée à Washington, passant de 5 000 chantiers à 6 000 entre 1996 et 1998 (Layton 2000). Au début de l'année 2000, le déploiement de la fibre optique a encore accru les interventions, entrainant le mécontentement de la population et motivant les autorités publiques à faire cesser les chantiers. Par ailleurs, (Zimmerman 2002) indiquait que la coprésence des réseaux techniques pouvait entrainer des risques d'incidents et de nombreuses répercutions sur les infrastructures urbaines et les populations. Ces incidents conduisent aussi à un surcoût important pour la remise en état des infrastructures.

Les interventions sur réseaux techniques enterrés présentent également des coûts plus élevés que celles réalisées sur des réseaux aériens. (Zimmerman 2002) relevait que la simple opération d'excavation représentait 70 % du coût de l'intervention sur un réseau. La voirie urbaine se retrouve par ailleurs trop souvent encore altérée avec des tranchées parfois affaissées, ou par la présence d'un véritable patchwork de matériaux. En France, la multiplication des interventions, et avec elles des incidents et des coûts, a conduit les autorités à développer des outils

règlementaires encadrant la réalisation des travaux sur voirie à proximité de réseaux techniques, et l'obligation d'une localisation précise de ces réseaux (Rouveyran et Fontaine 2012). Ces outils émanant de la réforme dite « anti-endommagement » ciblent principalement l'amélioration de la connaissance sur les réseaux techniques enterrés sans apporter de recommandations quant à la voirie. Il apparait pourtant que la voirie urbaine soit l'infrastructure centrale de ce système complexe dans la mesure où outre son rôle de milieu d'accueil et de support aux autres infrastructures elle joue le rôle d'interface entre des activités en sursol et l'accueil de réseaux en sous-sol. La place qu'occupe la voirie en fait un espace sur lequel interviennent de nombreux acteurs guidés par des enjeux différents.

À travers cette thèse, nous nous interrogeons sur la possibilité d'améliorer voire d'optimiser la gestion de la voirie dans son environnement, en particulier avec les réseaux enterrés. Compte tenu des outils développés avec la réforme anti-endommagement, et le constat d'un manque de données exhaustives relatives aux voiries, nous proposons une entrée par la géomatique afin de répondre à la problématique suivante : comment choisir et construire le référentiel spatial de voirie, pour optimiser la gestion conjointe de la voirie et des réseaux enterrés ?

Afin de répondre à cette problématique nous émettons trois postulats :

- Postulat 1, nous considérons que le choix du référentiel spatial de voirie doit être fait de façon à tenir compte des dimensions géographiques et techniques de la voirie ;
- Postulat 2, nous considérons que les Système d'Information Géographique (SIG) sont des outils adaptés pour développer et mettre en œuvre un tel référentiel ;
- Postulat 3, nous considérons que ce référentiel spatial peut être enrichi d'informations décrivant l'objet technique qu'est la voirie, ainsi que son évolution afin d'inscrire la gestion de l'infrastructure dans le temps et de permettre d'améliorer celle-ci.

Partant de ces postulats, cette recherche se présentera en quatre parties.

Partie 1 Une vision cohérente de la voirie

Dans une première partie, nous construirons une vision cohérente de la voirie, qui permettra d'une part de faciliter les échanges entre les acteurs, et d'autre part de poser les limites de l'objet pour lequel nous développerons le référentiel spatial. Pour cela, nous définirons le champ de recherche le plus adapté pour concevoir un référentiel spatial de voirie et nous ciblerons les acteurs à placer au centre de notre démarche.

La complexité de la voirie et la diversité des activités qu'elle supporte induisent l'intervention de spécialistes de différents domaines, à savoir, de la route, des réseaux techniques, des transports ou encore de l'aménagement. Il est de ce fait primordial d'avoir une bonne connaissance de la voirie pour sa *gestion* (aménagements, coûts, etc.) et notamment sa *maintenance* (Faivre d'Arcier et al. 1993). En 2017, les assises nationales de la mobilité ont d'ailleurs souligné deux objectifs importants pour les gestionnaires de voirie (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017) :

1) le premier est d'accroitre la connaissance sur les infrastructures de transport, pour mieux maitriser leur gestion et permettre de répondre aux défis de demain tels que les véhicules autonomes ou les nouvelles formes de mobilités (micro-mobilité, mobilité partagée) ;
2) le second est d'améliorer la communication entre les différents intervenants sur ces infrastructures de transport.

Selon Dupuy (1987), une *infrastructure* est définie comme un élément structurant l'espace durablement. L'infrastructure routière, que nous nommons dans nos travaux « voirie », est alors l'ensemble des installations et des équipements aménagés de façon durable, permettant la bonne organisation de l'activité routière (Lasserre 1962).

Les deux objectifs des assises de la mobilité sont en adéquations avec nos propres constats. Afin d'y répondre, il convient de s'interroger sur les usages de la voirie, et les intervenants qui ont une incidence sur l'infrastructure de par leur activité. D'abord, la voirie supporte et accueille de nombreuses activités ayant un impact sur les choix de construction et la vie de l'infrastructure. Ensuite, elle est gérée par différentes entités territoriales selon ses enjeux et selon le milieu (urbain ou non) dans lequel elle est implantée. Tout ceci implique une diversité importante d'intervenants sur la voirie tels que ses gestionnaires, mais aussi ceux des autres infrastructures ou de services qu'elle accueille.

Partie 2 Conception du référentiel spatial de voirie

Dans une seconde partie, nous analyserons les modélisations et les représentations existantes de la voirie à l'échelle internationale afin de proposer un processus de construction pour le référentiel spatial de voirie dans les SIG, adapté pour répondre à notre problématique. Notre référentiel spatial devra être construit de façon à pouvoir être mis en cohérence avec d'autres référentiels spatiaux de voirie classiquement utilisés.

La voirie est initialement considérée comme objet d'étude en soi pour définir ses caractéristiques de construction, puis d'entretien ou d'aménagement mais aussi comme support, par exemple de mobilités et d'activités variées. À ces regards différents, correspondent généralement des

modélisations et des représentations distinctes. Tout d'abord, pour la gestion de l'infrastructure, il importe de saisir l'emprise de la voirie et la description de sa structure en volume. Cela permet de délimiter les éléments qui la composent, et de décider les aspects techniques et économiques de leur aménagement. En effet, lors de la réfection d'un élément de voirie, outre la nature du revêtement, la surface et l'épaisseur à couvrir conditionnent directement le coût des travaux (Cerema Ouest 2017). Ensuite, les études sur l'organisation spatiale des réseaux de transports (Lagesse et al. 2016 ; Barthélemy 2011 ; Bretagnolle et al. 2010) ou encore les recherches sur les questions de mobilités (Ticha 2017 ; Guérois et al. 2016 ; Goldberg et Harrelson 2005) s'appuient sur des représentations linéaires sous forme de graphes pour permettre les calculs d'itinéraires ou d'aires de desserte, grâce aux outils de la théorie des graphes.

Lorsque l'on cherche à représenter des éléments ayant une emprise spatiale et dans leur environnement, c'est-à-dire des « objets géographiques », les SIG sont adaptés. Ils acceptent des données décrites par des coordonnées géographiques longitudinales (x), latitudinales (y) et d'élévation (z). Les objets géographiques y sont représentés par des points, lignes ou polygones permettant de créer des « objets graphiques ». L'environnement des SIG est donc propice à une représentation de la voirie tenant compte de son emprise. Deux questions restent à être traitées :

1) D'abord, nous devons nous interroger sur les objets géographiques à saisir pour notre référentiel. Par exemple, le référentiel doit-il permettre de distinguer les sections courantes des intersections routières, et dans ce cas comment doivent-elles être représentées ? De même, devons-nous distinguer chaque élément composant la voirie (chaussée, trottoir ou encore stationnement) ? En d'autres termes, quel niveau de granularité sémantique doit être sélectionné ?
2) Ensuite, comme Larrivée et al. (2006) l'indiquaient, il n'existait pas, en 2006, d'outil SIG intégrant une extension spatiale formalisant correctement la modélisation d'une base de données géographique en 3D. Ceci est encore vrai aujourd'hui : la dimension Z utilisée dans les bases de données géographiques correspond à une simplification de la troisième dimension de l'élément modélisé. Il s'agira en général d'une élévation moyenne, maximale ou minimale ne permettant pas de construire un objet graphique représentant l'espace occupé de l'élément. À ce titre, plusieurs auteurs utilisent la notion de $2^{1/2}$D (de Cambray 1993 ; Bordin 2002 ; Ruiz et al. 2004). Les dimensions d'une voirie ne correspondent pas un volume parfait d'un parallélépipède rectangle. Ainsi, notre réflexion pour la conception de notre référentiel spatial de voirie devra tenir compte de cet aspect limitatif des SIG.

Partie 3 Enrichissement du référentiel spatial

Dans une troisième partie, nous produirons une analyse permettant d'identifier les informations essentielles à la gestion de la voirie et les données permettant de les décrire. Dans la mesure où peu de données sont produites et accessibles, nous collecterons nos propres données sur un terrain de référence en développant un processus spécifique simple. De là, nous montrerons comment elles peuvent être intégrées au référentiel spatial de voirie, et comment elles l'enrichissent.

En milieu urbain, les diverses fonctionnalités de la voirie – les mobilités, le commerce, les loisirs, la culture, le patrimoine ou encore les liens sociaux (Cerema 2018a) – nécessitent son partage. Celui-ci est réalisé par une partition de l'espace à l'aide d'équipements, de marquages au sol, ou encore, par une variation des matériaux de surface appelés revêtements. Ainsi, nous observons en surface une décomposition en éléments constitutifs de la voirie : un élément central destiné à la circulation motorisée, la chaussée, et des dépendances telles que les trottoirs ou les espaces de stationnement. En sous-sol, les éléments constitutifs de la voirie peuvent être dimensionnés différemment selon leurs fonctionnalités : leur structure est adoptée pour répondre aux sollicitations des activités supportées. Il est essentiel pour les gestionnaires d'avoir une connaissance fine du patrimoine constitué par la voirie qu'ils gèrent. Cette connaissance, en plus de la question de la valeur patrimoniale des infrastructures, permet d'une part d'aménager la voirie en cohérence avec les activités qu'elle supporte, d'autre part de l'entretenir. Par ailleurs, la voirie accueille des réseaux techniques, aussi bien en surface qu'en sous-sol. Ainsi, il convient de s'interroger sur quelles informations essentielles ont besoin les gestionnaires de voirie pour gérer leurs infrastructures vis-à-vis de leurs différentes fonctionnalités.

D'abord, il est essentiel de connaitre l'occupation souterraine de l'infrastructure pour des questions de sécurité lors de travaux sur les réseaux ou la voirie. Ensuite, lors d'interventions sur réseaux sous voirie, la règlementation impose que les tranchées réalisées soient remblayées à l'identique, c'est-à-dire en respectant la nature et les épaisseurs des matériaux présents à l'origine. Le caractère identique du remblai présuppose que les gestionnaires ont une connaissance préalable de l'infrastructure. Enfin, outre la description de la voirie, il est indispensable d'y associer une dimension temporelle. En effet, il s'agit d'une infrastructure évolutive dans le temps, sous l'effet de sollicitations : – mécaniques, telles que le trafic ; – thermiques et hydriques, liées aux cycles climatiques et aux intempéries ; – des interventions extérieures comme l'implantation de réseaux et leur maintenance. En d'autres termes, la voirie subit des dégradations. Si aucun entretien n'est réalisé, en surface, l'usure du revêtement conduit à une diminution de la rugosité donc de la sécurité et à des défauts d'étanchéité. L'infiltration de l'eau provoque à terme des

désordres structurels entrainant la voirie à un état de délabrement. Des dégradations structurelles peuvent se développer également sans altération initiale en surface, par exemple, par des contraintes exercées par le sol support ou des remontées hydriques. Afin d'éviter une dégradation totale de l'infrastructure, les gestionnaires entretiennent la voirie, en réalisant des opérations de maintenance.

Partie 4 Mise en œuvre et validation du référentiel spatial

Pour cela, dans la dernière partie, nous développerons une démarche d'analyse permettant de répondre à des questions thématiques, et ce notamment sur les relations spatiales et structurelles entre voirie et réseaux techniques.

La France dispose de plus de 4 millions de kilomètres de réseaux techniques. Environ deux tiers de ces réseaux sont enfouis ou subaquatiques, tandis qu'un tiers restent déployés en aérien (MEDDE 2011). Une réglementation existe et ainsi la norme NF P 98-332 fixe les distances d'implantation d'un réseau à proximité d'un réseau existant ou de la végétation implantée sur la voirie.

Dans tous les cas, la présence de canalisation sous la voirie peut avoir une incidence sur sa dégradation à deux niveaux. D'abord, un incident sur la canalisation endommagera la structure de la voirie, ensuite comme Aljr (2017) l'analyse dans ses travaux de thèse, une tranchée ouverte et remblayée réduira la durée de service de la voirie.

Les gestionnaires ont rédigé des guides de bonnes pratiques pour l'enfouissement de leurs réseaux. Ces guides recommandent, sans préciser la raison, une implantation préférentielle des réseaux sous les trottoirs (GRDF 2016). Ces informations sont parfois reprises dans le discours des entreprises routières ou des gestionnaires de voirie :

- en 2018, lors d'une présentation d'un projet d'innovation de route géothermique, une entreprise routière indiquait que leur technologie, implantée sous la couche de roulement sur toute la surface de la chaussée, est viable dès lors que les autres réseaux sont sous les trottoirs ;
- lors d'une rencontre en 2019 avec des acteurs de voirie départementale, des praticiens soulignaient que les réseaux ne passaient généralement pas sous les chaussées départementales. Pour autant, aucune information quantitative n'était disponible pour certifier cela.

Produire un référentiel spatial de voirie, puis, l'enrichir d'informations sur les structures et les dégradations de voirie, voire ses différents éléments constitutifs, présente alors un triple intérêt :

- d'abord, cela permet d'optimiser la gestion et la maintenance de la voirie ;

- ensuite, cela rend possible l'analyse de la localisation des réseaux techniques vis-à-vis des éléments de voiries tels que les chaussées ou les trottoirs ;
- enfin, le croisement de cette information avec la localisation des réseaux permettrait d'améliorer la connaissance sur les phénomènes de dégradation liés à leur présence.

Nous tenterons de répondre aux deux premiers points à partir d'analyses réalisées sur des cas d'études.

Ce travail s'inscrit dans les recherches visant à optimiser les performances des infrastructures sur toute leur durée de service, telles celles menées à l'Institut de recherche en constructibilité (IRC). La conclusion de ce manuscrit visera à synthétiser les différents résultats de la thèse en soulignant l'apport de la géomatique et notamment des SIG pour aider à améliorer la gestion d'infrastructures dans leur environnement, et produire des résultats permettant d'accroitre les connaissances sur ces dernières.

« *La seule définition du terme voirie est un sujet de contentieux : ni les hommes du XVème siècle, ni les acteurs modernes et contemporain ne lui assigne un sens unique. Dans une acception matérielle, il désignait la voie publique ou la décharge. Mais la voirie est aussi un pouvoir dont le contenu exact était indécis (…)* » (Katia Weidenfeld, Le contentieux de la voirie parisienne à la fin du Moyen Age, 1999)

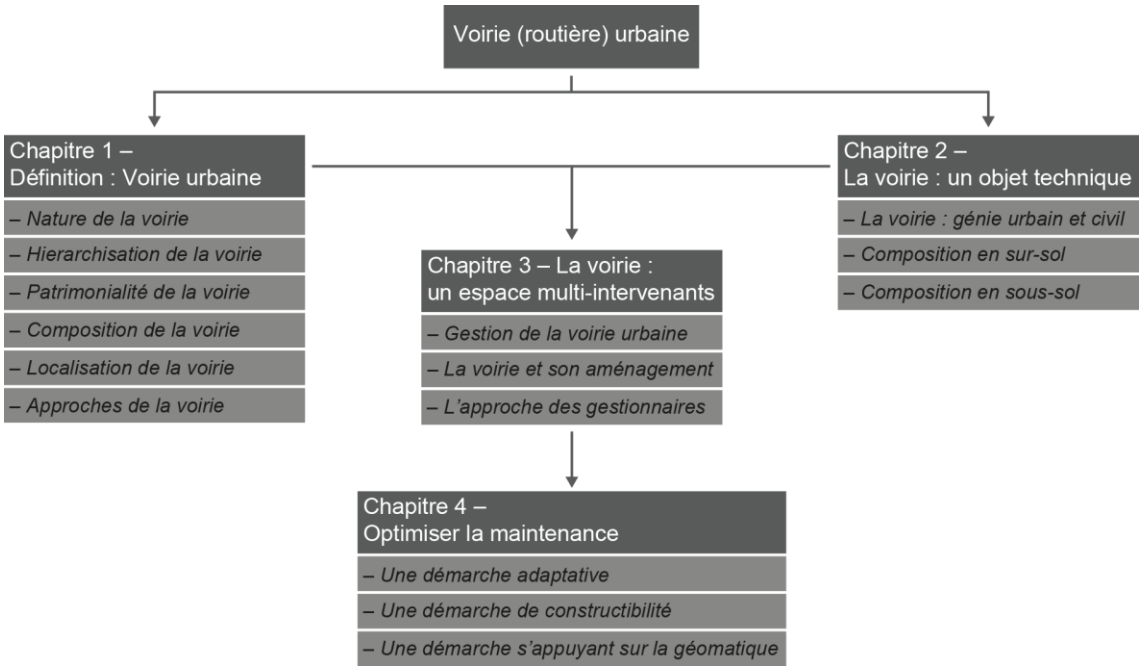
Partie I : La voirie routière urbaine – Vers une démarche d'optimisation des interventions sur voirie et réseaux enterrés

Introduction

À partir de l'analyse de différentes ressources bibliographiques relatives à la voirie urbaine, cette première partie a pour objectif d'ancrer nos recherches dans les champs disciplinaires les plus pertinents pour répondre à notre problématique. Elle nous permettra également de présenter le cadre méthodologique de nos travaux, en ciblant les concepts que nous utiliserons. En d'autres termes, cette partie vise à présenter le périmètre de nos recherches.

La **Figure 1** illustre l'organisation de cette partie en quatre chapitres :

- Dans un premier chapitre, nous analysons à l'aide de documents historiques et règlementaires l'objet central de notre travail, à savoir la voirie urbaine. À partir de cette analyse, nous précisons ce qui la constitue et comment elle a évolué au cours du temps.
- Dans un second chapitre, nous étudions les différentes approches de la voirie (génies civil et urbain) pour identifier les perceptions et les éléments nécessaires dans le cadre de notre problématique sur les interactions entre voirie et réseaux enterrés.
- Le troisième chapitre cible les différents intervenants de la voirie afin d'identifier les approches qu'ils ont de l'infrastructure et de comprendre la diversité des enjeux qu'elle revêt.
- Finalement, dans un dernier chapitre, nous présentons notre démarche de recherche et argumentons notamment l'emploi des méthodes et les outils de la géographie, et plus spécifiquement de la géomatique.



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 1 – Schéma d'organisation de la Partie I

1. Une voirie, des voiries – Définition de la voirie urbaine à partir d'une analyse des différentes conceptions

Dans ce premier chapitre, l'objectif est de définir l'objet central de nos recherches, la voirie urbaine :

1) Nous commençons par définir le vocabulaire général autour de l'infrastructure routière. En nous référant à l'évolution du champ lexical décrivant cette infrastructure, nous posons le vocabulaire utilisé ensuite tout au long de la présentation de nos recherches.
2) Ensuite, nous délimitons l'infrastructure routière urbaine, afin de dresser le périmètre de notre objet de recherche.
3) Enfin, à partir de l'analyse des différentes approches thématiques et techniques s'appuyant sur l'infrastructure routière dans leurs réflexions, nous ciblons les plus adaptées pour traiter notre problématique.

1.1. L'origine du terme « voirie routière »

1.1.1.La nature de la voirie

Le mot voirie vient du latin *via*, la *voie*, et fait référence historiquement aux voies de circulation naturelle. Aujourd'hui, il comprend les voies pouvant être routières ou pédestres, ferroviaires, fluviales ou aériennes. En effet, le mot, dans son sens étymologique regroupe les espaces liés à la circulation sans plus de spécifications.

Dans l'Antiquité, la voirie était déjà une infrastructure clé pour l'aménagement d'un territoire. Comme aujourd'hui, elle avait pour objectif de faciliter la circulation et d'améliorer l'accès à différents lieux. Elle favorisait également la circulation des idées et avancées scientifiques, des courants artistiques ou des théories philosophiques et religieuses, ainsi que la circulation des armées et du commerce (Staccioli 2003). Les civilisations antiques ont développé un vocabulaire précis permettant de décrire la voirie, dans le but notamment d'en assurer la gestion. Les romains, par exemple, avaient mis en place une typologie des voies selon leur importance et leur fonction : *iter* (le sentier), *actus* (le chemin), et *via* (la voie), telle que la *via Appia* (voie Appienne) reliant Rome à la ville portuaire de Brundisium (Brindisi). Chacune possédait des règles spécifiques de circulation liées à leurs configurations. Ainsi, les sentiers n'étaient pas praticables pour les bestiaux, contrairement aux voies plus larges, lesquelles permettaient également les déplacements à cheval, ou en voiture (char). Nous verrons par la suite que des typologies fonctionnelles et hiérarchiques perdurent aujourd'hui pour décrire la voirie. Au VIème siècle, les lois de l'Empereur Justinien recelaient d'autres éléments de définition sur la voirie romaine. Nous y observons, par exemple, une distinction entre la voirie privée et la voirie publique, notion permettant d'organiser

l'imposition pour son entretien (Ortolan 1857). Cette distinction entre la voirie privée et publique existe encore aujourd'hui (***Cf. 1.2, p. 47***).

Au fil des siècles, la configuration des voies a évolué, aussi bien par des élargissements, de nouveaux revêtements, que de nouveaux types de voies avec l'émergence de transports tels que les voies ferroviaires ou aériennes. Remonter à l'Antiquité renseigne sur l'origine des termes, mais ne permet pas d'avoir une image claire de ce que recouvre le terme actuel. L'essor des moyens de transport modernes et motorisés tels que la voiture individuelle, les poids lourds, ou les bus a conduit à une réorganisation structurelle de la voirie. Dans le même temps, une réflexion sur son aménagement a été initiée afin de la partager entre les différents usagers et modes de transport. Un retour au XIXème siècle, avant l'avènement de l'automobile, nous permet de mieux appréhender ces changements et ce qu'ils ont entrainé en termes d'organisation.

1.1.2.La hiérarchisation administrative de la voirie

Le traité de la voirie urbaine et rurale, ou des chemins et des rues communaux (Isambert 1825) vise à présenter de façon exhaustive l'état de la voirie française et des règlementations qui la régissent au début du XIXème siècle. La première information donnée porte sur le terme *vicinalité* développé au XVIème siècle, lequel renvoyait aux chemins reliant des bourgs voisins. *Voirie* a ensuite remplacé progressivement vicinalité, et s'est imposé dans le langage courant pour désigner l'ensemble des voies de communication. La seconde information porte sur la classification de cette voirie. Ainsi, selon Isambert, la grande voirie se composait des voies de communications terrestres et fluviales principales structurant le pays tandis que la petite voirie regroupait les voies de communication innervant localement des territoires.

Grande et petite voiries terrestres non ferroviaires décrites par Isambert ont été unifiées au XIXème siècle sous la dénomination de voirie. Sa description contient quatre niveaux présentés dans le **Tableau 1-1**. Le premier niveau est composé des routes royales de 1ère et 2ème classes. Celles-ci sont d'intérêt national dans la mesure où elles relient la capitale avec les extrémités du royaume et les grandes villes. Le second niveau regroupe les routes royales de 3ème classe. Elles relient les villes des départements et présentent de ce fait un intérêt régional ou départemental. Le troisième niveau correspond à la petite voirie irriguant les bourgs et villages. Le dernier niveau se compose de la voirie d'intérêt privé.

Tableau 1-1 – Classification de la voirie à partir de ISAMBERT, 1825

Type voirie	Type d'axe
La grande *voirie* – composée des grandes voies de communication terrestres (y compris voies fluviales)	Routes royales 1ère classe sont les communications entre la Capitale et les extrémités du Royaume.
	Routes royales 2ème classe sont les communications entre la Capitale et les grandes villes des départements.
	Rivières et fleuves navigables ou flottables
Dépendance de la grande *voirie*	Routes royales de 3ème classe relient les villes des départements.
	Les chemins de fer
La petite *voirie* ou *voirie* communale	Rues et places des villes, bourgs et villages
	Chemins vicinaux
Hors grande et petite *voirie*	Marchepieds ou chemins de halage et contre-chemin de halage, donnant accès aux bords de cours d'eau.
	Les chemins à usage exclusivement militaires : les Chemins couverts, remparts, parapets, terrains de fortification des places de guerre, postes militaires
	Les chemins à travers la forêt
	Autre chemins privés

Sources : Isambert 1825

À partir de 1926, les voies fluviales, ferroviaires et routières sont distinguées dans le cadre d'un décret-loi encadrant toutes les infractions à la circulation et à la dégradation de la voirie routière (Décret du 28 décembre 1926 1926). Les voies fluviales forment alors avec la voirie ferroviaire ce que l'on appelle encore aujourd'hui la *grande voirie*, tandis que les autres voies terrestres composent la *voirie routière*. Les voies routières sont les plus présentes, avec plus d'1 million de kilomètres contre 30 000 km pour les voies ferrées et 8 500 km pour les voies fluviales (Routes de France 2018). Ainsi, le terme voirie fait le plus souvent référence aujourd'hui aux voies terrestres non ferroviaires. Compte tenu de la généralisation du terme voirie pour parler de la voirie routière, nous adopterons ici cette simplification.

La typologie d'Isambert rappelle la classification des routes utilisée aujourd'hui, c'est-à-dire les routes nationales, départementales et communales. Sangaré et Thibault en 1996 décrivaient la voirie à partir de ces trois niveaux en y ajoutant, comme Isambert, un quatrième. Dans ce cas contemporain, il ne s'agit pas d'intégrer la voirie d'intérêt privé, mais de dissocier le niveau national selon son mode de gestion (Etat ou concession). Le premier niveau découle des schémas d'aménagement du territoire à l'échelle nationale. Il s'agit des autoroutes, lesquelles peuvent être concédées à de grandes entreprises du secteur privé. Les autoroutes représentent 12 300 km, soit 1% du linéaire de la voirie française. Le second niveau, géré par l'Etat, constitue la voirie structurante du territoire national en reliant notamment les capitales régionales. La voirie nationale se compose de 8 200 km, soit 1% du linéaire de voirie du pays. Le troisième, de gestion

départementale, présente un rôle similaire au précédent en reliant les communes d'un département. La voirie départementale compte 379 700 km, soit 35% du linéaire de voirie. Enfin le niveau communal organise la trame locale. La voirie communale est la plus importante avec 687 800 km, soit 63% du linéaire de voirie (Routes de France 2018).

Les similitudes entre la typologie d'Isambert, et celle proposée par Sangaré et Thibault s'expliquent par le fait qu'il existe des correspondances entre les différentes classes (**Tableau 1-2**). Ainsi, les routes royales de 1ère et 2ème classes sont devenues soit des routes nationales ou des autoroutes, soit des routes départementales de par le déclassement (de certaines nationales) opéré depuis les années 1970 (Offner 2004). Les routes Royales de 3ème classe déjà nommées départementales sont restées de la responsabilité des départements sous la même dénomination. Enfin, la petite voirie est formée de l'actuelle voirie communale.

Tableau 1-2 – De la classification d'Isambert à la classification contemporaine

Typologie d'Isambert début XIXème siècle		**Typologie Sangaré et Thibault fin XXème siècle**	
Niveau 1 (Grande voirie)	Routes royales 1ère classe relient la Capitale et les extrémités du Royaume.	Niveau 1	Autoroutes
	Routes royales 2ème classe relient la Capitale et les grandes villes des départements.	Niveau 1 bis	Routes nationales
Niveau 2 (Dépendance de la Grande *voirie*)	Routes royales de 3ème classe relient les villes des départements.	Niveau 2	Routes départementales
Niveau 3 (Petite *voirie*)	Rues et places des villes, bourgs et villages Chemins vicinaux	Niveau 3	Routes communales
Niveau 4 (Autre *voirie*)	Marchepieds ou chemins et contre-chemin de halage, donnant accès aux cours d'eau.	Hors typologie	Les routes et chemins privés
	Les chemins à usage exclusivement militaires		
	Les chemins à travers la forêt		
	Autre chemins privés		

Sources : Isambert 1825 ; Sangaré et Thibault 1996

Cette analyse de textes historiques a permis de revenir sur l'origine du terme voirie et sur celle de l'association voirie routière. De plus, la présentation et la mise en relation des typologies de voirie du XIXème siècle et contemporaine met en évidence l'existence de plusieurs voiries routières. Ces voiries ont des rôles différents selon les territoires qu'elles relient. En nous appuyant sur le sens originel de la voirie, et sur son évolution, nous posons que **la voirie renvoie à l'ensemble des espaces liés à la circulation terrestre hors espaces ferroviaires. Une analyse du cadre règlementaire permettra ensuite de préciser ce qu'est la *voirie routière***.

1.2. Le cadre règlementaire de la voirie

1.2.1.La patrimonialité de la voirie

Le Code de la voirie routière datant de 1989, et mis à jour régulièrement, apporte un cadre législatif et règlementaire. La voirie y est désignée sous l'appellation *domaine routier public* lorsqu'elle appartient à une collectivité territoriale publique et est accessible librement au public. Le domaine routier public doit être entendu comme l'« *ensemble des biens du domaine public de la commune affectés aux besoins de la circulation terrestre, à l'exception des voies ferrées* » (Code de la voirie routière 2015a). Cet espace public se définit par opposition à l'espace privé pouvant appartenir à une collectivité publique, ou à un individu ou groupement d'individus. Les espaces privés sont, par exemple : les logements communaux ou certains locaux commerciaux, les habitations, les dépendances telles que les jardins ou les garages, ou encore les terrains agricoles. Faivre d'Arcier, Christory, et Mignot (1993) indiquaientt que l'espace public est constitué de l'espace résiduel entre les parcelles cadastrales. Le domaine privé comporte également de la voirie. La voirie routière privée est alors constituée soit de chemins forestiers ou ruraux, soit de voies d'accès dépendant d'intérêts purement privés. Lorsque la voirie privée appartient à une collectivité territoriale elle relève de son domaine privé.

Par ailleurs, le Code de la voirie routière décrit l'espace public routier par ses usages et les règles qui les accompagnent, comme par exemple la circulation ou les droits des riverains (Code de la voirie routière 1989b). Il décline également le domaine public routier selon son gestionnaire à travers la voirie nationale, départementale et communale. En revanche, il ne donne aucune définition exhaustive du domaine public et ne décrit pas les éléments qui le constituent.

1.2.2.La composition de la voirie

L'appareil administratif, par ses ministères ou ses tribunaux administratifs, vient ensuite compléter le texte à l'aide de cas pratiques. C'est ce que l'on appelle la « doctrine administrative ». Dans le cas de la voirie, le tribunal administratif de Clermont-Ferrand de 1960 a jugé que les dépendances de la route, décrites par la suite (***Cf. 2.2.3, p. 61***), devaient être prises en compte. La doctrine a alors permis de compléter la définition : l'emprise du domaine public routier correspond à l'ensemble du terrain public affecté à la route ainsi qu'à ses dépendances. La route est ici définie comme l'espace circulable par les véhicules motorisés. Selon cette définition, le domaine routier public coïncide alors avec le domaine public sans les cimetières, les édifices historiques et religieux, les voies fluviales et ferroviaires, ainsi que les locaux directement à l'usage du public tels que les établissements scolaires, stades, ou encore bâtiments administratifs.

En 2006, le Code général de la propriété des personnes publiques (CG3P) introduit dans la règlementation le terme *dépendances*. Celles-ci sont définies comme étant des accessoires d'une infrastructure, ici routière. Ces dépendances sont indissociables de l'infrastructure, dans la mesure où elles contribuent à son bon fonctionnement ainsi qu'à la sécurité des usagers (CG3P 2006). La doctrine administrative entérine alors le fait que la voirie comprend les *chaussées*, nommées « routes », et leurs dépendances. Le texte législatif dresse une liste non exhaustive des dépendances. Un guide pratique associé liste les différents cas de jurisprudence et permet de regrouper les dépendances en sept catégories interdépendantes : les espaces dédiés aux piétons, ceux dédiés à la sécurité des usagers, la bonne tenue de l'infrastructure routière, les espaces de stationnement, les équipements routiers, les autres ouvrages de circulation, ainsi que les espaces ou éléments d'agrément (DGCL 2007).

Compte tenu des éléments apportés par la règlementation, nous précisons la définition de la voirie. **La voirie est une infrastructure permettant les circulations terrestres hors circulation ferroviaires. Elle appartient soit au domaine public ou privé d'une collectivité territoriale, soit à un individu ou groupement d'individus. Finalement, elle est composée d'un élément central, une chaussée, et des dépendances et accessoires permettant son maintien, la sécurité de ses usagers, et son agencement**. Au-delà de la composition de la voirie, le cadre règlementaire permet de définir le périmètre de la voirie urbaine.

1.3. La localisation de la voirie : définition de la « voirie urbaine »

Le Code rural et de la pêche maritime de 1992 apporte une distinction entre la voirie située à l'intérieur ou à l'extérieur d'une agglomération : lorsque l'infrastructure est hors agglomération, elle est appelée *voirie rurale* ; à l'inverse, lorsqu'elle est en agglomération, elle est appelée *voirie urbaine* (Code rural et de la pêche maritime 1992). Le caractère urbain ou rural est alors essentiellement lié à la localisation de la voirie. Ainsi, le Code de la route précise que la délimitation de l'espace urbain d'une commune, appelée *agglomération*, doit être définie par un arrêté du maire en tant qu'autorité détentrice du pouvoir de police. Les panneaux d'indication d'entrée en agglomération placés sur la voirie servent à ce titre de limite physique (Code de la route 2001). En milieu urbain, l'emprise de la voirie s'étend entre deux limites privées. En milieu rural les limites de son emprise sont posées par la collectivité territoriale gestionnaire. La distinction entre voirie urbaine et rurale est étroitement liée à sa fonction.

Le milieu urbain, même s'il est majoritairement traversé par la voirie communale, se voit également desservi par la voirie de niveau supérieur ou inférieur. En effet, la voirie nationale ou départementale, mais également des chemins ou encore des sentiers, peuvent traverser une agglomération. Les *chemins* et *sentiers*, bien qu'ils soient parfois inscrits dans les communes, ne

lui appartiennent pas. Régis par le Code rural et de la pêche maritime (1992), ils sont réservés « *à la communication entre divers fonds, ou à leur exploitation* ». Ils se déclinent en trois groupes :

- les premiers sont les chemins longeant ou aboutissant à des héritages ;
- les seconds sont des chemins exploités par les seuls riverains et dont la circulation est discontinue. Ils restent dans le domaine privé individuel, à condition qu'aucune collectivité publique, une commune ou un département, n'y ait opéré d'aménagements et n'ait fait valoir de droit de propriété ;
- les derniers sont des chemins répondant à certaines obligations. Notamment, ces chemins qui désenclavent des parcelles ne sont pas intégrés au domaine privé d'une collectivité, et ne sont d'usage obligatoire que pour les seuls riverains. Les chemins et sentiers d'exploitation forment donc la voirie locale privée.

La voirie communale, composante majeur de la voirie urbaine, est définie par l'Ordonnance n° 59-115 relative à la voirie des collectivités locales de 1959. Celle-ci se compose alors des voies urbaines, des voies reliant les petits bourgs entre eux, soit les chemins vicinaux à l'état d'entretien, et d'une partie des chemins ruraux. Le terme *voie* est utilisé ici lorsqu'il est question de ne mentionner qu'un type de voirie selon sa fonction. Les voies urbaines correspondent alors à ce qu'Isambert regroupait dans les rues et places des villes, bourgs et villages (***Cf. Tableau 1-2, p. 46***). Elles connectent les espaces résidentiels aux espaces de commerces ou de vie sociale, et forment la voirie urbaine communale. Le rôle de la voirie urbaine communale dépasse celui de simple support aux transports pour devenir un véritable lieu de vie pour les riverains comme pour les usagers. Ensuite, les voies reliant les petits bourgs, les chemins vicinaux et les chemins ruraux, assurent les communications interurbaines et la desserte de secteurs enclavés, et forment la voirie rurale communale (Brès 2006 ; De Schutter 2005). En conclusion, la voirie communale est composée à la fois d'une voirie urbaine et d'une voirie rurale. Elle peut être connectée à une voirie locale privée. Ce qui s'observe à l'échelon local est vrai à tous les échelons de voirie, c'est à dire pour la voirie départementale ou nationale.

Le Code de la voirie routière (1989d) pour la voirie urbaine communale, et le code rural pour la voirie rurale communale, prévoient des dispositions différentes pour l'aménagement de la voirie selon si elle se trouve en milieu urbain ou rural. Ainsi, la voirie urbaine communale a un rôle de desserte pour la circulation générale. Elle est imprescriptible et inaliénable, c'est-à-dire qu'elle ne peut être ni supprimée, ni cédée ou vendue. Un déclassement ou une procédure lui faisant perdre son caractère public peut toutefois la rendre prescriptible et aliénable. Les communes sont juridiquement responsables de son entretien et doivent donc en conséquence prévoir un budget généralement conséquent. La voirie rurale communale présente une vocation agricole, en

favorisant l'accès aux domaines agricoles par les exploitants. Elle est aliénable et aucune disposition législative ou règlementaire n'oblige les communes à son entretien.

Au-delà de la voirie communale et de la voirie locale privée, la différence de rôle de la voirie entre les milieux urbain et rural s'observe au quotidien dans son aménagement. Lorsque son rôle est uniquement lié aux communications interurbaines, son aménagement bien que complexe peut paraitre assez simple au regard de l'aménagement visible : un espace de circulation des véhicules, ainsi que des bordures destinées surtout aux arrêts en cas d'urgence. En revanche, dès lors que la voirie devient également un lieu de vie, que les échanges et les déplacements s'y multiplient, que sa fonction se diversifie, sa forme évolue (***Cf. 2.2.1, p. 58***). En ville, les différents transports se côtoient davantage et entrainent une division de l'espace. Premièrement, nous observons un partage de la voirie selon le mode de déplacement, avec des espaces piétons, cyclables, ou pour véhicules motorisés. Ensuite, l'activité conduit également à un partitionnement avec des espaces réservés aux déplacements, aux stationnements, ou aux loisirs. Cette division implique des aménagements spécifiques afin d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité des individus. Le critère de sécurité prend une dimension plus large en ville. En effet, en milieu urbain, il n'est plus question de protéger en majorité les usagers motorisés des accidents mais de tenir compte de la promiscuité plus importante entre les différents usagers selon leur vulnérabilité, comme notamment les piétons et les véhicules motorisés.

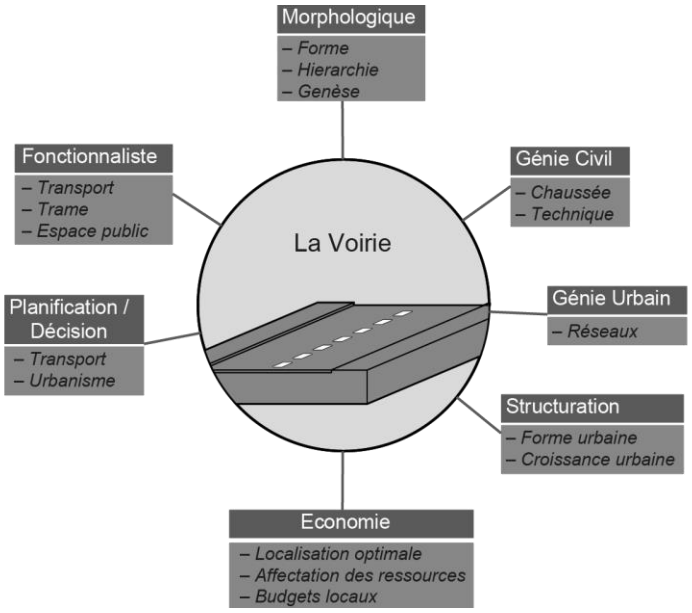
La voirie peut ainsi être catégorisée selon sa nature, sa hiérarchie administrative, sa patrimonialité et son caractère urbain ou non. Menerault (1994) indiquait en se basant essentiellement sur la hiérarchie administrative de la voirie que celle-ci ne présentait pas d'unité – sur les plans – géographique, fonctionnelle et de gestion. En effet, d'un point de vue géographique et fonctionnel, la voirie nationale et communale ne sont pas aménagées sur le territoire national de la même façon et n'ont pas non plus les mêmes rôles. La première relie les grandes villes et permet les mobilités interurbaines, tandis que la seconde irrigue localement les quartiers dans les villes et est davantage liée à la mobilité quotidienne. De même, du côté de la gestion, l'Etat, les départements, ou encore les communes gèrent chacun la voirie correspondant à l'échelon territorial pour lequel ils ont les compétences. Ainsi, ces deux critères d'unité (géographique, fonctionnelle et de gestion) non validés pour la voirie suggèrent qu'il n'existe pas une mais plusieurs voiries.

Partant de ce constat, Menerault (1994) utilisait le terme de *réseau viaire*, dès lors qu'il était question de l'ensemble des catégories de voirie. Le terme de réseau viaire est couramment utilisé dans certains champs disciplinaires, et notamment en géographie des transports (Marshall 2006 ; Genre-Grandpierre 1999 ; Brès 1998). Il renvoie principalement à la fonction de support des mobilités de la voirie, et semble de ce fait limitatif pour notre thématique de recherche sur les

interactions entre réseaux techniques enterrés et voiries. Par ailleurs, puisque nous bornons notre recherche au milieu urbain, nous choisissons de conserver le terme de *voirie urbaine*. Ce terme regroupe la part de toutes les voiries, c'est à dire communale, départementale, nationale, ou autre, incluses dans l'agglomération telle qu'elle est délimitée par l'autorité compétente. Cette définition est avant tout administrative et règlementaire. Nous constatons que selon les acteurs intervenant sur la voirie, ou spécialistes s'intéressant à cet objet, des perceptions et donc des définitions différentes émergent.

1.4. Différentes approches de la voirie urbaine

La voirie forme un *patrimoine*, c'est-à-dire qu'elle est un bien immobilisé et exploité par une organisation afin d'assurer un service, tel que permettre la mobilité (Nafi et Tourment 2016). De nombreuses activités s'appuient sur ce patrimoine, ce qui en fait un espace sur lequel plusieurs acteurs interviennent. Parmi eux figurent les gestionnaires de l'infrastructure (collectivité publique ou organisation privée) ; ou encore les acteurs s'intéressant aux services tels que les organismes de transport. Plus largement, Faivre d'Arcier, Christory, et Mignot (1993) replaçaient la voirie dans le cadre de différents champs thématiques. Les mêmes auteurs identifiaient sept approches renvoyant à différentes perceptions de la voirie et donc à différents groupes d'acteurs ou spécialistes de la voirie (**Figure 1-1**). Il s'agit des approches *morphologique*, *fonctionnaliste*, *planificatrice et décisionnelle*, *économiste*, *structurelle*, ainsi que *génie civil* et *urbain*.



Sources : Faivre d'Arcier et al. 1993 / Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 1-1 – Exemples d'approches de la voirie

Bien que la typologie présentée par Faivre d'Arcier ne soit pas exhaustive, elle est à notre connaissance la seule à présenter la voirie selon des champs thématiques et techniques aussi variés. Sans chercher à décrire précisément chacune de ces approches, il apparait intéressant d'identifier à quelles facettes de la voirie chacune s'intéresse.

D'abord, l'approche *morphologique* concerne les formes et leur genèse. À travers cette approche, il est considéré que la voirie organise l'espace par son emprise, c'est-à-dire sa largeur, sa longueur, ou encore par sa partition selon ses différents usages. Les acteurs ayant recours à cette approche s'intéressent notamment au processus de constitution de la voirie, laquelle a pu se développer par strates ou par l'effet de la planification urbaine. Ensuite, nous regroupons les approches *fonctionnaliste* et *planificatrice/décisionnelle* car celles-ci mettent l'accent sur les fonctions assurées par la voirie, par exemple, commerciale, de loisir ou de transport. La *planificatrice* dépasse cet aspect en donnant à la voirie un rôle essentiel dans l'urbanisation, en considérant par exemple qu'un nouvel espace urbanisé ne s'intègre à l'espace urbain existant que s'il lui est correctement relié. Les acteurs concernés par ces approches partitionnent la voirie en différentes trames, par exemple, les trames vertes ou commerciales. Pour autant, ces deux approches ne renvoient pas la voirie à un simple réseau. En effet, l'environnement de chaque voie est pris en compte, tel que l'espace privé contigüe ou leur positionnement relatif. Ceci permet d'évaluer à quel point les voies assurent les fonctions qui leur sont attribuées. De son côté, l'approche *structuraliste* pose la voirie en tant que moteur de la croissance des espaces. Par exemple un espace urbanisé s'étend grâce au développement de la voirie. Ici, la voirie est clairement définie en tant que réseau à travers sa fonction de support de mobilités. Il existe également plusieurs approches *économistes*. Généralement, celles-ci renvoient à l'idée d'une recherche d'allocation optimale des ressources telles que les activités économiques ou les zones résidentielles. La voirie est alors davantage identifiée comme un moyen de transport assurant l'accessibilité plutôt que comme une infrastructure. Enfin, il existe les approches dites de *génie urbain* et de *génie civil*. La première se focalise sur la production et la gestion des réseaux techniques, c'est-à-dire, la voirie en tant que réseau de transport, mais également les réseaux techniques tels que l'assainissement. La deuxième concerne les techniques de construction et d'entretien de la voirie, et s'intéresse de ce fait à sa dimension verticale, c'est-à-dire, sa structure (***Cf. 2.3.2, p. 70***).

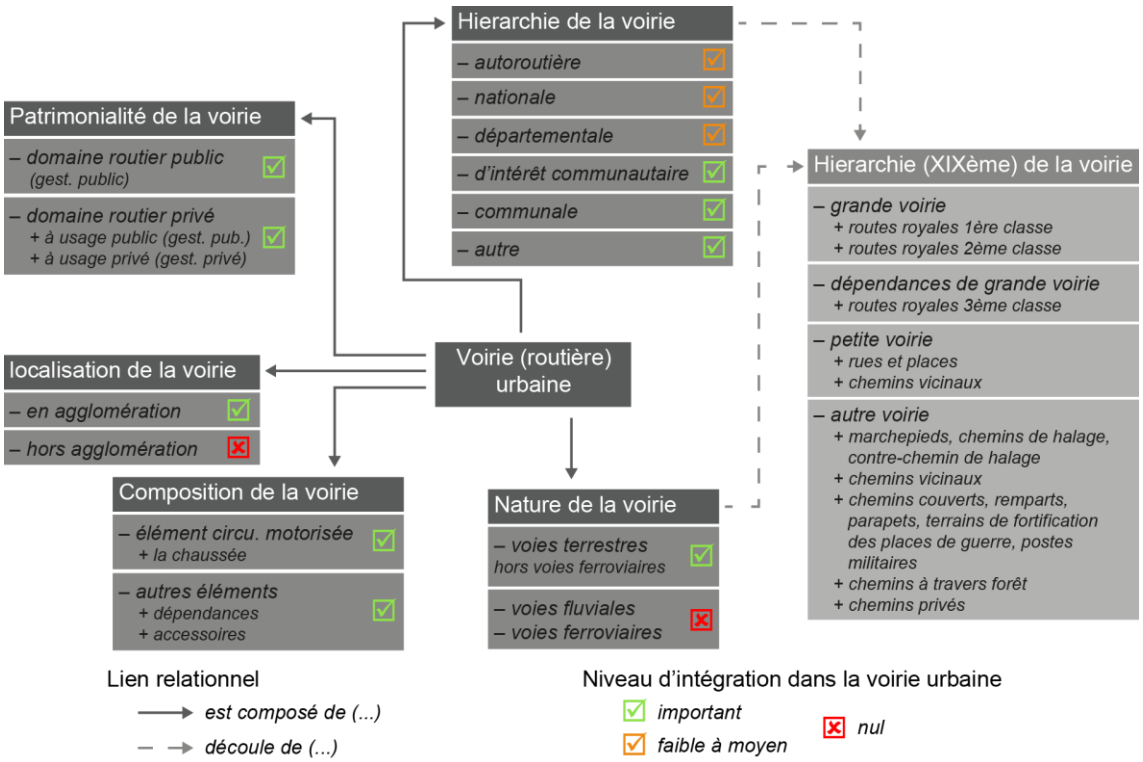
Ces différentes approchent renvoient à des définitions distinctes de la voirie, que nous pouvons illustrer par deux exemples. Premièrement, dans une approche *fonctionnaliste*, la voirie est souvent perçue à travers une seule de ses fonctions, celle de support du trafic. Ceci conduit généralement à ne tenir compte que d'un seul élément constitutif de la voirie : les voies de circulation. Par exemple, Aubert et Tourjansky-Cabart abordent la voirie comme un territoire à

partager entre les différents modes de transport. Leurs réflexions sur l'allocation de la voirie en centre urbain, les amènent naturellement à la question du stationnement et de son impact sur la circulation routière en centre-ville, lorsque celui-ci prend place sur les voies de circulation. En concluant qu'« *une file de stationnement empiète sur la voirie* (routière), *rétrécit l'espace destiné à la circulation et contribue à augmenter la congestion* », les auteurs adoptent implicitement comme définition de la voirie : l'espace circulable uniquement par les transports routiers, en d'autres termes, les voies de circulation (Aubert et Tourjansky-Cabart 2000).
Deuxièmement, en génie urbain et civil, la voirie est perçue comme une infrastructure délimitée aussi bien en surface qu'en profondeur. Dans une réflexion environnementale, par exemple, Hendel et al. (2015) s'intéressent à l'impact de la voirie sur le climat en fonction des matériaux qui la constituent et de leur environnement. Les auteurs analysent ainsi l'influence des matériaux de surface et structurels sur la formation d'îlots de chaleurs en milieu urbain. Ils constatent qu'au-delà de l'effet de l'albédo des matériaux de surface sur la chaleur, les matériaux structurels de la voirie influent également sur le comportement thermique de l'infrastructure. La voirie dans ce contexte renvoie à un territoire en trois dimensions constitué de matériaux de chaussées répartis en différentes couches de structure (**Cf. Partie III, 9, p. 170**).

Notre recherche est inscrite dans une démarche d'analyse des interactions spatiales et structurelles entre la voirie et les réseaux enterrés. Le fait que les approches génie urbain et génie civil posent la voirie en tant qu'« objet géographique » disposant d'une dimension horizontale et d'une dimension verticale, et en tant qu' « objet technique » par sa structure est particulièrement intéressant. Dans sa dimension horizontale, c'est-à-dire pour son emprise au sol, elle peut être partagée selon les usages et les fonctions qui lui sont attribués. Ce partage en surface est réalisable à condition que sa structure, dans sa dimension verticale soit conçue pour répondre aux besoins de ses usages et fonctions. Par ailleurs, ces approches sont généralement au cœur des métiers des services techniques des gestionnaires de voirie et des réseaux techniques liés à la voirie. Ainsi, nous incluons dans notre définition de la voirie ses dimensions verticales et horizontales.

Synthèse I.1

À partir de textes historiques, nous avons mis en évidence l'héritage laissé par les romains, notamment le vocabulaire et la hiérarchisation permettant de décrire l'infrastructure selon ses fonctions. Ainsi, nous avons identifié que le terme voirie permet de désigner l'ensemble des voies permettant le déplacement des personnes et des biens matériels (***Cf. 1.1, p. 43***). Il s'agit alors des voies ferroviaires, fluviales, ou encore routières. Dans le cadre de nos travaux nous nous intéressons à l'infrastructure routière urbaine, et donc la voirie routière urbaine, que nous désignerons par la suite *voirie urbaine*. La **Figure 1-2** synthétise les différents éléments de définition de la voirie urbaine.



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 1-2 – Synthèse de définition de la voirie urbaine

Nous avons identifié que la voirie urbaine est la voirie traversant une agglomération, au sens administratif du terme (***Cf 1.3, p. 48***). Elle se compose généralement d'un élément central, la chaussée, et de dépendances et d'équipements lui permettant d'assurer l'ensemble de ses fonctions (***Cf. 1.2, p. 47***). La voirie urbaine n'appartient pas à un seul et même gestionnaire. Elle se caractérise donc par sa patrimonialité. Par exemple, elle est du ressort du domaine public lorsqu'elle appartient à une collectivité publique et est à l'usage du public. À l'inverse, elle est du ressort du domaine privé lorsqu'elle est privée et à usage public tout en appartenant à une collectivité publique ; ou lorsqu'elle est à usage privé tout en appartenant à un organisme, un individu, ou encore un groupe d'individus (***Cf. 1.2, p. 47***). La patrimonialité est également directement liée à la fonction première de la voirie, c'est-à-dire à son rôle de support des déplacements. Cette fonction a systématiquement conduit à hiérarchiser la voirie, en distinguant par exemple la voirie reliant les grandes villes de celles irriguant localement les territoires. La voirie urbaine est principalement constituée d'une voirie irriguant localement le territoire urbain, il s'agit de la voirie communale ou d'intérêt communautaire, ainsi que de la voirie privée. Bien sûr, les voiries structurantes que sont les voiries nationales, départementales et plus rarement autoroutières sont également amenées à composer la voirie urbaine dès lors qu'elles traversent une agglomération.

Au-delà du cadre règlementaire et administratif permettant d'identifier ce qu'est la voirie urbaine, nous avons identifié que selon le champ thématique ou technique par lequel on l'aborde, nous percevons la voirie différemment (***Cf. 1.4, p. 51***). Compte tenu de notre thématique de recherche, les approches génie urbain et civil apparaissent comme les plus adaptées. Ces approches nécessitent une analyse plus fine de l'infrastructure, notamment en décomposant ses éléments constitutifs afin d'en obtenir une bonne maitrise. Cette analyse est présentée dans le chapitre suivant.

2. La voirie selon les approches de génie civil et génie urbain – Délimitation et compréhension de l'objet géographique et technique

L'objectif de ce deuxième chapitre est de replacer nos travaux dans les champs disciplinaires les plus adaptés pour traiter notre problématique de recherche :

1) Dans un premier temps, nous analysons le lien entre le génie civil et le génie urbain, puis nous replaçons plus précisément notre problématique de recherche à l'interface de ces deux approches.
2) Ensuite, nous identifions le vocabulaire technique pour décrire la voirie selon l'approche du génie urbain.
3) Puis nous réalisons la même analyse pour le vocabulaire lié à l'approche du génie civil.

Identifier ce vocabulaire devra nous permettre :

– d'assurer un bon dialogue avec les différents intervenants ;
– de saisir un vocabulaire adapté lors la conception de notre référentiel spatial de voirie.

2.1. La voirie urbaine entre génie civil et génie urbain

Le champ disciplinaire du génie civil est ancien et, bien que vaste, il est aujourd'hui bien défini. Il couvre entre autres toutes les techniques de construction civile, c'est-à-dire des travaux publics et du bâtiment. Les infrastructures routières, et donc la voirie, font de ce fait partie des domaines d'application du génie civil. Par ailleurs, ce champ disciplinaire intègre toutes les phases visant la construction de l'ouvrage (Cerema 2016 ; Barjot et Dureuil 2008).

Chaque projet de construction commence par une phase de planification permettant de placer l'ouvrage à construire dans un ensemble de plans directeurs. Des études d'avant-projet permettent ensuite de concevoir l'ouvrage. Afin que l'ouvrage réponde aux fonctions qui lui seront attribuées, des ingénieurs civils déterminent ses différents éléments constitutifs lors d'une phase de dimensionnement (**Cf. Partie III, 9.1, p. 170**). Des appels d'offres sont rédigés pour choisir les entreprises de travaux et planifier le coût de réalisation du projet. Une fois la construction exécutée, l'ouvrage est réceptionné et est exploité et entretenu par un gestionnaire. Ces différentes phases nécessitent l'intervention de divers acteurs que nous présenterons ultérieurement (***Cf. 3 p. 73***). De ce fait, de nombreuses disciplines sont requises telles que la géotechnique, la résistance des matériaux, la stabilité des structures ou encore la topographie.

À l'inverse, le terme génie urbain est plus récent. Dupuy indiquait que la pratique du génie urbain est aussi ancienne que les villes. En revanche, parler du génie urbain et le définir est récent. D'après Dupuy (1981), ce champ disciplinaire s'articule autour de trois préoccupations majeures :

- 1). Le milieu urbain nécessite une adaptation ou une innovation technologique afin de répondre aux enjeux du milieu. Par exemple, Dupuy citait parmi ces innovations, le traitement des eaux et l'épuration, le traitement des déchets solides ou l'isolation phonique des bâtiments. Dans cette liste, la voirie trouve sa place, dès lors que l'on s'intéresse à l'amélioration de ses propriétés phoniques, de l'utilisation de matériaux recyclés du milieu urbain tel que les mâchefers, ou encore le choix de matériaux à utiliser en cas de présence de réseaux techniques enterrés.
- 2). La gestion des infrastructures ou équipements est un enjeu important pour le milieu urbain. À ce sujet, l'auteur indiquait que l'accroissement des charges salariales ou encore la hausse des coûts de l'énergie pouvaient devenir des freins à la gestion et à la maintenance des équipements. Or, si les collectivités territoriales locales éprouvaient des difficultés de financement dans les années 1980, la tendance dans les années 2000 et 2010 a été de réduire davantage encore les budgets et donc les coûts de gestion (Guenoun, Meyssonnier, et Turc 2015). Il est alors essentiel de penser la gestion des équipements en amont des projets. Dans cette optique, les interactions spatiales et structurelles entre voirie et réseaux enterrés permettraient d'amorcer une réflexion d'optimisation budgétaire de la maintenance de la voirie. Par exemple, la localisation des réseaux pourrait permettre des choix constructifs de la voirie au niveau des matériaux à utiliser.
- 3). La coordination de la production et de la gestion des équipements est particulièrement complexe en milieu urbain. L'auteur prend pour exemple la question de la gestion de la voirie et des réseaux divers, notamment en ce qui concerne l'imperméabilisation des sols par la voirie et son impact sur l'assainissement et le traitement des eaux pluviales. Par extension, la coprésence des éléments de voirie et des réseaux enterrés soulèvent de nombreuses questions pour les interventions sur réseaux et sur voirie.

Dans cette première approche du génie urbain, la conception et la gestion des équipements sont très présentes. En 1989, le même auteur revient sur le champ disciplinaire du génie urbain en indiquant que si le critère d'urbanité des équipements est primordial, la technicité l'est moins (Dupuy et al. 1989). Plus tard, Sangaré et Thibault (1996) relevaient que la gestion de la ville, au-delà des problématiques techniques, est largement conditionnée par l'aspect politique. La sphère technique intervient alors pour la conception, la réalisation et l'entretien des équipements, tandis que la sphère politique se charge de la programmation, la gestion et le financement de ces équipements. De ce fait, l'un des aspects les plus importants du génie urbain est la coordination entre le champ politique et le domaine technique.

Cette contextualisation des génies civil et urbain présuppose que l'aspect technique, c'est-à-dire la conception et la réalisation des ouvrages demeurent des compétences du génie civil. Le génie

urbain quant à lui est davantage concerné par des réflexions en amont ou en aval des constructions. En amont il intervient dans les questions du *quoi* et *où* construire. En aval, il est impliqué dans les décisions portant sur l'entretien ou la maintenance des ouvrages en décidant quand et comment intervenir selon les budgets disponibles. Ces éléments confirment l'intérêt de placer notre problématique de recherche à l'intersection de ces deux champs disciplinaires. D'ailleurs, dans le cadre d'une problématique similaire, d'autres chercheurs ont opté pour le même choix comme, par exemple, pour le projet « Clé de Sol » (Cerema 2005). Celui-ci a été développé sur le constat que la voirie urbaine subissait de nombreuses interventions liées à la présence de réseaux enterrés. Les experts du projet se sont tournés vers le développement de galeries multi-réseaux permettant de regrouper les réseaux techniques. À travers la présentation de leurs travaux, ceux-ci se sont positionnés dans une démarche alliant génie urbain, pour la coordination des différents gestionnaires et la réorganisation spatiale des réseaux, et génie civil, pour la conception et réalisation des galeries.

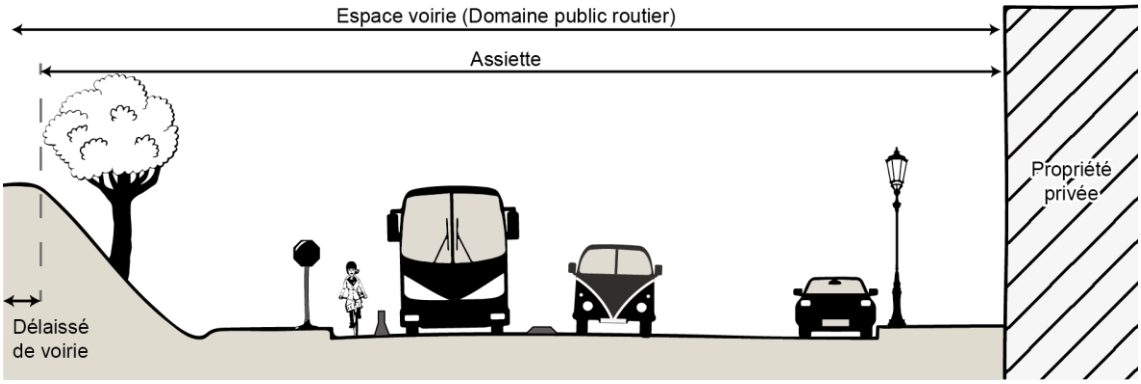
2.2. La voirie urbaine en génie urbain : son aménagement en sursol

L'espace occupé en sursol par la voirie s'organise en secteurs, composés eux-mêmes d'éléments ou infrastructures nécessaires au bon fonctionnement de l'infrastructure et à la sécurité des usagers. À ce jour, en dehors de ce qui est présenté par le Code de la route (2010b), le législateur n'a pas dressé de liste complète de ces éléments. Ainsi, les gestionnaires de la voirie s'appuient principalement sur la jurisprudence et les coutumes pour définir les règles d'aménagement. Le vocabulaire utilisé dans les textes de loi, complété des précisions apportées par la jurisprudence et la coutume, nous permet de décrire la voirie et d'identifier quatre niveaux se superposant horizontalement.

2.2.1.Le profil en travers

D'abord, l'espace voirie complet, c'est-à-dire l'emprise du domaine public routier pour la voirie publique, correspond au terrain affecté aux voies de circulation et à l'ensemble de leurs dépendances. Il englobe l'*assiette de la voirie* et les *délaissés de voirie*. La première s'étend sur toute la surface utile au bon fonctionnement de l'infrastructure routière. Elle correspond le plus souvent à l'emprise de l'espace voirie. Toutefois, la voirie peut subir une modification ou un alignement. Ainsi, des parcelles se retrouvent exclues dès lors qu'elles ne contiennent plus d'infrastructure utile au bon fonctionnement de la voirie. Les espaces laissés vacants sont appelés délaissés de voirie (Conseil d'Etat 1989) (**Figure 2-1**).

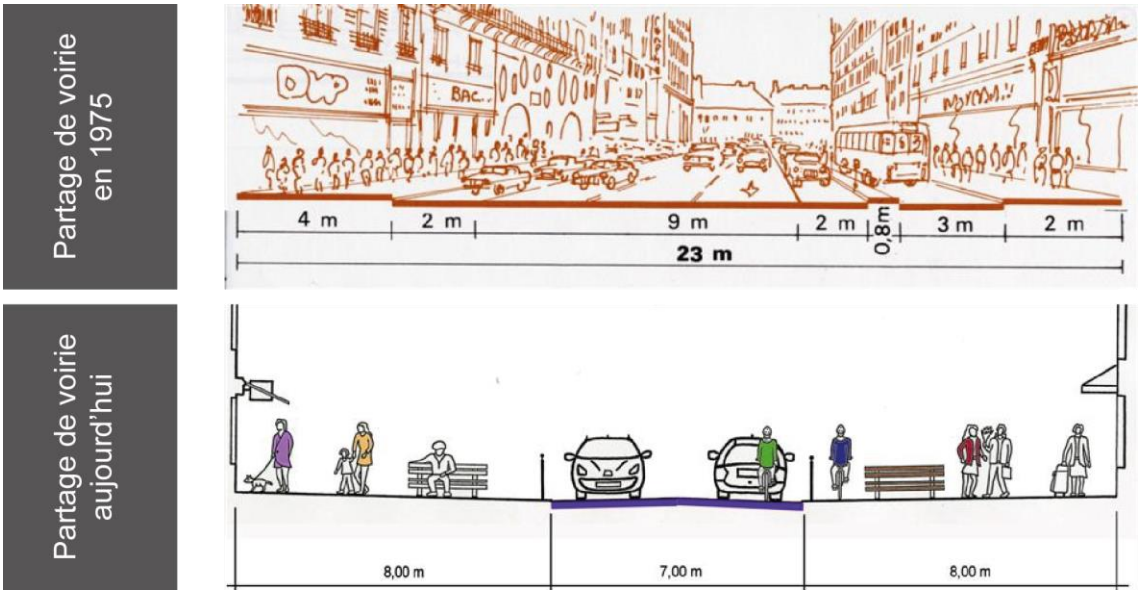
Une coupe transversale telle que présentée en **Figure 2-1**, est appelée un *profil en travers* dès lors qu'elle met en évidence la composition de la voirie dans toute sa largeur et permet d'identifier chaque élément constitutif.



Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 2-1 – Espace voirie, assiette, délaissés de voirie

Le profil en travers est un outil essentiel pour la voirie, et notamment la voirie urbaine. Il permet d'identifier les dimensions de chaque élément, et de redéfinir leurs limites dans la largeur de voirie disponible. Ainsi, il aide au partage de l'espace voirie (Leheis et Ziliani 2010 ; Certu 2009). Cet outil est d'autant plus important que l'aménagement de la voirie urbaine est repensé dans son intégralité en réaffectant une partie de l'espace historiquement réservé à la circulation motorisée individuelle aux mobilités douces ou aux transports en commun (**Figure 2-2**) (Reynaud 2008).



Sources : Certu 2008

Figure 2-2 – L'évolution du profil en travers de la voirie urbaine de 1975 à aujourd'hui

2.2.2.Le corps de la voirie : la chaussée

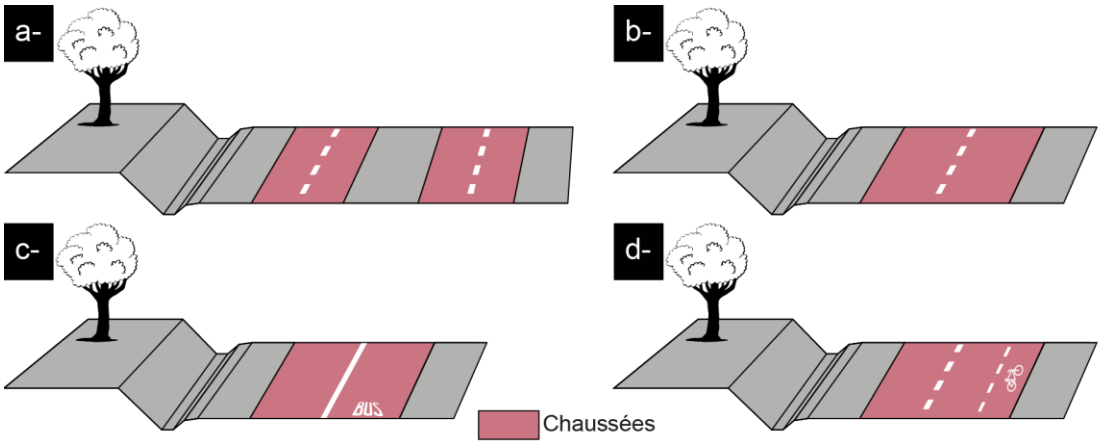
La voirie est donc composée d'une assiette, laquelle recouvre la chaussée et l'ensemble des dépendances. La chaussée correspond à la partie aménagée pour la circulation des véhicules dans leur ensemble. Dans son profil en largeur une chaussée est légèrement bombée au centre et présente de ce fait une inclinaison de 7% maximum. Cette pente appelée *devers* facilite l'évacuation des eaux pluviales vers l'extérieur de la chaussée (Setra 2006). La chaussée est ensuite décomposée en voies de circulation. Elles ont une largeur suffisante pour permettre la circulation de véhicules en une seule file. Les chaussées sont aménagées différemment selon le mode de transport auquel elles sont destinées. Ainsi, il existe des chaussées pour la circulation motorisée individuelle, appelées *chaussées principales* (**Figure 2-3 a**), d'autres réservées aux cycles de deux à trois roues non motorisées, les *chaussées ou pistes cyclables* (**Figure 2-3 b**), et finalement des chaussées à destination exclusive des transports en commun, les *chaussées propres* (**Figure 2-3 c**).

<u>Légende</u> : a) les chaussées principales, b) les chaussées cyclables, c) les chaussées propres

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-3 – Différentes affectations des chaussées

Les **chaussées principales** sont soit dédoublées (**Figure 2-4 a**), soit uniques (**Figure 2-4 b**). Lorsqu'elles sont dédoublées, un aménagement central est réalisé, tel qu'un terre-plein ou encore un muret. Les chaussées séparées peuvent être à destination d'un même mode ou au contraire de modes de transport distincts. Il existe par exemple des chaussées pour transports en commun, et pour cycles. Cependant, pour des raisons d'espace, notamment en milieu urbain, ou de coût, le dédoublage des chaussées n'est pas toujours envisageable. Les transports doux tels que les cycles ou les transports en commun comme le bus, occupent alors une voie de la chaussée principale. Ces voies sont nommées *voies de bus* (**Figure 2-4 c**), ou *bandes cyclables* (**Figure 2-4 d**) (Deboudt 2009). Dans ce cas, les voies de bus sont produites par affectation d'une voie de circulation classique à la circulation des bus. Les bandes cyclables sont quant à elles délimitées par empiètement sur une voie de circulation.



<u>Légende</u> : a) les chaussées dédoublées, b) les chaussées uniques, c) les voies réservées au bus, d) les bandes cyclables

Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 2-4 – Configurations des chaussées

Les **chaussées ou pistes cyclables** sont caractérisés par trois critères. Le premier critère correspond à la contiguïté entre la piste cyclable et la chaussée principale. En milieu urbain, pour des questions de place, les pistes cyclables sont généralement contiguës à la chaussée principale. À l'inverse, hors agglomération, elles sont éloignées pour assurer la sécurité des cyclistes. Le deuxième critère concerne la hauteur de la piste par rapport à la chaussée, au trottoir. Elles sont alors, soit à hauteur de la chaussée principale, et dites ordinaires, soit à hauteur intermédiaire entre le trottoir et la chaussée, soit à hauteur du trottoir. Le dernier critère tient de la localisation de la piste par rapport aux stationnements longeant la chaussée principale. Elle sera soit entre la chaussée et les stationnements, soit intercalée entre les stationnements et le trottoir (Poreau 2009). Enfin les chaussées propres sont caractérisées par le transport auquel elles sont destinées. Il existe des chaussées à destination des tramways ou des bus par exemple.

2.2.3.Les dépendances de la voirie

Autour des chaussées, des dépendances de la voirie sont aménagées. Celles-ci regroupent tous les autres éléments utiles à son exploitation. Il s'agit des espaces dédiés aux piétons, ou au stationnement, mais aussi d'espaces dédiés à la sécurité des usagers et à la bonne tenue de la voirie. Parmi les espaces dédiés aux piétons figurent les *trottoirs*, les *galeries* ou encore les *arcades*. Ces espaces sont aménagés pour la circulation des piétons. Comme le relevait le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), le trottoir est mentionné par le Code de la Route, mais n'y est pas défini formellement (Billard et al. 2010). Ce sont finalement les textes de lois et décrets relatifs à l'accessibilité qui apportent un éclaircissement à son sujet. Ainsi le CERTU insiste sur le fait qu'il s'oppose à l'espace réservé aux véhicules. Ses limites sont facilement repérables et son revêtement est adapté au déplacement des piétons ou au cadre urbain (**Cf. Partie III, 10, p. 182**). Par exemple, le trottoir peut être revêtu

d'un matériau ayant des propriétés antidérapantes pour assurer la sécurité des piétons (**Figure 2-5 a**), ou être revêtu de pavés pour s'intégrer et mettre en valeur les centres historiques (**Figure 2-5 b**). Les galeries (**Figure 2-5 c**) ou arcades riveraines (**Figure 2-5 d**) sont généralement utilisées aujourd'hui pour mettre en valeur des activités commerçantes en milieu urbain.

Légende : a) trottoir classique, b) trottoirs en pavés pour centre historique), c) galerie, d) arcade

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-5 – Exemples d'aménagement des trottoirs

Les espaces dédiés au stationnement ont des aménagements variés en milieu urbain selon l'espace disponible. Il peut s'agir de *places de stationnement* le long de la chaussée. Ces places sont aménagées soit sur un espace intermédiaire entre la chaussée et le trottoir et exclusivement réservé au stationnement (**Figure 2-6 a**), soit directement sur la chaussée et délimitées par un marquage au sol (**Figure 2-6 b**). Lorsque l'espace est suffisant, des *parkings* sont aménagés. Ils sont alors entourés de chaussées ou placés sous les chaussées et ses autres dépendances (**Figure 2-6 c**).

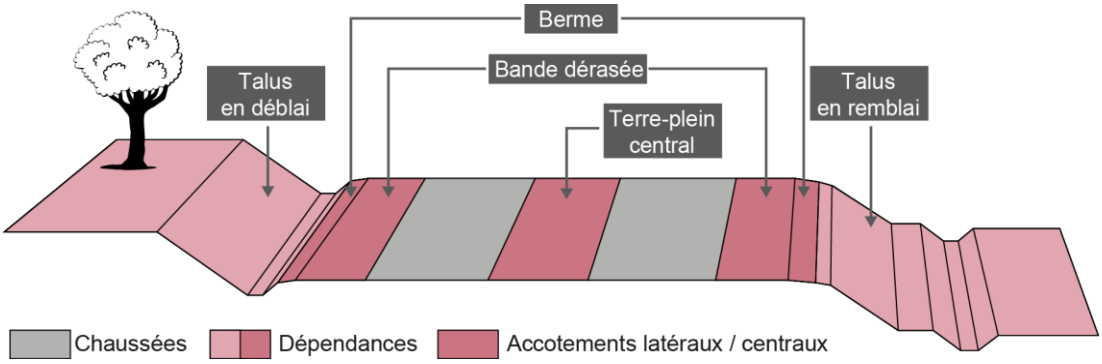
Légende : a) Places de stationnement entre chaussée et trottoir, b) Places de stationnement sur chaussée, c) Parking séparé

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-6 – Exemples d'espaces dédiés au stationnement

Des espaces sont également aménagés de façon à assurer la sécurité des usagers. Ces espaces permettent soit l'arrêt de véhicules dans le besoin en toute sûreté, soit de séparer les usagers plus fragiles tels que les piétons en créant une interface. Dans le premier cas, il s'agit classiquement de l'*accotement* (**Figure 2-7**). Lequel désigne l'espace entre la chaussée et un *fossé*, un *talus* ou

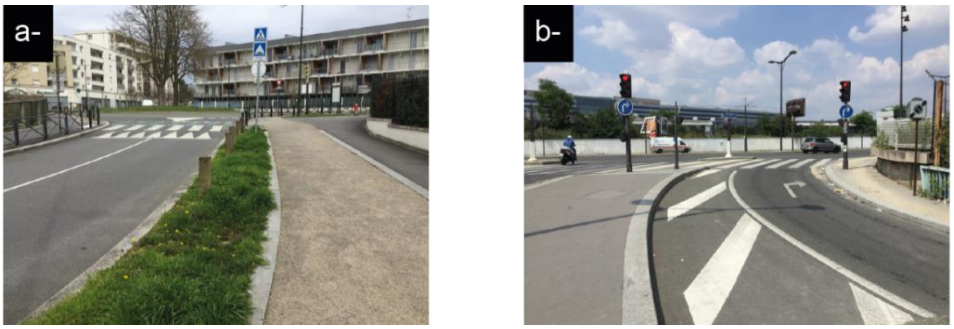
les limites d'une propriété. Un accotement est généralement composé de deux parties. La première partie, en bordure directe de la chaussée, est appelée *bande dérasée*. La bande dérasée est aménagée de façon à supporter l'arrêt de véhicules. La deuxième partie, séparée de la chaussée par la bande dérasée, est appelée *berme*. La berme est généralement couverte d'herbes courtes et permet d'élargir l'angle de vue des automobilistes. Les accotements latéraux peuvent présenter des aménagements spécifiques. Par exemple, *des bandes d'arrêt d'urgence* y sont aménagées dans le cas autoroutes ou autres axes de circulation importants. Lorsque la chaussée est dédoublée, un accotement central peut les séparer. Il s'agit alors d'un *terre-plein central*.



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 2-7 – Les accotements

L'aménagement des accotements en ville dépend des voies de circulation. Leur nature est conditionnée par l'importance du trafic et les contraintes d'aménagement de la voirie, telles que la géométrie de l'espace disponible. Ainsi, aux abords des voies à faible trafic, il peut se substituer au trottoir et former un espace piétonnier, ou un espace vert (**Figure 2-8 a**). Au contraire, lorsque le trafic est fort, il sert d'espace de sécurité entre chaussée et espace piétonnier (**Figure 2-8 b**).



<u>Légende</u> : a) non revêtu, b) revêtu

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-8 – Espaces dédiés à la sécurité des usagers

D'autres espaces et ouvrages sont dédiés à la bonne tenue de l'infrastructure routière. C'est le cas notamment des talus et fossés, lesquels favorisent l'écoulement des eaux des chaussées. Ces éléments se retrouvent principalement hors milieu urbain ou en zone de transition entre l'urbain et le rural. En milieu urbain, les *égouts* ont un rôle similaire, puisqu'ils favorisent l'évacuation des eaux usées ou pluviales (**Figure 2-9 a**). Des *regards d'égouts* sont alors installés sur les éléments de voirie tels que les trottoirs ou la chaussée pour accéder aux canalisations (**Figure 2-9 b**). Enfin, d'autres ouvrages tels que des *murs de soutènement* sont aménagés dans des zones présentant des dénivelés (**Figure 2-9 c**). Ces murs permettent de maintenir l'infrastructure et d'éviter les glissements et effondrements. En milieu urbain, ils sont, par exemple, utilisés en bordure de cours d'eau.

Légende : a) Entrée d'égout, b) Regard d'égout, c) Mur de soutènement

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-9 – Espaces ou ouvrages dédiés à la bonne tenue de l'infrastructure routière

2.2.4.Les équipements de la voirie

Des *équipements routiers*, appelés *accessoires* sont également implantés sur la voirie. Ceux-ci sont utiles à la bonne gestion et au bon usage de la voirie. Certains de ces accessoires vont permettre d'accentuer la séparation des espaces selon les usages, tandis que d'autres aideront à organiser la circulation. Dans tous les cas ils favorisent une meilleure lecture de la voirie par les usagers. Il s'agit :

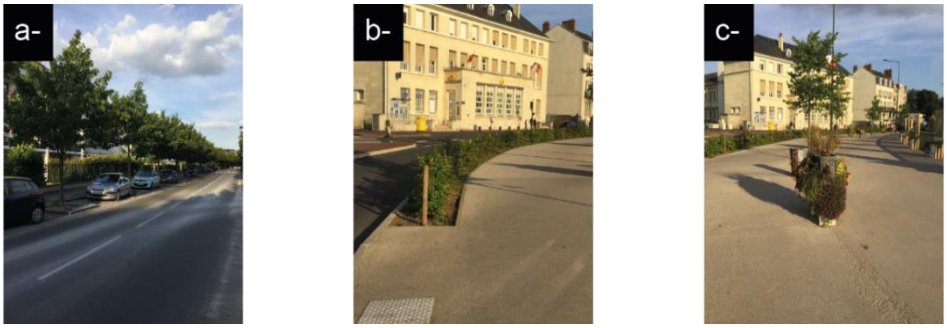
- de poteaux (**Figure 2-10 a**) et pylônes,
- de clôtures et murets de séparation (**Figure 2-10 b**),
- de marquages verticaux tel que les panneaux de signalisation (**Figure 2-10 c**),
- de bornes kilométriques,
- de radars automatiques,
- d'éclairage public (**Figure 2-10 d**),
- ainsi que d'éléments d'affichage.

Légende : a) Poteaux, b) Muret de séparation, c) Panneaux de signalisation, d) Eclairage public

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-10 – Équipements ou accessoires routiers

Un dernier type d'espaces et d'accessoires permet d'habiller ou agrémenter la voirie. Il s'agit par exemple des terrains contigus à la voie publique. Ceux-ci sont aménagés et non clos par des riverains ou le gestionnaire public. D'autres espaces verts sont aménagés le long des chaussées ou sur les trottoirs tels que les arbres (**Figure 2-11 a**), les jardinières séparatrices (**Figure 2-11 b**) ou disposées sur les trottoirs (**Figure 2-11 c**). Au-delà du caractère esthétique qu'ils apportent à la voirie, certains de ces éléments peuvent aussi améliorer la tenue de l'infrastructure en absorbant l'eau de pluie par exemple, ou réduire l'effet d'îlot de chaleur en milieu urbain.



Légende : a) Arbres longeant une chaussée, b) jardinière continue entre trottoir et chaussée, c) Jardinière sur trottoir

Auteur : A.Pavard, 2018

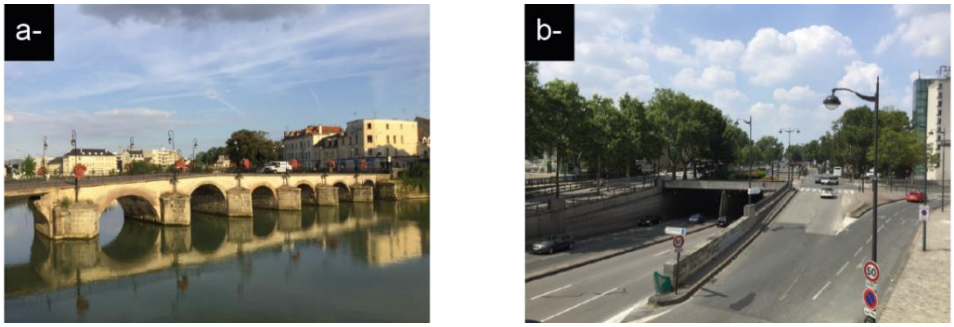
Figure 2-11 – Espaces ou éléments d'agrément

2.2.5.La voirie et ses autres ouvrages

Jusqu'ici, nous avons présenté la voirie selon sa configuration la plus classique. La voirie est en effet généralement implantée au sol et est constituée de *sections courantes*, appelées également *tronçons de voirie*, reliant des extrémités d'impasses et des *carrefours* (Cerema 2016). Nous verrons qu'il existe de nombreux types et de formes de carrefours (**Cf. Partie II, Figure 6-9, p. 127**). Ainsi, pour désigner l'intégralité de ces carrefours, nous utiliserons le terme *intersection de voirie*.

La voirie peut également prendre des formes différentes :

- 1). Elle s'organise parfois de manière moins linéaire sous la forme de places. Celles-ci sont aménagées soit essentiellement autour d'espaces réservés aux mobilités douces (marche, cycles), ainsi que d'espaces ou éléments d'agrément ; soit en alliant les espaces réservés aux véhicules motorisés, dont les chaussées, et les espaces de stationnement. Dans le deuxième cas, les chaussées encerclent généralement un espace réservé aux mobilités douces.
- 2). D'autres fois, la voirie est également associée à des ouvrages d'art tels que les ponts (**Figure 2-12 a**), les tunnels (**Figure 2-12 b**), ou encore les bacs et passages d'eau.

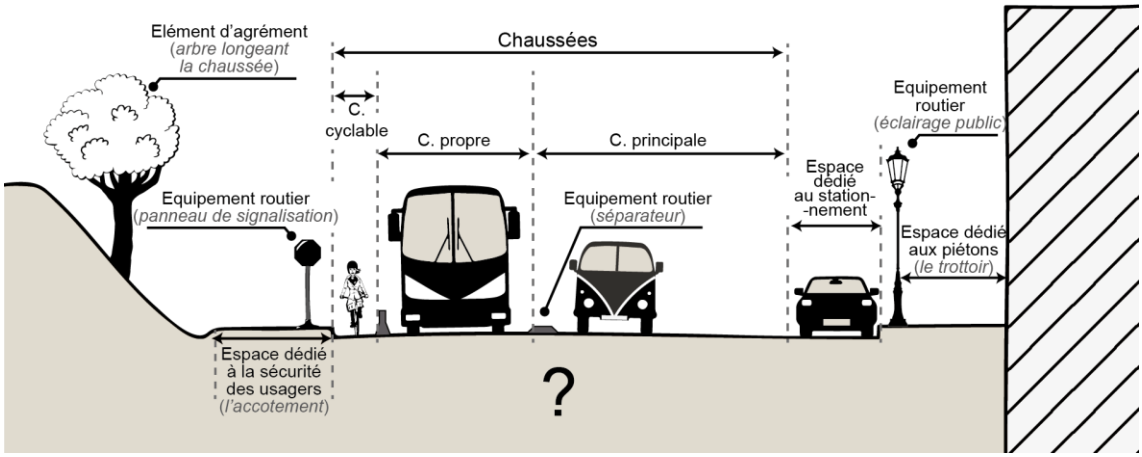


<u>Légende</u> : a) Pont routier, b) Tunnel routier

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-12 – Autres ouvrages dédiés à la circulation

En conclusion, la voirie est composée de différents éléments en sursol (**Figure 2-13**). Classiquement, elle s'organise autour d'une ou plusieurs chaussées selon les modes de transport qu'elle supporte et l'espace disponible. Autour des chaussées, sont aménagés des accotements ou des espaces dédiés aux piétons. Des équipements permettent de séparer et d'assurer la sécurité des différents usagers entre les chaussées, les accotements et les espaces piétonniers. D'autres équipements assurent une meilleure lisibilité de la voirie et facilite la circulation. Enfin, des éléments d'agrément contribuent à l'esthétisme de la voirie, ou peuvent également assurer d'autres rôles : en absorbant l'eau de pluie par exemple, ou pour apporter de la fraicheur en ville.



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-13 – Synthèse de la composition de la voirie en sursol

En-dessous, la voirie dispose d'une structure lui permettant d'assurer ses fonctions. Cette structure se compose de différents éléments qu'il convient de définir afin d'avoir une vision complète de l'infrastructure.

2.3. La voirie urbaine en génie civil : sa structure

La voirie est aménagée en sursol différemment selon les principales fonctions qu'elle assure. Dans certains cas, elle connecte les grandes villes, alors que dans d'autres cas, elle irrigue les différents quartiers d'une ville. Ainsi, si l'on se réfère aux éléments constitutifs de la voirie (***Cf. 2.2, p. 58***), on peut souligner qu'une voirie nationale présente généralement des chaussées plus larges permettant le croisement de plusieurs files de véhicules qui sont le plus souvent motorisés. Elle a également davantage d'équipements permettant d'assurer la sécurité des usagers, tels que des murets de séparation ou des rambardes (**Figure 2-14 a**). À l'inverse une voirie communale fait plus souvent l'objet d'un partage de l'espace entre les différents usagers et se compose donc de chaussées pour automobiles mais aussi pour véhicules cyclables ou pour transport en commun. Des trottoirs et des espaces de stationnement jouxtent généralement ces chaussées **(Figure 2-14 c**). Entre les deux extrêmes, la voirie départementale est constituée de larges chaussées tout en laissant de la place aux équipements destinés aux autres usagers, notamment lorsqu'elle traverse le milieu urbain (**Figure 2-14 b**).

<u>Légende</u> : a) Voirie nationale, b) Voirie départementale, c) Voirie communale

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 2-14 – Exemples d'aménagement selon la hiérarchie de la voirie

Les vocations de la voirie conduisent à une circulation plus ou moins importante des véhicules motorisés. Une voirie nationale accueille un trafic plus dense, avec une fréquentation des poids lourds plus importante qu'une voirie communale. Ainsi, au-delà de son tracé et son aménagement en surface qui sont généralement deux aspects liés au génie urbain, la voirie est également conçue afin de supporter le trafic. En génie civil, cette phase de conception correspond au *dimensionnement* de la voirie (**Cf. Partie III, 9, p. 170**) et conduit à la sélection et la construction de structures différentes selon des critères prédéfinis. Le trafic, ou plus spécifiquement l'*agressivité du trafic*, est le paramètre utilisé le plus important lors du dimensionnement de la voirie, et de ces espaces destinés à supporter des charges importantes. L'agressivité du trafic caractérise les dégradations dues aux passages des poids lourds. Elle n'est pas exclusivement liée à la hiérarchie administrative, même si généralement le nombre de véhicules lourds est plus important sur la voirie nationale ou départementale (liaison interurbaine).

Une voirie de même hiérarchie administrative présente, par exemple, une intensité de circulation différente selon qu'elle traverse un milieu très dense en termes d'habitation ou d'activités économiques, ou au contraire un milieu faiblement peuplé et loin de toute activité économique. Ainsi, pour un même niveau administratif, les règles d'aménagement en surface comme dans le sous-sol peuvent varier. En surface, il est toujours question d'assurer la sécurité maximale de tous les usagers ainsi que leur confort, et de fluidifier le plus possible la circulation, notamment par l'aménagement des intersections. Dans le sous-sol, la structure des chaussées doit permettre de répondre aux différents niveaux de sollicitation.

2.3.1.Hiérarchisation de la voirie selon le type de trafic

Au-delà du critère administratif (***Cf. 1.1.2, p. 44***), il existe plusieurs façons de hiérarchiser la voirie. Sans chercher à être exhaustif, nous pouvons citer par exemple les hiérarchises suivantes :

- le rapport entre leur intégration dans la vie locale et le niveau de trafic supporté (Certu 1998a) ;

- la vitesse pratiquée (Christian et al. 1997) ;
- le type de trafic, tel que transit, interne ou d'échange (Certu 2008).

Ces hiérarchisations sont généralement proches aussi bien en termes de nombre de classes composant chaque système de hiérarchie que de la nature de ces classes. Ainsi, Christian et al. indiquaient qu'il est possible de mettre en concordance les niveaux des différentes hiérarchisations et d'en produire un résumé. Les auteurs proposaient alors la classification présentée dans le **Tableau 2-1**.

Tableau 2-1 – Synthèse de la hiérarchisation de la voirie

NIVEAUX	DESCRIPTION
1	Axes de **transit** (autoroutes urbaines)
2	artères urbaines ou de **liaison** (non autoroutières)
3	voies de **distribution** (ou collectrices)
4	voies de **desserte** (rue de quartier)

Source : Christian et al. 2008

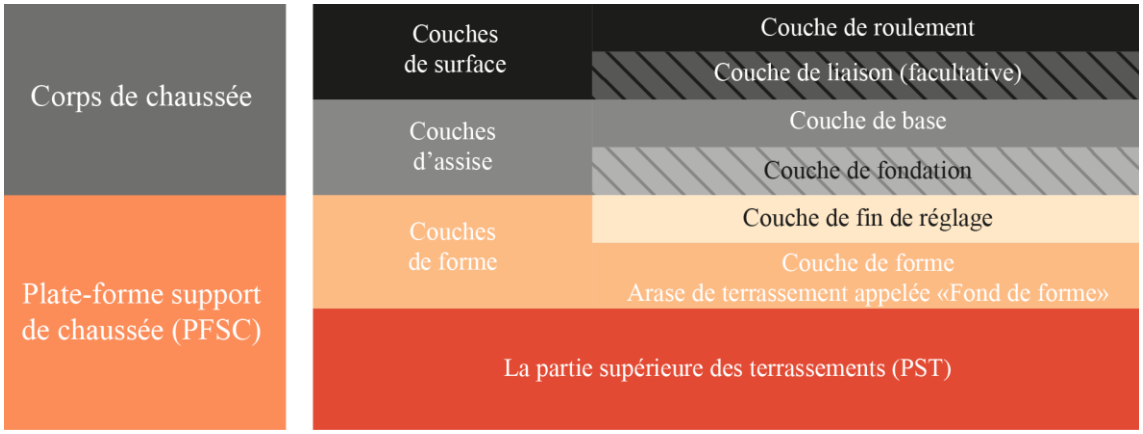
À ce sujet, Christian et al. (1997) relevaient que cette classification a l'avantage d'être simple et facilement transposable. D'ailleurs, plusieurs pays utilisent cette même hiérarchisation. La simplicité et la transposabilité sont certainement à l'origine du fait que les gestionnaires de voirie et les spécialistes en charge de son dimensionnement, utilisent couramment cette classification lorsqu'il est question de l'aménagement en sous-sol, c'est-à-dire pour le choix de la structure de chaussée à mettre en œuvre. En effet, dans les guides techniques que nous avons consultés (**Cf. Partie III, 9.1, p. 170**), les spécialistes croisent cette hiérarchisation avec le type de trafic et l'utilise ainsi comme paramètre pour le dimensionnement des chaussées. Certains ajoutent par ailleurs un cinquième niveau spécifique au milieu urbain, les voies réservées au transport en commun.

Pour le milieu urbain, le Certu indiquait en 2008, que la hiérarchisation de la voirie urbaine est souvent plus complexe que la hiérarchisation de la voirie hors urbaine (Certu 2008). Entre autres, la voirie urbaine présente davantage de différenciations pouvant être de l'ordre (**Cf. Annexe 0, p. 306**) : – du type de liaison tel que les liaisons primaires, secondaires et tertiaires ; – de l'emprise des voies, avec une décomposition en boulevards, avenues ou encore rues ; – de la nature du bâti environnant ; – ou encore des pratiques sociales qu'elle supporte. Malgré ces différences, nous observons que le Certu proposait également la hiérarchisation identifiée par Christian et al. La concernant, il indiquait que les deux premiers niveaux présentent une fonction dominante de circulation tandis que les deux suivants ont des fonctions davantage liées à la vie locale.

2.3.2.La composition en sous-sol

Au-delà de la description horizontale visible pour l'usager, la voirie a une emprise dans le sol. Cette emprise est occupée par la structure, laquelle est notamment définie par le trafic en sursol. Ainsi, les espaces supportant un trafic ou une charge statique importante, tels que les chaussées, les stationnements et les trottoirs, présentent une structure en sous-sol. Cette structure leur permet d'assurer au mieux les activités dont ils sont le support, telles que les différentes mobilités ou le stationnement. En effet, les usages de la voirie ont des impacts différents sur l'infrastructure. Ainsi, une opération de dimensionnement vertical de la voirie est nécessaire. Le dimensionnement est principalement mécanique et permet de définir les natures, c'est-à-dire la composition en termes de matériaux, et épaisseurs de couches de matériaux à mettre en œuvre (**Cf. Partie III, 9.2, p. 176**). Le dimensionnement d'un trottoir n'est pas le même que celui d'une chaussée. De la même façon, et sachant qu'un poids lourd exerce une pression sur la chaussée équivalente à 10 000 automobiles (AASHTO 1972) le dimensionnement des chaussées varie selon qu'elles supportent un faible ou un fort trafic poids-lourds.

Classiquement, les chaussées et trottoirs sont façonnés en trois couches principales établies sur un *sol support* terrassé appelé *arase de terrassement* (**Figure 2-15**).



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 2-15 – La voirie dans le sol

Les deux premières couches forment pour les chaussées ce que l'on appelle le *corps de chaussée*. La plus haute, et en partie visible, est la *couche de surface*. Celle-ci assure le confort et la sécurité des usagers notamment par l'adhérence. Selon les cas, elle est constituée d'un seul ou de deux blocs. Pour les chaussées notamment, la couche de surface se décline en *couche de roulement* et en *couche de liaison*. La couche de roulement est celle sur laquelle s'exercent directement les agressions extérieures telles que le trafic. C'est elle qui présente l'essentiel des caractéristiques favorisant la sécurité et le confort des usagers (**Cf. Partie III, 10.1.1, p. 183**). La couche de liaison

imperméabilise l'assise et protège de ce fait les propriétés mécaniques, thermiques et hydrauliques de la structure. En-dessous de la couche de surface se trouve la *couche d'assise*. Celle-ci permet de reporter les sollicitations du trafic vers la *plateforme support*. Comme pour la couche de surface, elle reste généralement d'un seul bloc pour les trottoirs tandis qu'elle se décline en deux sous-couches pour la chaussée, c'est-à-dire une couche de base et une couche de fondation.

En-dessous du corps de chaussée se trouve la *Plateforme Support de chaussées* (PFSC). Celle-ci se compose dans sa partie haute de couches facultatives, dont la *couche de forme*. La constitution d'une couche de forme dépend directement de la nature du sol support qui assurera la stabilité de la structure de la chaussée. La couche de forme présente deux fonctions principales. D'abord, lors des travaux, elle permet la circulation des engins. Ensuite, lorsque la chaussée est opérationnelle, celle-ci permet de rendre plus homogène les propriétés mécaniques du sol support. Lorsque le sol support est suffisamment stable, ce dernier constitue à lui seul la PFSC (Benedetto et Corté 2004).

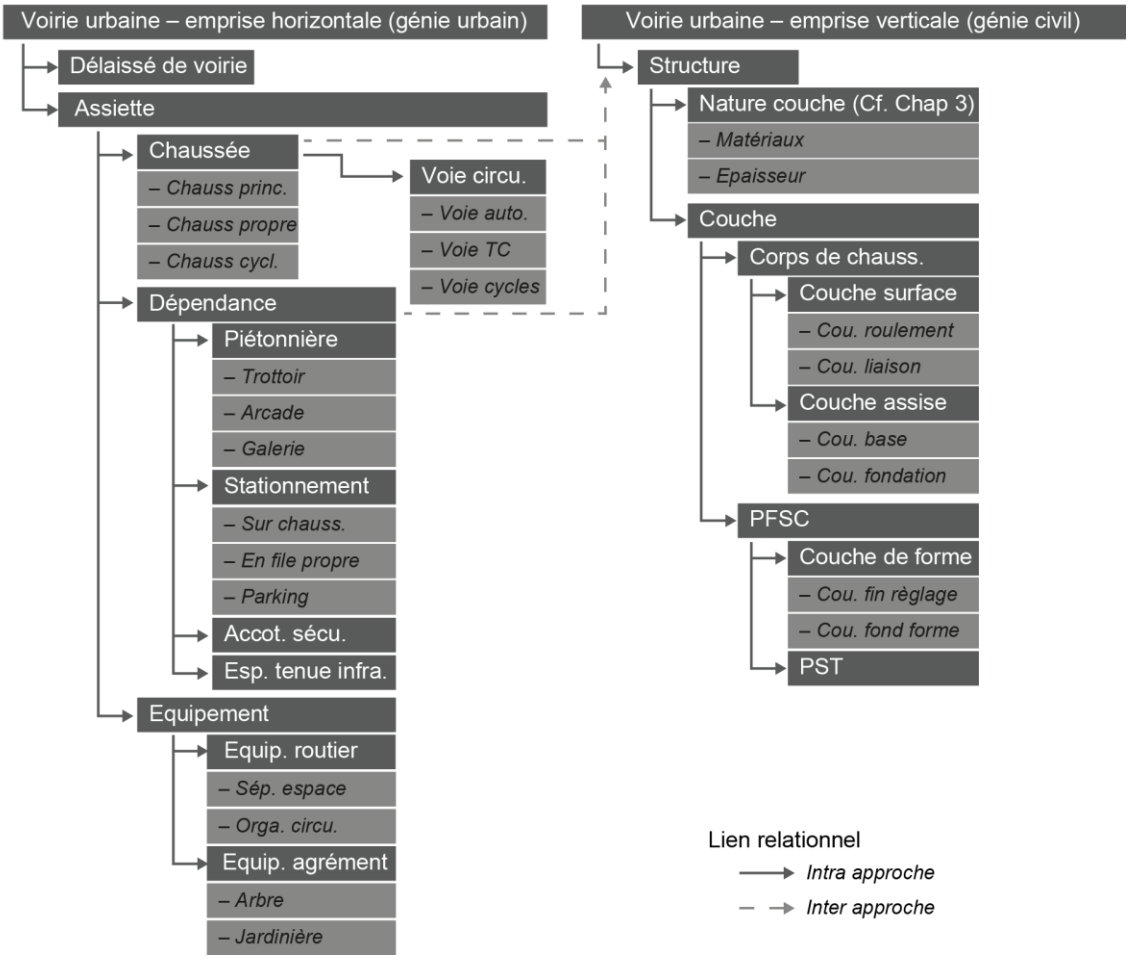
Nous relevons également, que la PSFC accueille les réseaux techniques lorsqu'ils sont enterrés. Le Code général de la propriété des personnes publiques précise que les réseaux d'assainissement, d'eau, d'électricité et de télécommunications ne font pas partie des dépendances des voies publiques (DGCL 2007). En revanche, leur présence a un impact direct sur la voirie, notamment dans le cadre de leur installation, leur maintenance et leur entretien.

Synthèse I.2

Les approches de génies urbain et civil permettent d'appréhender la voirie dans ses dimensions horizontale et verticale (**Figure 2-16**). En effet, la voirie occupe une emprise spatiale en surface, laquelle peut être décomposée selon ses éléments constitutifs, tels que les chaussées, les trottoirs ou encore les espaces de stationnement. De même, en profondeur différentes couches forment la structure des éléments de la voirie, nécessaire notamment vis à vis de l'agressivité du trafic ou de charges. Les deux approches doivent être prises ensemble et globalement afin de concevoir une voirie assurant un rôle de support à de multiples activités (circulation multimodale, activités économiques, lieux de vie). Cet espace peut être désigné par le concept de « portion de territoire » telle que développé par (Bordin 2006).

L'aménagement de la voirie regroupe les opérations : d'acquisition de terrain, de démolition, de travaux (de maintenance ou d'interventions ponctuelles) sur la structure et sur la surface, auxquelles il faut ajouter la gestion des équipements et des dépendances tels que l'éclairage public, la signalisation ou le mobilier urbain (Faivre d'Arcier 1990). Il implique de fait des intervenants issus de milieux variés, ayant recours à l'une ou l'autre des deux approches (génie

urbain ou civil). Tous les intervenants doivent être en mesure de dialoguer entre eux et donc d'utiliser un langage commun pour assurer un aménagement cohérent de la voirie.



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 2-16 – Synthèse de la perception de la voirie selon les approches génie urbain et civil

3. La voirie urbaine, un espace d'intervention multi-intervenants : Qui gère la voirie urbaine ?

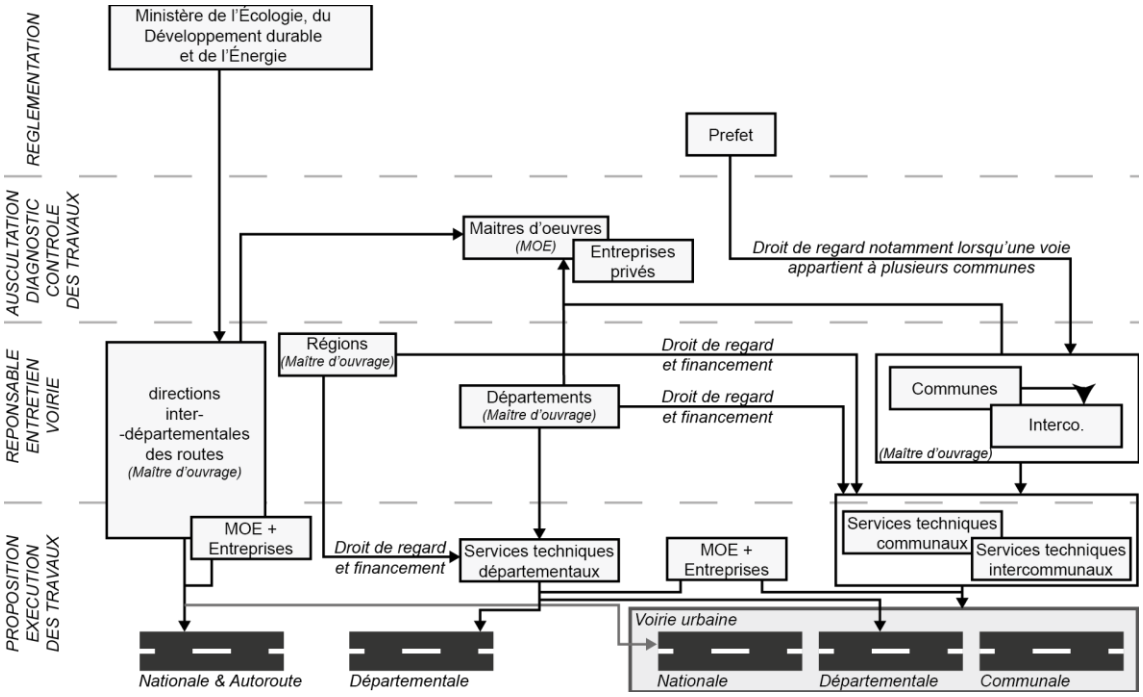
Dans ce troisième chapitre, l'objectif est de saisir la complexité de la gestion de la voirie urbaine. Nous abordons cette question par une analyse du jeu des acteurs intervenants sur la voirie :

1) D'abord, nous présentons les compétences de voirie de chaque échelon de l'administration publique, correspondant à différents niveaux de la hiérarchie administrative de la voirie (national, départemental, communal et d'intérêt communautaire). L'objectif est de comprendre comment se traduit cette organisation administrative dans le cas de la gestion de la voirie urbaine où tous les niveaux sont présents et s'entremêlent pour organiser un même espace urbain.
2) Ensuite, au-delà de cette question de gestion globale de la voirie urbaine qui nous conduit à nous intéresser exclusivement aux gestionnaires de ces infrastructures, nous analysons la conduite et la réalisation d'un projet de voirie à une échelle plus fine.
3) Le changement d'échelle réalisé en deuxième section est important dès lors que l'on aborde la question des interactions entre les voiries et leur environnement dont les réseaux techniques. En effet, la multiplicité des infrastructures en agglomération, et donc des intervenants engendre une complexification du mode de gestion d'un projet d'aménagement. Nous terminons alors en mettant en évidence les différences d'approche de la voirie que vont avoir des intervenants issus de milieu varié à travers les exemples des gestionnaires de voirie et de réseaux techniques.

3.1. La gestion des voiries urbaines : une gestion individuelle ou mutuelle ?

La compétence voirie se décompose en trois volets : – la création avec l'acquisition de terrain pour une nouvelle construction ou le reclassement d'une voie ; – l'aménagement par l'élargissement, le redressement, ou l'établissement d'un plan d'alignement de la voirie ; – l'entretien par l'exécution des travaux nécessaires au maintien en bon état des voies (Diamédo et al. 2013). Cette compétence est passée d'une administration à une autre au rythme d'une règlementation marquée par des luttes d'enjeux entre les différents échelons territoriaux. L'histoire de cette évolution a laissé une empreinte nette sur l'organisation des compétences de voirie aux différents échelons administratifs. Bien que nous nous concentrions ici sur l'organisation actuelle, il a été nécessaire d'analyser l'évolution de ces compétences et de leurs transferts afin de mieux comprendre les relations entre les différents gestionnaires (**Cf. Annexe B, p. 311**).

La **Figure 3-1** schématise l'organisation actuelle des compétences de voirie selon l'échelon administratif auquel appartient la voirie. Ainsi, nous identifions une logique différente selon que la voirie est localisée en milieu urbain ou non.



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 3-1 – Gestion de la voirie depuis les années 1990

Pour la voirie hors milieu urbain, celle relevant de l'échelon national est gérée par les directions interdépartementales des routes (DIR) créées par la loi des libertés et responsabilités locales de 2004 (Loi n°2004-809 2004). Les DIR dépendent du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (aujourd'hui, Ministère de la Transition écologique et solidaire), et sont en charge de l'entretien de la voirie et donc de proposer les travaux permettant d'assurer la bonne tenue de l'infrastructure. La loi de 2004 a également conduit à un déclassement de la voirie nationale en voirie départementale, et a accordé toute latitude aux départements quant à leur gestion. L'Etat conserve aujourd'hui dans son patrimoine uniquement la voirie n'ayant pas vocation départementale et celle devant rejoindre ultérieurement le domaine public communal. Dans le cas des collectivités, régions et départements d'outre-mer, un déclassement a également été réalisé vers le niveau administratif équivalent aux régions, ceci dans la perspective de donner plus d'autonomie à ces territoires. En outre-mer, la voirie nationale est devenue voirie territoriale. La voirie départementale reste du ressort des départements, lesquels bénéficient de services techniques compétents pour la gestion des travaux. À ce titre, le projet prévisionnel de la loi NOTRe de 2015 envisageait de transférer la compétence voirie des départements vers les régions. Cette idée a en définitive été abandonnée et le pouvoir des départements s'en est vu au contraire

renforcé (Loi n°2015-991 2015). En revanche, puisque les régions ont une vue d'ensemble de leur territoire et donc des enjeux en termes de transports, celles-ci ont conservé un droit de regard sur les projets de construction et d'entretien de la voirie à enjeu régional. Par ailleurs, les régions ont gagné en compétence dans la gestion des transports publics. Cette compétence relative aux transports publics n'est pas sans lien avec la voirie dans la mesure où certains transports ont besoin de l'infrastructure routière, et notamment d'aménagement spécifique, tel que pour les bus en site propre.

Pour la voirie en milieu urbain, plusieurs cas se présentent. En 1989, une loi a conforté les compétences du maire quant à la voirie traversant sa commune, et plus précisément en agglomération (Loi n°89-413 1989). Le Code de la voirie routière (1989c) routière indique depuis qu'à « *l'intérieur des agglomérations, le maire assure la coordination des travaux affectant le sol et le sous-sol des voies publiques et de leurs dépendances, sous réserve des pouvoirs dévolus au représentant de l'Etat sur les routes à grande circulation* ». Par ailleurs, il revient au maire selon le code de la route de fixer les limites de l'agglomération (***Cf. 1.3, p. 48***). Ces aménagements législatifs tendent à complexifier la gestion des voiries départementales et nationales lorsque celles-ci traversent l'agglomération. En effet, si les départements et l'Etat restent propriétaires, et donc responsables de l'entretien de leur voirie, le maire doit exercer son rôle de police de l'ordre public. Ainsi, comme le relevaient Lucas et al. (1995), le maire a le devoir d'assurer la sûreté et la commodité des passages en agglomération, et ce quel que soit le niveau administratif de la voirie. Pour cela, il doit réaliser les aménagements pour la sécurité des usagers, et s'assurer du bon fonctionnement des équipements tels que la signalisation ou l'éclairage. Par ailleurs, il a l'obligation de doter les sections de voirie d'un trottoir ou d'un accotement. En d'autres termes, la commune est responsable d'une partie de la voirie, alors même que celle-ci relève du domaine public d'une autre entité. Et ce, dans le sens où elle doit gérer, c'est-à-dire créer, aménager et entretenir les dépendances, dont les trottoirs.

La loi NOTRe a également eu plusieurs impacts sur la voirie communale et plus généralement sur la voirie urbaine. D'abord, comme pour la voirie départementale, elle confère aux régions un droit de regard dès lors qu'il s'agit d'une voirie à enjeu régional. Ensuite, elle a permis d'achever la couverture du territoire français par les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) à fiscalité propre, tout en limitant leur nombre par le jeu des fusions. La France connait depuis le début des années 1980 un processus de décentralisation visant à donner davantage de compétences de gestion aux collectivités territoriales locales, notamment en développant les EPCI. Ce processus a introduit un nouveau niveau de voirie, la voirie d'intérêt communautaire. La voirie nouvellement créée au sein et par une intercommunalité est classée en tant que voirie communautaire comme l'indiquait en 2002 le ministre de l'intérieur, de la sécurité intérieure et

des libertés locales (Sénat 2002). En définitive, la loi NOTRe a eu pour effet de réduire le nombre d'EPCI de 39% en favorisant les regroupements des plus petits EPCI, et ce entre 2016 et 2017, soit en seulement une année (**Tableau 3-1**). Ainsi, cette diminution est principalement enregistrée parmi les communautés de communes qui ont diminué à hauteur de 45%. Dans le même temps, les Métropoles et les Communautés urbaines ont vu leurs compétences renforcées. Notamment, le transfert de certaines compétences de voirie est devenu obligatoire. Pour autant, nous observons que même si ces compétences devraient échoir par obligation aux intercommunalités, la réalité sur le terrain est différente. Par exemple, la Métropole de Paris est décomposée en 12 Etablissements Publics Territoriaux (EPT). Chaque EPT récupère les compétences de la métropole pour les communes qui le composent. L'EPT du Grand-Orly Seine Bièvre est composé de 24 communes des départements du Val-de-Marne et de l'Essonne. Selon la législation, l'EPT devrait disposer de la compétence voirie pour l'ensemble de ces 24 communes, or, selon le site internet de l'établissement public, seules 13 communes ont transféré ces compétences (grandorlyseinebievre.fr 2016). Cette situation n'est pas isolée. En effet, au cours de nos travaux de recherche, nous avons rencontré des responsables de services de voirie de différentes collectivités territoriales locales : – de la commune de Drancy (71 000 hab.) dans le département de Seine-Saint-Denis et appartenant à l'EPT Paris Terres d'Envol ; – de la commune du Perray-en-Yvelines (7 000 hab.) appartenant à la communauté d'agglomération de Rambouillet Territoires. Pour la commune du Perray-en-Yvelines, les échanges menés ont mis en évidence une crainte de perdre une compétence et avec elle le contrôle d'un élément structurel important de l'espace urbain.

Tableau 3-1 – Groupements intercommunaux (EPCI fiscalité propre)

EPCI fiscalité propre	2016*	2017*	Evolution	Compétence voirie
Métropoles (y compris Lyon)	14	15	8%	**Compétences <u>obligatoires</u>** (depuis 2010) : - ***Voirie communale*** : Création, aménagement et entretien - ***Voirie départementale*** : Gestion des routes et dépendances et accessoires.
Communautés urbaines	11	15	36%	**Compétences <u>obligatoires</u>** (depuis 1966) : - ***Voirie communale*** : voirie et signalisation
Communautés d'agglomération	196	218	11%	**Compétences <u>optionnelles</u>** (depuis 1992) : - ***Voirie communale*** : la création, l'aménagement et l'entretien
Communautés de communes	1 842	1 019	-45%	
Total	2 062	1 266	-39%	

* France métropolitaine et territoires d'outre-mer

Source : INSEE, 2017

Cette analyse des intervenants gestionnaires de la voirie et leur évolution dans le temps, permet de comprendre la complexité de l'organisation de la gestion de cette infrastructure. Comme nous l'observons à travers la structure mise en place suite à la décentralisation, le rôle de chaque échelon territorial n'est pas toujours clairement identifiable. Ceci est d'autant plus vrai lorsque la voirie considérée se trouve en agglomération, c'est-à-dire lorsqu'il est question de la voirie urbaine. Le développement et l'empilement des structures intercommunales a renforcé cette complexité et contribue aujourd'hui au flou persistant quant à savoir qui gère quoi. Par ailleurs ce processus amorcé il y a quelques décennies maintenant, est un processus lent et par étape, entrainant de ce fait une multitude de situations.

3.2. La mise en place d'un projet d'aménagement autour de la voirie routière

La voirie peut être assimilée à un organisme vivant, et suit de ce fait un *cycle de vie* : elle est construite, elle est utilisée par les usagers, elle évolue et s'use, et peut devenir impraticable. On estime que la remise à neuf du réseau routier français dans sa totalité coûterait 2 000 milliards d'euros, et qu'un tronçon de voirie d'un kilomètre, hors autoroute et ouvrage d'art exceptionnel, engendre une dépense de l'ordre de 1 à 10 millions d'euros lors de sa construction. Or, si les dépenses de construction sont inévitables, un entretien régulier permet d'éviter la reconstruction complète de la voirie routière. Selon l'état d'usure, des interventions ponctuelles ou complètes sur les couches de roulement appelées également revêtement ou tapis routier (**Cf Partie III, 11, p. 204**) permettent d'augmenter la durée de service de la voirie.

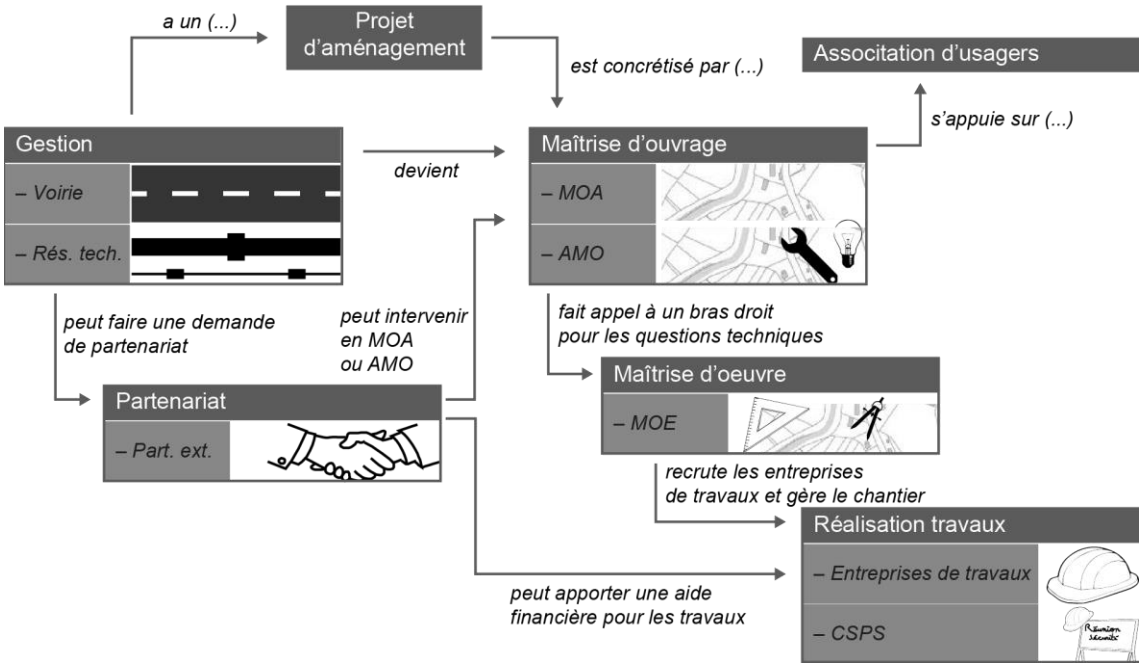
Les matériaux utilisés, l'agressivité du trafic, mais aussi les interventions sur les dépendances ou sur les autres ouvrages accueillis par la voirie, tels que les réseaux techniques enterrés, ont un impact sur la dégradation plus ou moins rapide de la voirie. Dans tous les cas, un renouvellement complet des couches de roulement doit être opéré tous les 7 à 10 ans afin de limiter les dégradations sur sa structure. Les coûts entrainés peuvent alors être élevés : un revêtement est estimé entre 15 et 45 euros le m², tandis qu'une structure peut atteindre entre 250 et 500 euros le m². On comprend ainsi tout l'intérêt de surveiller l'état de la voirie et d'en assurer un entretien régulier. Faivre d'Arcier englobe les opérations de création et d'entretien ou maintenance de la voirie routière dans la notion d'aménagement (Faivre d'Arcier 1990). Il pose alors comme définition de l'aménagement l'ensemble des interventions la touchant de près ou de loin. C'est-à-dire, l'acquisition de terrain, la démolition d'ouvrages présents, les travaux en structure comme en surface, sans oublier la gestion de l'éclairage public, de la signalisation, du mobilier urbain, et de toutes ses autres dépendances.

L'analyse du processus d'évolution des acteurs publics de la voirie (***Cf. 3.1, p. 73***), ainsi que la définition de ce qu'est son aménagement permet de mesurer la complexité pouvant émerger lors

de la mise en place d'un projet d'aménagement et par la suite de l'exécution d'un chantier. Selon la patrimonialité de la voirie et le projet d'aménagement envisagé, le processus permettant d'aboutir à la réalisation finale des travaux varie. De même, le rôle des intervenants se succédant du début à la fin du projet évolue. Un même intervenant peut être sollicité à différentes étapes du projet selon qu'il endosse le costume de maître d'ouvrage (MOA) ou de gestionnaire par exemple. De ce fait, nous nous attachons ici aux principaux rôles et la vision qu'ils impliquent dans un projet d'aménagement de voirie plus qu'à la multiplicité des intervenants.

La voirie est à la fois une infrastructure à entretenir, mais également le support de nombreuses activités nécessitant elles-mêmes d'autres infrastructures. C'est le cas par exemple de la distribution de flux qui s'opère via des réseaux techniques, le plus souvent enterrés en milieu urbain. Ces réseaux étant placés sous la voirie, leur maintenance implique un passage par cette infrastructure. Rappelons également qu'un projet d'aménagement pour lequel il est question de voirie ou des réseaux enterrés peut s'inscrire dans un cadre plus large tel que la rénovation d'un quartier, ou l'implantation d'un bâtiment public à vocation d'enseignement ou de santé. Ainsi, les intervenants et leurs rôles varient selon le type d'aménagement, et son contexte : un projet de construction ou de rénovation, lié uniquement à la voirie ou non. De ce fait, nous présentons ci-après les rôles récurrents à tout projet d'aménagement, et pouvant être assumés par différents intervenants. Les rôles et leurs interactions sont ici simplifiés et abordés selon l'angle de vue des gestionnaires de la voirie et des réseaux enterrés. La **Figure 3-2** nous permet de présenter ces rôles.

Le gestionnaire de la voirie présente plusieurs visages selon le domaine public auquel appartient la voirie : une commune, une intercommunalité, un département, l'Etat. Le gestionnaire s'assure du bon état de sa voirie ainsi que de la sécurité de l'ensemble des usagers. De son côté, le gestionnaire de réseaux techniques est la personne morale en charge d'une activité d'exploitation de réseaux. Cette activité est vouée à fournir un service de production, de transport et de distribution au public. Le service peut concerner le gaz, l'électricité, la chaleur, la télécommunication, ou encore l'eau potable à évacuer ou les eaux usées. Afin de gérer leurs infrastructures, les gestionnaires peuvent faire appel à des partenaires extérieurs pouvant intervenir selon la nature du projet d'aménagement. Ils apportent alors soit une aide technique via leurs propres services techniques ou une aide financière. Pour les projets d'aménagement de voirie, les petites collectivités privilégient souvent des partenariats avec les collectivités d'échelon supérieur notamment les départements ou les intercommunalités



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 3-2 – Les principaux rôles dans le cadre d'un projet d'aménagement de voirie

Ensuite, différents rôles sont organisés afin d'aider les gestionnaires dans leurs opérations d'aménagement. Le MOA « *est la personne morale pour laquelle l'ouvrage est construit* » (Loi n°85-704 1985). Ce dernier a plusieurs fonctions allant de la détermination de la localisation de l'ouvrage avec l'aide du géomètre-expert, au choix du processus de réalisation de l'ouvrage, en passant par la définition d'un programme précis et la programmation budgétaire. Lorsqu'un projet concerne des organismes différents, par exemple dans le cas d'un carrefour entre des voiries de différents échelons administratifs, la maîtrise d'ouvrage est soit partagée, soit prise en charge par une seule collectivité. À ce titre, une ordonnance de 2004 donne les conditions d'organisation de la maîtrise d'ouvrage exercée, et précise que « *lorsque la réalisation, la réutilisation ou la réhabilitation d'un ouvrage ou d'un ensemble d'ouvrages relèvent simultanément de la compétence de plusieurs maîtres d'ouvrage, ces derniers peuvent désigner, par convention, celui d'entre eux qui assurera la maîtrise d'ouvrage de l'opération* » (Ordonnance n°2004-566 2004). Le MOA ne dispose pas toujours de toutes les compétences en interne pour mettre en place un projet de grande ampleur, notamment lorsque les services techniques internes sont limités ou inexistants. Il peut alors faire appel à un aide au maître d'ouvrage (AMO) privé ou public. L'AMO, sur la base d'une prestation de service, facilite la coordination du projet. Selon la nature de la prestation il intervient sur : l'expression des besoins, le montage juridique et financier, ou encore sur la réalisation d'études de faisabilité ou d'impacts. Ainsi, il revêt selon les cas, le rôle d'assistant juridique, technique, ou administratif. Le rôle d'AMO pourra alors être assuré par des intervenants variés :

- une agence départementale ;
- un bureau d'études privé ;
- un cabinet d'architecture, de paysagiste, d'urbanisme, ou de géomètre ;
- un conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement (CAUE) ;
- une société publique locale (SPL) ;
- une société d'économie mixte (SEM).

Bien sûr, si la collectivité dispose des moyens en interne, un service propre à la collectivité peut officier en tant qu'AMO.

En tant que bras droit du MOA, le maître d'œuvre (MOE) s'occupe de la conception de l'ouvrage et de la supervision de sa réalisation (Ordonnance n°2004-566 2004). Plus précisément, il est chargé de proposer des solutions techniques et esthétiques pour la réalisation de l'ouvrage en respect de l'enveloppe budgétaire et des délais fixés. Les entreprises de travaux sont désignées par le MOE sur accord du MOA en respectant la procédure d'appel d'offre public. Les sociétés de travaux publics sont chargées de tout ou partie de la réalisation selon leur spécialité. Tout au long des travaux, le MOE surveille le respect des exigences de conception. Sur le chantier, le coordinateur de sécurité et de protection de la santé (CSPS) est désigné par le MOA afin d'assurer la sécurité lors des activités simultanées ou successives des entreprises. En d'autres termes, son rôle est de gérer tout au long du chantier les interactions entre les entreprises afin d'éviter qu'un risque induit par une intervention ne se répercute sur l'ensemble du projet et des ouvriers. En marge, mais non moins importants, figurent les associations d'usagers pouvant être sollicitées tout au long de la mise en place du projet d'aménagement. Cette sollicitation peut d'abord se faire sous forme de consultation et concertation. Il est également possible de les associer de façon plus active, via un test in-situ, en mettant en place un aménagement provisoire et en recueillant leur expérience.

Maintenant que nous avons identifié les principaux rôles présents lors d'un projet d'aménagement, nous allons analyser plus spécifiquement les approches des gestionnaires de voirie et de réseaux techniques dans le cadre d'un projet d'aménagement de la voirie.

3.3. Les approches des gestionnaires dans un projet d'aménagement de voirie

L'aménagement d'une voie publique est décidé par l'organe délibérant de la collectivité gestionnaire de la voirie, c'est-à-dire, le conseil municipal pour les communes, ou encore le conseil départemental pour les départements. Nous proposons ici d'analyser l'approche que peuvent avoir les gestionnaires de la voirie ainsi que les gestionnaires de réseaux techniques lors de la mise en place d'un projet d'aménagement.

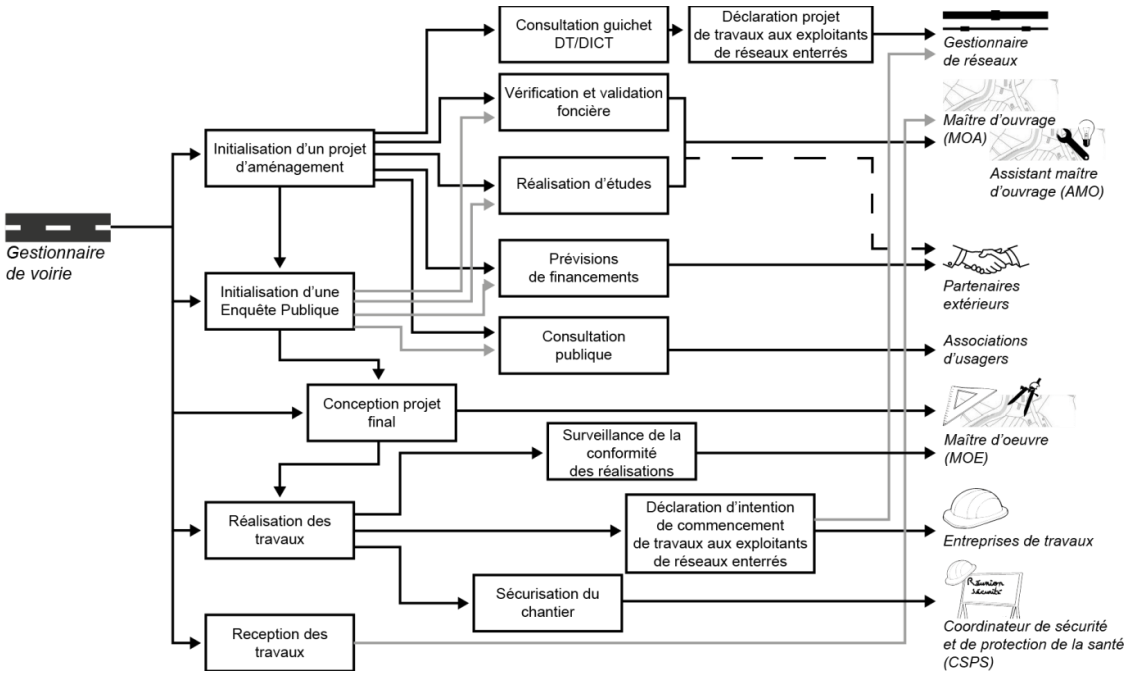
3.3.1.L'approche des gestionnaires de voirie

Le code de la voirie routière par ses articles L131-4 et L141-3 prévoit que la décision d'un organe délibérant concernant la création d'une nouvelle voie ou d'un aménagement conséquent ne peut s'effectuer qu'après une Enquête Publique (EP) (Code de la voirie routière 2004 ; 2015). La loi Grenelle de 2010 a simplifié cette procédure en regroupant les 180 régimes différents d'EP (Loi Grenelle n°2010-788 2010). Ainsi, les EP sont désormais régies par deux codes uniques, celui de l'environnement et celui de l'expropriation pour cause d'utilité publique. L'Enquête Publique instanciée par une collectivité doit être conduite selon l'article R141-4, au minimum quinze jours après le dépôt d'arrêté d'enquête, et ce sur une durée de quinze jours (Code de la voirie routière 1989e). Elle a pour but d'informer le public et de permettre à celui-ci de formuler des observations. Un registre est mis en place afin de recueillir les observations du public et est mis à jour tout au long de l'enquête. Le résultat de l'EP est dit non contraignant, dans le sens où l'organe délibérant peut choisir de poursuivre ou non son projet en l'état sans tenir compte des recommandations formulées. Dans le même temps, un dossier d'enquête – composé a minima d'une notice explicative, d'un plan de situation, d'une présentation des dépenses, d'une étude d'impact, d'un plan parcellaire présentant les limites existantes et projetées de la voirie, des parcelles riveraines et des bâtiments existants, de la liste des propriétaires des parcelles concernées par le projet, et d'un projet de plan de nivellement – doit être constitué par le MOA ou par des aides extérieures telles que les AMO et les partenaires publics ou privés. Par exemple, la production des plans des limites actuelles et futures de la voirie, peut être prise en charge par un géomètre-expert. Lequel depuis une loi de 1946, exerce une délégation de service public. Les plans produits ont pour vocation d'identifier précisément les limites du futur projet de façon à en maitriser l'assiette foncière (***Cf. 2.2.1, p. 58***) nécessaire au bon fonctionnement de la voirie (Loi n°46-942 1946).

Que ce soit pour alimenter le dossier de l'EP ou la réflexion globale autour du projet d'aménagement, les gestionnaires de réseaux sont associés dès lors que des réseaux enterrés peuvent se trouver dans le périmètre du projet d'aménagement de la voirie. À ce titre, la réforme anti-endommagement de 2012 prévoit un certain nombre de garde-fous pour réduire les incidents liés à la présence de ces réseaux (Arrêté du 15 février 2012 2012). Par ailleurs, elle facilite la maintenance de ces derniers tout en assurant l'intégrité de la voirie. Ainsi, une demande de consultation auprès d'un guichet unique doit être effectuée et une déclaration de projet de travaux (DT) doit être formulée auprès des gestionnaires de réseaux. Par la suite les gestionnaires de réseaux sont tenus informés de l'évolution du chantier, d'une part via une déclaration d'intention de commencement des travaux (DICT), d'autre part via les constatations effectuées sur le chantier. Par exemple, des différences constatées entre les plans et la réalité devraient en toute logique être consignées et communiquées. Classiquement, si au cours d'une intervention sur la

voirie les ouvriers constatent la présence de réseaux techniques non déclarés sur les plans, ou mal localisés par rapport à la réalité, l'information devrait être remontée de façon à mettre à jour les plans.

Un écart important peut-être observé entre le pré-projet imaginé et présenté lors de l'Enquête Public, et ce qui est finalement réalisé. Les modifications que le projet connait tout au long de sa phase de préparation jusqu'à sa phase de réalisation relèvent aussi bien du MOA que du MOE. Le MOE prend en charge la gestion des travaux, et nécessairement intervient dès la phase de préparation du projet dans le sens où il permet d'identifier les problèmes techniques et y apporter des solutions. Tout au long des travaux il assure la bonne cohérence entre le projet et la réalisation. En ce sens, il fait le pont entre le MOA et les entreprises de travaux. Enfin, sur le chantier une multitude de professionnels étant amenés à se côtoyer, un CSPS est nommé pour éviter les interventions incompatibles.



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 3-3 – Synthèse : approche du gestionnaire de voirie

Ainsi, tel que nous l'observons, et de façon plus synthétique à travers la **Figure 3-3** un gestionnaire de voirie est amené à communiquer au cours d'un projet avec de nombreux intervenants revêtant différents rôles. **Il est alors important que le gestionnaire de voirie puisse proposer une vision unifiée de la voirie à l'ensemble de ces partenaires afin de s'assurer de la bonne intelligibilité des échanges.**

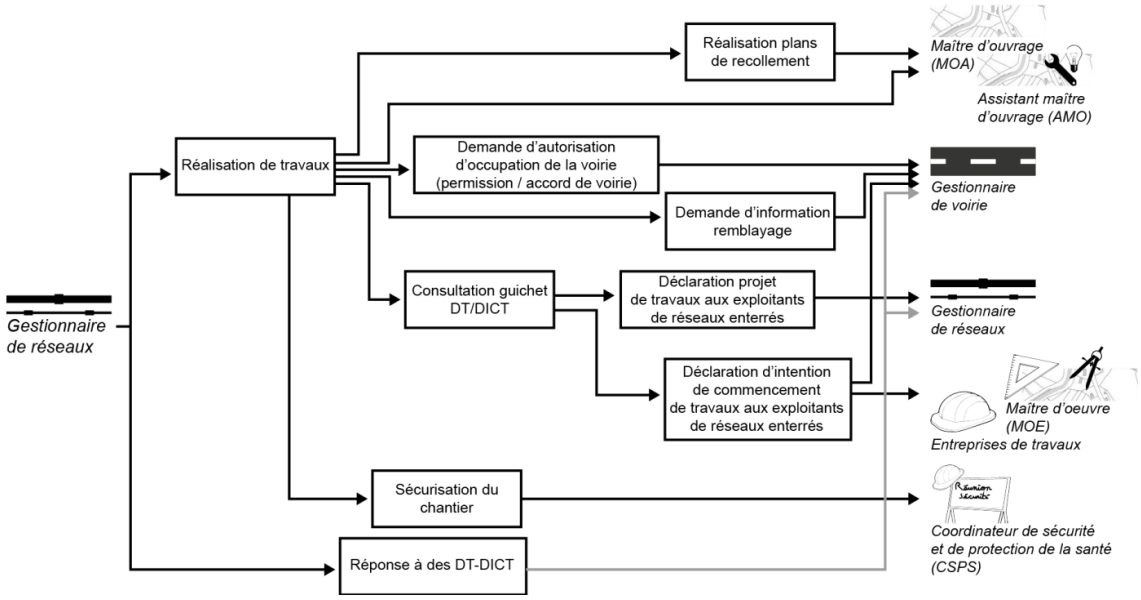
3.3.2.L'approche des gestionnaires de réseau technique

Un gestionnaire de réseau technique présente de prime abord la même activité qu'un gestionnaire de voirie dans le sens où il est en charge d'une infrastructure qu'il doit entretenir et éventuellement développer. Cependant, le gestionnaire de réseau n'a pas la même approche spatiale, et donc règlementaire qu'un gestionnaire de voirie : l'infrastructure qu'il gère est en sous-sol, et est liée par sa localisation à l'infrastructure qui l'accueille. Cette différence conduit à une autre vision d'un projet d'aménagement de son infrastructure, tel que nous allons le présenter.

Puisqu'il occupe le sous-sol d'un territoire et que souvent, tout au moins en milieu urbain, son infrastructure coïncide avec la localisation de la voirie, il est dans l'obligation d'obtenir de la part du gestionnaire de voirie une permission ou un accord de voirie (Service Gestion des Territoires n.d). La permission de voirie correspond à une autorisation de travaux en bordure ou sur le domaine public. Elle est nécessaire dès lors qu'il y a utilisation du domaine public avec emprise comme pour la création ou l'extension de réseaux techniques. L'accord de voirie quant à lui concerne principalement les ouvrages ayant une emprise plus profonde ou au contraire aérienne, tels que les services de transports, et la distribution d'électricité ou de gaz (Code de la voirie routière 1989a). Ces permissions ou accords présentent des caractéristiques permettant d'assurer l'intégrité de la voirie et la sécurité des usagers. Ainsi, le gestionnaire d'un réseau technique est tenu de supporter les gênes et les frais issus des travaux occasionnés sur le domaine public, d'entretenir son ouvrage et de réparer les dommages. Par ailleurs, il doit s'acquitter d'une redevance tout au long de la durée de son contrat. Un contrat s'applique sur une durée de 5 ans à l'exception des contrats pour les réseaux de télécommunication, lesquels sont conclus sur 15 ans. Bien sûr, les modalités de ces contrats dépendent des liens unissant le gestionnaire du réseau et le gestionnaire de la voirie publique. Ces liens se définissent suivant le mode de gestion du réseau, tel que la concession ou encore l'affermage (Lorrain 1987).

Depuis la réforme anti-endommagement de 2012, et son évolution avec la démarche DT-DICT mise en place à partir de 2014, les gestionnaires sont tenus de fournir la localisation de leurs réseaux lorsqu'un projet d'aménagement se profile en proximité directe. Pour les réseaux les plus récents, le gestionnaire dispose généralement d'une information relativement fiable. En revanche, pour les réseaux les plus anciens, pouvant dater d'une centaine d'années tels que les canalisations d'eau, l'information peut être imprécise voire perdue. Un travail d'investigation supplémentaire est alors nécessaire afin de retrouver avec la plus grande précision possible le tracé des réseaux. En plus de devoir répondre aux demandes DT-DICT relatives à d'autres travaux, les gestionnaires de réseaux techniques sont dans l'obligation de procéder eux-mêmes à cette formalité lorsqu'ils souhaitent réaliser des travaux sur leur infrastructure. En effet, la plupart du temps, des réseaux pouvant appartenir à d'autres gestionnaires passent à proximité.

Comme nous l'avons observé, et comme l'illustre le schéma de synthèse en **Figure 3-4**, un gestionnaire de réseau technique en milieu urbain est presque systématiquement amené à interagir avec un gestionnaire de voirie. **Ceci renforce l'idée que les gestionnaires de voirie doivent être au centre de la réflexion portant sur la mise en place d'une démarche d'optimisation des interventions aussi bien sur les voiries que sur les réseaux.**



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 3-4 – Synthèse : approche du gestionnaire de voirie

Synthèse I.3

Dans une démarche d'optimisation des interventions sur la voirie et les réseaux techniques, il est essentiel de coordonner les actions de chaque intervenant. Ceci est possible en analysant les relations entre les principaux intervenants afin d'identifier parmi eux celui qui serait susceptible d'endosser le rôle de coordinateur. Cependant, notre travail de recherche ne porte pas directement sur le jeu d'acteurs. Ainsi, nous avons limité cet aspect à une analyse macroscopique permettant de comprendre la complexité et les enjeux principaux de la gestion de la voirie au regard de ses multiples intervenants

La voirie présente une complexité dans sa gestion administrative, législative et technique. Elle dépend en grand partie d'une organisation publique qui entraine le morcellement de ce qui pourrait, et certainement devrait être « l'infrastructure réseau (routier) » par excellence. À ce titre, dans son analyse morphologique des réseaux viaires, Menerault (1994) constatait que seules les infrastructures nationales peuvent former un réseau connexe. En effet, les routes nationales relient entre elles les grandes villes françaises sans discontinuité. À l'inverse, prises une à une les voiries

départementales et communales ne forment pas une entité connexe. Un processus d'aménagement cohérent entre les différents échelons de voirie est alors important afin de ne pas exclure de territoires. Ce constat est d'autant plus vrai en milieu urbain, là où les trois niveaux de voirie s'entrecroisent et structurent la ville et donc la vie urbaine. Les récentes évolutions législatives autour des intercommunalités montrent une certaine volonté d'harmoniser la gestion de la voirie et de ne plus la prendre comme une infrastructure dépendante d'une échelle spatiale, et donc d'un échelon administratif, mais bien comme une entité globale dont chaque portion n'a de sens qu'au regard de toutes les autres. Malgré tout, le processus de transfert des compétences d'une administration à une autre reste lent. **Il convient aujourd'hui d'impliquer l'ensemble des gestionnaires de voirie dans une réflexion portant sur l'optimisation de sa gestion.**

Au-delà, **la voirie ne peut être considérée indépendamment des autres infrastructures implantées sur le territoire.** Ceci est d'autant plus vrai que la voirie est le support d'une multitude d'activités nécessitant parfois d'autres infrastructures pour fonctionner. D'ailleurs, ces autres infrastructures peuvent-elles même prendre comme support la voirie, comme c'est le cas des réseaux techniques le plus souvent enterrés. **Ainsi, bien que la voirie et ses gestionnaires soient au centre de notre réflexion, il est essentiel de tenir compte des points de vue des intervenants extérieurs et notamment de ceux issus du milieu des différents réseaux techniques.**

4. L'optimisation des interventions sur la voirie urbaine : Une démarche adaptative pour un processus de modélisation en géomatique

Nous présentons dans ce quatrième chapitre notre positionnement scientifique et la démarche scientifique que nous avons mise en œuvre :

1) Dans une première section nous expliquons pourquoi nous nous inscrivons dans une *approche de constructibilité*, en redéfinissant ce concept et en l'appliquant à notre système complexe qu'est la voirie urbaine et son environnement.
2) Dans une seconde section, nous montrons que notre *démarche modélisatrice* s'appuie sur des fondements de la modélisation d'accompagnement développée à partir de 1996 (Bousquet et al. 2013).
3) Enfin une troisième section nous permet de justifier notre choix d'outil de géomatique, le système d'Information Géographique (SIG). Il nous permet de proposer un processus de modélisation évolutif, anticipateur et ouvert, en nous appuyant d'une part sur l'hétérogénéité des connaissances qu'ont les gestionnaires de voirie de leurs infrastructures, et d'autre part sur le déploiement actuel et futurs d'outils de géomatique.

4.1. L'optimisation de la co-maintenance voirie et réseaux techniques : une approche de constructibilité

Il convient dans un premier temps de définir le concept de constructibilité applicable à tout projet de construction. À la conception d'une infrastructure ou d'un bâtiment, il existe des incertitudes techniques parfois importantes (F Contrada et al. 2019). Le processus décisionnel visant à prolonger la période de conception par rééchelonnement entraine souvent une conception inefficace, des risques de dégradation des performances de l'ouvrage, des coûts supplémentaires ou encore le non-respect des délais de livraison. Contrada souligne qu'il existe des pratiques anglo-saxonnes visant à améliorer le processus de conception, et que l'on peut regrouper sous les termes de *buildability* et *constructability*.

La buildability s'appuie sur des technologies permettant la production d'un ouvrage. Plus précisément, elle est liée à la qualité du produit, à la facilité de mise en œuvre, à l'efficacité et à la rentabilité de la construction. La constructability concerne davantage les moyens organisationnels et techniques exploitables pour mener une opération de construction, et ce aux différentes phases du projet. Elle vise à intégrer l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage dans le processus de conception. En France, ces deux concepts ont conduit à la création de la *constructibilité* (Francesca Contrada 2019).

La constructibilité a été définie en 2010 lors de la création de l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics de Paris (ESTP-Paris). Ainsi, Gobin (2010) indiquait qu'elle « *vise à fournir, dès le lancement du projet, une assurance raisonnée quant à l'atteinte des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie* ». Le même auteur indiquait plus tard que le développement de la constructibilité s'était appuyé sur un double constat : la création d'une scission entre les sciences de l'ingénierie et l'architecture dans le domaine de la construction, et par un cloisonnement entre les spécialistes des deux disciplines (Gobin 2013). Cette situation se retrouve typiquement dans le cadre de projets d'aménagement de voirie. À travers une analyse de plans urbains du début du XXème siècle, l'architecte Alonzo a remarqué que l'ingénierie des routes était étroitement liée à l'architecture. À l'inverse selon lui, les plans urbains actuels montrent qu'aujourd'hui les deux sont le plus souvent déconnectées. Or, il est essentiel de les lier et de les rendre visibles sur un même plan pour mener une analyse complète des relations entre la voirie et son environnement. Pour illustrer ses propos, Alonzo donnait l'exemple d'un projet d'aménagement routier de l'Agence A10 de Tours. En intervenant sur ce projet avec Vinci Autoroute et l'agence d'urbanisme de Tours, il avait constaté que les documents des deux entités ne regroupaient pas des informations pourtant complémentaires : Vinci Autoroute disposait de plans de l'infrastructure routière sans aucun contexte spatial (**Figure 4-1 – b**) tandis que l'agence d'urbanisme possédait un plan d'urbanisme sur lequel l'espace public routier était laissé vide (blanc) (**Figure 4-1 – a**). Les deux données n'avaient jusqu'alors pas été croisées (Alonzo 2018).

Afin de remédier à la séparation des compétences, et à la difficulté de communication entre les experts, la constructibilité tend à exploiter une complémentarité avec les disciplines de la construction. L'objectif est d'enrichir la réflexion lors d'un projet, en tenant compte des différents points de vue.

<u>Légende</u> : a) plan de l'agence d'urbanisme de Tours, b) plan de Vinci Autoroute

Source : E. Alonzo, 2018

Figure 4-1 – Différentes affectations des chaussées

La constructibilité se distingue de la constructability et de la buldability par un questionnement plus large : elle a pour objectif d'anticiper des difficultés de production résultantes des décisions prises par chaque intervenant aux différentes étapes d'un projet. Selon Contrada et al. (2019), au-delà de cette distinction, la constructibilité améliore les définitions de la constructability et de la buldability, dans le sens où elle ne se concentre pas uniquement sur la productivité du travail. Au contraire, elle vise également à atteindre et à garantir des niveaux de performance des ouvrages en améliorant le processus de construction. Elle contribue par là même au bon déroulement de l'ensemble du processus de construction. En conclusion, la constructibilité d'une part offre un cadre assurant l'anticipation des efforts des intervenants, et d'autre part définit les exigences de performance à partir d'une analyse fonctionnelle de l'ouvrage et des besoins des utilisateurs finaux. Elle est donc utile dans le cas d'une conception de projet complexe regroupant plusieurs intervenants, et donc plusieurs enjeux. **À ce titre, l'approche proposée par la constructibilité est adaptée dans le cas d'une réflexion d'optimisation de la co-gestion de la voirie et des réseaux. Ainsi, nous intégrerons d'abord dans notre réflexion l'ensemble des dimensions de la voirie. Ensuite, celle-ci sera replacée dans son environnement, notamment par la prise en compte des réseaux techniques. La mise en cohérence de la voirie et des réseaux à l'aide d'une modélisation permettra de mieux saisir les interactions spatiales et structurelles entre les infrastructures. L'amélioration de la gestion coordonnée des données relatives à ces infrastructures permettra alors d'optimiser les interventions et ainsi d'améliorer les**

performances des infrastructures tout au long de leur cycle de vie. Ceci contribue à optimiser globalement les coûts.

4.2. Une modélisation d'accompagnement pour une démarche adaptative

Une gestion optimisée de la voirie, et de ses interactions avec son environnement urbain (dont font partie les réseaux techniques) nécessite une prise en compte de toutes les dimensions de la voirie et de ses évolutions. Notre démarche modélisatrice doit donc intégrer une confrontation continue et itérative entre la réflexion théorique et la réalité terrain. Cette confrontation doit également se faire par un dialogue avec tous les gestionnaires et intervenants sur voirie de façon à intégrer les visions liées aux enjeux de chaque activité concernée par la voirie.

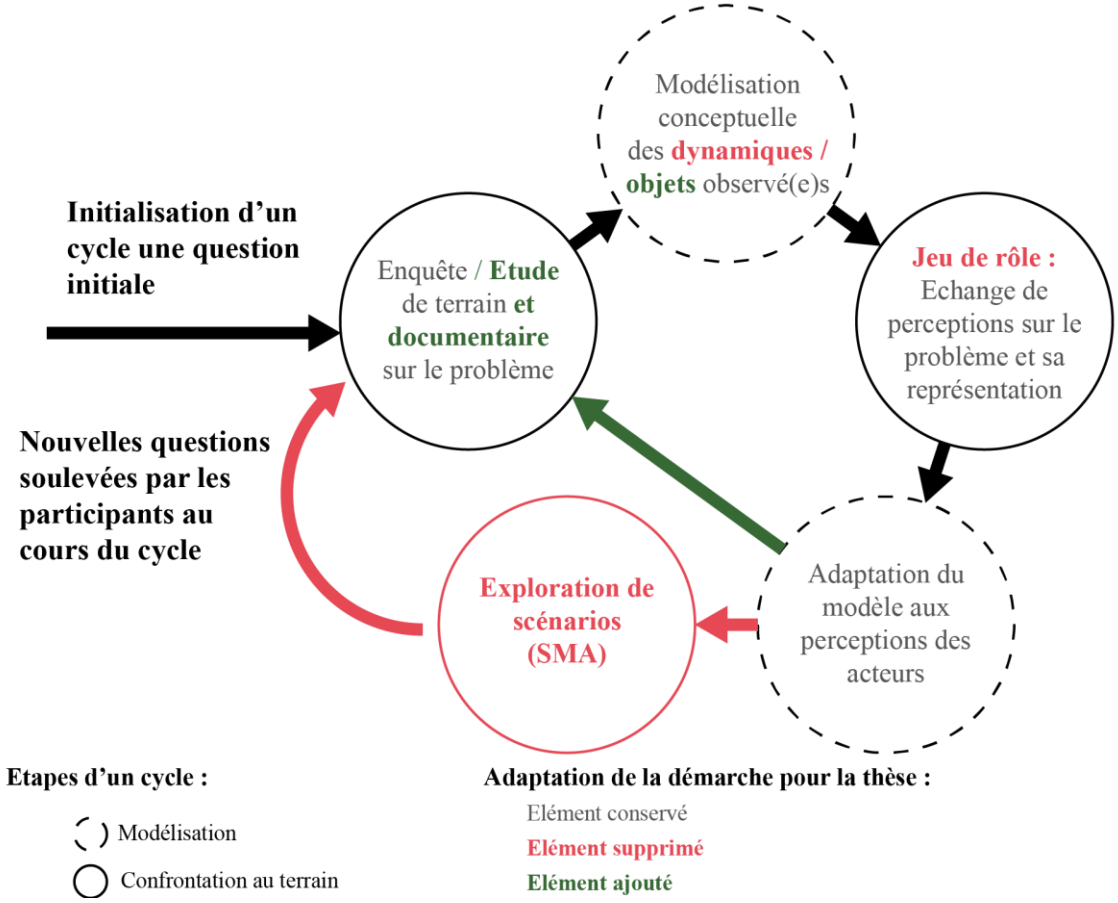
En 1996, des chercheurs, dont Barreteau O., Bousquet F., Mullon C., et Weber J., ont développé la *modélisation d'accompagnement*. Selon ses auteurs, elle facilite les processus collectifs de décision. Elle aide à expliciter les points de vue et les critères subjectifs des différents intervenants. Les auteurs soulignaient que dans une situation complexe, le processus décisionnel est généralement évolutif, itératif et continu. En d'autres termes, il est source de décisions imparfaites, mais améliorables et mieux comprises à chaque itération. La modélisation d'accompagnement ne vise alors pas la qualité des choix mais la qualité du processus. Ainsi, il s'agit avant tout d'améliorer la gestion des incertitudes dans une situation donnée. Cette démarche repose sur trois préceptes (Etienne 2010 ; Bousquet et al. 2013) :

- l'acceptation et la prise en compte de points de vue parfois contradictoires ;
- la remise en cause de chaque nouvel élément introduit dans la démarche ;
- la confrontation avec chaque élément extérieur nouveau.

Ces trois préceptes sont en adéquation avec le concept de *constructibilité*, dans le sens où ils encouragent la prise de point de vue des différents intervenants et l'échange avec ces derniers.

Etienne (2010) dans son livre décrivait plus précisément la modélisation d'accompagnement. Il présentait notamment les éléments constitutifs de l'approche : les intervenants, les outils, et les modèles. Puisqu'elle vise à intervenir en milieu réel, elle est d'abord confrontée à une diversité de protagonistes concernés par l'objet étudié. Elle est, de ce fait, orientée acteurs. Quatre catégories d'intervenants sont identifiées : **les profanes**, **les chercheurs**, **les techniciens** et **les institutionnels**. Les **profanes** ont une connaissance non formalisée ni explicitée du système étudié, mais une connaissance issue d'expériences empiriques. Les **chercheurs** ont une connaissance académique organisée et validée. Les **techniciens** ont une connaissance construite essentiellement sur la base de l'étude d'un grand nombre de situations et de données techniques spécialisées. Enfin, les **institutionnels** ont une connaissance essentiellement politique et économique du système. Ces quatre groupes, par leurs visions complémentaires, sont

particulièrement importants lorsqu'il est question de confronter une modélisation. Concernant les outils, les initiateurs de la démarche argumentent que le domaine des sciences cognitives et de l'informatique bénéficie d'un outil particulièrement adapté à l'étude de systèmes dynamiques et complexes : les systèmes multi-agents (SMA). Dans ce cadre, les SMA contrebalancent les outils plus classiques de la géomatique, notamment en formalisant les dynamiques et hypothèses étudiées (Collectif ComMod 2005). **Toutefois, dans notre cas, il ne s'agit pas d'étudier des hypothèses de gestion de la voirie ni d'autres dynamiques, mais de proposer une modélisation de la voirie dans son environnement de façon à doter les gestionnaires d'un outil de représentation adapté aux enjeux de la voirie. Ainsi, si nous nous appuyons sur la modélisation d'accompagnement dans ce travail, certaines étapes propres à cette modélisation ne sont pas utilisées dans nos recherches**. Barnaud et al. (2007) ont proposé un schéma descriptif des étapes de la modélisation d'accompagnement telle que proposée par le ComMod en 2005. Nous reprenons ce schéma afin de pointer les convergences et divergences de notre démarche avec la leur (**Figure 4-2**).



Sources : Barnaud et al. 2007

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 4-2 – Adaptation du cycle de modélisation d'accompagnement

Dans notre cas, **nous travaillons sur la description et la représentation c'est-à-dire la construction d'« objets graphiques » représentant des « objets géographiques » composants la voirie et non sur les dynamiques entre les objets géographiques et des phénomènes extérieurs tels que les modes de gestion. De ce fait :**

- **nous empruntons à la modélisation d'accompagnement sa dimension adaptative, notamment à l'aide d'un aller-retour avec la réalité, et un échange régulier avec les quatre catégories de spécialistes (les profanes qui dans notre cas sont les usagers de la voirie, les chercheurs, les techniciens et les institutionnels) ;**
- **Nous laissons en revanche de côté le caractère dynamique non essentiel à notre recherche.**

4.3. Un processus de modélisation de la voirie en géomatique

Une démarche modélisatrice se voulant adaptative, il est essentiel de s'appuyer sur les connaissances et les outils connus et déjà déployés au sein des structures des intervenants visés, à savoir dans notre travail de thèse les collectivités territoriales gestionnaires de voirie.

En France, les collectivités territoriales se sont dotées il y a plusieurs décennies d'outils de la géomatique. Roche (1997) indiquait que les collectivités avaient trouvé en ces outils des alliés pour « *optimiser leurs interventions sur l'espace dont elles ont la charge* ». Parmi ces outils, les SIG sont les plus connus et les plus plébiscités par les collectivités. Les SIG ont diverses définitions selon les pays et les spécialistes qui les emploient. Pour certains, comme au Canada, le terme SIG désigne essentiellement les outils utilisés pour assurer quatre fonctions principales : la saisie et l'acquisition de données, leur stockage et leur gestion, leur analyse et enfin leur représentation graphique. En France, les SIG désignent à la fois les outils, les projets informatiques et le système d'information (Pornon 2015).

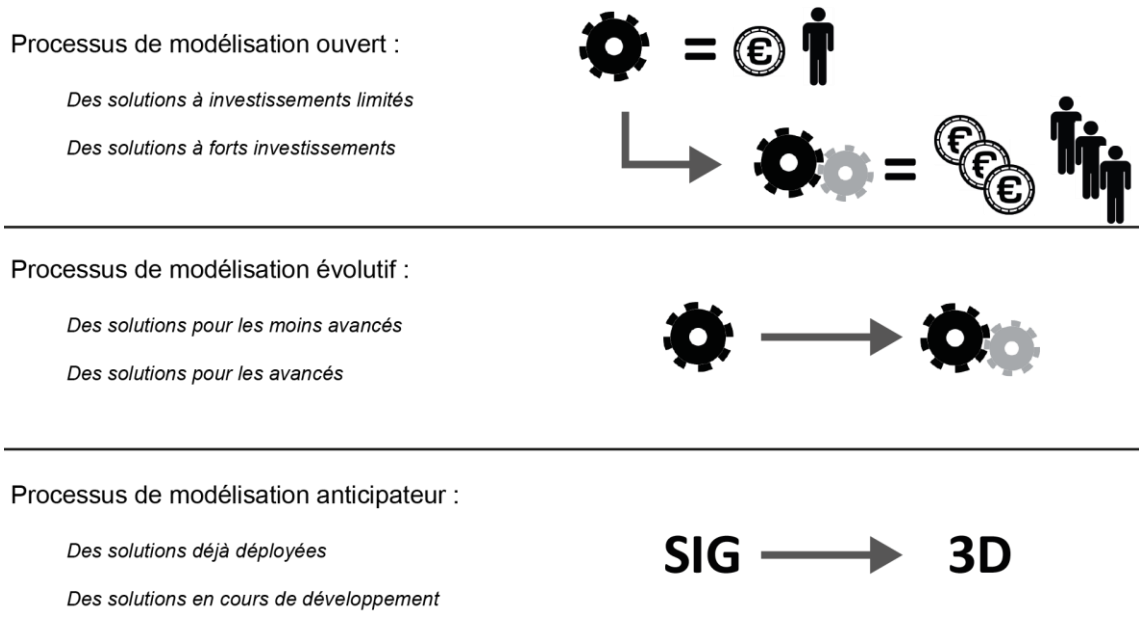
Roche (1997) soulignait que l'émergence au début des années 1990 de ces outils d'information et de communication avait soulevé des questions quant à leur rôle et leur utilité pour l'aménagement, ainsi que leur effet sur les dynamiques spatiales. Pour autant, en comparaison à la cartographie statique utilisée jusqu'alors, les SIG ont apporté des fonctionnalités qui ont prouvé leur utilité : le changement dynamique de lieu et d'échelle, ou encore des modes de représentation. De plus, contrairement aux systèmes d'information classiques, les SIG se sont illustrés en produisant une projection spatiale des questions et informations traitées. En d'autres termes, ils permettent de positionner à l'aide d'un référentiel spatial les objets géographiques étudiés dans leur environnement géographique. En conclusion, les SIG apportent un regard nouveau sur les phénomènes et objets géographiques, et aident à la compréhension et la maitrise de l'espace étudié.

À la fin des années 1990 et au début des années 2000, les SIG se sont démocratisés. Mineau (2003) relevait qu'en 1998 77% des villes de plus de 100 000 habitants disposaient de leur SIG. Le niveau de couverture décroissait ensuite en même temps que la taille des villes. Ainsi, 64% des villes de 50 000 à 100 000 habitants disposaient d'un SIG contre 14% pour les villes de 10 000 à 50 000 habitants ou encore 6% pour les villes de 5 000 à 10 000 habitants. Ainsi, les collectivités ont largement investi dans ces outils, et parfois plus par effet de mode que pour répondre à un besoin réellement identifié.

Les SIG ont été développés autour d'une réflexion principalement planimétrique du territoire. En effet, leur objectif initial était de permettre le positionnement relatif des objets géographiques par rapport aux autres sur un même territoire. Depuis la fin des années 2000, les SIG connaissent une transformation progressive visant à intégrer la troisième dimension dans leur représentation. Le développement de la 3D dans les SIG est probablement lié au rapprochement de la géomatique avec certaines disciplines telles que l'aménagement du territoire. Les aménageurs intervenant en lien avec les architectes, ont davantage été habitués à la représentation en 3D. De par leurs activités, les architectes ont recours à des outils informatiques permettant cette représentation : d'abord les outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et plus récemment le Building Information Modeling (BIM) (Cristia, Zalio, et Guéna 2018).

Nous observons en parallèle du développement du BIM un engouement en géomatique pour la modélisation 3D, et notamment dans le cadre de questionnements autour du développement urbain (Siret et al. 2006 ; Banaszak et Koehl 2008 ; Miklasz 2018). Bien que des études et programmes de recherche soient aujourd'hui en cours sur cette question, une modélisation entièrement 3D pour un territoire aussi vaste qu'une ville n'est pas envisageable. D'abord, quel que soit l'outil, nous ne disposons pas encore d'une librairie d'objets graphiques nécessaire à ces outils qui soit complète. Malgré cette limite, certaines collectivités tentent de développer une modélisation 3D de leur voirie en empruntant au BIM de façon à produire ce que l'on peut appeler un City Information Modeling (CIM), c'est le cas des services de voirie du Département du Val-de-Marne. Lors de différents échanges que nous avons eus avec eux, nous avons observé des blocages quant à la disponibilité des librairies d'objets graphiques et au développement de normes permettant de modéliser en 3D les éléments de voirie. Ensuite, le déploiement d'outils permettant la modélisation 3D, et les compétences à acquérir nécessitent des investissements aussi bien en temps qu'en finances. Une majorité de collectivités n'est pas en mesure d'investir dans ce domaine, d'autant plus que beaucoup ont déjà investi au cours des dernières années dans les SIG. Au-delà, grâce à leur déploiement important, les SIG permettent aujourd'hui de disposer de nombreuses informations spatiales décrivant l'environnement géographique des phénomènes que l'on souhaite étudier.

En nous appuyant sur une démarche modélisatrice adaptative, **nous avons développé un processus de modélisation lui-même adaptatif** (**Figure 4-3**). En effet, notre processus de modélisation est ouvert, dans le sens où il consiste à s'appuyer sur les moyens des organismes impliqués. Pour notre processus de modélisation, nous avons décidé de nous appuyer sur les moyens dont disposent et qu'utilisent les collectivités territoriales en limitant les investissements humains, financiers et matériels. Toutes les collectivités ne sont pas au même niveau : une majorité dispose de SIG, quelques-unes développent le BIM / CIM et d'autres moins avancées ne disposent d'aucun outil numérique, ou utilisent des supports limités de gestion de données tels que des tableurs. **Nous avons donc souhaité un processus de modélisation évolutif** afin d'être en mesure d'aider les moins munis à faire leurs premiers pas, tout en proposant aux plus outillés des méthodes pour progresser. **Enfin, nous voulions que notre processus de modélisation soit anticipateur** afin de pouvoir intégrer des solutions en développement. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les outils les plus déployés, les SIG, tout en prévoyant l'intégration de nouvelles configurations telles que la 3D.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 4-3 – Un processus de modélisation adaptatif

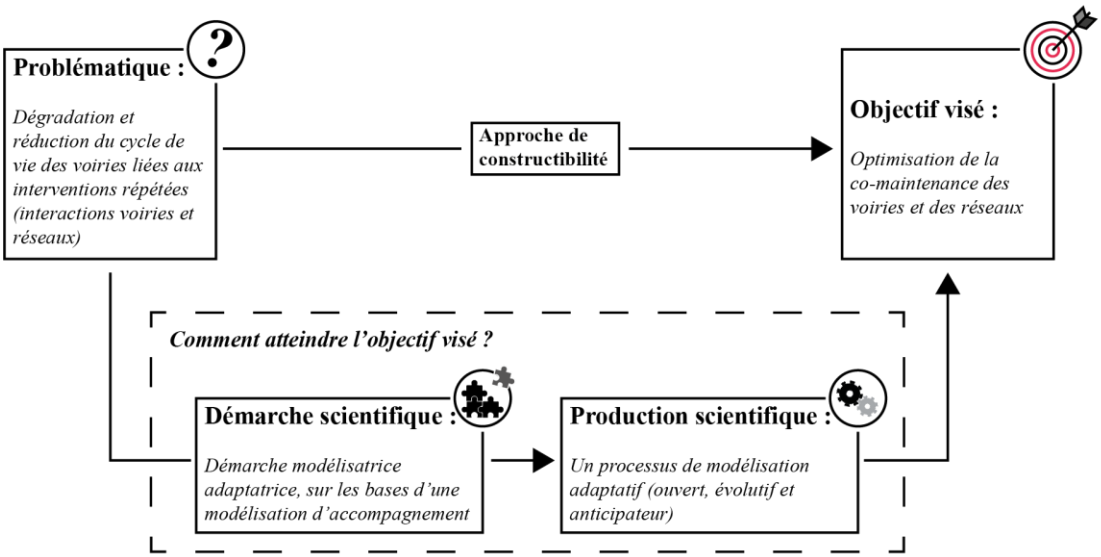
Synthèse I.4

Dans le cadre de nos travaux (**Figure 4-4**) nous nous inscrivons dans une approche de constructibilité et nous proposons de contribuer à une amélioration des performances de l'ouvrage voirie en améliorant la co-gestion de la voirie et des réseaux techniques à l'aide d'un référentiel spatial de voirie.

Pour cela, nous avons adopté une démarche modélisatrice qui s'appuie sur la dimension adaptative de la modélisation accompagnatrice. Cela nous a conduit à mettre en place un processus de modélisation adaptatif :

- Evolutive en s'adaptant au niveau d'avancement des collectivités territoriales.
- Anticipatrice en s'adaptant aux solutions actuelles mais aussi aux solutions en développement.
- Ouverte en s'adaptant aux capacités humaines, techniques et financières des collectivités.

Ce processus de modélisation s'appuie sur les besoins des différents intervenants, et sur une confrontation systématiquement de la modélisation à la réalité. Notre processus de modélisation est développé autour des SIG, qui sont aujourd'hui des outils numériques largement déployés dans les collectivités territoriales gestionnaires de voirie et pertinents pour cette recherche.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 4-4 – Synthèse démarche de thèse

Conclusion Partie I

Cette première partie principalement bibliographique a mis en exergue trois éléments fondamentaux de notre travail de recherche :

- sur quoi notre recherche porte, c'est-à-dire, la définition et le périmètre de la voirie ;
- à qui notre recherche s'adresse, en ciblant les gestionnaires de voirie ;
- comment nous avons mené nos recherches, en présentant l'approche que nous avons suivie.

Dans le cadre d'une réflexion sur les interactions spatiales et structurelles entre voirie et réseaux techniques, nous avons choisi de mettre au centre de nos travaux la voirie urbaine, laquelle accueille la majorité des réseaux techniques enterrés. Nous avons alors défini la voirie urbaine comme :

> *L'ensemble des infrastructures privées et publiques (**Cf. 1.2, p. 47**) destinées à la circulation terrestre hors infrastructures ferroviaires, et traversant une agglomération selon des critères administratifs (**Cf 1.3, p. 48**). L'infrastructure est composée d'un élément central sur lequel circulent généralement des véhicules motorisés : la chaussée. Autour, des dépendances et des équipements sont aménagés afin qu'elle assure ses différentes fonctions (**Cf. 1.2, p. 47**).*

Puisque notre problématique porte aussi bien sur les dimensions spatiales que structurelles de la voirie, nous avons ensuite défini l'objet géographique et technique voirie selon deux champs d'études :

- Le génie urbain conduisant à percevoir la voirie dans ses dimensions planimétriques en identifiant ses différents éléments constitutifs et leurs aménagements, tels que les chaussées, les espaces cyclables, les trottoirs ou encore les stationnements. C'est aussi cette approche qui permet d'analyser le positionnement des réseaux techniques par rapport aux voiries.
- Le génie civil prenant davantage en compte la conception verticale de la voirie, et notamment par l'intégration de ses structures en sous-sol avec la nature des matériaux et leurs épaisseurs. Cette approche de génie civil permet ainsi d'analyser les dégradations des voiries en fonction des matériaux choisis et la présence ou non de réseaux techniques.

Au-delà, nous avons constaté que la voirie urbaine est un espace géré par de nombreux gestionnaires. Elle relève de différentes juridictions selon son classement : national, départemental, communal ou intercommunal. Ensuite, puisqu'elle est multifonctions, d'autres intervenants sont concernés par l'infrastructure. Ces fonctions impactent la voirie au cours du

temps, du fait des aménagements qu'elles nécessitent, par la maintenance des aménagements ou tout simplement par les activités qu'elles engendrent. La mise en place d'une démarche modélisatrice permettant d'optimiser la co-maintenance des voiries et réseaux doit alors tenir compte de la diversité des intervenants sur voirie et la complexité de leurs relations. Pour cela, il nous a semblé pertinent d'identifier les intervenants les plus légitimes pour revêtir le rôle de coordinateur, et de les mettre au centre de notre démarche : ces intervenants sont les gestionnaires de voirie, objet central de notre travail. Ils ont déjà de façon implicite un rôle de coordinateur des interventions sur le domaine routier. Par ailleurs, les réseaux techniques passant sous la voirie, les gestionnaires de réseaux sont obligés de se référer aux gestionnaires de voirie pour intervenir sur leurs infrastructures.

Finalement, nous replaçons notre travail dans le champ disciplinaire de la constructibilité dans la mesure où notre démarche a pour objectif d'améliorer les performances de la voirie sur toute sa durée de service en optimisant les interventions et ainsi d'optimiser le coût global de cette voirie. Pour cela, nous développons à travers les parties suivantes un référentiel spatial de voirie à l'aide d'une modélisation accompagnatrice s'appuyant sur les SIG et se voulant évolutive, anticipatrice et ouverte.

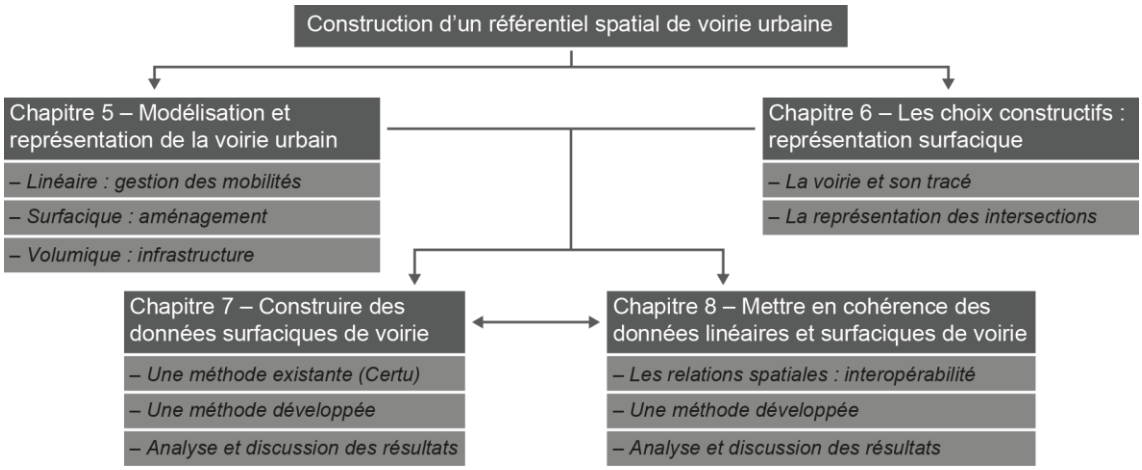
« *La route se présente comme un territoire dont il faut prendre en compte les multiples dimensions. Elle ne peut être considérée uniquement du point de vue de ceux qui la parcourent, qu'elle soit conçue comme un itinéraire qui mène d'un point à un autre ou de façon plus réaliste comme un écheveau de voies qui reflète les aléas du cheminement. Elle existe également pour les populations locales qui cohabitent quotidiennement avec l'axe routier et pour qui elle est une source de revenus et de contraintes. Elle a enfin une importance fondamentale pour les différents pouvoirs qui tiennent à s'en assurer le contrôle.* » (Céline Perol, Comment penser la route ?, 2007)

Partie II : Modéliser l'implantation en sursol de la voirie urbaine : pourquoi et comment construire des objets géographiques voirie pour les SIG ?

Introduction

L'objectif de cette partie est de présenter notre démarche pour développer un référentiel spatial de voirie permettant d'améliorer la gestion et la maintenance de l'infrastructure. La **Figure 2** illustre l'organisation de cette partie en quatre chapitres :

- Dans un premier chapitre nous analysons les différentes modélisations et représentations de la voirie dans les SIG, afin d'expliciter notre choix d'une représentation surfacique de la voirie.
- Dans un deuxième chapitre, nous analysons des bases de données (BD) surfaciques de voirie à travers des exemples nationaux et internationaux : Victoria et Montréal au Canada, San Francisco aux USA, Copenhague au Danemark, ainsi que Bordeaux et Paris en France. Ceci permet d'identifier les choix constructifs les plus pertinents pour une BD de voirie adaptée à la gestion et à la maintenance des voiries. Une étude spécifique est menée sur les intersections et leur représentation.
- En troisième chapitre, nous définissons et développons une méthode générique pour construire des objets graphiques surfaciques de voirie. Les résultats de cette méthode sont comparés avec ceux d'une autre méthode couramment utilisée par les collectivités, ainsi qu'avec une donnée de référence.
- En dernier chapitre, nous concevons et proposons une méthode générique pour construire des tronçons surfaciques de voirie cohérents avec les tronçons linéaires existants. Ceci devra faciliter le transfert d'informations associées aux objets graphiques linéaires et surfaciques des BD de voirie.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 2 – Schéma d'organisation de la Partie II

Les méthodes proposées en chapitres 7 et 8 sont présentées par une application sur une commune de l'agglomération parisienne (Cachan – Val de Marne), notre *cas d'étude*. Ce choix repose sur :

- **La proximité** : L'IRC est implanté sur le territoire de Cachan. Dans une démarche modélisatrice d'accompagnement, la proximité permet de confronter rapidement nos résultats aux observations « terrain ».
- **La variété des voiries** : La voirie de Cachan est dense et diversifiée en termes d'aménagements.
- **La disponibilité de données voiries (collectés ou fournis)** : les analyses thématiques nécessitent de disposer d'un référentiel spatial de voirie opérationnel. Nous justifierons ce choix plus précisément en quatrième partie.

5. La voirie, des objets géographiques à leur représentation dans les SIG

Les acteurs de la voirie identifiés en première partie ont des acceptions différentes de l'infrastructure selon l'usage qu'ils en ont ou pour lequel ils interviennent (**Cf. Partie I, 1.4, p. 51**). De ces acceptions découlent des modélisations différentes de la voirie. Alors que certains s'intéressent aux axes de circulation d'autres se focalisent sur le volume à aménager en sursol, ou encore le volume occupé sous le sol par les différentes couches de l'infrastructure. À partir de ces conceptions de la voirie, les géomaticiens construisent des bases de données géographiques exploitables sous SIG.

Dans ce chapitre, notre objectif est d'analyser les représentations – dans les SIG – de la voirie, utiles aux différents acteurs selon leurs besoins, avant de proposer une représentation adaptée à la gestion de la voirie et des réseaux enterrés :

1) Dans une première section, nous présentons la représentation de la voirie la plus utilisée. Il s'agit d'une représentation adaptée à la gestion des mobilités.
2) Dans une deuxième section, nous présentons une représentation de la voirie adaptée aux besoins de l'aménagement en sursol de l'infrastructure.
3) Dans une dernière section, nous présentons une représentation de la voirie adaptée à la gestion de l'infrastructure en sous-sol et en sursol.

5.1. La voirie – support de mobilités, un service à gérer

Les collectivités, pour aménager (**Cf. Définition Faivre-D'Arcier, p. 53**) et développer leurs territoires, ont besoin de maitriser et gérer l'ensemble des mobilités. Les mobilités sont étroitement liées à la planification de la circulation, laquelle permet de fluidifier les déplacements et d'organiser l'accessibilité sur l'ensemble des territoires. Les collectivités s'appuient sur les infrastructures supports des mobilités liées à leurs différents enjeux.

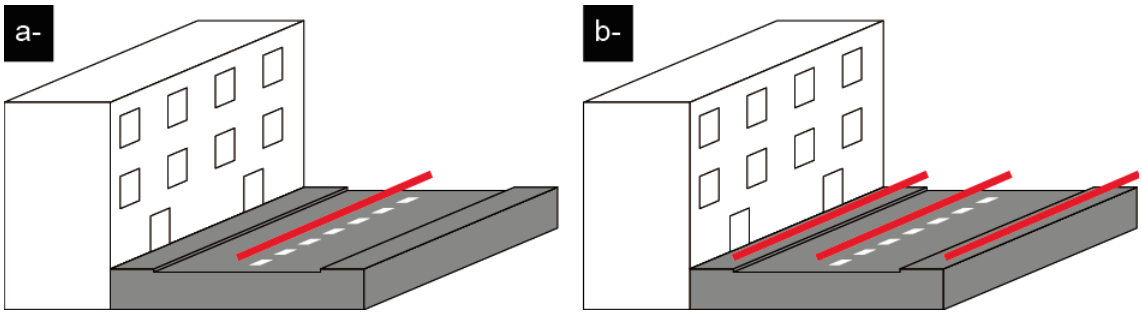
D'abord, à l'échelle intra-urbaine, les communes et intercommunalités, doivent relier les quartiers entre eux, et assurer une bonne accessibilité des activités et services. La voirie demeure l'infrastructure la plus génératrice de mobilités autant par les déplacements doux (à pieds, cycles, etc.), que par les déplacements motorisés individuels (automobiles, deux roues) ou encore collectifs (autobus). En 2008[2], un rapport décennal présentant les résultats de l'enquête sur la mobilité des personnes menée conjointement par l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) et le service statistique du ministère de la Transition écologique et solidaire, indique que les déplacements locaux en semaine par mode motorisé individuel se stabilisaient. Néanmoins, ils restaient majoritaires (65,6 %) avec 64,9% par automobiles et 1,7% par deux-

[2] Les résultats de la dernière enquête décennale réalisée en 2018 seront publiés au cours de l'année 2020.

roues motorisés, contre 22% pour les transports collectifs (dont les transports ferrés), tandis que les modes doux représentaient 28% avec la marche (22,3%) et le vélo (2,7%) (Papon et de Solère 2010). Ensuite, à l'échelle interurbaine, les départements et régions organisent les mobilités permettant de relier les capitales départementales et régionales et les territoires périphériques. L'État, et l'Union européenne organisent les mobilités entre les lieux à forts enjeux notamment entre les capitales nationales et grandes villes régionales. La voirie reste là encore une infrastructure privilégiée bien que la part modale des transports en communs ferrés ou aériens augmente avec la distance. Les transports individuels motorisés relient les espaces urbains entre eux et irriguent les espaces ruraux. En 2008, la part des déplacements longue distance en France, c'est-à-dire supérieurs à 80 kilomètres, réalisés par automobile dépassait 70% (Grimal 2010).

La gestion de la circulation nécessite une analyse du trafic (vitesses théoriques règlementaires, nombre de véhicules prévus) et de l'ensemble des contraintes engendrées par le trafic réel (nombre de véhicules, vitesses réelles). Ce type d'analyse amène à s'intéresser principalement aux axes de circulation liés aux tronçons de voirie. La modélisation qui en découle conduit, le plus souvent, à rapporter un tronçon de voirie à un axe unique correspondant classiquement à l'axe de la chaussée routière (**Figure 5-1 a**). Dès lors que l'on se place dans une analyse multimodale, un tronçon de voirie est rapporté à plusieurs axes représentant chacun une chaussée en particulier (routière, cyclable, ou en site propre), voire un trottoir (**Figure 5-1 b**). Il s'agit d'une modélisation en graphe.

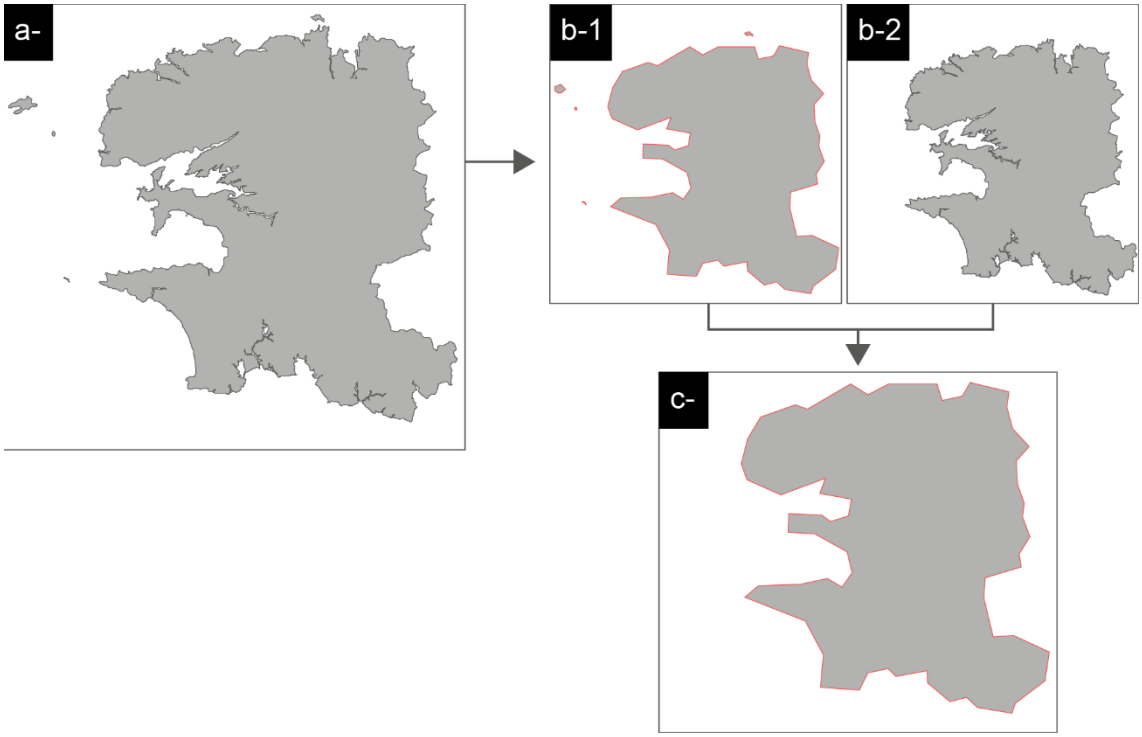
Les systèmes d'informations géographiques permettent, à l'aide de données de voirie organisées sous forme de graphes de transport, de s'appuyer sur la théorie des graphes (Fournier et Pomerol 2010) pour caractériser la circulation en mesurant par exemple l'accessibilité par le plus court chemin. La modélisation en graphe de l'objet géographique voirie conduit à représenter la voirie par des objets graphiques linéaires et ponctuels. Un tronçon de voirie est modélisé par une polyligne représentant l'axe de la chaussée la composant. Ces polylignes relient les points représentant les intersections de voirie et disposent d'attributs associant un coût ou une impédance relative à la mobilité étudiée (vitesse de circulation, temps de parcours, sens de circulation par exemple).



Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 5-1 – Modélisation de la voirie par ses axes de circulation

Les enjeux auxquels sont confrontés les différents services de l'État conduisent à étudier les mobilités à des échelles différentes. La variation de l'échelle d'analyse suppose une généralisation différente des tronçons de voirie (Salvo 2006), aussi bien en termes de sélection que de simplification (Béguin et al. 2017) (**Figure 5-2**).



<u>Légende</u> : Le processus de généralisation consiste à adapter la représentation des objets géographiques sur une carte selon le but, le thème et l'échelle de la représentation. À partir d'un objet graphique avec un niveau de détails important (a), le processus vise à simplifier le tracé (b-1), et à sélectionner les éléments (b-2) afin d'obtenir la représentation la plus adaptée. La figure (c) est le résultat de la sélection et de la simplification combinées.

Sources : © IGN, BD GEOFLA® 2016 / Auteur : A. Pavard, 2018

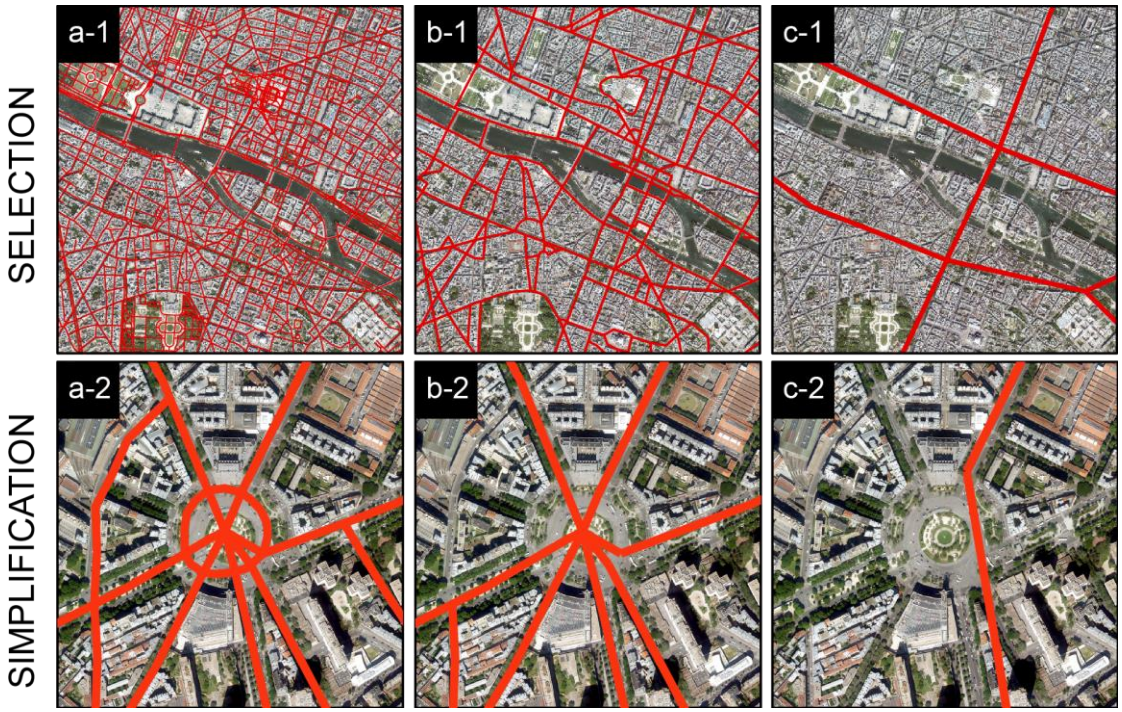
Figure 5-2 – Processus de généralisation

À l'échelle locale, tous les tronçons de la voirie constituée des voies de transit aux voies de desserte (**Cf. Partie I, Tableau 2-1, p. 69**) sont conservés et représentés. Les polylignes

représentant les axes de ces tronçons de voirie ont une simplification faible de façon à conserver au mieux les tracés observables sur le terrain. Lorsqu'un tronçon de voirie se compose de plusieurs chaussées, chaque chaussée est modélisée et représentée par une polyligne propre. La base de données topographique (BD TOPO) de l'IGN en est un bon exemple pour le territoire français (**Figure 5-3 a**). Des BD de même nature existent pour d'autres territoires. Les outils de navigation type GPS utilisent en général des BD de ce niveau de généralisation.

À l'échelle régionale, seuls les tronçons de la voirie constituée des voies de transit et de liaison, sont conservés. Leurs géométries sont simplifiées, et les tronçons de voirie composés de plusieurs chaussées sont modélisés et représentés par une seule et même polyligne. La base de données ROUTE 500 de l'IGN en est une illustration pour le territoire français au 1 : 250 000 (**Figure 5-3 b**). Eurogeographics, l'association des agences cartographiques ou cadastrales européennes, propose une base de données routière couvrant le territoire à la même échelle, EuroRegionalMap.

Enfin, **à l'échelle nationale**, n'apparaissent que les tronçons de la voirie constituée des voies de transit, le plus souvent fortement simplifiés, tel qu'on peut l'observer à travers la base de données ROUTE 120 de l'IGN au 1 : 1 000 000 (**Figure 5-3 c**). De la même façon que précédemment, Eurogeographics déploie à cette échelle la base de données EuroGlobalMap.



Sources : © IGN, BD TOPO®, BD ROUTE500®, BD ROUTE120® ORTHO HR®, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 5-3 – Différents niveaux de généralisation selon l'échelle de représentation

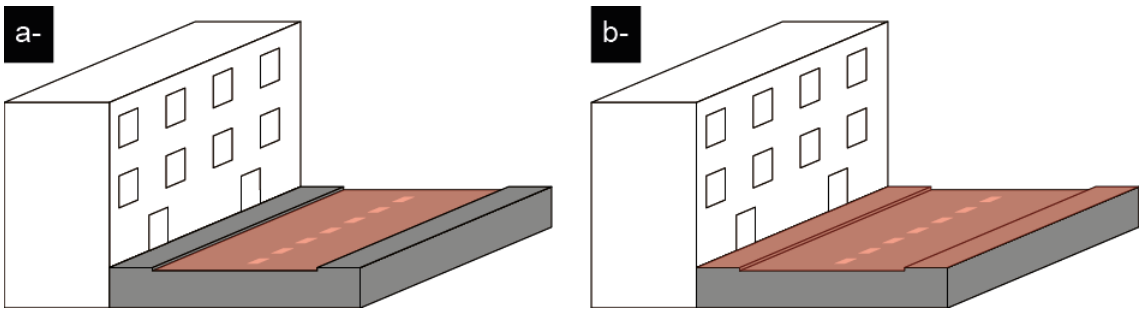
La représentation linéaire permet selon l'échelle de représentation de conserver l'axe de toutes ou partie des chaussées circulables (routières, cyclables, piétonnières, etc.). Cette représentation s'appuie uniquement sur les espaces circulables dont un axe de circulation est identifiable et exclut de facto les autres dépendances de la voirie telles que les espaces verts ou les stationnements. Dès lors que l'on souhaite se rapporter à l'emprise de la voirie, cette représentation ne convient plus. Une modélisation par représentation de l'axe des chaussées ne permet pas de conserver une information détaillée sur la largeur des chaussées et sa diversité d'usage. En effet, même en affectant une largeur par attribut descriptif, il n'est pas possible de tenir compte des nombreuses spécificités d'aménagement du milieu urbain. Il est fréquent de constater des élargissements ou rétrécissement de voirie sur un même tronçon de voirie.

5.2. La voirie – « support » de la vie urbaine, un espace à partager

L'aménagement d'une voirie est soumis à la contrainte forte de disponibilité de l'espace en ville. Cette contrainte d'espace est d'autant plus importante aujourd'hui que l'on tend à partager de plus en plus la voirie en différents usages, tels que circulatoires ou de loisirs (terrasses de café, galeries marchandes). À cette division de l'espace par les usages, s'ajoute le partage selon les modes de transport. Ce partage s'inscrit par une limitation des emprises, identifiables au sol notamment par des tracés de couleur, comme dans le cas des bandes séparatrices des différentes chaussées, ou par des équipements spécifiques tels que les murets séparatifs. La maitrise de ces projets d'aménagement nécessite de détenir des informations détaillées et précises sur l'existant, et ou le projeté, permettant de délimiter correctement l'emprise des éléments constitutifs de la voirie.

5.2.1.La voirie, une emprise au sol

Dans la littérature, le terme « voirie », renvoie à deux conceptions différentes : la première ne tient compte que des chaussées (**Figure 5-4 a**), tandis que la seconde (**Figure 5-4 b**) englobe les chaussées avec l'ensemble de leurs dépendances (**Cf. Partie I, 2.2, p. 58**).



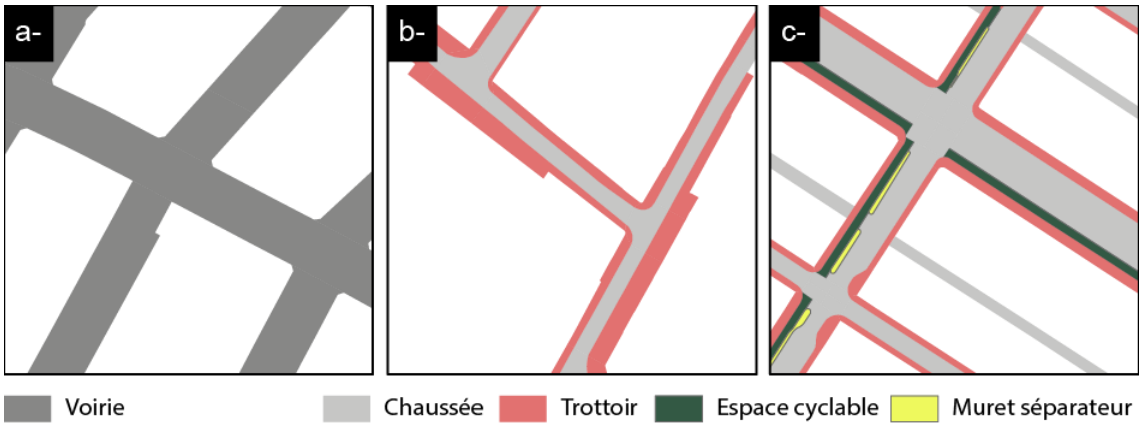
Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 5-4 – Modélisation de la voirie par son emprise au sol

À notre connaissance, la représentation de la voirie par sa seule chaussée n'est aujourd'hui plus utilisée. En effet, ne modéliser que les chaussées circulables sans leurs dépendances et leurs équipements semble insuffisant compte tenu du besoin croissant de partager et d'aménager l'espace pour les différents usages et usagers. La deuxième représentation du périmètre voirie, tenant compte de la chaussée et des dépendances, est de de facto plus adaptée. S'intéresser à une emprise au sol conduit à une représentation surfacique de la voirie.

Or, à partir de nos recherches nous constatons que les données géographiques surfaciques de voirie sont moins courantes que les données linéaires. Pourtant les collectivités ont un réel besoin de connaitre l'emprise de leur voirie, pour en prévoir ses aménagements, et les budgets associés. En effet, selon l'usage, le coût de l'aménagement varie en tenant compte des matériaux utilisés et des quantités nécessaires. Ainsi, le prix d'une couche de revêtement de voirie évolue entre 1,8€/m² pour un revêtement très mince (c'est-à-dire environ 2 cm) et 11€/m² pour un revêtement épais (c'est-à-dire environ 5-6 cm) (Cerema Ouest 2017). La volonté de maitriser plus précisément le patrimoine voirie, conduit localement des collectivités à produire des données géographiques permettant d'estimer les surfaces de leurs infrastructures.

L'analyse de données surfaciques existantes que nous avons réalisée à l'aide de données de municipalités internationales, met en exergue des différences, notamment de modélisation des éléments constitutifs de la voirie (***Cf. 6, p.117***). Par ces données, nous constatons une prise de conscience de l'intérêt de délimiter l'espace voirie dans son ensemble, donc, en ajoutant les dépendances aux chaussées. Malgré cela, les modélisations qui en résultent varient. La modélisation la plus simple consiste à représenter l'ensemble des éléments constitutifs d'un tronçon de voirie avec un unique objet graphique. Il s'agit de la modélisation proposée et déployée en accès libre (OpenData) par la municipalité de Copenhague (**Figure 5-5 a**). Une modélisation plus avancée, comme celle proposée par la municipalité de Paris conduit à distinguer la chaussée et les trottoirs (**Figure 5-5 b**). Enfin, la municipalité de Montréal a opté pour une modélisation plus détaillée en dissociant en plus des trottoirs, les espaces cyclables, les îlots, tels que les terres pleins centraux et autres séparateurs (**Figure 5-5 c**).



Légende : a) Copenhague, b) Paris, c) Montréal

Sources : Københavns Kommune Bydata, 2019, SIG – Paris 2019, SIG – Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 5-5 – Exemples de données voirie surfaciques

Une telle représentation surfacique de la voirie permet de prendre en compte l'ensemble de la dimension horizontale de l'infrastructure. Nous l'avons vu, la voirie se compose également d'un volume visible en surface qui est aménagé et dans lequel les usagers évoluent, ainsi que d'un volume souvent invisible en sous-sol constitué de l'ensemble des couches de matériaux permettant à l'infrastructure de répondre aux sollicitations faites en surface. Sous ce volume en sous-sol sont installés d'autres infrastructures dont les réseaux techniques.

5.3. La voirie – une infrastructure, un volume à maintenir

5.3.1.La voirie, un volume en sursol

Au-delà des mobilités, la multiplication des modes de transport et des usages a nécessité de sécuriser les différents espaces de la voirie selon la vulnérabilité des usagers (Héran 2005). Plus récemment encore, la notion de qualité de vie urbaine a émergé et transformé les opérations d'aménagement de la voirie.

Le partage de la voirie, notamment pour la sécurité des usagers, s'est d'abord fait par un redécoupage et une réaffectation des différents espaces de la voirie. Pour cela, un tracé au sol usant par exemple de couleurs des revêtements, a permis aux usagers d'identifier ces espaces. Ce partage marqué d'une simple empreinte au sol s'est souvent révélé insuffisant pour assurer la sécurité des usagers (Reigner 2004). Les nombreux incidents entre piétons, cyclistes et automobilistes ont poussé les autorités à amorcer une réflexion sur l'organisation de ce partage, et les aménageurs à proposer des solutions assurant une meilleure sécurité. Des accessoires et

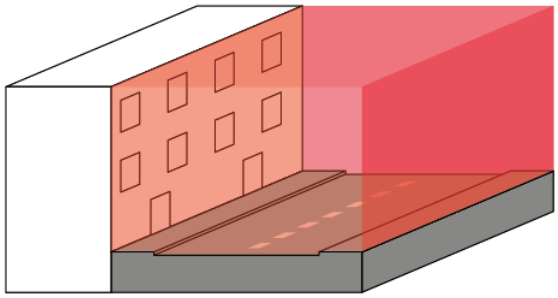
équipements de voirie ont été développés (Hiron et al. 2006), comme par exemple des (**Cf. Partie I, 2.2.1, p. 58**) :

- îlots de sécurité pour mettre à l'abri les piétons lors de la traversée de très larges chaussées ;
- barrières physiques pour éviter les empiétements des véhicules motorisés sur les espaces piétonniers ou cyclistes ;
- murets pour empêcher des chevauchements ou des traversées dangereuses ;
- chicanes, des jardinières installées en coté de chaussée pour inciter les automobilistes à réduire leur vitesse ;
- espaces végétalisés ayant souvent les mêmes fonctions que les barrières ou murets, avec une fonction supplémentaire d'agrémentation ;
- luminaires pour assurer l'identification des espaces de nuit.

Tous ces éléments occupent une emprise au sol non négligeable ainsi qu'un volume en sursol.

Au-delà du partage de l'espace et de la notion de sécurité, l'ensemble de l'aménagement en sursol de la voirie est aujourd'hui pris en compte dans l'optique de construire l'identité visuelle de l'espace public et proposer un cadre de vie agréable en milieu urbain, avec une prise en compte du bâti. Ces aménagements peuvent également répondre à des problématiques environnementales rencontrées en milieu urbain telles que les îlots de chaleur. Des éléments d'agréments ponctuels, tels que les arbres, les jardinières et carrés végétalisés sont par exemple introduits sur la voirie, lesquels permettent, en plus d'améliorer le paysage urbain, de capter le dioxyde de carbone et de réduire la chaleur (Gramond 2019). Des jeux d'eau sont aménagés, ponctuellement par des fontaines, ou de façon plus étendue, comme le miroir d'eau de Bordeaux (2 cm d'eau stagnant sur une dalle en granit de 3 450 m2 et reflétant la Place de la Bourse).

Ces exemples conduisent à représenter les éléments constitutifs de la voirie dans le référentiel tridimensionnel qu'est la voirie en sursol (**Figure 5-6**).



Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 5-6 – Modélisation de la voirie par les volumes occupés en sursol

Les SIG sont limités par les objets graphiques 2D – point, polyligne et polygone – permettant de représenter les éléments géographiques. La cartographie résultant des SIG limite encore davantage la représentation en perdant l'environnement tridimensionnel des SIG : alors que les polygones demeurent des objets graphiques 2D, les polylignes et les points perdent respectivement une et deux dimensions. Ainsi, les géomaticiens des collectivités territoriales ont produit des bases de données géographiques pour les équipements de voirie en utilisant ce que Larrivée et al. (2006) appellent les objets graphiques 0D à 2D dans un univers 3D. En d'autres termes, ils utilisent des géométries de type point, polyligne ou polygone construites à l'aide de coordonnées géographiques X et Y, et décrites en attribut par la troisième dimension Z permettant de représenter le volume englobant des éléments réels. On note par exemple, et c'est le cas pour Paris, l'existence de bases de données par mobilier et équipement de voirie tels que les équipements de signalisation verticale, les lampadaires ou encore les arbres. Ces éléments sont souvent représentés à l'aide de géométries de type point dans le SIG. Leur localisation est permise à l'aide de coordonnées géographiques X et Y et leur hauteur est renseignée dans les attributs liés aux objets graphiques.

Ces initiatives locales se sont démocratisées sur la fin des années 2010 portées notamment par la réforme anti-endommagement des réseaux de 2012 (**Cf. Partie I, 3.3.2, p. 83**) qui a incité les collectivités à mettre en place des Plans de Corps de Rue Simplifiés (PCRS). Le PCRS constitue un référentiel topographique à l'échelle du 1/200ème permettant de positionner les réseaux techniques par rapport aux éléments de la voirie. En 2014, l'Association française de normalisation (Afnor) a réalisé un premier travail de normalisation sur le géoréférencement des ouvrages. Parallèlement, les acteurs de la voirie se sont réunis dans le cadre d'une commission sur les données du Conseil national de l'information géographique (Cnig) de façon à définir pour l'échelon national un cadre technique, organisationnel et financier garantissant l'efficience et l'interopérabilité des PCRS. En se basant sur les initiatives locales, notamment de grandes municipalités, la commission a spécifié un contenu de ce référentiel. Les spécifications proposées

par le Cnig prévoient l'intégration d'un certain nombre d'éléments de la voirie dans les PCRS : – les limites de voirie (chaussées et trottoirs) ; – les marches d'escaliers ; – les limites des façades des bâtiments ; – les seuils (l'ensemble des portes, portes cochères, portails et seuils permettant l'entrée ou la sortie dans un bâtiment ou une enceinte) ; – les murs et clôtures séparateurs ; – les piliers et piles de ponts ; – les rails ; – les arbres – les affleurant des réseaux techniques (bouches à clés, regards, etc.).

Les spécifications donnent également des indications sur la modélisation et la représentation des éléments cités. Ainsi, elles prévoient de modéliser les objets géographiques par leurs limites physiques et de les représenter par des polylignes (**Figure 5-7**). Il est précisé que le PCRS ne s'attache pas à décrire les hauteurs, les épaisseurs ni même les matériaux constituant les éléments (CNIG et AFIGEO 2017).

Source : https://decryptageo.fr/le-pcrs-reporte-2026/

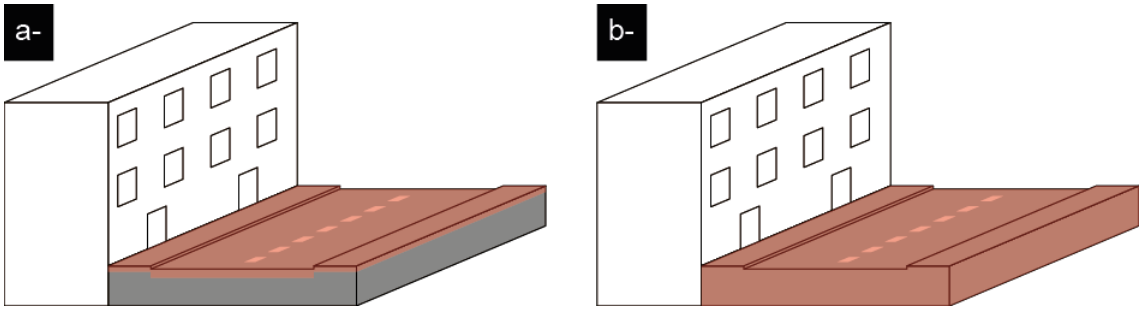
Figure 5-7 – Extrait du PCRS de Strasbourg

L'expérience de collectivités a montré que les informations minimales proposées pour constituer le PCRS sont insuffisantes pour des opérations d'entretien de la voirie et des réseaux sous voirie. Par souci de détenir des informations plus détaillées, certaines collectivités, telles que Drancy, ont poussé la démarche plus loin de façon à produire des référentiels très grande échelle (RTGE). Les interventions sur voirie et réseaux dépendent bien sûr des aménagements en surface, mais également des aménagements en sous-sol et notamment de la structure des éléments de voirie implantés dans le sous-sol.

5.3.2.La voirie, un volume en sous-sol

Les différents éléments de la voirie, pour répondre au mieux aux différentes sollicitations en fonction des usages qu'ils supportent, sont dimensionnés selon des règles techniques précises prenant en compte principalement les sollicitations mécaniques (trafic). Ce dimensionnement implique un calibrage des différentes couches composant l'infrastructure (**Cf. Partie III, 9, p. 170**) aussi bien en termes d'épaisseur que de choix des matériaux. Dans le cas d'une chaussée, le passage d'un nombre important de poids lourds provoque une agressivité forte sur l'infrastructure. Les exigences pour ces chaussées ne sont pas les mêmes que pour des pistes cyclables ou des trottoirs. Une bonne prise en compte de l'agressivité du trafic et des sollicitations climatiques doit permettre à chaque structure une meilleure durabilité en limitant les dégradations au cours de sa durée de service. (**Cf. Partie III, 9, p. 170**)

En plus de son emprise au sol et de son volume en sursol, la voirie occupe alors un volume en sous-sol. Deux perceptions conduisant à deux modélisations de ce volume sont identifiables : la première ne tient compte que de la couche supérieure appelée couche de roulement (**Figure 5-8 a**), la seconde englobe l'ensemble des couches de l'infrastructure ainsi que son support (**Figure 5-8 b**).



Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 5-8 – Modélisation la voirie par les volumes occupés en sous-sol

La prise en compte de la seule couche de roulement s'accorde avec la vision que les aménageurs ont de l'infrastructure. La voirie étant un espace partagé, l'aménagement de celui-ci doit refléter ce partage et permettre d'identifier rapidement et simplement les emplacements réservés à chaque usage. Ce partage visuel permet de limiter les empiétements, telle que la circulation d'automobiles sur des espaces réservés à d'autres mobilités (espaces piétons ou cyclables), et d'assurer la sécurité des usagers (***Cf. 2.1.3.1, p. 109***).

La seconde modélisation, intégrant les autres couches de la voirie, est liée aux contraintes physiques que la voirie est amenée à supporter, et donc à son besoin de dimensionnement. Le

service de l'état en charge des études sur les transports, les routes et leurs aménagements propose un guide technique identifiant de façon détaillée les étapes du dimensionnement pour déterminer les épaisseurs des couches de la chaussée. Et ce dans une démarche stratégique d'investissement et d'entretien, ainsi que pour répondre aux objectifs de service et à la pression du trafic (LCPC et SETRA 1994).

Les informations relatives au dimensionnement des chaussées, et plus globalement des éléments constitutifs de la voirie sont le plus souvent fournies à travers des plans et documents techniques. Les exemples de données géographiques diffusées par les collectivités montrent qu'elles n'intègrent pas la 3ème dimension de la voirie en sous-sol. Lorsque des données caractérisant les structures sont inclues, celles-ci se limitent généralement à la couche de revêtement, élément intéressant les acteurs de l'aménagement en surface de la voirie. Elles ne fournissent, en revanche, généralement pas d'information sur les structures elles-mêmes, c'est-à-dire leurs matériaux, leurs épaisseurs et profondeurs (données non disponibles ou disponibles dans un autre format). Nous notons cependant une évolution à ce sujet. La municipalité de Montréal propose par exemple une base de données surfacique de voirie décrivant les éléments constitutifs de la voirie. Depuis la mise à jour de 2019, la base de données contient des informations sur les structures de chaussées (**Tableau 5-1**).

Tableau 5-1 – Nombre de tronçons de voirie de Montréal selon le revêtement et la structure

		Revêtement								
		Bét. Bit. (BB)	BB / béton	BB / pavés	Béton	Béton / pavés	Pavé	Gravier	Poussière de roche	Total
Type de structure	Rigide	23381	2	13	380	2	215	11		24004
	Souple	35793	4	4	130		118	45	6	36100
	Inconnu	92			2			3		97
	Total	59266	6	17	512	2	333	59	6	60201

Sources : Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

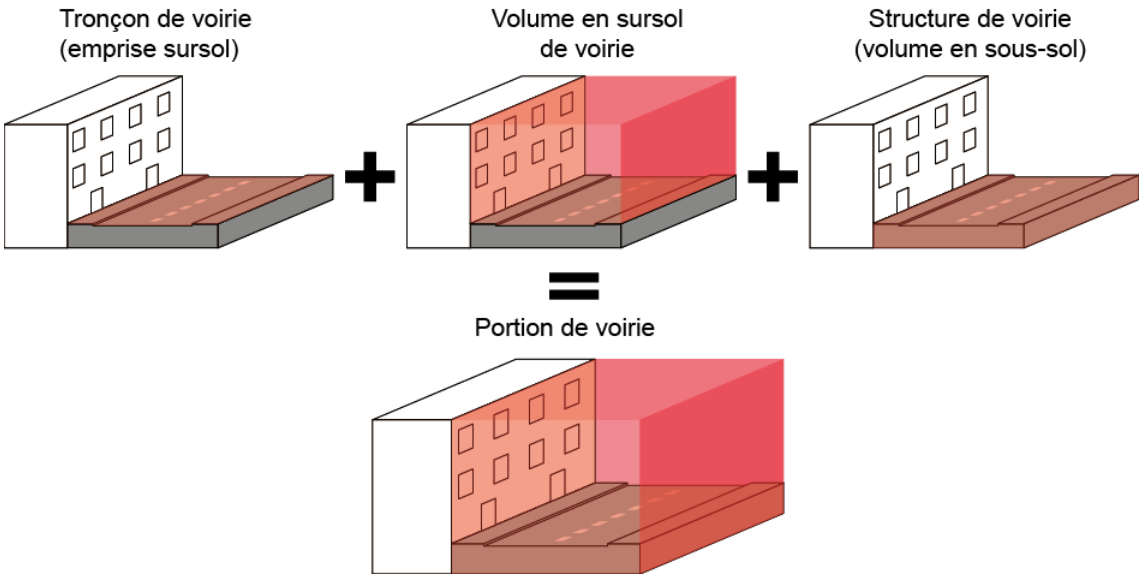
Une base de données géographique intégrant les informations de structures de la voirie permettrait une réflexion sur les choix constructifs de l'infrastructure selon son environnement. Par exemple, croiser des données géographiques de voirie décrites par la structure et les dégradations, avec des données géographiques sur les réseaux techniques permettrait :

- de mieux saisir les interactions entre ces deux types d'infrastructure,
- d'organiser les interventions,
- d'effectuer des choix constructifs selon la présence ou l'absence de réseaux sous la voirie.

Synthèse II.1

Les différents acteurs de la voirie, selon leur questionnement, ont une vision partielle de l'infrastructure (**Cf. Partie I, 2, p. 56**). Dans le cas de la gestion de la circulation, la voirie est rapportée à des axes de circulation permettant l'analyse du trafic et des mobilités. Son aménagement en surface, notamment pour optimiser le partage de l'espace entre les différentes activités qu'elle supporte, conduit à s'intéresser à son emprise au sol ainsi qu'au volume qu'elle occupe en sursol. Finalement, un dimensionnement de la structure en sous-sol, permet à la voirie de supporter les usages prévus en limitant les dommages irréversibles subis au cours de sa durée de service. Dans la suite de ce travail, nous adopterons le vocabulaire suivant par souci de cohérence et d'homogénéité (**Figure 5-9**) :

- *tronçon de voirie* renverra à l'emprise au sol ;
- l'ensemble des dimensions d'un tronçon de voirie sera défini comme *portion de voirie*, terme renvoyant à la notion de portion de territoire développée par Bordin (2006).



Auteur : A. Pavard, 2018

Figure 5-9 – Les différentes dimensions et modélisations de la voirie

Les objets graphiques disponibles pour représenter des éléments réels dans un SIG sont limités à deux dimensions bien que pouvant être décrits par une troisième dimension (***Cf. 5.3.1, p. 109***). Dans l'optique d'une base de données géographique de voirie exploitable pour gérer les interventions sur voirie et réseaux, nous proposons une représentation surfacique, donc en 2D, de la voirie décomposée en ses éléments constitutifs. La troisième dimension n'est pas prise en charge par la représentation géométrique des objets graphiques, mais par un attribut. Il est impératif, au-delà de la question de la décomposition en éléments constitutifs de s'interroger sur les choix constructifs des bases de données surfaciques de voirie (***Cf. 6, p. 117***)

Par ailleurs, ce choix ne nous évite pas le besoin de disposer d'informations contenues dans les bases de données linéaires de voirie. Typiquement, nous avons indiqué que les informations sur le trafic routier sont généralement rattachées à des données linéaires. Or, les informations de trafic sont essentielles pour dimensionner la voirie pour les choix de matériaux et de structures (**Cf. Partie 3, 9.1, p. 170**). Ce besoin de transfert d'informations entre bases de données linéaires et surfaciques traduit la nécessité de mettre en cohérence les objets graphiques linéaires et surfaciques, c'est-à-dire, de construire une base de données surfacique assurant sa mise en cohérence avec les bases de données linéaires (***Cf. 8, p. 152***).

6. Les choix constructifs des bases de données géographiques surfaciques existantes

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté que la représentation surfacique de la voirie dans les SIG est la plus adaptée pour aboutir à une base de données géographique utile à la problématique de gestion des interventions sur voirie et réseaux enterrés. Les données surfaciques de voirie existantes permettent d'étudier un aspect des tracés de la voirie : le tracé en plan de voirie. Ce tracé est une vue du dessus de la voirie et se définit par une succession de tronçons de voirie (courbés ou droits) raccordés entre eux.

L'objectif de ce sixième chapitre est de présenter les choix constructifs pour les bases de données géographiques surfaciques existantes :

1) Dans une première section nous traitons la question de la modélisation et de la représentation des éléments de voirie saisis.
2) Dans une seconde section, nous analysons plus spécifiquement la modélisation et la représentation des intersections de voirie selon les utilisations envisagées des bases de données géographiques.

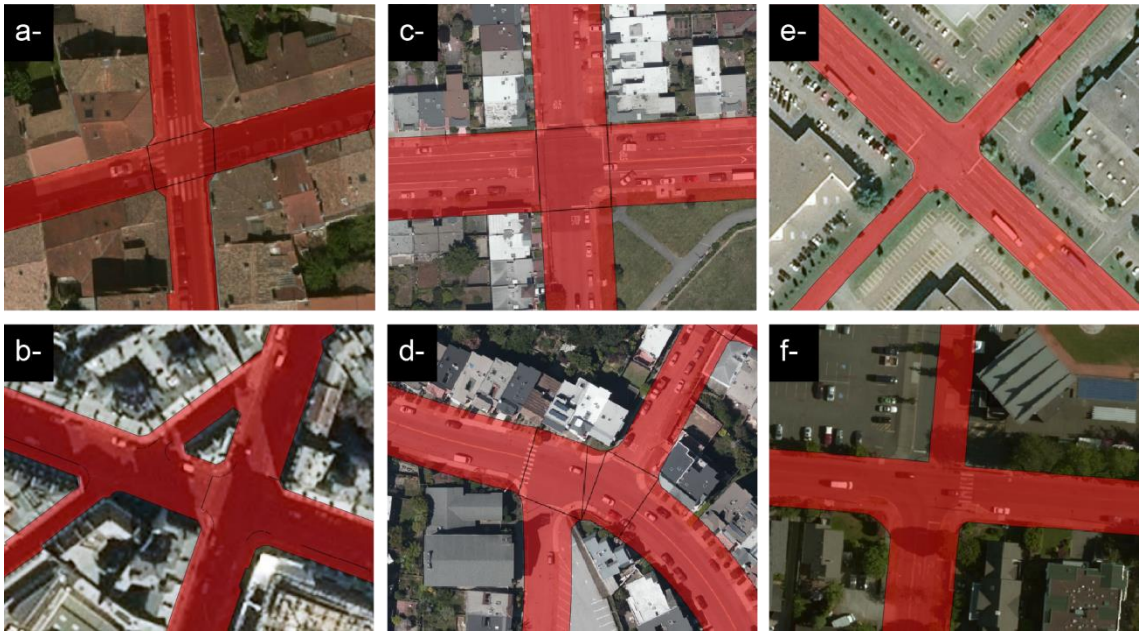
6.1. La voirie : Le tracé des objets graphiques

Dans la suite, nous allons nous intéresser à la question des objets graphiques représentant les intersections de voirie. Auparavant, nous observons des différences de construction des limites des objets graphiques, notamment aux points de jonction entre tronçons et intersections de voirie.

Notre première hypothèse expliquant les différences observées tient du processus de généralisation. Comme pour les données linéaires présentées précédemment (***Cf. 5.1, p. 103***), la construction des objets graphiques dépend de la représentation souhaitée, c'est-à-dire de l'échelle, du contenu et du processus de généralisation retenu pour sélectionner et traduire l'information. La simplification est observable en superposant les données de voirie à une image aérienne dont la granularité est suffisamment fine pour identifier avec précision les limites de voirie. Cette superposition permet de repérer le tracé des objets géographiques de voirie et de le comparer aux objets graphiques représentant la voirie dans les SIG.

À partir de ce type d'observation, on constate des différences notamment au niveau des intersections de voirie. Trois types de tracés pour les objets graphiques ressortent : – des tracés à angle pointu lorsque la limite des sommets est pointue ; – des tracés à angle arrondi lorsque la limite des sommets est courbe ; – des tracés à angle biseauté lorsque la limite des sommets est en biseau.

Une analyse des objets graphiques produits pour représenter les intersections de voirie dans cinq bases de données confirme cette hypothèse (**Figure 6-1**).



Légende : a) Bordeaux – France, b) Paris – France, c - d) San Francisco – USA, e) Montréal – Canada, f) Victoria – Canada

Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG – Paris 2019, SIG – San Francisco 2017, CityOfVictoriaBC, 2019, Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

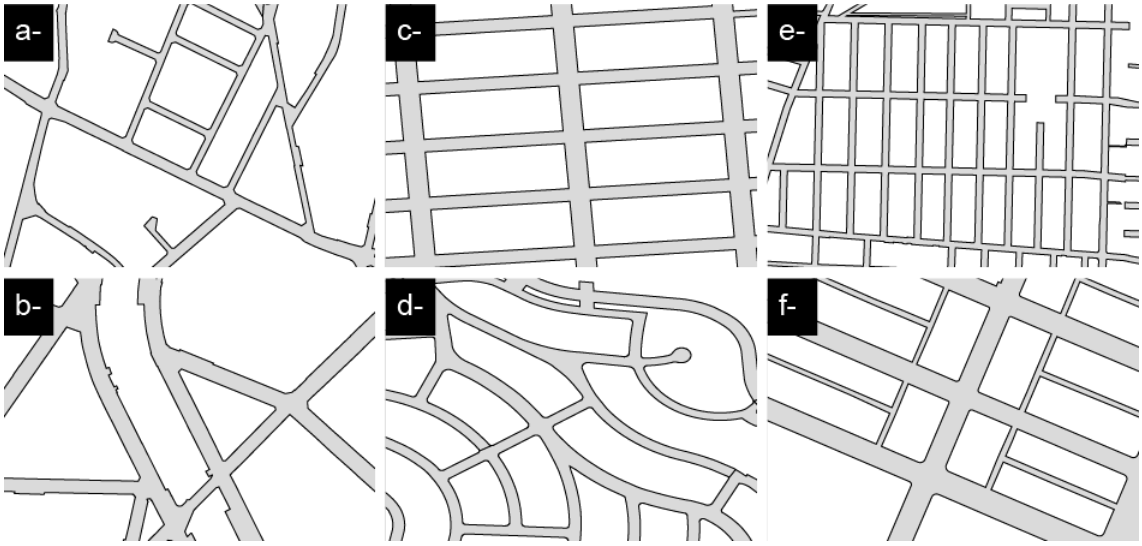
Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-1 – Correspondance objets graphiques et objets géographiques

Des tracés à angles biseautés correspondent aux morphologies induites par les bâtiments localisés aux angles de voirie (**Figure 6-1 a et b**). Dans ce cas, l'opérateur a retenu une généralisation permettant de traduire la forme observée. Un extrait d'un document technique de la Division des plans de voirie de la Mairie de Paris, que nous présenterons plus loin l'illustre (Mairie de Paris – Division des plans de voirie 2011) (***Cf. Figure 6-7, p. 126***). En revanche, des tracés à angles pointus droits repérés majoritairement pour les quartiers en damiers de San Francisco ainsi que pour Victoria (**Figure 6-1 c et e**) correspondent à des simplifications importantes de la morphologie terrain. Pour ces deux terrains d'étude, une simplification moins importante conduirait à réaliser des tracés à angles soit biseautés soit arrondis. Ce résultat s'explique selon nous de deux façons : Premièrement, un processus automatisé de construction des objets graphiques peut conduire à une simplification des tracés. Toutefois, si tel était le cas, nous ne devrions pas constater de différence d'un quartier à l'autre d'une même municipalité. Or, les quartiers sinueux de San Francisco présentent des tracés par angles arrondis (**Figure 6-1 d**). Nous notons d'ailleurs pour ces quartiers qu'une simplification est également réalisée, même si les tracés respectent plus souvent la morphologie terrain. Deuxièmement, l'image renvoyée par les morphologies en damier conduit probablement plus facilement le géomaticien à opérer une

simplification des tracés. Enfin, pour Montréal, deux éléments ressortent (**Figure 6-1 f**). D'abord, il apparait que les tracés au niveau des intersections les plus larges sont majoritairement à angles arrondis respectant la morphologie terrain, tandis que les intersections les plus étroites présentent des angles pointus. Par ailleurs, certains quartiers présentent des intersections exclusivement à angles arrondis, tandis que d'autres quartiers présentent des intersections exclusivement à angles pointus. Ce résultat suggère l'intervention de plusieurs géomaticiens n'ayant pas respecté une spécification commune pour l'ensemble de la municipalité.

Ainsi, compte tenu des différences observées au sein d'une même base de données, nous formulons une deuxième hypothèse : Les différences tiennent de la variété des morphologies urbaines et donc de celles des tracés de voiries des municipalités. Cette hypothèse découle de la première dans le sens où les tracés de voiries peuvent conduire les géomaticiens à opérer des choix variables de simplification. Les morphologies diffèrent de par l'histoire et la topographie des lieux (Allain 2014 ; Marshall 2005 ; Kostof 1993). Ainsi, nous constatons que Bordeaux et Paris ont un tracé de voirie composé de tronçons articulés et parfois courbés (**Figure 6-2 a et b**). À l'inverse, San Francisco, Montréal et Victoria disposent d'un tracé de voirie pour l'essentiel en grille ou damier, issu de la combinaison de lignes droites (**Figure 6-2 c, e et f**). Dans ces trois municipalités, des quartiers sont toutefois plus sinueux du fait d'une topographie accidentée, comme à San Francisco (**Figure 6-2 d**).



Légende : a) Bordeaux – France, b) Paris – France, c - d) San Francisco – USA, e) Montréal – Canada, f) Victoria – Canada

Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG – Paris 2019, SIG – San Francisco 2017, CityOfVictoriaBC, 2019, Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-2 – Exemples de données surfaciques de voirie

De ces différences morphologiques peuvent résulter des variations de tracés des objets graphiques notamment au niveau des intersections de voirie (**Tableau 6-1**). On remarque que dans le cas d'une morphologie articulée et courbée, les tracés présentent soit des angles arrondis, comme dans le cas de voiries sinueuses à San Francisco, soit des angles biseautés comme à Bordeaux ou Paris. Dans le cas d'un tracé de voirie en damier, les objets graphiques sont en majorité à angles pointus.

Tableau 6-1 – Types de tracés de voirie aux intersections selon les municipalités

	Angle pointu	Angle biseauté	Angle arrondi
Bordeaux	×	X	×
Paris	×	X	×
San Francisco *(voirie damier)*	X		
San Francisco *(voirie sinueuse)*			X
Montréal	X		×
Victoria	X		X

X Tracé majoritaire × Autre tracé présent

Auteur : A. Pavard, 2020

Ces différences suggèrent que la morphologie de la voirie explique en partie les choix de simplification réalisés par les géomaticiens lors du tracé des objets graphiques. Dans la mesure où les objets graphiques sont créés de façon à respecter au mieux les objets géographiques qu'ils représentent, le lien entre morphologie de voirie et tracés des objets graphiques semble logique.

En conclusion, les choix de tracés relèvent de la combinaison de la morphologie de la voirie et du choix de représentation opéré lors de la construction des objets graphiques dans les SIG. Le cas de Montréal conduit à rappeler l'importance d'observer des spécifications communes pour un territoire donné de façon à éviter une hétérogénéité au sein d'une même base de données.

6.2. Les intersections de voirie : choix de modélisation et de représentation

En dehors du tracé des objets graphiques pour les intersections de voirie, l'identification même des intersections et leur représentation questionnent. À ce sujet, deux types de représentation se confrontent :

– Le premier conduit à rattacher les intersections de voirie aux tronçons de voirie adjacents. Cette représentation repose sur l'absence d'objets graphiques modélisant explicitement les intersections.

– Le second entraine la construction d'objets graphiques modélisant individuellement les intersections de voirie.

6.2.1.La voirie en un seul objet graphique

La représentation surfacique la plus rudimentaire correspond à une modélisation de la voirie en un objet graphique unique. La voirie n'est pas considérée comme constituée de parties distinctes, mais comme un tout, un objet géographique unique caractérisé par la surface qu'il occupe. Les tronçons et les intersections sont alors indissociables. La municipalité de Victoria, capitale de Colombie Britannique, par exemple, produit des données de voirie sous cette forme (**Figure 6-3**).

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-3 – Données surfaciques de voirie de Victoria – Canada

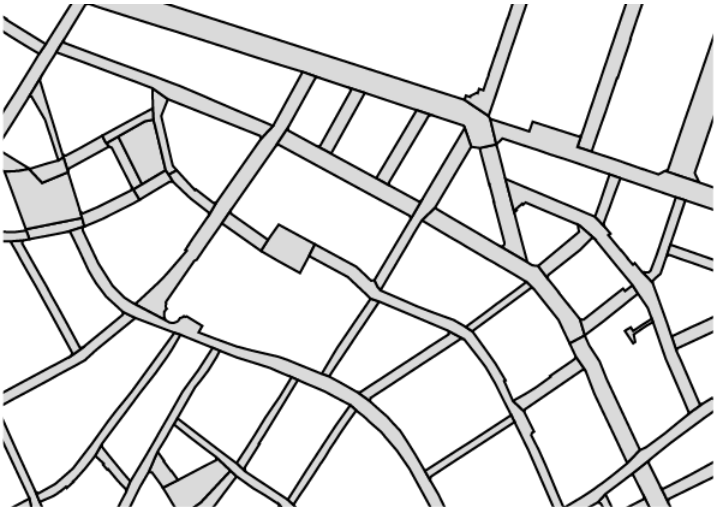
L'objectif de cette modélisation est la connaissance de l'emprise globale de la voirie sur l'ensemble d'un territoire. Par ailleurs, puisque tous les éléments participent à un objet graphique unique, cette représentation ne permet pas, de facto une description sémantique détaillée.

6.2.2.La voirie découpée en routes ou rues

Une variante du premier cas – la voirie en un seul objet graphique – repose sur la décomposition de l'infrastructure selon la fonctionnalité ou la hiérarchie des routes et des rues[3]. Un objet graphique surfacique est alors composé des intersections agrégées aux tronçons de voirie connexes. Les tronçons de voirie agrégés à l'intersection sont d'un même niveau fonctionnel (primaire, secondaire, tertiaire) ou hiérarchique (selon la classification administrative du pays) et

[3] Les termes *route* et *rue* sont fréquemment utilisés pour décrire une continuité de tronçons de voirie ayant la même toponymie. Route renvoie à la voirie rurale et rue à la voirie urbaine. Nous utiliserons par la suite le terme rue pour faire référence à cette continuité.

suivent le même axe de circulation. Cette modélisation nécessite de choisir la caractéristique discriminante entre deux rues, c'est-à-dire, une classification fonctionnelle ou hiérarchique permettant de positionner les rues entre elles à travers des niveaux. Finalement, les intersections sont associées à la rue ayant le plus haut niveau dans la classification considérée. Dans ce type de modélisation, les intersections ne sont donc pas identifiables en tant qu'objets géographiques indépendants. Les données de la municipalité de Copenhague illustrent cela (**Figure 6-4**).

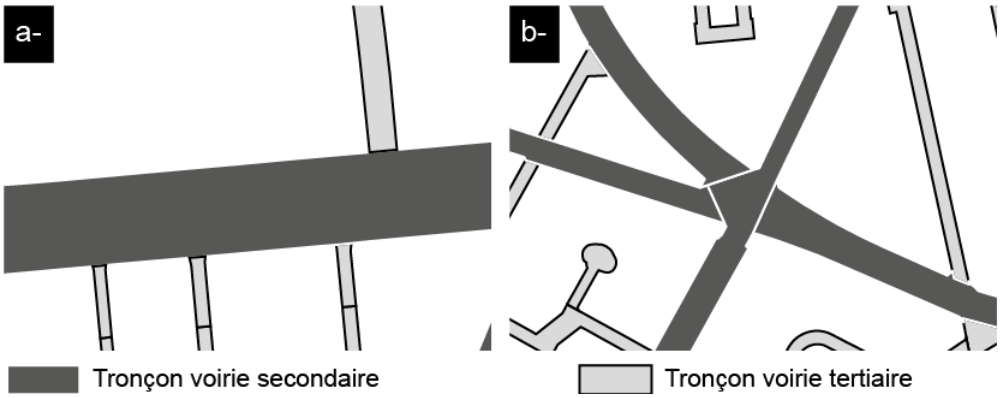


Sources : Københavns Kommune Bydata, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-4 – Données surfaciques de voirie de Copenhague – Danemark

Cette modélisation soulève une question quant à l'attribution des intersections que ce soit d'un point de vue technique pour la construction des données que d'un point de vue administratif pour la gouvernance de ces espaces. Dans le cas simple où deux rues présentant des niveaux différents se croisent, l'intersection est attribuée à celle relevant du plus haut niveau (**Figure 6-5 a**). En revanche, lorsque le niveau est le même, l'attribution de l'intersection à l'une ou à l'autre nécessite des spécifications supplémentaires (**Figure 6-5 b**).



Légende : a) cas simple, b) cas ambigu

Sources : Københavns Kommune Bydata, 2019 / Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-5 – Attribution de l'intersection à un axe

Recourir à une classification multicritères semble dans ce cas plus adapté, et ce, dès lors que l'usage d'un seul critère peut conduire à opérer des choix arbitraires lorsque deux rues présentent une équivalence selon ce critère. Par exemple, il est possible d'utiliser le trafic routier supporté, ou la vocation de la rue (transit, distribution, desserte, etc.). Dans le cas de Copenhague, la configuration des géométries permet de poser plusieurs hypothèses :

- la première, est que la vocation de l'axe est prise en compte. Dans ce cas, l'intersection est rattachée à l'axe le plus circulé ;
- la seconde, est qu'il existe un choix lié à l'antériorité des rues. Ici, l'intersection est rattachée à la rue la plus ancienne ;
- la troisième, pouvant découler de la précédente, est liée à la toponymie des tronçons de voirie. Ces derniers sont agrégés avec les intersections dès lors qu'il y a continuité dans le nom de la rue ;
- Enfin la dernière est liée à la question de rectilinéarité des itinéraires. Les tronçons et intersections sont alors agrégés de façon à ne pas interrompre l'itinéraire le plus rectiligne.

Dans tous les cas, la documentation fournie avec ces données ne permet pas de vérifier l'une ou l'autre des hypothèses.

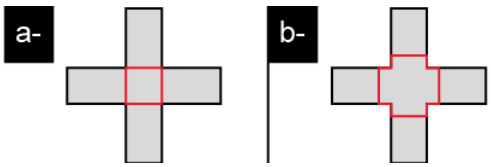
L'affectation d'une intersection à des tronçons de voirie doit reposer sur la combinaison de plusieurs critères pertinents pour éviter les choix arbitraires. La sélection, la construction des critères et leur mise en ordre sont autant d'éléments pouvant impacter le résultat. Finalement, les nombreuses possibilités de construction, d'une telle approche, dépendent des points de vue pris par les administrateurs de données.

Contrairement à la démarche utilisée pour la construction des données de voirie de Victoria, celle de Copenhague permet selon les critères sélectionnés d'aboutir à des informations plus détaillées. Par exemple, elle rend possible le calcul de la surface de voirie pour les différents niveaux hiérarchiques de voirie d'un même territoire. Quoi qu'il en soit, elle reste d'un intérêt limité pour notre problématique d'intervention sur réseaux techniques par la voirie.

6.2.3.L'intersection modélisée en un seul objet graphique indépendant

Une représentation surfacique de la voirie plus détaillée repose sur la séparation des intersections et des tronçons de voirie les reliant. Les municipalités de Bordeaux et Paris, en France, mais aussi de San Francisco aux Etats-Unis, ont adopté ce choix de modélisation. Les intersections de voirie sont des éléments de la voirie subissant des sollicitations mécaniques liées aux mouvements de véhicules et à la répartition des charges sur un coté des essieux lorsque les véhicules effectuent un virage. Ces sollicitations sont appelées « sollicitations tangentielles » (Hamlat 2007). Pour des questions de gestion de la voirie il est alors important de pouvoir isoler les éléments intersections des éléments tronçons, et donc de représenter les intersections par des objets graphiques indépendants.

À travers les bases de données des trois municipalités ressortent deux types d'objets graphiques intersections. Le premier type concerne les objets graphiques construits à l'aide des points de jonction entre les tronçons et les intersections de voirie, et conduit à des formes trapézoïdales (**Figure 6-6 a**). Le deuxième type concerne des objets graphiques construits par dépassement des points de jonction. Les objets graphiques construits sont de forme évasée (**Figure 6-6 b**).



Légende : a) intersection par points de jonction, b) intersection par dépassement de points de jonction

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-6 – Les deux types d'objets graphiques intersections

L'analyse des objets graphiques intersections des différentes municipalités nous permet de formuler plusieurs hypothèses de construction de ces objets graphiques. La première hypothèse réside en un lien étroit entre les objets graphiques construits et les tracés de voirie identifiés précédemment (***Cf. 6.1, p. 117***). Dans cette hypothèse, l'objectif serait de construire le plus simplement possible les objets graphiques intersections : c'est-à-dire à partir des points identifiables. Les objets construits à partir des tracés à angles pointus semblent le confirmer. San

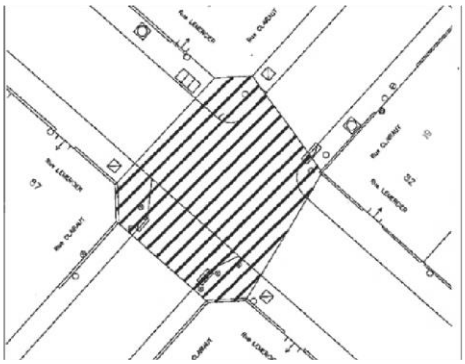
Francisco, pour la voirie en damier, Bordeaux et Paris présentent des objets graphiques intersections construits suivant des points de jonction facilement identifiables à partir des pointes des angles (**Tableau 6-2**).

Tableau 6-2 – Schématisation des objets graphiques intersections par municipalité selon les tracés

	Angles pointus	Angles biseautés	Angles arrondis
Bordeaux			
Paris			
San Francisco (voirie damier)			
San Francisco (voirie sinueuse)			

Auteur : A. Pavard, 2020

Une lecture du cahier des normes transmis par la division des plans de voirie de la Mairie de Paris confirme dans un premier temps cette hypothèse. Les exemples fournis dans ce document technique mettent en évidence le choix de suivre les tracés de voirie, et d'identifier de façon simple les intersections (**Figure 6-7**). On note par ailleurs que ce choix conduit à obtenir des emprises maximales des intersections dans le cas de tracés à angles biseautés ou arrondis. Les explications apportées dans le document restent cependant peu détaillées (Mairie de Paris – Division des plans de voirie 2011).



Sources : Mairie de Paris, Division des plans de voirie, 2011

Figure 6-7 – Cahier des normes de Paris – Exemple des intersections

Un échange direct avec la division des plans de voirie de la Mairie de Paris a permis d'établir que le choix de construction des objets graphiques intersections relève par ailleurs d'une autre conception de l'objet géographique intersection. Selon la division des plans de voirie, l'objet géographique intersection dépasse le périmètre délimité par les points de jonction des tronçons de voirie, et ce du fait :

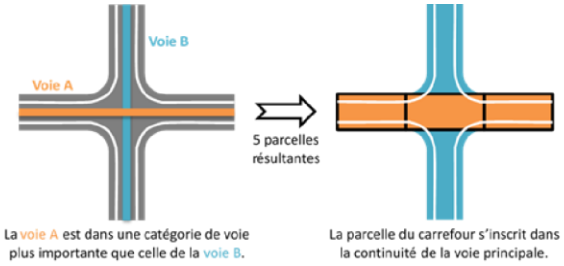
- du fonctionnement des intersections de type carrefour non giratoire ;
- du positionnement de certains réseaux enterrés, notamment des réseaux de signalisation et d'éclairage public.

Cependant, aucune information dans la documentation technique associée à ces données ne permet de le confirmer. L'exemple ci-dessus confirme principalement le lien entre limites de voirie et limites du bâti. S'il existe un lien entre ces limites et la disposition des réseaux enterrés, il n'est pas explicité.

Les autres tracés et constructions d'objets graphiques pour San Francisco et Bordeaux révèlent d'autres éléments de réponse. D'abord, pour les quartiers sinueux de San Francisco où les tracés sont arrondis, l'identification de points de jonctions pose question. Les informations transmises avec ces données ne permettent pas de comprendre la logique de construction des points permettant de tracer les intersections dans ce cas. Pour autant, les objets graphiques intersections construits semblent répondre à un même objectif d'identifier l'emprise minimale correspondant à l'intersection de voirie. Cette seconde hypothèse n'est aujourd'hui pas vérifiable compte tenu de l'absence des spécifications liées à cette base de données.

Ensuite, pour Bordeaux, les objets graphiques construits à partir des angles biseautés et des angles arrondis suggèrent la volonté de privilégier la continuité d'un des axes de voirie. Cette hypothèse est validée par le cahier des clauses techniques particulières relatif à la base de données voirie

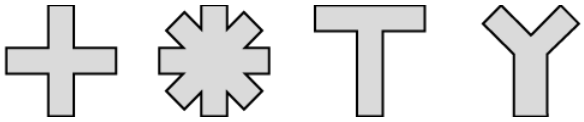
transmis par Bordeaux Métropole. Il y est indiqué que « *la parcelle du carrefour s'inscrit dans la continuité de la voie principale* » (Bordeaux Métropole 2018, p. 9) (**Figure 6-8**).



Sources : Bordeaux Métropole, 2018

Figure 6-8 – Le cas des carrefours non giratoires de Bordeaux

Les constructions des objets graphiques intersections présentées jusqu'à présent concernent toutes le même type d'intersection simple : des carrefours non giratoires à quatre branches. En excluant les intersections de type échangeur, quatre types d'intersection se retrouvent fréquemment en milieu urbain : en croix, en étoile, en T, et en Y (Perna et al. 2011 ; Marshall 2005) (**Figure 6-9**).

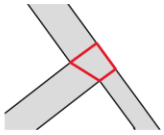
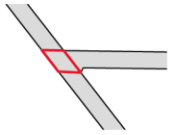
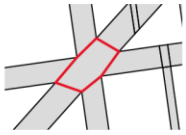
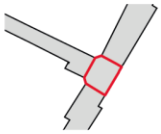
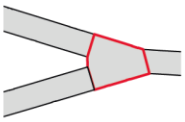
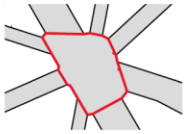
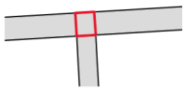
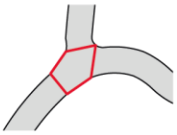
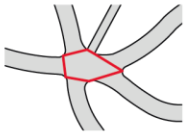


Sources : Auteur, 2020

Figure 6-9 – Les grands types d'intersection

L'analyse de ces différents types d'intersections à travers les bases de données des trois municipalités suggère que le traitement de ces intersections coïncide avec les hypothèses avancées à partir des intersections les plus classiques, c'est-à-dire, les intersections en croix à quatre branches (**Tableau 6-3**). Ainsi, on note bien la volonté de préserver la continuité du tracé pour Bordeaux, l'emprise minimale pour San Francisco, et l'emprise maximale pour Paris.

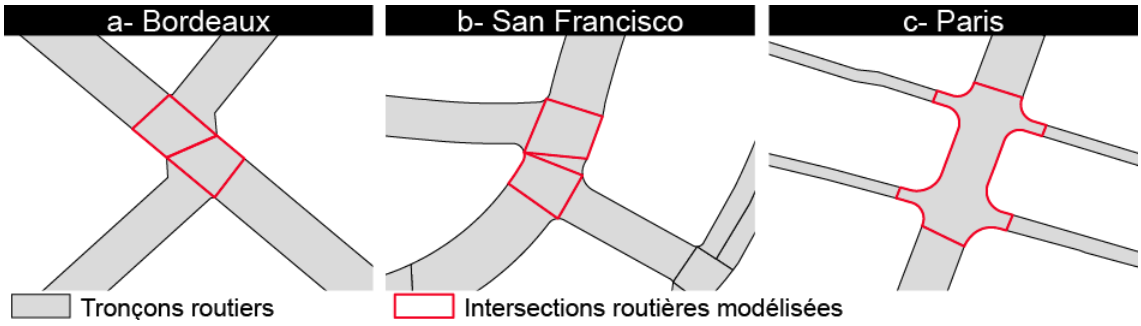
Tableau 6-3 – Exemple des autres types d'intersections

	Intersection T	Intersection Y	Intersection étoile
Bordeaux			
Paris			
San Francisco (voirie damier)			
San Francisco (voirie sinueuse)			

Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG – Paris 2019, SIG – San Francisco 2017

Auteur : A. Pavard, 2020

La densité et la ramification de la voirie en milieu urbain entraine parfois des successions d'intersections de voirie à intervalle réduit. Nous constatons que ces configurations ne sont pas traitées de la même façon selon les municipalités. Bordeaux et San Francisco ont choisi de construire un objet graphique pour chaque intersection (**Figure 6-10 a et b**), tandis que Paris réalise une agrégation des intersections proches pour ne conserver qu'un seul objet graphique (**Figure 6-10 c**).



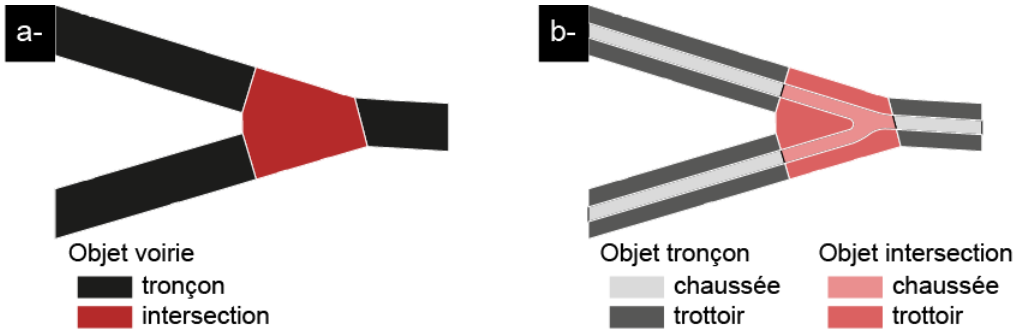
Sources : SIG - Bordeaux Métropole 2019, SIG – Paris 2019, SIG – San Francisco 2017

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-10 – Exemples de modélisations des intersections proches

À travers les exemples de Bordeaux, Paris et San Francisco, nous observons différentes façons de construire des objets graphiques intersections répondant à des objectifs distincts. Dans les trois cas, les objets graphiques intersections sont construits à partir de l'emprise totale de la voirie, soit,

des chaussées et de leurs dépendances. Nous avons observé précédemment que la Municipalité de Paris a décomposé, dans sa base de données, les chaussées des trottoirs (***Cf. 5.2, p. 107***). Ainsi, pour Paris, l'objet graphique intersection une fois construit (**Figure 6-11 a**) est décomposé en plusieurs objets graphiques à savoir des objets graphiques intersections trottoirs et un objet graphique intersection chaussée (**Figure 6-11 b**).



Sources : SIG – Paris 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-11 – Décomposition des objets graphiques intersection

En dehors de l'étape supplémentaire identifiée pour les données de Paris, la construction des bases de données des trois Municipalités, Bordeaux, Paris et San Francisco répond à la même logique, c'est-à-dire, identifier et construire des objets graphiques intersections sur l'ensemble de l'emprise de la voirie et pouvant être par la suite décomposés selon les éléments constitutifs de la voirie. Une autre logique consiste à construire des objets graphiques intersections qui décomposent la chaussée aux intersections en plusieurs sous-objets graphiques.

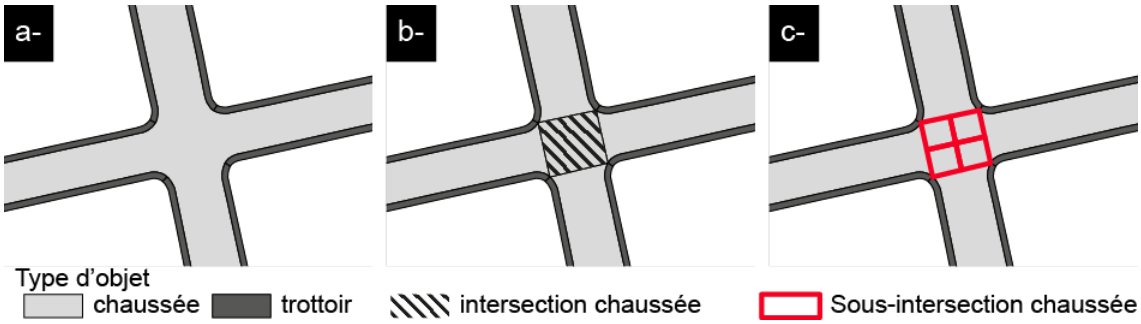
6.2.4.L'intersection modélisée en plusieurs objets graphiques indépendants

La Municipalité de Montréal présente un cas particulier de modélisation des objets graphiques intersections. D'abord, comme pour Paris, Montréal a choisi de décomposer la voirie en éléments constitutifs, à savoir la chaussée et des dépendances dont les trottoirs et les îlots directionnels. (**Figure 6-12 a**).

Ensuite, contrairement aux trois exemples précédents, les objets graphiques intersections sont construits non plus à partir de l'emprise totale de la voirie, mais uniquement à partir de l'emprise des chaussées (**Figure 6-12 b**).

Enfin, l'objet graphique intersection de chaussée est décomposé en plusieurs sous-objets graphiques (**Figure 6-12 c**). Plus précisément, l'intersection est découpée en autant d'objets graphiques que de tronçons y débouchant. Des échanges avec la division géomatique du service

des infrastructures du réseau routier nous éclaire sur ce choix. Cette représentation facilite l'identification des parties d'intersection à traiter lors des opérations d'entretien courant, notamment, de nettoyage et de déneigement.



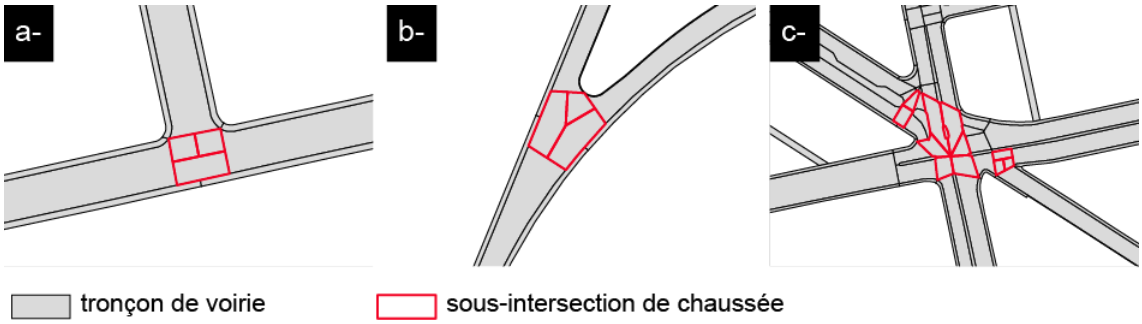
Sources : Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-12 – Montréal : Construction des objets et sous-objets graphiques intersection

Montréal suit pour ses tracés de limite de voirie au niveau des intersections de voirie des angles pointus ou arrondis selon les quartiers. Les objets graphiques intersections dans la base de données sont construits uniquement dans les limites des chaussées. Par ailleurs, les limites entre chaussées et trottoirs sont quasi exclusivement arrondies. Le choix opéré par la Ville de Montréal coïncide avec le cas des quartiers sinueux de San Francisco. Les sommets des arrondis sont reliés pour former les limites de l'emprise de l'intersection.

Les limites des emprises des intersections en T et Y sont identifiées selon la même logique avant d'être découpées en autant d'objets graphiques que de tronçons de voirie débouchant sur l'intersection, soit trois objets graphiques (**Figure 6-13 a et b**). Les intersections en étoile sont, quant à elles, traitées comme étant des combinaisons des trois cas principaux (X, T et Y). Le résultat dépend alors directement de la combinaison inhérente à ces intersections (**Figure 6-13 c**). Les intersections proches sont traitées de la même façon qu'à Bordeaux et San Francisco. Chaque intersection reste indépendante quelle que soit la distance séparant ces intersections.



Sources : Service des infrastructures du réseau routier – Division de la géomatique de la ville de Montréal, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 6-13 – Exemples de modélisations des intersections en T / Y et étoile (Montréal)

Synthèse II.2

Les exemples de Victoria, Copenhague, Bordeaux, Paris, San Francisco et Montréal sont représentatifs des modélisations surfaciques existantes. Ces modélisations sont basées sur la décomposition en éléments constitutifs de la voirie, en d'autres termes, sur la construction de données présentant des granularités sémantiques différentes. Jusqu'à présent aucune analyse de données issues d'autres territoires n'a remis en question cette taxonomie.

Nous constatons qu'au-delà de la décomposition en éléments constitutifs de la voirie vue précédemment (***Cf. 5.2, p. 107***), les modélisations analysées dans ce chapitre répondent à des problématiques différentes selon qu'elles identifient ou non les intersections :

- une modélisation agrégeant l'ensemble de la voirie, et de ce fait, ne permettant pas de distinguer les tronçons de voirie des intersections, renseigne sur l'emprise globale de la voirie sur un territoire. C'est le cas pour la base de données de Victoria ;
- une modélisation rattachant les intersections en respectant la continuité des voies principales renseigne sur l'emprise de la voirie selon une hiérarchie administrative par exemple. C'est le cas pour Copenhague ;
- une modélisation distinguant les intersections des tronçons de voirie répond d'une part à un besoin de dimensionnement des intersections de voirie (sélection des matériaux et choix des types et épaisseurs des structures) de façon à ce que ces espaces supportent les sollicitations de freinage et tangentielles, d'autres part à des besoins métiers divers selon les choix de construction des objets graphiques intersections :
    - mettre en relation les objets graphiques intersections avec des réseaux enterrés tels que l'éclairage public ou la signalisation (Paris) ;
    - faciliter les opérations d'entretien quotidien telles que le nettoyage et le déneigement (Montréal).

Les exemples analysés ont par ailleurs montré l'importance de respecter deux règles principales, et ce, quelle que soit la modélisation choisie :

- sélectionner une généralisation adaptée aux objectifs de la base de données ;
- spécifier les règles de construction de façon à obtenir une base de données cohérente et homogène sur l'ensemble du territoire traité.

7. Proposition méthodologique : construire une base de données géographique surfacique de voirie dans les SIG

Ce chapitre a pour objectif de proposer une méthode de construction des objets graphiques surfaciques de voirie dans les SIG. Pour cela nous présentons :

1) Dans une première section, une méthode existante et classiquement utilisée par des gestionnaires de voirie pour construire leurs bases de données surfaciques estimant l'emprise de la voirie à l'aide de données linéaires. Peu onéreuse, cette méthode présente cependant de nombreuses limites connues, et qui ont conduit des spécialistes de la donnée urbaine à s'intéresser à d'autres méthodes s'appuyant sur l'information cadastrale : c'est le cas par exemple de l'Institut Paris Région (anciennement Iaurif). Aujourd'hui, il n'existe pas à notre connaissance de méthode harmonisée et reconnue, et dans tous les cas, aucune n'est publiée.
2) Ainsi, dans une seconde section, nous présentons une démarche méthodologique s'appuyant sur l'information cadastrale, et développée dans le cadre de la thèse. Les deux méthodes sont présentées de façon générique et ont été appliquées à l'ensemble des communes d'Île-de-France et à la métropole de Bordeaux.
3) Afin d'analyser les résultats de ces deux méthodes, nous confrontons, dans une dernière section, leurs résultats à une donnée pour laquelle nous maitrisons la précision et l'exhaustivité. Ainsi, la démarche d'analyse est présentée, dans cette partie, à partir des résultats obtenus sur le cas d'étude de Cachan, pour lequel nous avons construit des données manuellement par photo-interprétation, et que nous appelons par la suite « données Référence ». Une mise en regard est ensuite faite à l'aide de l'exploitation de résultats de deux autres terrains, la commune de Paris, qui est divisée en arrondissements, et la commune de Bordeaux (**Cf. Annexe E, p. 327)**.

7.1. Une méthode automatisée existante : des données surfaciques de voirie à partir du linéaire

Des travaux réalisés par des organismes publics et des centres de recherche proposent des méthodes permettant de construire une base de données surfaciques à partir de données géographiques existantes. Ces méthodes se regroupent en deux types : les méthodes basées sur des données rasters, composées de pixels, telles que les images aériennes ou satellites, et les méthodes basées sur des données vectorielles, composées de polylignes.

Nous écartons de notre analyse le premier type, et ce pour deux raisons. D'abord, comme le mentionnent les chercheurs de l'IGN depuis plus de 20 ans (Airault et Jamet 1995), mais également des chercheurs en géomatique d'autres institutions (Péteri et al. 2003), le traitement

d'images automatique présente de nombreuses limites, notamment lorsque l'on s'intéresse au milieu urbain où la voirie serpente, entre infrastructures (bâtiments) et aménagements particuliers (espaces verts). Ces infrastructures ou aménagements rendent la lecture des images aériennes complexe dans le sens où, pour les uns, ils entrainent des ombrages parfois très importants, pour les autres, ils cachent ou recouvrent parfois complètement la voirie. Finalement, ces méthodes tendent à une bonne extraction des surfaces de voirie lorsque le milieu traité est un milieu peu dense en bâti et en végétation (Baumgartner et al. 1999 ; Laptev et al. 2000 ; Hutchison et al. 2010). Ces limites font qu'aujourd'hui aucune méthode automatique d'extraction ne permet d'obtenir un meilleur résultat qu'une photo-interprétation humaine. Ensuite, la mise en œuvre de ces méthodes repose sur des solutions techniques difficilement déployables au sein d'une collectivité.

Nous nous concentrerons donc sur le deuxième type de méthodes. À ce sujet, nous constatons que l'essentiel des méthodes proposées s'appuie sur l'exploitation des bases de données linéaires de voirie. Notons que ces données linéaires sont généralement extraites de façon automatisée à partir d'images aériennes. L'identification d'un axe de voirie est la première étape permettant d'identifier les limites d'un tronçon de voirie (Hutchison et al. 2010). Le principe des méthodes exploitant les bases de données vectorielles repose sur l'affectation d'une largeur à chaque tronçon linéaire de voirie selon la nature des tronçons. Nous présentons la démarche à travers l'exemple de la méthodologie proposée par le Certu (CERTU et CETE Normandie-Centre 2013).

7.1.1.Expérience française à travers une méthode du Certu

La méthodologie développée par le Certu repose sur deux éléments. Le premier est la notion de profil en travers de la voirie, c'est-à-dire la définition, dans la largeur, des chaussées et de leurs dépendances. Parmi ces dépendances, le Certu a relevé les accotements composés des bandes dérasées de droite et de gauche (BDD / BDG), ou bande d'arrêt, et de la berme. Ces éléments d'accotement relèvent davantage du milieu rural que du milieu urbain (**Cf. Partie I, 2.2.3, p. 61**). Le deuxième élément est composé de la base de données topographique produite par l'IGN (***Cf. 5.1, p. 103***) et des données attributaires qu'elle contient. Le Certu a identifié quatre variables descriptives permettant de caractériser la largeur d'un tronçon de voirie. D'abord, les tronçons de voirie sont distingués selon leur classe administrative (autoroute, route nationale, route départementale et autre). À chaque classe administrative est ensuite associée une largeur de voie selon la nature des tronçons de voirie (autoroute, bretelle, route à 1 ou 2 chaussées, route empierrée, sentier et chemin, piste cyclable et escalier). Dans un troisième temps, des largeurs des BDD et de berme sont estimées à partir d'une combinaison entre la nature des tronçons de voirie et le type de franchissement (pont, tunnel, radier, gué). Enfin, la largeur est déterminée en factorisant les largeurs de voie selon le nombre de voies de circulation.

De ces éléments découle une équation permettant de calculer la largeur théorique par tronçon linéaire de voirie (**Équation 7-1**). Un tableau récapitulatif (**Cf. Annexe C, p. 322**) permet d'attribuer à chaque tronçon les largeurs le concernant.

Équation 7-1 – Calcul de largeur de voirie[4]

$$\text{largeur de la voirie (calculée)} = \left(\frac{\text{largeur de l'ensemble des voies}}{\text{Nb de voies}}\right) + \text{largeur BDD} + \text{largeur berme}$$

Dès lors, l'attribution des largeurs à chaque tronçon linéaire de voirie permet de construire une base de données surfacique.

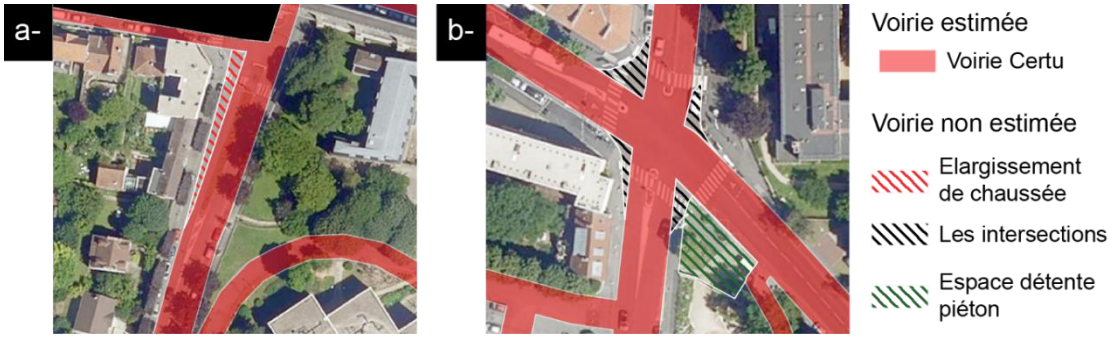
Cette méthode simple à mettre en œuvre est utilisée par des collectivités et organismes étatiques, lesquels l'ont éprouvé, à travers leurs pratiques et donc identifié ses limites. Ainsi, par connaissance de leur territoire, certains de ces organismes mettent en évidence que l'utilisation des paramètres proposés par le Certu conduit à des sur ou sous-représentations importantes de la voirie en milieu urbain alors que l'estimation de la voirie hors urbaine est plus pertinente. Par exemple, sur le territoire du département des Pays de la Loire, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) constate, sans donner de chiffres des biais liés à la méthode (DREAL 2014) :

- les largeurs des ruelles étroites de centres historiques sont surestimées du fait de la non-uniformité des anciennes voiries ;
- les largeurs de certains boulevards sont sous-estimées, notamment lorsque l'emprise de ces boulevards englobe des espaces cyclables ou encore des espaces propres et réservés à la circulation de transport en commun ;
- les places publiques et les stationnements ne sont pas pris en compte.

Nous émettons trois hypothèses pour expliquer les écarts constatés sur l'estimation de la voirie. D'abord, le paramétrage proposé par le Certu suppose que la largeur de la voirie est identique sur l'ensemble d'un tronçon de voirie, soit entre les deux intersections définissant ses extrémités. Or, ceci n'est pas le cas. La voirie peut être rétrécie ou élargie selon l'espace disponible. Ainsi contrairement au milieu hors urbain où la voirie est moins contrainte par l'espace, les largeurs de voirie urbaine varient davantage (**Figure 7-1 a**). Ensuite, nous constatons sur la **Figure 7-1 b** que

[4] Largeur des voies : dépend de la classe administrative et de la nature des tronçons.
Nombre de voies : pour les tronçons de voirie disposant de moins de 2 voies, le dénominateur est de 2.
Largeur BDD : dépend de la classe administrative de la nature et du nombre de voies.
Largeur de berme : dépend de la classe administrative et du type de franchissement.

les trottoirs sont tantôt englobés par l'estimation de voirie, et c'est le cas pour le tronçon de voirie se dirigeant vers le sud-est, tantôt exclus de cette estimation tel qu'on peut l'observer sur les autres tronçons de voirie. Cette situation peut s'expliquer de la même manière que pour la première hypothèse, à savoir une très grande hétérogénéité des tronçons entre eux. Enfin, la voirie urbaine présente une variété d'aménagements permettant aujourd'hui de partager l'espace et de l'inscrire dans un paysage le plus agréable et sécuritaire possible pour les usagers. Ainsi, des espaces piétonniers plus ou moins larges sont aménagés, des espaces de détente peuvent jouxter les chaussées et élargir d'autant l'espace voirie ponctuellement (**Figure 7-1 b**). Dans le même ordre de constats, la DREAL des Pays de la Loire pointe la non prise en compte des places publiques et aires de stationnement (DREAL 2014).



Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 7-1 – Voirie estimée et écarts constatés : Exemple de Cachan

Pour ces raisons, il semble difficile de proposer une méthode de construction de données surfaciques de voirie précise à partir du linéaire de voirie et de largeurs fixes telle que celles proposées par le Certu. Cependant, nous supposons que les trois hypothèses présentées ci-dessous sont à moduler selon la morphologie du tissu urbain et notamment son ancienneté sur le territoire français. Des municipalités d'autres pays, notamment des pays disposant d'un système urbain plus récent que la France, mettent également en œuvre ce même type de méthode sur leurs territoires et considèrent les résultats satisfaisants.

7.1.2. Des expériences internationales

La Ville de Québec s'est dotée progressivement depuis une dizaine d'années d'un système de gestion des infrastructures de voiries et de réseaux techniques. Ce système repose sur des bases de données géographiques relatives aux infrastructures. Lors d'une rencontre avec la Division planification des infrastructures de la Ville de Québec en 2018, nous avons abordé la question de la construction des données spatiales de voirie. Alors que nous pointions les sous-estimations d'emprises de voirie par la méthode Certu sur des cas français, les ingénieurs de Québec

considéraient qu'une méthode équivalente appliquée sur leur territoire aboutissait à des estimations cohérentes. Ainsi, en classant les tronçons de voirie selon une hiérarchie fonctionnelle – artère, collecteur, locale – une largeur fixe – 10m, 9m et 8m – est appliquée. Selon eux, la meilleure estimation obtenue sur leur territoire au regard des résultats parisiens s'expliquait par la morphologie urbaine et donc de voirie plus régulière et orthogonale au Canada. Cependant, une illustration fournie par le même service suppose des sous-estimations des emprises de voirie (**Figure 7-2**). N'ayant pas accès aux données, notre analyse se limite à ce constat. Néanmoins, nous estimons qu'il est difficile même pour une morphologie urbaine régulière d'estimer les emprises des tronçons de voirie par un simple critère de largeur fixe selon une hiérarchie. En effet, à moins que la ville se soit construite sur un terrain parfaitement planimétrique et que les distances entre les bâtiments de part et d'autre des axes de circulation soient strictement les mêmes, il existera toujours des irrégularités.

Sources : Ville de Québec – Service de l'ingénierie – Division Planification de l'état des infrastructures, 2020

Figure 7-2 – Ville de Québec : voirie estimée

7.2. Une méthode automatisée développée : des données surfaciques de voirie à partir de la base cadastrale

Une alternative à la méthode du Certu est l'utilisation d'une information prenant en compte l'organisation du tissu urbain. Il s'agit de l'information cadastrale. En France, une loi de 1807 puis un règlement impérial de 1808 ont officialisé la mise en œuvre d'un cadastre parcellaire. En 1850, l'ensemble du territoire métropolitain était couvert. Une loi de 1930 a favorisé la

réorganisation des plans cadastraux et leur suivi dans le temps. Finalement, à partir des années 1970, la technique de photo-interprétation par photogrammétrie est introduite en plus des levés topographiques pour la construction des nouveaux plans.

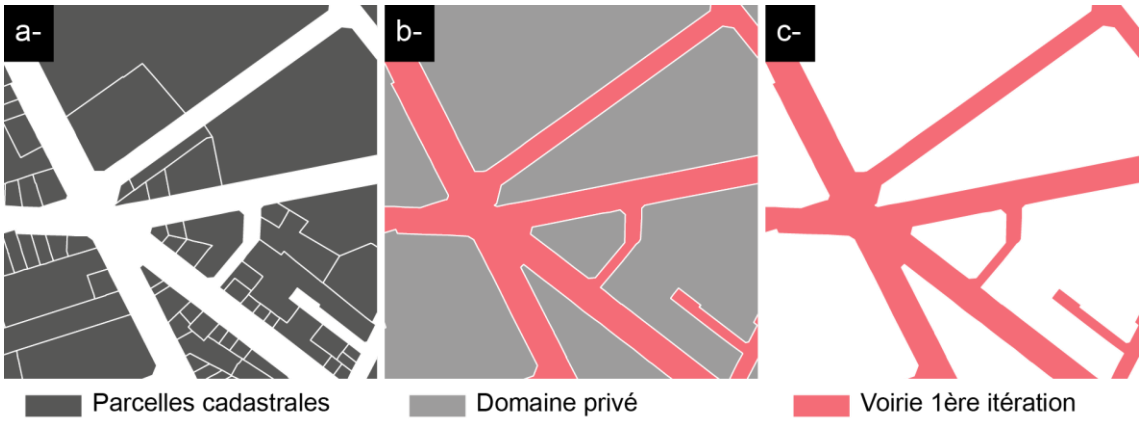
L'exploitation de l'information cadastrale pour produire une donnée surfacique de voirie repose sur l'hypothèse qu'il est possible d'extraire l'espace voirie d'un territoire en soustrayant de l'emprise du territoire les domaines privés, donc les espaces cadastrés (**Cf. Partie I, 1.2.1, p. 47**).

Il existe aujourd'hui plusieurs bases de données regroupant les informations cadastrales. L'IGN met à disposition, par partenariat avec la Direction Générale des Finances Publiques (DGFiP), la BD PARCELLAIRE tandis que le Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema) propose, lui aussi avec un partenariat incluant la DGFiP, un enrichissement des fichiers fonciers sous la forme d'une Mise À Jour des Informations Cadastrales, la base de données MAJIC. Ces bases de données contiennent des informations géographiques de précisions variées selon les territoires, lesquels utilisent des méthodes de construction différentes pour leurs données.

Le développement de notre méthode s'appuie sur la base de données de l'IGN, aisément accessible. Compte tenu des données disponibles dans la base de données MAJIC, la démarche que nous présentons ci-après est également applicable sur ces données.

7.2.1.Première itération : la voirie correspond à l'espace public

La première itération de notre méthode consiste à identifier et extraire l'espace public. À partir des parcelles cadastrales (**Figure 7-3 a**), nous reconstruisons le domaine privé des communes afin de découper les territoires communaux (**Figure 7-3 b**). Finalement, nous conservons les espaces non intersectés par les parcelles cadastrales (**Figure 7-3 c**).



Sources : © IGN, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, 2018

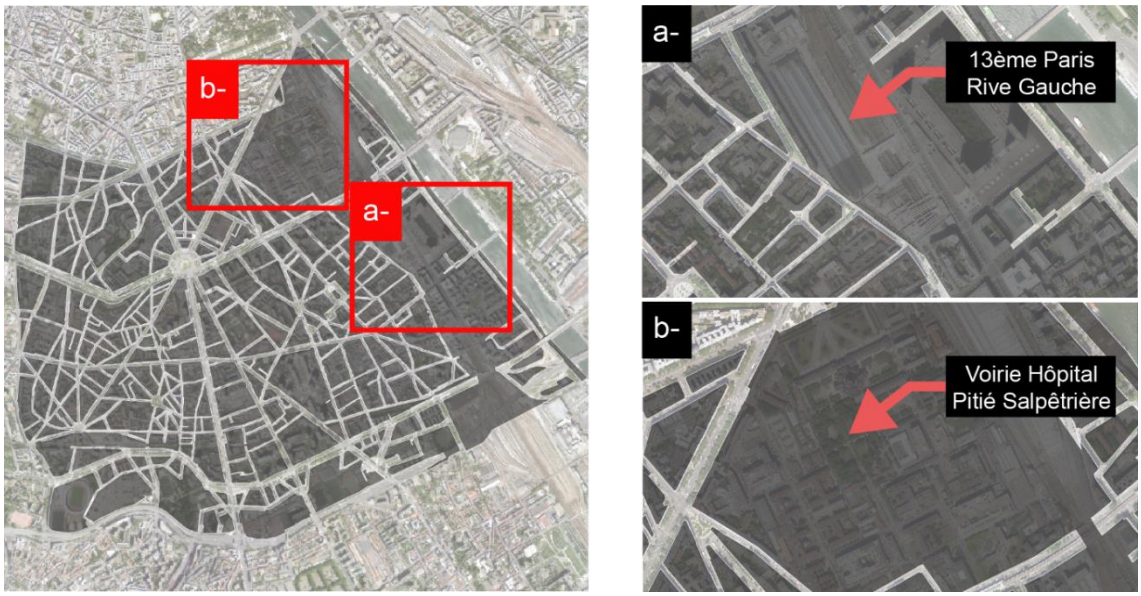
Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 7-3 – Étapes de première itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris

Suite à cette première étape, nous observons des limites à l'utilisation de la base de données cadastrale. En effet, une partie de la voirie ne peut être identifiée à l'aide de cette méthode n'utilisant que les données cadastrales. Une analyse plus fine permet d'identifier trois raisons à cela : d'abord, une limite liée à la Mise À Jour des données, ensuite, la présence de voirie dans le domaine privé (**Cf. Partie I, 1.2.1, p. 47**), et enfin, la présence d'erreurs de production.

1) **Limites liées à la Mise À Jour** : nous constatons dans notre exemple que la BD PARCELLAIRE de l'IGN éditée en 2018 n'inclut pas des aménagements réalisés dans les années 2000 à 2010. Il s'agit finalement, d'un décalage entre les dates d'édition des bases de données et les dates de couverture de ces mêmes données. Ainsi, le quartier Paris Rive Gauche du 13ème arrondissement, réaménagé entre la fin des années 2000 et début 2010, n'est pas encore mis à jour. L'espace public inscrit dans ce quartier suite à l'opération d'aménagement n'y apparait pas (**Figure 7-4 a**).
2) **Limites liées à la voirie privée** : bien que la voirie relève en majorité du domaine public, une partie est du ressort du domaine privé. À titre d'exemple, nous observons que la voirie des hôpitaux universitaires de la Pitié Salpêtrière de Paris ne peut être identifiée par cette première étape (**Figure 7-4 b**). La voirie privée est selon nous importante pour deux raisons : – des réseaux enterrés passent sous la voirie privée ; – la voirie privée peut passer dans le domaine public (**Cf. Partie I, 1.2.1, p. 47**). Au-delà de la voirie privée cadastrée, de la voirie publique appartenant au domaine privé d'une collectivité peut également être cadastrée.

– 3) **Limites liées à des erreurs de production** : toute donnée produite peut présenter des erreurs liées à la précision du processus de production et aux choix réalisés par l'opérateur.



Légende : a) mise à jour, b) voirie privée

Sources : © IGN, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, ORTHO HR®, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 7-4 – Voirie manquante : Exemple du 13ème arrondissement de Paris

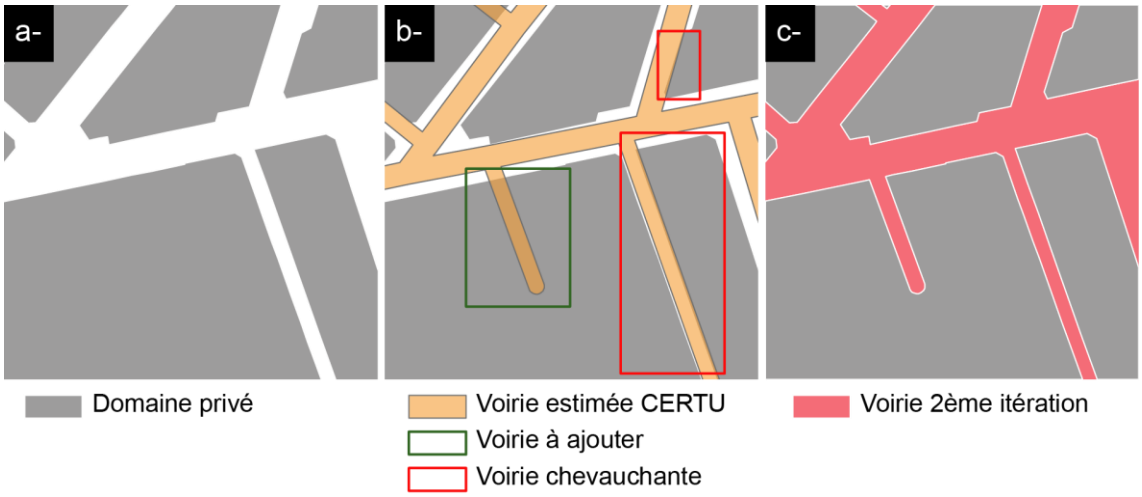
7.2.2.Deuxième itération : la voirie correspond à la voirie publique et la voirie privée

Nous proposons une deuxième itération permettant d'injecter la voirie manquante, qu'il s'agisse d'une absence liée à la mise à jour ou bien de voiries privées. Lors de cette étape, nous pouvons opter pour l'identification visuelle à l'aide d'images aériennes la voirie manquante et la digitaliser, ou bien utiliser d'autres données de voirie construites sur le même territoire. Dans le second cas, nous devons connaitre les limites des données voiries utilisées. Pour notre travail de développement de la méthode, nous choisissons de nous appuyer sur les surfaces de voirie estimées par la méthode Certu, en toute conscience des avantages et limites de ces données (***Cf. 7.1.1, p. 134***). Concernant les avantages, la méthode Certu s'appuie sur les données de la BD TOPO plus fréquemment mises à jour et contenant les voiries privées. Pour les limites de la méthode Certu dans le milieu urbain, deux perspectives sont envisageables. Premièrement, nous estimons qu'une recherche approfondie sur les paramétrages de la méthode Certu et les morphologies urbaines permettrait d'améliorer les résultats sur le milieu urbain. Deuxièmement, une fois les voiries manquantes identifiées, des corrections manuelles peuvent être réalisées localement.

Ainsi, la deuxième itération s'organise comme suit : à partir du domaine privé construit en première itération (**Figure 7-5 a**), nous superposons les espaces de voirie estimés par la méthode Certu. Cette superposition révèle deux éléments : d'une part, la voirie manquante à la première itération est identifiable, d'autre part, nous relevons des chevauchements entre les tronçons de

voirie Certu et le domaine privé en des lieux où l'espace voirie est plus justement estimé par la première itération de la méthode à Base Cadastrale que par la méthode Certu (**Figure 7-5 b**). L'analyse des données traitées à partir d'une variation des seuils de sélection des tronçons de voirie Certu, permet de proposer un seuil de sélection des tronçons. Ce seuil est déterminé par le calcul de la part de la surface intersectée entre les tronçons de voirie Certu et le domaine privé sur la surface totale de chaque tronçon Certu. Nous avons observé qu'un seuil de 45% permet d'ajouter les tronçons de voirie non pris en compte par la première itération, sans apporter de modification aux tronçons déjà pris en compte. Ainsi, dès lors que la surface intersectée est d'au moins 45%, le tronçon de voirie Certu est conservé. À cette étape, nous pouvons décider selon les besoins d'exclure certains tronçons de voirie selon leur environnement et les besoins. Par exemple, nous pouvons considérer utile ou non de conserver la voirie traversant les cimetières. Compte tenu de la problématique de gestion coordonnée de la voirie et des réseaux enterrés, cette voirie ne représente pas d'intérêt majeur.

Finalement, une dernière étape permet de découper le domaine privé à l'aide de la voirie que l'on souhaite ajouter (**Figure 7-5 c**).



Sources : © IGN, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

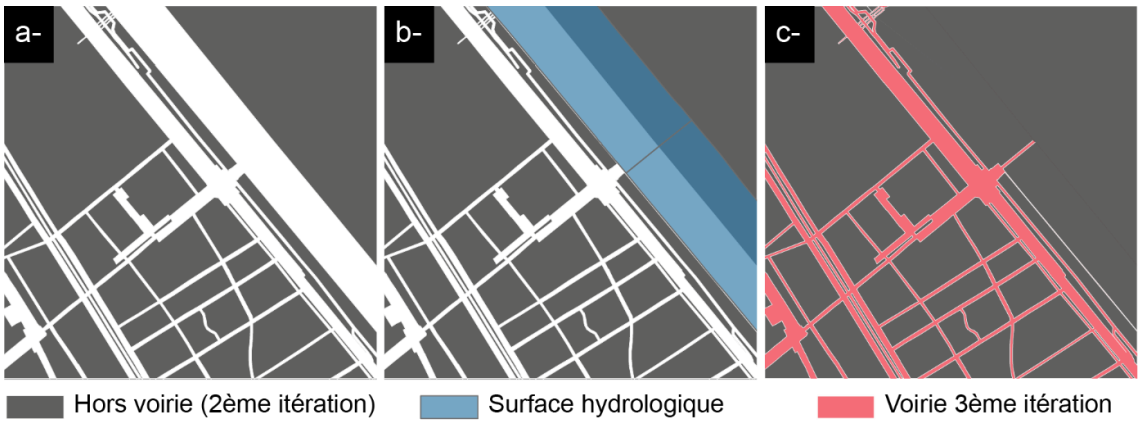
Figure 7-5 – Étapes de deuxième itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris

À la fin de cette seconde itération, nous considérons que l'ensemble des espaces de voirie est identifié. Cependant, le choix initial d'extraire le domaine public à l'aide de l'information cadastrale consiste à formuler l'hypothèse que l'ensemble du domaine public est de la voirie. Or, en milieu urbain, le domaine public est également constitué d'espaces verts et d'espaces hydrographiques. Par exemple, à Paris, la Seine relève du domaine public hydrographique tandis que les bois de Vincennes et de Boulogne relèvent du domaine public vert.

7.2.3. Troisième itération : la voirie publique correspond à un espace public réduit

Une troisième itération consiste à identifier le domaine public ne relevant pas de la voirie de façon à l'enlever de notre traitement. La BD TOPO de l'IGN contient deux informations utiles à cette problématique. Il s'agit des surfaces hydrologiques et des surfaces d'activités à partir desquelles sont identifiées les surfaces « culture et loisirs » contenant les espaces verts publics.

Les étapes de la troisième itération sont alors les suivantes : à partir de l'espace hors voirie issu de la deuxième itération (**Figure 7-6 a**), nous superposons les espaces hydrologiques et espaces verts, puis nous les agrégeons à l'espace hors voirie (**Figure 7-6 b**). Nous construisons ensuite par différence avec le territoire communal le nouvel espace de voirie (**Figure 7-6 c**). À ce stade, il est nécessaire de rajouter la voirie traversant les espaces verts ainsi que les ouvrages d'art traversant les surfaces hydrologiques. Pour cela, nous nous appuyons encore une fois sur la voirie issue de la méthode Certu pour identifier les tronçons de voirie à ajouter.



Sources : © IGN, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 7-6 – Étapes troisième itération : Exemple du 13ème arrondissement de Paris

Finalement, la méthode à Base Cadastrale permet de construire des données surfaciques de voirie à partir d'un processus automatisable ne nécessitant pas de moyens techniques et budgétaires supplémentaires par rapport à la méthode proposée par le Certu. De plus, nous émettons l'hypothèse que le résultat produit une estimation plus fine de la voirie. Une analyse systématique des produits de la méthode Certu et de la méthode à base cadastrale est nécessaire pour la valider.

7.3. Discussion des résultats par comparaison avec des données Référence

Une mise en regard des emprises voiries Certu et Base Cadastrale est insuffisante pour valider l'hypothèse que la méthode à Base Cadastrale produit une estimation plus fine de la voirie. Une superposition avec les images aériennes tend toutefois à confirmer cette hypothèse. Nous

proposons ci-après une démarche permettant une analyse des résultats permettant d'une part de valider ou non notre hypothèse, d'autre part d'identifier des perspectives d'amélioration soit de la méthode Certu, soit celle de la Base Cadastrale. Dans cette section nous n'abordons pas la question de la propagation des erreurs induite par les processus de productions des données initiales et utilisées en entrée de notre processus méthodologique. Nous ne sous-estimons pas pour autant l'impact de ces erreurs sur nos propres résultats.

Notre analyse s'appuie sur la comparaison des résultats à ceux d'une donnée Référence prise comme *terrain nominal*. Dans un processus de construction de données, un terrain nominal est utilisé afin de vérifier la conformité de données produites relativement à des données considérées « justes » et appelées données de référence. Ces données sont supposées suffisamment exactes pour mesurer et représenter les objets géographiques étudiés. David et Fasquel (1997) définissaient le terrain nominal comme étant une *« image de l'univers, à une date donnée, à travers le filtre défini par la spécification de produit* ». Dans notre cas, nous entendons par « donnée Référence », une donnée construite par photo-interprétation humaine, technique reconnue encore aujourd'hui comme la plus précise pour l'identification des éléments constitutifs du tissu urbain (Foulard et Zeiger 2013). Pour cela, nous avons construit sur notre cas d'étude cette donnée Référence à partir des orthophotographies de l'IGN. Pour obtenir des données précises, complètes et construites de façon homogène pour un même territoire, la photo-interprétation doit être réalisée avec précaution. Cette méthode requière du temps, c'est pourquoi elle n'est envisagée dans notre cas que pour une analyse des résultats produits par les méthodes automatisées.

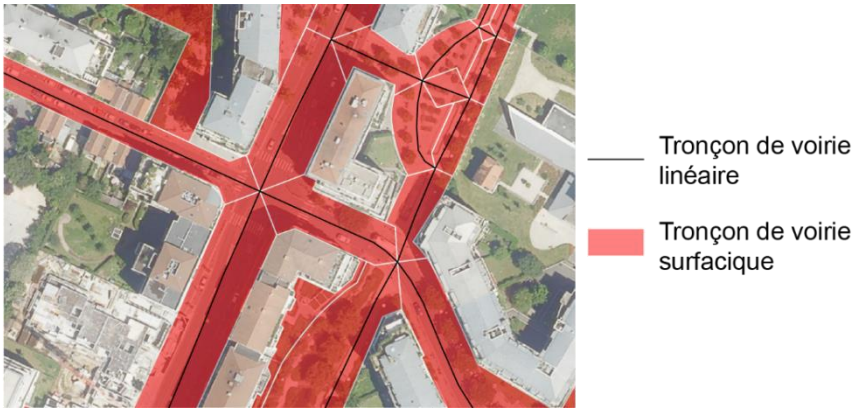
7.3.1. Construction des données Référence

La photo-interprétation à partir d'images aériennes est une technique répandue pour la construction de données et l'analyse des tissus urbains (Coste et Roncayolo 1980). Elle consiste à identifier visuellement les espaces que l'on souhaite étudier à partir de photographies relevées à l'aide d'un appareil photographique grand angle embarqué dans un avion réalisant une trajectoire à basse altitude. Une utilisation optimale de la photo-interprétation nécessite le recours à la photogrammétrie. Celle-ci repose sur l'exploitation de la parallaxe entre deux photographies d'un même territoire prises selon des angles différents, et ainsi permet de bénéficier d'une vue stéréoscopique, et de construire des données superposables à la photographie (Lillesand, Kiefer, et Chipman 2015).

L'objectif de notre démarche est principalement de disposer d'une donnée de voirie plus précise géométriquement et plus exhaustive. Nous nous sommes limités à une photo-interprétation sans recours à la photogrammétrie. De ce fait, nous mesurons les limites des données produites à partir

de l'ORTHOPHO haute résolution d'une précision de 20 centimètres. Nous produisons nos données Référence en deux étapes.

Premièrement, nous identifions et construisons chaque emprise de tronçon de voirie. Les limites des tronçons de voirie aux intersections sont produites de manière à permettre une mise en cohérence entre les données linéaires de la BD TOPO et les données surfaciques en production, en suivant la modélisation proposée dans le chapitre suivant (***Cf. 8.1, p. 152***)

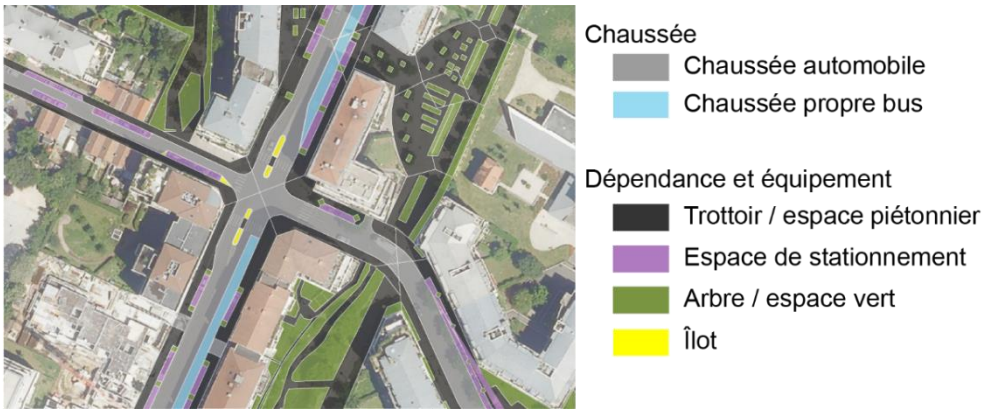


Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2018

Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 7-7 – Construction des tronçons de voirie surfacique par photo-interprétation : Exemple de Cachan

Deuxièmement, nous identifions et construisons les emprises des dépendances (espaces piétonniers, cyclables, chaussées propres) et équipements (arbres et espaces verts, îlots) de la voirie (**Figure 7-8**). Cette étape nous permet de dissocier les emprises des chaussées du reste.



Sources : ORTHO HR®, 2018

Auteur : A.Pavard, 2020

Figure 7-8 – Construction des équipements et dépendances par photo-interprétation : Exemple de Cachan

Ainsi nous pouvons comparer les résultats obtenus à l'aide des méthodes précédentes à l'emprise totale de la voirie issue de la photo-interprétation ou à l'emprise des chaussées uniquement. Ce découpage nous sera également utile pour la suite de nos travaux, notamment pour l'ajout des informations sur les matériaux de voirie (**Cf. Partie III, 12, p. 220**) et pour l'analyse des relations de coprésence entre voirie et réseaux enterrés (**Cf. Partie IV, 14, p. 252**).

7.3.2. Comparaison des trois résultats

Finalement, nous disposons pour notre cas d'étude trois bases de données surfaciques de voirie distinctes : une première base de données issue de la méthode Certu (**Figure 7-9 a**), une deuxième base de données issue de la méthode à base cadastrale (**Figure 7-9 b**), une troisième base de données correspondant à notre donnée Référence construite par photo-interprétation (**Figure 7-9 c**). La comparaison des représentations cartographiques et du calcul de la surface de voirie totale pour chaque méthode traduit pour les deux méthodes automatiques une sous-évaluation de la surface de voirie par rapport à la surface de référence. Cette sous-évaluation est plus importante par la méthode Certu : la surface estimée par cette méthode représente 75% de la surface estimée par la méthode à base cadastrale et 53% de la surface calculée par la donnée Référence. La méthode à base cadastrale produit des résultats plus proches de ceux de la donnée Référence, puisque la surface estimée de voirie correspond à 72% de la surface calculée par la donnée Référence. Cette comparaison a été étendue à l'ensemble des communes d'Île de France entre les résultats Certu et Base Cadastrale et confirme la sous-évaluation quasi systématique de la méthode Certu (**Cf. Annexe E, p. 327**).

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure 7-9 – Comparaison trois bases de données voirie surfacique (ex. cas d'étude)

Une analyse à cette échelle des résultats nous permet de formuler deux explications à ces écarts :

- **première explication** : les différences observées entre les résultats Certu et base cadastrale sont surtout liées à une différence d'estimation de largeur des tronçons de voirie ;
- **Deuxième explication** : les différences observées entre les résultats base cadastrale et la donnée Référence tiennent davantage à la nature des éléments de voirie saisis dans les deux méthodes. Par exemple, les grands ensembles de stationnement privés et l'ensemble de la voirie traversant les espaces verts sont inclus dans la donnée Référence du cas d'étude.

Ces explications semblent être confirmées par une analyse à la même échelle des données produites sur les arrondissements de Paris et la commune de Bordeaux ; données que nous avons confrontées à des données Référence produites par les collectivités elles-mêmes (**Cf. Annexe E, p. 327**). Cette première analyse mésoscopique nécessite toutefois d'être affinée par une comparaison intégrant les différents objets géographiques constitutifs de la voirie tels que les chaussées et leurs dépendances. En effet, comme nous l'avons observé localement les résultats obtenus par la méthode Certu produisent parfois une estimation des emprises de voirie inscrites dans les limites des chaussées (***Cf. Figure 7-1, p. 136***). Afin de mettre en regard des objets géographiques comparables entre les bases de données, nous raisonnons pour cette analyse à l'échelle des tronçons de voirie. Les données produites à l'exception de la donnée Référence, présentent une voirie agrégée sur l'ensemble du territoire sans tenir compte des différents éléments la constituant. De ce fait, il est nécessaire de découper les emprises de voirie résultantes des méthodes Certu et de la Base Cadastrale. Pour cela, nous recourons à la méthode déjà mentionnée, et présentée par la suite, permettant de construire des tronçons surfaciques cohérents avec les tronçons linéaires de la BD TOPO (***Cf. 8.1, p. 152***). Ainsi, nous obtenons dans chacune

des bases de données surfaciques – Certu, Base Cadastrale et Référence – des objets graphiques tronçons surfaciques disposant des identifiants issus des objets graphiques linéaires de la BD TOPO. Cet identifiant permet de conserver les tronçons surfaciques équivalents entre les BD, c'est-à-dire ayant le même identifiant, et de les comparer.

Les résultats obtenus synthétisés dans le **Tableau 7-1** nous permettent de tirer deux constats relatifs au cas d'étude, et de confirmer les deux explications formulées précédemment (***Cf. p. 145***). **D'abord, nous validons la première explication** : la déclinaison des surfaces de voirie par élément constitutif de voirie dans les données Référence nous permet d'identifier des relations avec les données Base Cadastrale et Certu. D'abord, nous remarquons qu'en ajoutant à la surface voirie Base Cadastrale les surfaces des données Référence relatives aux stationnements hors voirie, aux espaces verts et à certains espaces piétonniers (Galeries, Zones piétonnes, et autres), nous obtenons des emprises équivalentes (745 900 m²). Ceci s'explique par le fait que les éléments de voirie mentionnés composent le domaine privé et ne sont donc pas identifiables à l'aide de notre méthode. Ensuite, nous constatons que l'emprise de voirie Certu (460 400 m²) est proche de celle issue de la donnée Référence lorsque l'on considère uniquement les éléments liés aux chaussées (surface chaussée + chaussée propre + espace cyclable = 416 700 m²). Ensuite, nous **validons la deuxième explication** : l'opération consistant à conserver uniquement les tronçons équivalents impacte principalement les résultats de la donnée Référence. Les données issues des méthodes Certu et Base Cadastrale perdent respectivement 1 000 et 2 000 m² de voirie contre plus de 108 000 m² pour la donnée Référence.

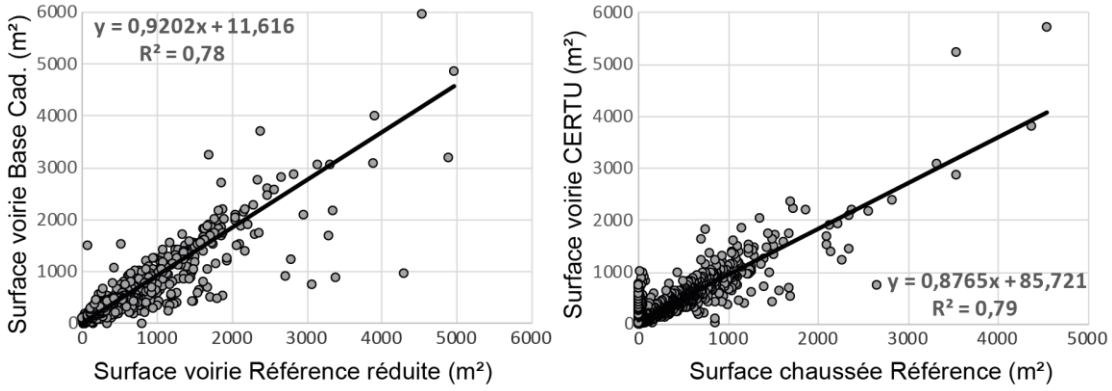
Tableau 7-1 – Résultats comparaison à tronçons équivalents

Type de l'espace	Sous-type	Certu	Base Cadastrale	Référence
Surface Chaussée		*NA*	*NA*	*399 100*
Surface Chaussée Propre		*NA*	*NA*	*2 500*
Surface Espace Cyclable		*NA*	*NA*	*15 100*
Surface Piétonnière		*NA*	*NA*	*254 500*
	Trottoir	*NA*	*NA*	*173 400*
	Galerie	*NA*	*NA*	*2 300*
	Zone piétonne	*NA*	*NA*	*9 600*
	Chemin	*NA*	*NA*	*35 800*
	Autre	*NA*	*NA*	*33 400*
Surface Stationnement (hors chaussée)		*NA*	*NA*	*46 900*
Surface Espace Vert		*NA*	*NA*	*36 400*
Surface Voirie		**460 400**	**617 300**	**754 500**

Sources : A. Pavard, 2020

Afin d'analyser plus finement les constats précédents, nous proposons une mise en relation des valeurs décrivant les individus statistiques « tronçons » à l'aide d'un nuage de points. Les répartitions des individus sur ces nuages supposent des relations à tendance linéaire selon les équivalences avancées ci-dessus. La construction des droites de régression (**Cf. Annexe D, p. 325**) décrivant les relations f(x) = y, et le calcul des coefficients de détermination renforcent les hypothèses émises (**Figure 7-10**) :

- il semble exister une relation statistique (Pente = 0,92 et R^2 = 78%) entre la surface totale des tronçons Base Cadastrale et la surface réduite des tronçons Référence (exclusions des : stationnements, espaces verts, galeries, zones piétonnes) ;
- de même, une relation statistique semble être attestée entre les surfaces voirie Certu et les surfaces chaussée Référence (Pente = 0,88 et R^2 = 79%).



Sources : A. Pavard, 2020

Figure 7-10 – Relation statistique entre données Référence et données Base Cadastrale / Certu

Concernant les résultats Base Cadastrale, une superposition des géométries issues de cette méthode avec les données Référence valide la relation supposée. Les écarts aux modèles que nous appelons résidus statistiques s'expliquent par la captation de certaines zones piétonnes par la méthode à Base Cadastrale, notamment lorsque ces zones piétonnes couvrent en grande partie l'emprise de la voirie.

Les conclusions apportées sur les limites de la méthode Certu (***Cf. 7.1.1, p. 134***) et les résultats du modèle de régression permettent de formuler deux hypothèses de répartition spatiale des écarts au modèle que nous appellerons « résidus statistiques » :

- Premièrement, nous supposons, comme la DREAL, que la méthode Certu sous-évalue les emprises de chaussée pour la voirie structurante du cas d'étude (DREAL 2014).
- Deuxièmement, pour des voiries équivalentes, il existe possiblement une relation avec la morphologie des quartiers (pavillonnaires ou de grands ensembles), et donc avec la

morphologie de la voirie inhérente à ces quartiers conduisant à des biais d'estimation de l'emprise de chaussée.

Une cartographie des résidus permet d'identifier les premières pistes de réponse. Ainsi, il semble que les chaussées de voirie structurante soient surévaluées contrairement à ce que l'on supposait. Concernant la morphologie des voiries selon le type de quartier, la relation est moins évidente pour le cas d'étude (**Figure 7-11**).

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 7-11 – Cartographie des résidus du modèle

Synthèse II.3

Nous sommes partis du constat qu'il existe aujourd'hui peu de méthodes permettant de construire à moindre coût et rapidement des données surfaciques de voirie. Par ailleurs, ces méthodes basées sur une estimation de l'emprise de la voirie à partir du linéaire de voirie ne sont pas optimales pour le milieu urbain, puisque la voirie y est majoritairement sous-évaluée.

Pour répondre à cet enjeu, nous avons proposé une nouvelle méthode permettant de construire une base de données surfacique de voirie à partir de l'information cadastrale. Nous avons ensuite confronté les résultats de cette méthode à ceux obtenus par l'intermédiaire d'une méthode basée sur l'exploitation du linéaire routier (méthode Certu). La comparaison de ces deux résultats est insuffisante, dans la mesure où ils découlent d'une méthode estimant l'emprise de voirie à partir d'autres données. Nous avons alors construit par photo-interprétation une donnée Référence.

La donnée Référence a permis de mettre en évidence une meilleure estimation de l'emprise de voirie par la méthode à Base Cadastrale sur le cas d'étude. Par ailleurs, une analyse à une échelle microscopique, à l'échelle des tronçons, a permis de décrire plus finement les écarts constatés entre les différentes méthodes :

- **la méthode à Base Cadastrale** présente des résultats bien ajustés aux données Référence dans une majorité des cas, et les écarts constatés sont liés à des aménagements spécifiques tels que les stationnements hors voirie, les espaces verts en bordure, ou encore des zones piétonnes spécifiques. Ces aménagements généralement de l'ordre du domaine privé ne peuvent être captés par les données cadastrales, et nécessitent l'usage de sources de données complémentaires ;
- **la méthode Certu** permet non pas d'estimer l'emprise de la voirie, mais plus vraisemblablement l'emprise des chaussées. Des sous et surévaluations de l'emprise de chaussée restent toutefois notables. Cependant, une exploration par analyse statistique bivariée permet d'ouvrir des pistes de recherche pour l'amélioration de l'estimation des chaussées par la méthode Certu, à travers une analyse morphologique du tissu urbain et un réajustement de paramétrage selon l'importance des tronçons de voirie.

Nos analyses se sont limitées à un cas d'étude principalement, et ont été partiellement étendues à deux autres cas, Paris et Bordeaux. Un travail systématique à plus grande échelle devrait être réalisé afin de valider les hypothèses émises et proposer une amélioration, d'une part de la méthode Base Cadastrale, d'autre part de la méthode Certu. Nous supposons par ailleurs qu'une amélioration de la méthode Certu permettrait à terme de répondre au besoin de distinguer la chaussée de ses dépendances. En effet, en améliorant la captation de l'emprise des chaussées par

cette méthode, et en la combinant à l'emprise voirie obtenue par la méthode Base Cadastrale, la distinction entre chaussées et dépendances deviendrait possible.

8. Proposition méthodologique : mettre en cohérence des données de voirie surfaciques et linéaires

Les données géographiques de voirie les plus courantes sont organisées sous forme de réseaux. Au sein d'un SIG, elles sont donc composées d'objets graphiques ponctuels et de polylignes (***Cf. 5.1, p. 103***). Cette structuration privilégie une représentation linéaire des voies de circulation. Les données surfaciques présentent des variations en fonction des choix réalisés au moment de la modélisation, notamment au niveau des intersections de voirie (***Cf. 6, p. 117***). Ces choix ont un impact sur la mise en relation des données surfaciques et les données linéaires. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de proposer une méthodologie permettant de mettre en relation ces différentes données. Pour cela, nous proposons :

1) Dans une première section, une identification des relations spatiales possibles entre des objets graphiques linéaires et surfaciques, et de leur degré de mise en cohérence.
2) Dans une seconde section, une modélisation des données surfaciques permettant de les mettre en cohérence avec les données linéaires, c'est-à-dire de les rendre interopérables. Cette modélisation s'appuie sur une méthode développée à partir du cas d'étude. Nous présentons ici la démarche permettant la modélisation visée. Afin d'aider à la compréhension, la méthode est présentée de façon générique à travers des cas simples, elle est ensuite abordée avec davantage de détails en annexe (**Cf. Annexe F, p. 335**).
3) Finalement, dans une dernière section, une application sur d'autres données à la fois en France, de façon à la tester sur d'autres configurations de voirie tout en conservant des données similaires et de sources homogènes, et à l'international, afin de tester là encore des configurations de voirie différentes constituées de données provenant de sources hétérogènes. Les résultats obtenus sont ensuite discutés, en soulignant les succès et les limites de la méthode mise en œuvre afin d'identifier des éventuelles perspectives d'amélioration.

8.1. Relations spatiales et interopérabilité entre objets graphiques linéaires et surfaciques

Les relations entre les objets graphiques de deux types se décrivent notamment par leurs relations topologiques. En mathématique, les relations entre deux ensembles – ensemble de départ et ensemble d'arrivée – sont nommées *applications* lorsque tous les éléments de l'ensemble de départ sont reliés à des éléments de l'ensemble d'arrivée. À chaque ensemble correspond dans notre cas une base de données constituée d'éléments, les objets graphiques. Trois types d'application sont identifiables (Liu et Shi 2007 ; Armstrong 2013 ; Bredon 2013) (**Tableau 8-1**).

Premièrement, l'application est bijective lorsque chaque objet graphique de l'ensemble d'arrivée correspond à un et un seul objet graphique de l'ensemble de départ. Pour les bases de données, cette relation de type 1-1 permet une association aisée d'un point de vue spatial. Les attributs des objets graphiques d'une BD peuvent être transférés sur les objets graphiques de l'autre BD sans aucune difficulté. Des précautions restent toutefois à prendre quant à la validité thématique d'un tel transfert.

Deuxièmement, l'application est surjective lorsque chaque élément de l'ensemble d'arrivée correspond à au moins un élément de l'ensemble de départ. Concernant les BD, cette relation de type 1-n ou n-1 conduit à relier un objet graphique d'une BD à un ou plusieurs objets graphiques de l'autre BD. La relation topologique résultante présente une association moyenne. Il est généralement nécessaire de construire une règle de passage numérique pour transférer l'information entre les deux BD. Par exemple, les objets graphiques linéaires sont décrits par un attribut relatif au nombre de véhicules présents à un temps t, et nous souhaitons transférer cette information sur les objets graphiques surfaciques : lorsque deux tronçons linéaires sont liés à un seul et même tronçon surfacique, le transfert se fait généralement en sommant les valeurs présentes sur les deux tronçons linéaires. Inversement, lorsqu'un seul tronçon linéaire est lié à plusieurs tronçons surfaciques, alors chaque tronçon récupère a priori une partie du nombre de véhicules. Dans ce cas, il est nécessaire d'établir une règle de passage numérique basée par exemple sur la surface totale de chaque tronçon surfacique.

Enfin, l'application est multivaluée lorsque chaque élément d'un des deux ensembles correspond à plusieurs éléments de l'autre ensemble. Pour les BD, ces relations notées n-p présentent les associations les plus difficiles.

Tableau 8-1 – Les relations spatiales entre les objets graphiques linéaires et surfaciques

Type de relation spatiale	Relation modélisée	Type d'associations
1-1		Association facile
1-n n-1		Association moyenne
n-p		Association difficile

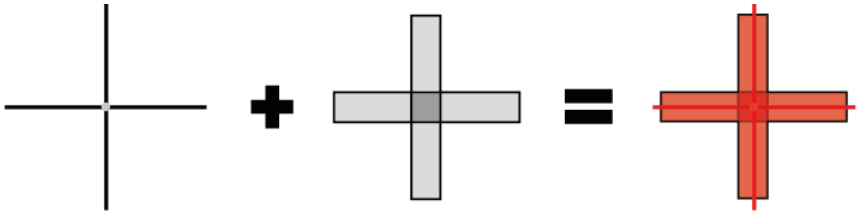
Légende

Objets graphiques surfaciques

Objets graphiques linéaires

Auteur : A. Pavard, 2020

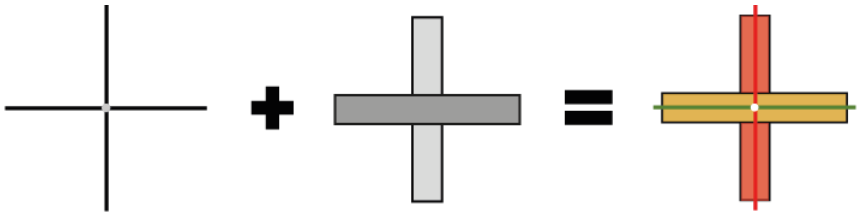
Dans le cas des données de voirie, la question de l'association entre des objets graphiques linéaires et surfaciques est particulièrement importante au niveau des intersections de voirie. Les tronçons linéaires débouchant sur une même intersection se rejoignent toujours au point central de cette intersection. Ainsi, lorsque l'intersection est modélisée en surfacique par un objet graphique individuel, comme dans le cas pour Bordeaux, Paris et San Francisco (***Cf. 6.2.3, p. 124***), la relation spatiale entre le linéaire et le surfacique est presque toujours de type n-p. L'association est donc difficile (**Figure 8-1**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-1 – Cas de Bordeaux, Paris et San Francisco, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie

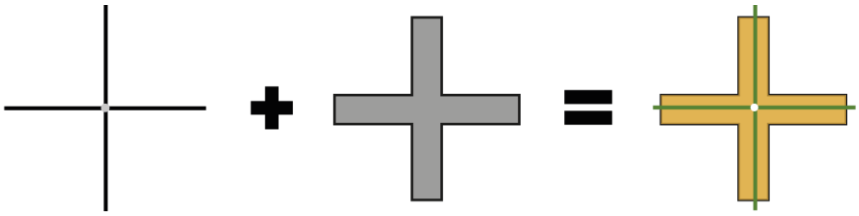
La modélisation utilisée par Copenhague (***Cf. 6.2.2, p. 121***), conduit quant à elle à disposer de relations n-1 (linéaire / surfacique) ou n-p. Dans certains cas au moins, l'association est moyenne (**Figure 8-2**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-2 – Cas de Copenhague, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie

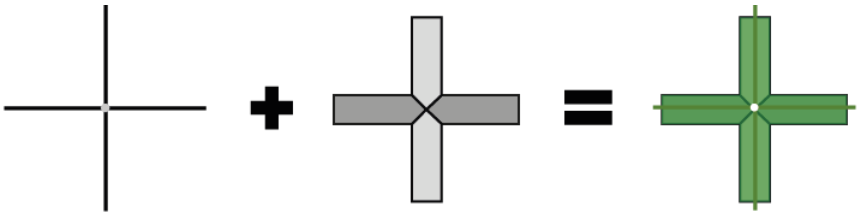
Lorsque la voirie est représentée par un seul polygone, comme c'est le cas pour Victoria, la relation spatiale est de type 1-n, à un polygone, plusieurs polylignes sont associées. L'association est également moyenne (**Figure 8-3**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-3 – Cas de Victoria, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie

Enfin, dans tous ces cas, l'association est limitée, et ne peut être envisagée qu'au prix d'un traitement qui entrainerait une perte d'information (par exemple, le choix d'une répartition au pourcentage). Compte tenu de la modélisation linéaire courante des données de voirie, nous proposons une modélisation surfacique alternative. Elle s'appuie sur un découpage des intersections en fonction des tronçons de voirie qui y débouchent, en affectant à chaque tronçon une partie de l'intersection. De cette modélisation résulte une relation spatiale 1-1 (**Figure 8-4**).



Auteur : A. Pavard, 2020

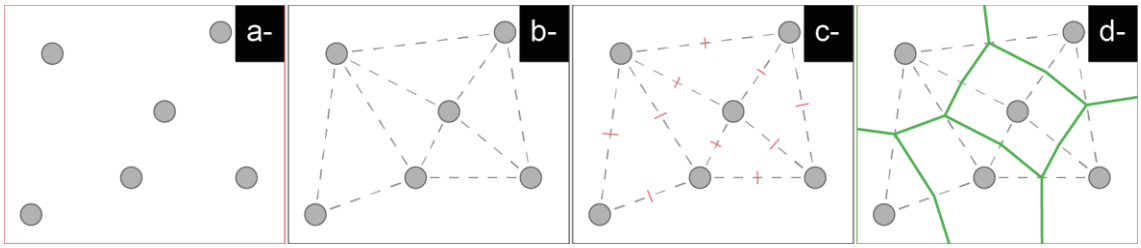
Figure 8-4 – Modélisation proposée, association objets graphiques linéaires et surfaciques de voirie

Cette modélisation des intersections est envisageable pour tous les cas identifiés. Nous avons élaboré une méthode, que nous avons testée et calibrée en nous appuyant sur notre cas d'étude comportant des configurations variées, représentatives de la complexité d'un milieu urbain. Nous l'avons ensuite mise en œuvre sur plusieurs autres territoires : Paris, Bordeaux, et Victoria.

8.2. Principe méthodologique de la mise en cohérence des données

La méthodologie proposée repose sur le découpage des intersections de voirie à l'aide d'un maillage du plan en cellules construit à partir d'un ensemble discret de points que nous nommons : *points sources*. Notre méthodologie repose alors sur le concept de « tessellation ». La tessellation consiste à recouvrir l'ensemble d'un espace par des objets géométriques non superposés. En d'autres termes, la tessellation divise un territoire traité en régions (polygones) dont chacune contient le point source le plus proche selon une distance euclidienne (**Figure 8-5**). Les régions sont constituées en regroupant l'ensemble des points les plus proches de chaque point source.

Comme l'indiquait Dupuis (2003), il existe de nombreuses formes de tessellation. Dans notre cas, nous nous utilisons la tessellation de Voronoï qui est la plus utilisée en géomatique et ce notamment en raison de sa généricité et de son application dans des espaces multidimensionnels.



<u>Légende</u> : À partir d'un ensemble de points (a), chaque point est relié à ses voisins (b). Les points médians de chaque segment reliant les points sont repérés (c). Des polygones sont tracés à partir des points médians de façon à produire la tessellation.

Auteur : A. Pavard 2020, d'après une illustration de J. Boulier

Figure 8-5 – Processus de tessellation

Nous avons développé notre méthodologie selon un processus itératif. À chaque étape, nous avons comparé les résultats obtenus à la situation escomptée, soit, l'attribution d'une portion d'intersection à chaque tronçon y débouchant (**Cf. Figure 8-4**). Ces comparaisons ont permis, lorsque des défauts étaient constatés, de formuler des hypothèses expliquant ces défauts, et de proposer des améliorations afin de les corriger.

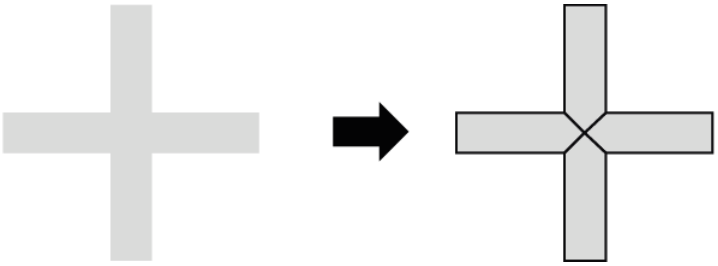
8.2.1.Les prérequis : données en entrée

La mise en œuvre de la méthode nécessite deux prérequis : deux jeux de données de voirie sur un même territoire, l'un correspondant à une modélisation linéaire, l'autre à une modélisation surfacique.

Les données surfaciques doivent s'organiser en un polygone représentant l'ensemble de la voirie du territoire. En d'autres termes, il s'agit d'introduire en entrée une donnée de voirie dont la modélisation ne distingue pas les tronçons de voirie des intersections de voirie, comme c'est le cas pour Victoria. Lorsque la modélisation des données surfaciques de voirie distingue les tronçons de voirie de leurs intersections (Bordeaux, Paris, San Francisco ou Montréal), ou lorsque les intersections de voirie sont associées à deux tronçons de voirie (Copenhague), il est alors nécessaire de réaliser un prétraitement d'agrégation.

8.2.2.Modélisation des tronçons surfaciques pour une association optimale

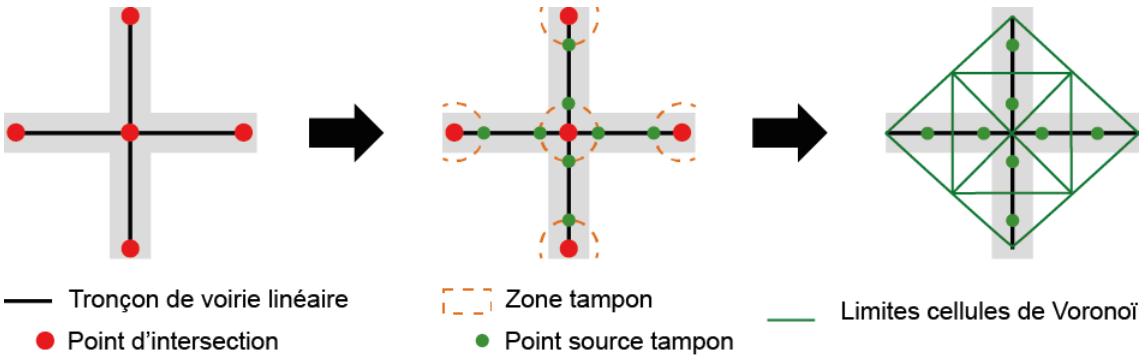
La méthodologie vise à modéliser les tronçons surfaciques de voirie, de façon à affecter à chaque tronçon de voirie une partie de l'intersection (**Figure 8-6**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-6 – Modélisation des tronçons surfaciques de voirie

Pour produire ce résultat, nous nous appuyons sur un diagramme de Voronoï, construit autour de points représentant les intersections. Dans la mesure où une cellule de Voronoï est construite pour chaque point source, il est essentiel pour chaque intersection de disposer d'autant de points que de tronçons de voirie débouchant sur cette intersection. La construction de cellules à partir d'un seul point représentant une intersection conduirait à englober l'intersection dans une seule cellule de Voronoï. Compte tenu du mode de construction des cellules du diagramme de Voronoï, ces points doivent se juxtaposer aux objets graphiques linéaires débouchant sur l'intersection, et se trouver à égale distance du centre de l'intersection. Ces points sont nommés *point source tampon*. Il est alors possible de produire un découpage homogène de l'intersection (**Figure 8-7**).

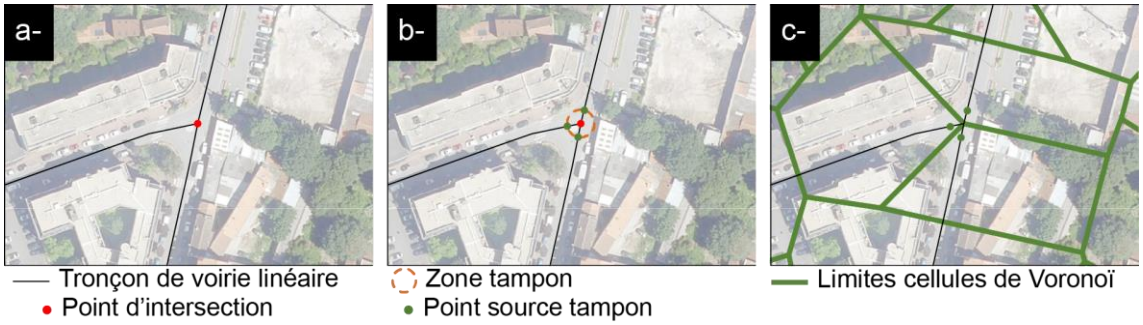


Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-7 – Construction des points sources

La construction de ces points sources tampons est réalisée à l'aide d'une zone tampon autour de chaque point d'intersection. La largeur d'une chaussée en milieu urbain est généralement comprise entre 5 et 7,5 mètres. Nous utilisons la largeur minimum d'une chaussée et fixons un rayon de 5 mètres pour ces zones tampons de façon à s'inscrire au maximum dans les périmètres des intersections (**Figure 8-8 a**). Les points sources tampons sont construits à partir de l'intersection du linéaire et des limites zones tampons (**Figure 8-8 b**). Le diagramme de Voronoï

est calculé à partir des points sources tampons comme illustré sur la **Figure 8-8 c**. On obtient alors une intersection découpée telle qu'elle est présentée en **Figure 8-6**.



Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure 8-8 – Diagramme de Voronoï à partir de points intermédiaires selon une distance uniforme aux intersections

Dans un second temps, nous relevons plusieurs cas ne pouvant être traités simplement par ce processus. Ils concernent des configurations de voirie auxquels nous sommes couramment confrontés en milieu urbain dense : les chaussées parallèles proches et les intersections complexes. Nous avons alors proposé des améliorations à notre méthode afin de la rendre également efficiente sur les cas particuliers (**Cf. Annexe a, p. 335**). Finalement, une fois la méthode ajustée, nous produisons des objets graphiques surfaciques de voirie cohérents avec les objets graphiques linéaires de voirie (**Figure 8-9**).

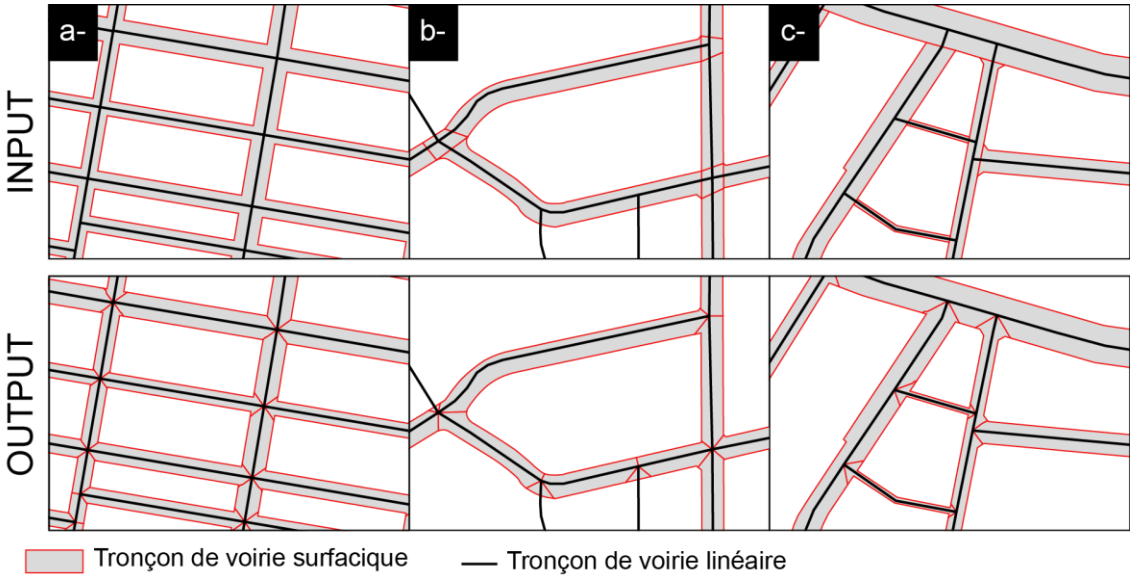
Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure 8-9 – Construction finale des tronçons surfaciques

8.3. Analyse des résultats et validation de la méthode

La méthode élaborée à partir de notre cas d'étude a ensuite été mise en œuvre sur trois villes (Victoria, Bordeaux et Copenhague) reposant sur des modélisations différentes. Ces applications

ont permis d'une part d'éprouver la méthode générique sur plusieurs territoires, d'autre part de montrer son adaptabilité à des données de types différents (**Figure 8-10**).



<u>Légende</u> : a) Victoria, b) Bordeaux et c) Copenhague.

Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, CityOfVictoriaBC, 2019, Københavns Kommune Bydata, 2019

Auteur : A. Pavard, 2020

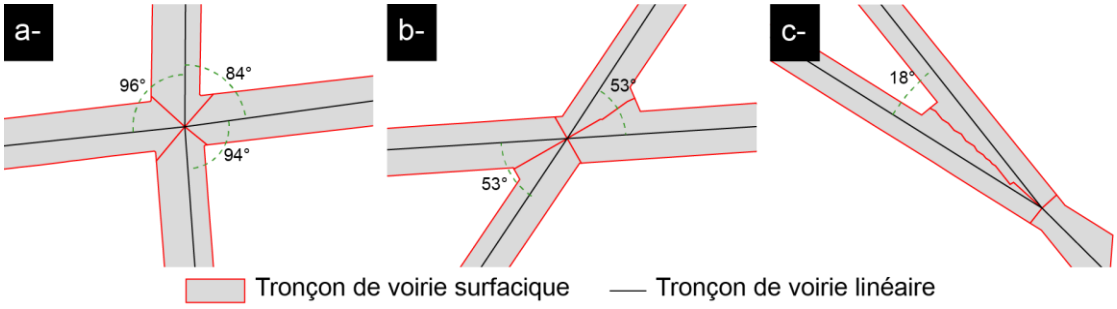
Figure 8-10 – Résultats de la mise en œuvre de la méthode sur trois villes

Dès lors que l'on dispose de deux bases de données géographiques de voirie, l'une linéaire et l'autre surfacique pour un même territoire, la méthode développée peut être mise en œuvre. Le délai de réalisation peut cependant être important selon le volume de données en entrée. Un petit territoire de superficie inférieure à 5 km² composé d'une voirie inférieure à 100km linéaires (ex. la commune de Cachan en France, 2,7 km² pour 100 km de voirie) requière une trentaine de minutes de traitement. Il faut compter plusieurs heures pour un territoire dont la superficie avoisine 100 km² et composé d'un linéaire de voirie supérieur à 400 km (ex. la commune de Copenhague au Danemark, 88,25 km² pour 430 km de linéaire routier). Une analyse plus détaillée des derniers résultats obtenus fait apparaitre trois configurations de voirie pour lesquelles la méthode n'aboutit pas à des résultats optimaux. Nous présentons ci-après ces configurations et apportons des précisions techniques dans l'annexe associée (**Cf. Annexe b, p. 343**).

8.3.1.Résultats selon le type d'intersection entre linéaires de voirie

Premièrement, nous observons que le type d'intersection, et plus spécifiquement les angles et les trajectoires pris par les tronçons linéaires de voirie, impactent directement la forme du découpage obtenu. En comparant les angles pris par les objets graphiques linéaires de voirie aux

intersections, nous constatons que plus les angles entre les tronçons linéaires deviennent aigus, plus les limites deviennent irrégulières (**Figure 8-11**).

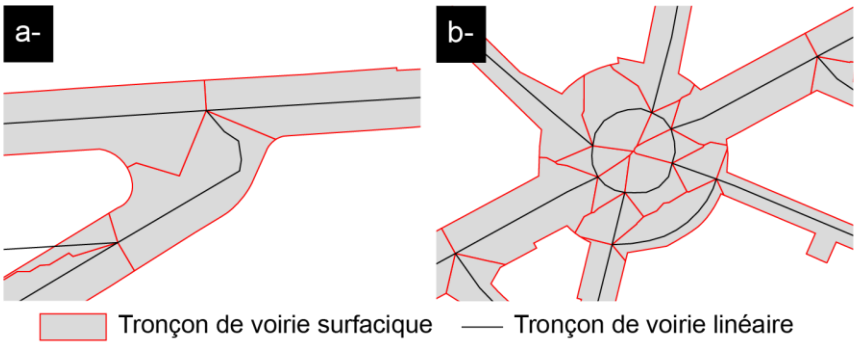


Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-11 – Exemples de résultats pour les intersections en croix et en T

Au-delà de l'angle, la courbure des trajectoires des objets graphiques linéaires modifie, elle aussi, la relation spatiale entre les linéaires débouchant sur une même intersection. Dès lors que la trajectoire d'un tronçon linéaire est courbe, l'angle formé entre deux tronçons linéaires n'est plus fixe (**Figure 8-12 a**). Calibrer un découpage régulier devient alors plus difficile et nécessite probablement une intervention manuelle (**Figure 8-12 b**).



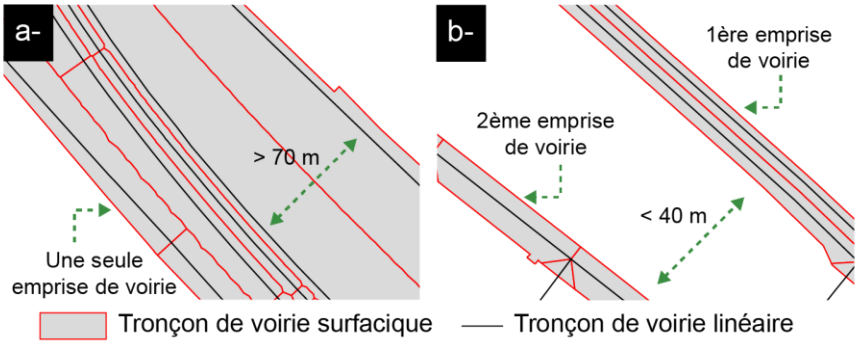
Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2020

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-12 – Découpage selon la forme ou morphologie de l'intersection

8.3.2.La densité et la proximité des tronçons linéaires de voirie

Deuxièmement, le traitement des tronçons de voirie à grande emprise composés de chaussées parallèles demeure problématique. Les enrichissements proposés lors du développement de la méthode ont certes amélioré les résultats de ces cas de figure, cependant, le critère de distance retenue (**Cf. Annexe ii, p. 339**) n'est pas le plus adapté pour prendre en compte correctement ces configurations particulières. Pour une même distance, deux tronçons de voirie peuvent appartenir à la même emprise (**Figure 8-13 a**) ou non (**Figure 8-13 b**).



Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2020

Auteur : A. Pavard, 2020

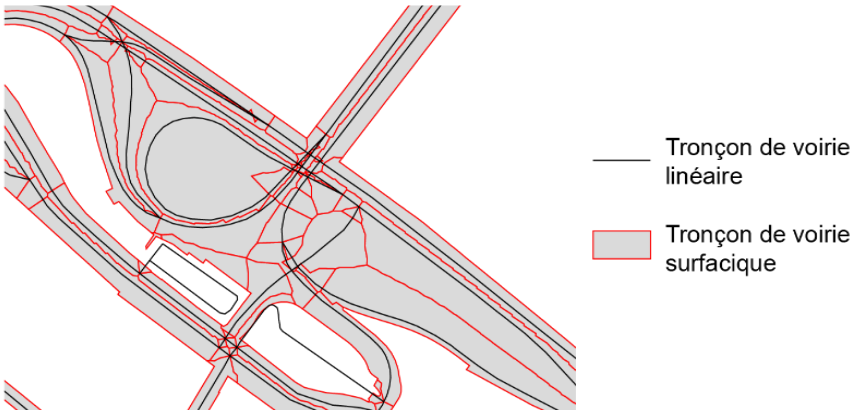
Figure 8-13 – Densité du linéaire, les cas particuliers

8.3.3. Les chevauchements de voiries

Finalement, le dernier point concerne le chevauchement des tronçons de voirie. Les défauts relatifs à ces cas sont moins imputables à des considérations techniques qu'au raisonnement que nous avons mené lors du développement de la méthode. En effet, nous nous sommes appuyés sur l'hypothèse d'une voirie planimétrique, ce qui est d'ailleurs majoritairement le cas en milieu urbain. Toutefois, bien qu'une grande partie des intersections relève de carrefours à giratoire ou non, d'autres intersections peuvent être de type échangeurs, se présenter sous la forme de croisement de deux tronçons par infrastructures superposées, ou encore des ouvrages d'art tels que des ponts ou tunnels.

Notre méthode ne permet pas aujourd'hui de créer des tronçons surfaciques superposés. Deux pistes d'amélioration peuvent cependant être suggérées :

- dans le cas d'un ouvrage d'art simple, tel qu'un pont ou un tunnel isolé, il est possible de dupliquer les tronçons surfaciques créés lorsque deux objets graphiques linéaires se superposent ;
- pour les échangeurs (**Figure 8-14**), un traitement manuel reste certainement à envisager.



Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2020

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 8-14 – Cas des échangeurs autoroutiers

Synthèse II.4

Nous avons développé une méthode permettant d'assurer l'association entre des données linéaires et surfaciques de voirie. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des données relatives à notre cas d'étude, à savoir un territoire urbain de l'agglomération parisienne, afin de prendre en considération un éventail large de configurations de voirie. Son application sur d'autres données de sources hétérogènes de différents pays a permis de valider sa reproductibilité, et de montrer sa généricité. En effet, elle est applicable aux différents types de données surfaciques de voirie identifiés (***Cf. 6, p. 117***) dès lors que l'on dispose également de données linéaires de voirie.

L'application de la méthode à des territoires urbains très denses a mis en évidence des cas particuliers. Ceux-ci sont liés à :

- la morphologie et l'aménagement des infrastructures, tels que :
  - les intersections de voirie complexes, soit les échangeurs autoroutiers,
  - la non rectitude des tronçons de voirie,
  - le chevauchement de tronçons de voirie dans le cas d'ouvrages d'art
  - Les tronçons de voirie composés de plusieurs chaussées parallèles ;
- la représentation linéaire de l'infrastructure :
  - la précision de la modélisation de l'axe de la chaussée,
  - la généralisation plus ou moins fine des tracés.

Pour chacun des cas particuliers identifiés, nous proposons des perspectives de traitements. Ces cas ont été identifiés sur les données disponibles, issues de villes de pays occidentaux. Nous émettons l'hypothèse que la morphologie de villes de pays en émergence, pour lesquelles nous ne disposons pas de données, peut présenter de nouvelles spécificités. Il serait selon nous intéressant d'étendre ce travail à des villes présentant des configurations différentes.

Conclusion Partie II

Cette partie a mis en exergue le besoin de spécifications pour la modélisation dans les SIG de la voirie à des fins de gestion de l'infrastructure, notamment pour une gestion intégrant les réseaux techniques prenant place sous la voirie. L'identification des besoins et les solutions envisagées ont mobilisé les concepts de généralisation cartographique (***Cf. 5.1, p. 103***), de terrain nominal (***Cf. 7.3, p. 142***), d'interopérabilité des données (***Cf. 8.1, p. 152***), et de tessellation d'un espace (***Cf. 8.2, p. 155***).

Dans un premier temps, une présentation des différentes modélisations de la voirie a permis de rappeler à quels besoins métiers se rapportent chacun des grands types de modélisation existants. Ainsi, les bases de données linéaires sont appréciées pour des questions liées aux mobilités, les modélisations surfaciques pour traiter les problématiques du partage de l'espace, et enfin les modélisations volumiques pour des problématiques d'aménagement et de gestion d'infrastructures. Bien que les SIG ne permettent pas à l'heure actuelle une modélisation 3D utile à l'implémentation de l'ensemble des dimensions de la voirie, son environnement tridimensionnel et ses capacités à décrire la troisième dimension par l'intermédiaire d'un attribut le rendent toutefois attractif et pertinent pour les besoins propres à la gestion de la voirie. À cet effet, nous proposons une modélisation de la voirie sur une représentation $2^{1/2}$D s'appuyant sur des objets graphiques surfaciques dont la description attributaire permettra d'intégrer la troisième dimension.

Concernant les bases de données surfaciques de voirie existantes, l'objectif était de comprendre les choix constructifs et leurs impacts sur les données construites. Une comparaison entre différentes bases de données a permis premièrement d'identifier des choix liés au tracé des objets graphiques représentant la voirie, et ce, aussi bien en termes de morphologie de l'infrastructure que de généralisation des tracés. Les résultats ont rappelé l'importance pour un territoire donné d'adopter des règles de numérisation uniques spécifiées clairement en fonction des besoins. Deuxièmement, cette comparaison a permis de dresser une taxonomie des différentes solutions de modélisation des intersections de voirie. Compte tenu des échanges avec les acteurs de la voirie, et des documents techniques dont nous disposons, il parait essentiel d'intégrer dans la modélisation de la voirie des objets graphiques intersections distincts. À ce titre, la modélisation proposée par Paris nous semble particulièrement pertinente dans la mesure où elle s'inscrit dans une « réalité » terrain de gestion des objets graphiques intersection de voirie. Nous constatons à travers des visites sur terrain que les intersections sont de plus en plus souvent structurées et aménagées de façon spécifique à l'aide par exemple d'un revêtement rehaussant leur niveau par rapport aux tronçons y débouchant. Ces aménagements sont généralement étendus jusqu'aux passages piétons conférant une inscription de l'intersection sur le terrain similaire à celle observée

dans la base de données de Paris. Ces aménagements sont liés à une question de mise en sécurité des usagers et, probablement, à une prise en compte de points de pression de freinage, et de sollicitations tangentielles pour l'infrastructure. Les éléments de réponse présentés dans le deuxième chapitre laissent entrevoir par ailleurs un champ de recherche quant à la relation entre morphologie et modélisation de la voirie.

Le faible déploiement des bases de données surfaciques de voirie, certainement lié à des contraintes financières et surtout techniques, nous a amené à proposer une méthodologie permettant d'aboutir à la construction de ce type de données. Il s'agit de rendre possible à l'ensemble des gestionnaires de voirie de disposer de solutions leur permettant de concevoir un Système d'Information Géographique de premier niveau, c'est-à-dire de disposer à minima de l'emprise de leur voirie. Le passage à un deuxième niveau conduit à s'interroger sur la possibilité de distinguer les différents éléments constitutifs de la voirie. Aujourd'hui, il n'existe pas sur le marché de solutions entièrement automatisées permettant d'identifier ces éléments et de construire les objets graphiques. Nous avons évoqué deux solutions techniques. Une analyse micro des résultats de deux méthodes automatiques, à savoir la méthode Certu et celle développée à partir de la Base Cadastrale, nous permet d'envisager de croiser ces deux méthodes de façon à décomposer la voirie en chaussées et dépendances, à condition d'améliorer la méthode Certu pour le milieu urbain. Comme nous l'avons observé, la méthode Base Cadastrale fournit une bonne estimation de l'emprise de voirie sur le cas d'étude. La méthode Certu pourrait quant à elle et après amélioration, fournir une estimation fine de la largeur des chaussées. Dans tous les cas, une recherche approfondie entre morphologie urbaine et morphologie de voirie apporterait des éclaircissements sur ce sujet.

Enfin, bien que des questions métiers soient reliées à différentes modélisations de la voirie, nous avons évoqué le besoin de mise en cohérence des objets graphiques issus des différentes modélisations entre eux. Nous verrons plus précisément dans la partie suivante que l'importance du trafic routier demeure l'une des contraintes que les constructeurs de voirie ont besoin d'intégrer pour dimensionner les tronçons de voirie. Or, l'information de trafic étant classiquement rattachée à la modélisation linéaire de la voirie, il est primordial de rendre interopérable les bases de données linéaires et surfaciques entre-elles de façon à assurer le transfert de données de l'une vers l'autre. Pour cela, nous avons proposé une méthodologie automatisée conduisant au découpage de l'emprise de voirie globale d'un territoire en tronçons de voirie permettant d'assurer un lien unique entre un objet graphique surfacique et un objet graphique linéaire. Cette construction d'objets graphiques tronçons ne remet pas par ailleurs en question la modélisation d'objets graphiques intersections. Une fois la relation établie entre les objets graphiques surfaciques et linéaires, il est possible de reconstruire des objets graphiques intersections, soit en reprenant le

modèle proposé par la base de données surfacique lorsque ce modèle préexistait, soit en choisissant la modélisation la plus adaptée selon le besoin.

Dans la partie suivante, nous nous concentrons sur la modélisation géosémantique nécessaire à la construction d'un Système d'Information Géographique répondant aux besoins en gestion intégrée de la voirie et des réseaux enterrés.

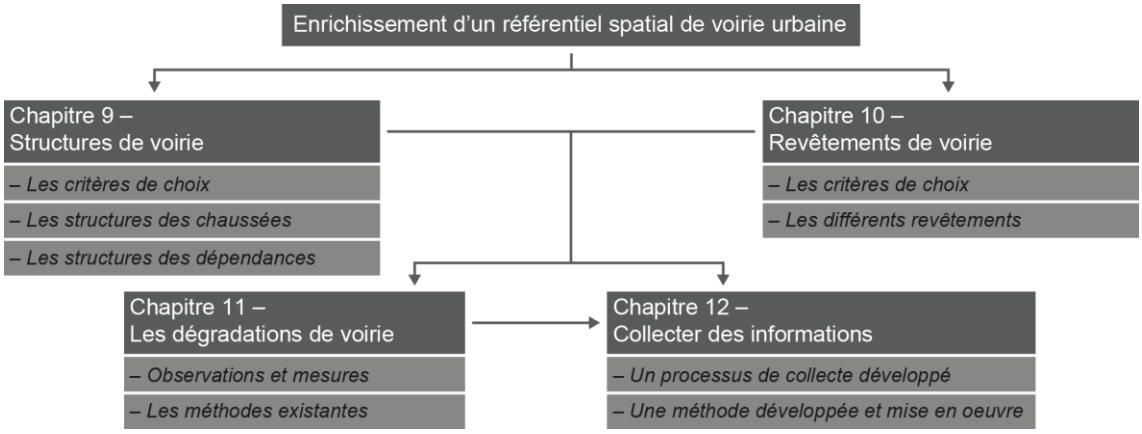
« *Ces chaussées ont résisté depuis 10 ans, avec un entretien suivi, aussi belles et bombées qu'elles l'ont été dans leur première formation, sur les routes les plus pratiquées de cette province ; telles que celles de Paris à Toulouse, et celles de Paris en Espagne, quoique composées dans la plus grande partie, de pierres calcaires et tendres.* » (Pierre Marie Jérôme Trésaguet, Mémoire sur la construction et l'entretien des chemins en plaine et en montagne, 1775)

Partie III : Du sursol à l'implantation en sous-sol : Quelles informations sur l'infrastructure de voirie urbaine et comment les intégrer dans un SIG ?

Introduction

L'objectif de cette partie, centrée sur l'objet technique *voirie urbaine*, est d'analyser les informations utiles à la gestion et à sa maintenance dans son environnement, c'est à dire d'identifier les données pertinentes pour alimenter un référentiel spatial de voirie qui servira de support à des outils améliorant par exemple la cogestion des voiries et des réseaux. Ces données concernent la surface avec les revêtements, l'emprise en sous-sol par les structures, la dimension temporelle par l'identification des dégradations et leurs évolutions. La **Figure 3** présente l'organisation de cette partie :

- Dans les deux premiers chapitres, à partir de documents techniques existants, nous présentons une synthèse des structures puis des revêtements de voirie, et identifions les choix constructifs liés à son environnement par l'exemple des réseaux.
- Dans un troisième chapitre, nous analysons l'évolution des voiries, soit les dégradations qu'elles subissent. L'objectif est de déterminer l'impact de l'environnement de la voirie, notamment des réseaux enterrés, ainsi que les techniques pour collecter ces informations.
- Enfin, nous développons et mettons en œuvre une démarche de levé de données sur les revêtements et les dégradations. Appliquée au cas d'étude de Cachan, la démarche devra apporter des éléments de réflexion sur l'enrichissement des BD géographiques de voirie.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 3 – Schéma d'organisation de la Partie III

La conception des voiries urbaines repose sur un savoir-faire et une doctrine du domaine de la construction routière développés à l'échelle nationale, notamment pour les chaussées. Des collectivités telles que des métropoles, ont développé leurs propres pratiques pour répondre à des enjeux locaux. Notre démarche vise à identifier les spécificités de la voirie urbaine, et à mettre en avant des différences liées aux contextes régionaux. Ainsi, nous nous appuyons sur des guides techniques français, nationaux et locaux, en ciblant des agglomérations de différentes régions françaises : Lyon, Toulouse, Lille, Bordeaux, Nantes et le Pays de Gâtine Parthenay.

9. La voirie selon sa forme : Quels choix structurels ?

La voirie dispose de différents éléments structurels comprenant : les revêtements et les couches en sous-sol (**Cf. Partie I, 2.3.2, p. 70**). Le choix technique des structures est crucial lors de la conception. Elles permettent aux voiries de résister aux différentes sollicitations. Les couches en sous-sol conditionnent également l'emploi de revêtements spécifiques (Ville de Toulouse 2008). Par la suite, la connaissance des structures de voirie est essentielle dans une démarche d'optimisation des travaux sur voirie, en particulier pour les interventions sur les réseaux enterrés. En effet, la réforme DT-DICT (**Cf. Partie I, 3.3.2, p. 83**) oblige les gestionnaires de réseaux après intervention par tranchée à remblayer à l'identique. Par ailleurs, certains matériaux ne peuvent être utilisés en structure lorsque certaines canalisations sont présentes en sous-sol. L'objectif de ce chapitre est donc d'identifier les informations sur les structures, nécessaires à la gestion et à la maintenance de l'infrastructure.

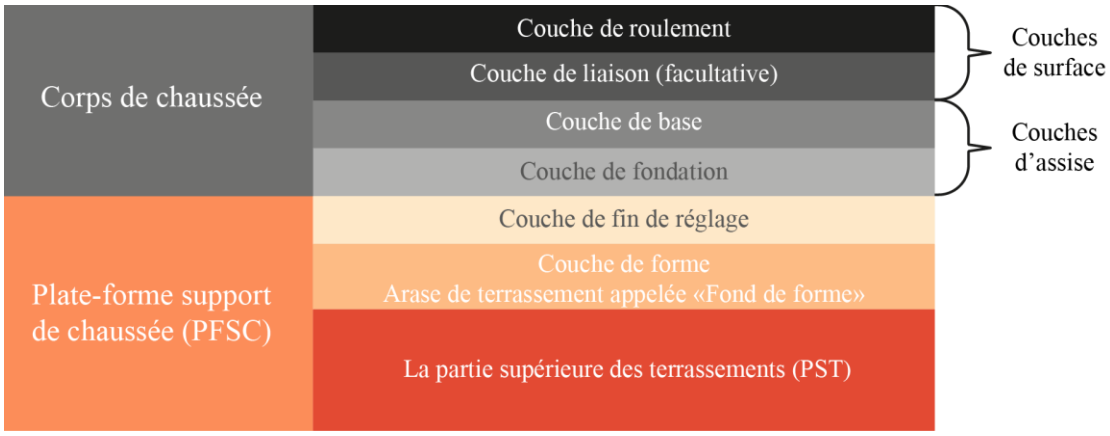
1) Dans une première section, nous présentons les critères de conception d'une structure de voirie. Cette étape est appelée « dimensionnement ». Ces critères ont été principalement mis en place en lien avec les sollicitations mécaniques induites par le trafic motorisé. Ainsi, traditionnellement les documents relatifs à la structure concernent principalement un élément de la voirie : la chaussée.
2) De ce fait, nous présentons dans une deuxième section les principales structures de chaussée. Enfin, compte tenu des nouvelles préoccupations urbaines, et notamment, la multimodalité, le cadre de vie urbain, et les impacts environnementaux, les gestionnaires ont été amenés à élargir leur vision de la voirie en intégrant l'ensemble des dépendances (**Cf. Partie I, 1.2.2, p. 47**). Ces dépendances, et notamment les trottoirs ou les espaces cyclables subissent également des sollicitations mécaniques, bien que moindres, pour lesquelles un dimensionnement est nécessaire.
3) Ainsi, nous terminons ce chapitre en présentant les structures développées pour les dépendances.

9.1. Les critères pour choisir la structure d'une chaussée

Le Grand Lyon dans son guide technique de conception et dimensionnement indique que jusque dans les années 1950, le dimensionnement relevait essentiellement d'une démarche empirique par analogie avec les structures déjà en place (Gaborit et al. 2017 ; Rampignon 2009). C'est à partir des années 1970 que des guides techniques et des méthodes d'essais ont été rédigés. Notamment le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (Setra) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ont proposé en 1971 un premier guide de conception et de dimensionnement des structures de chaussées à destination principale de la voirie à fort trafic,

donc de la voirie départementale à la voirie nationale. Ce guide a connu ensuite trois mises à jours, jusqu'à la dernière datant de 1994 (LCPC et Setra 1994). À partir de ce guide, un catalogue des structures a été élaboré (LCPC et Setra 1998). Concernant la voirie à faible trafic, c'est-à-dire la voirie locale, un manuel a été rédigé au début des années 1980 (LCPC et Setra 1981). Ce manuel n'a connu aucune mise à jour jusqu'à 2020 (IDRRIM 2020). En préambule, le document de 1981 indiquait qu'il visait à « *compléter la gamme de structures définie par le Catalogue de 1977* » de façon à intégrer les spécificités de la voirie des collectivités locales, et leur proposer des règles de dimensionnement adaptées. Notamment, il est précisé que la gestion de la voirie locale est contrainte par « *la diversité des maitres d'ouvrage et des modes de financement des projets* ». En effet, les stratégies de dimensionnement sont adaptées selon les budgets adoptés par le maitre d'ouvrage. La répartition budgétaire dépend alors de l'investissement consenti pour l'ouvrage initial et le budget alloué à son entretien afin de maintenir son niveau de service. Par ailleurs, les collectivités locales ont manifesté l'intérêt d'utiliser des matériaux produits localement ayant des qualités et origines variées.

Au-delà des stratégies de dimensionnement liées au contexte budgétaire, six critères sont classiquement identifiés : – la vocation de la voie ; – le trafic poids lourd et son agressivité ; – la durée de service ; – le gel-dégel, dépendant principalement de la région ; – le classement géotechnique des sols naturels ; – la classe de portance et l'état hydrique du sol support. Les deux derniers critères concernent essentiellement la partie de la voirie correspondant à la plate-forme support de la voirie (**Figure 9-1).** Pour les structures de voirie, il est couramment admis que le problème du gel-dégel est moins important pour la voirie locale que pour la voirie à fort trafic (LCPC et Setra 1981).



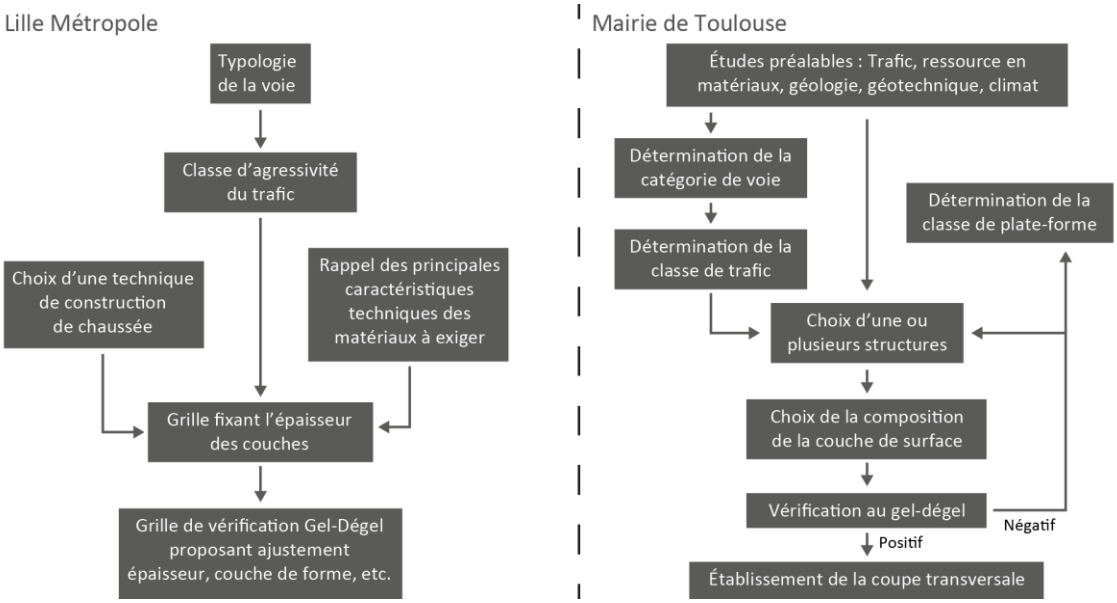
Sources : Lyon 2017

Figure 9-1 – Structure type d'une chaussée

À travers leurs guides techniques, nous constatons que les collectivités suivent effectivement les mêmes étapes dans leur procédure de dimensionnement (**Figure 9-2**) :

- des études préalables sur le trafic, la géologie et géotechnique des sols, ou encore le climat et conduisant à la détermination de classe de la PF, et d'agressivité du trafic ;
- le choix technique de construction : la structure avec la nature et l'épaisseur des couches ;
- la vérification au gel-degel.

Nous remarquons qu'elles n'introduisent pas de critère lié aux réseaux enterrés. Analysées plus en détail, les procédures des différentes collectivités locales présentent des variations.



Sources : Lille 2000 ; Toulouse 2008

Figure 9-2 – Comparaison des procédures de dimensionnement de Lille et Toulouse

Avant tout, nous précisons que nous limitons ici notre analyse au corps de chaussée, et plus spécifiquement aux couches d'assise. Les couches de surface seront traitées en deuxième chapitre. La partie inférieure, appelée plate-forme support de chaussée (PFSC) est principalement liée à la géotechnique du sol d'origine. Cette problématique dépasse notre champ de recherche. Toutefois, nous retenons l'importance de la PF, qui influence la résistance globale de la chaussée aux contraintes et aux déformations liées au trafic en surface. De plus, les réseaux enterrés sont généralement installés dans cette partie de la structure, ce qui en fait un élément important pour notre questionnement. Selon la chaussée, toutes les couches n'existent pas simultanément. Par exemple, pour les chaussées supportant les trafics les plus faibles, les couches de fondation et de base sont souvent confondues. De la même façon, lorsque le revêtement est de type béton hydraulique, la couche de surface est généralement confondue avec la couche de base. Enfin, la couche de liaison est rarement présente dans les chaussées urbaines. Cette dernière assure une

meilleure répartition des efforts sur l'ensemble de la surface de la chaussée, et ce notamment dans le cas d'un trafic important.

Le dimensionnement d'une chaussée est prévu sur la base d'une hypothèse de durée de service de l'infrastructure, c'est-à-dire, une durée au cours de laquelle il n'est pas prévu de réaliser d'entretien structurel. À ce titre, alors que Lyon propose des durées de service différentes selon la vocation de la voie (**Cf. Partie I, 2.3.1 p.68**), avec un maximum de 20 ans pour les voies de transit, Lille et Toulouse prévoient une durée de service équivalente pour toutes les chaussées (**Tableau 9-1**). Nantes présente une situation intermédiaire en prévoyant une durée de service moins importante pour les voies de distribution et de desserte, c'est-à-dire de 20 ans contre 30 ans pour les autres voies (Communauté urbaine Nantes Métropole 2012). En distinguant les voies, le Grand Lyon indique qu'il existe une relation entre la situation, c'est-à-dire en milieu urbain ou non, la vocation des voies et la présence de réseaux enterrés. Par exemple, il est précisé dans le guide de Lyon, qu'il est plus probable de trouver des réseaux enterrés sous les voies de distribution et de desserte que sous les voies de transit. Par ailleurs, les auteurs ont remarqué que ce paramètre est essentiel pour la mise en place d'une politique d'investissement et d'entretien compte tenu des interventions par tranchées sur les réseaux enterrés. Ainsi, les durées de service prévues pour les voies de distribution et de desserte sont moins importantes. De la même façon Nantes précise que la stratégie de dimensionnement ne peut être la même en milieu urbain du fait de la contrainte des réseaux enterrés.

Tableau 9-1 – Hypothèse de durée de service des infrastructures

	Lille	Toulouse	Lyon	Nantes
Voies transit	30 ans	20 ans	20 ans	30 ans
Voies liaison			15 ans	
Voies distribution			10 ans	20 ans
Voies desserte			10 ans	
Voies Transport en commun (TC)	NA	NA	15 ans	30 ans

Sources : Lille 2000 ; Toulouse 2008 ; Nantes 2012 ; Lyon 2017

Exception faite de Lyon qui introduit un critère de présence de réseaux enterrés, le dimensionnement de la chaussée est réalisé essentiellement selon le trafic supporté. Afin que les structures résistent, il est alors indispensable d'estimer le trafic.

Le trafic est mesuré par le nombre de passages de poids lourds (PL) dont la charge dépasse 3,5t, sur une durée déterminée et sur une des voies de circulation. Il est considéré que les véhicules légers ont un effet négligeable sur l'infrastructure (Gaborit et Azambre 2017). Nous constatons que, deux classifications du trafic sont aujourd'hui toujours utilisées.

La première classification, introduite au début du dimensionnement dans les années 1970, repose sur des classes de trafic déterminées selon le nombre de PL journalier moyen pendant une année (JMA) sur la voie la plus circulée. Nantes, Lille et Lyon s'appuient par exemple sur cette classification (**Tableau 9-2**). Cette classification s'étend de T5 pour le trafic le plus faible à T0 pour un trafic plus important, avec deux classes TS et T EXP pour les trafics exceptionnels.

Tableau 9-2 – Classification du trafic sur une année (JMA)

Classe	**T5**	**T4**	**T3**	**T2**	**T1**	**T0**	**TS**	**T Exp**
	T3-	**T3+**	**T2-**	**T2+**	**T1-**	**T1+**	**T0-**	**T0+**	**TS-**	**TS+**
MJA	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000
Niveau	Faible				Moyen				Fort		Très fort	

Sources : LCPC et Setra 1981 ; Lille 2000 ; Nantes 2012 ; Lyon 2017

La deuxième, mise en place lors de la mise à jour des guides techniques dans les années 1990 intègre les durées de service et le cumul d'un trafic sur la voie la plus circulée au cours d'un nombre d'années déterminé. Le trafic est alors exprimé en millions de PL sur 20 ans ou 30, selon la nature structurelle (VRS) ou non (VRNS) de la voirie (LCPC et Setra 1998). Toulouse utilise cette classification (**Tableau 9-3**). Des déclinaisons par tranches de 5 ans de 5 à 25 ans sont également proposées dans le manuel des chaussées neuves à faible trafic (LCPC et Setra 1981). Contrairement à l'ancienne classification, la numération est inversée avec un trafic allant de TC1 pour le trafic le plus faible à TC8.

Tableau 9-3 – Classification du trafic en cumulé sur 20 ou 30 ans

classe	**TC1**	**TC2**	**TC3**	**TC4**	**TC5**	**TC6**	**TC7**	**TC8**
VRS (million PL) – 30 ans	0.5	1	3	6	14	38	94	
VRNS (million pl) – 20 ans	0.2	0.5	1.5	2.5	6.5	17.5	43.5	
Niveau de trafic	Faible			Moyen	Fort	Très fort		

Sources : Toulouse 2008

Le trafic est obtenu soit par une opération de comptage, soit par une évaluation selon la vocation de la voirie et ses utilisateurs potentiels. Ainsi, le Grand Lyon propose par exemple une table des classes de trafic (JMA) selon la vocation des voies (**Tableau 9-4**).

Tableau 9-4 – Correspondance entre vocation des voies et classes de trafic

		Classes de trafic (JMA)						
Vocation des voies	Transit	T0	T1	T2	T3			
	Liaison		T1	T2	T3	T4		
	Distribution				T3	T4	T5	
	Desserte					T4	T5	T6
	TC		T1	T2	T3			

Sources : Lyon 2017

Le trafic est également amené à évoluer au cours de la durée de service de la chaussée. Cette augmentation doit être prise en compte pour le dimensionnement. Ainsi, les gestionnaires formulent des hypothèses d'accroissement de la circulation. Par exemple, Lille prévoit une croissance annuelle de 1% tandis que Nantes et Lyon se basent sur une croissance de 2%.

Le dimensionnement est réalisé en France à partir d'un essieu de référence correspondant à un essieu simple de 13 tonnes à roues jumelées. Les véhicules en circulation ne sont pas tous équipés de ces essieux. Un coefficient permet de convertir le trafic réel sur la base de l'essieu de référence. Ce coefficient est appelé coefficient d'agressivité. L'agressivité est définie à partir des dommages causés par le passage d'un essieu de référence d'une charge déterminée. Ce standard développé pour la voirie à fort trafic ne convient pas nécessairement à la voirie locale. Ainsi, Nantes, Lille et Lyon proposent une adaptation du coefficient d'agressivité selon la vocation des voies.

Tableau 9-5 – Agressivité selon la classe de trafic

Vocation des voies	TC	Desserte	Distribution	Liaison (artérielle)	Transit
Lille		0,01	0,1	0,5	À calculer spécifiquement
Nantes	1	0,5		0,7 à 1	1
Lyon	0,5 à 1	0,1 à 0,5	0,1 à 0,6	0,2 à 0,6	0,5 à 1

Sources : Lille 2000 ; Nantes 2012 ; Lyon 2017

Au-delà de ces coefficients d'agressivité, le Grand Lyon relève que certaines zones de voirie sont plus sensibles que d'autres à l'agressivité des poids lourds. Notamment, les ronds-points, les zones sinueuses ainsi que les zones d'accélération et freinage subissent des pressions mécaniques plus importantes. Il recommande alors, pour ces cas, de multiplier le coefficient d'agressivité par 2.

9.2. Les structures de chaussée

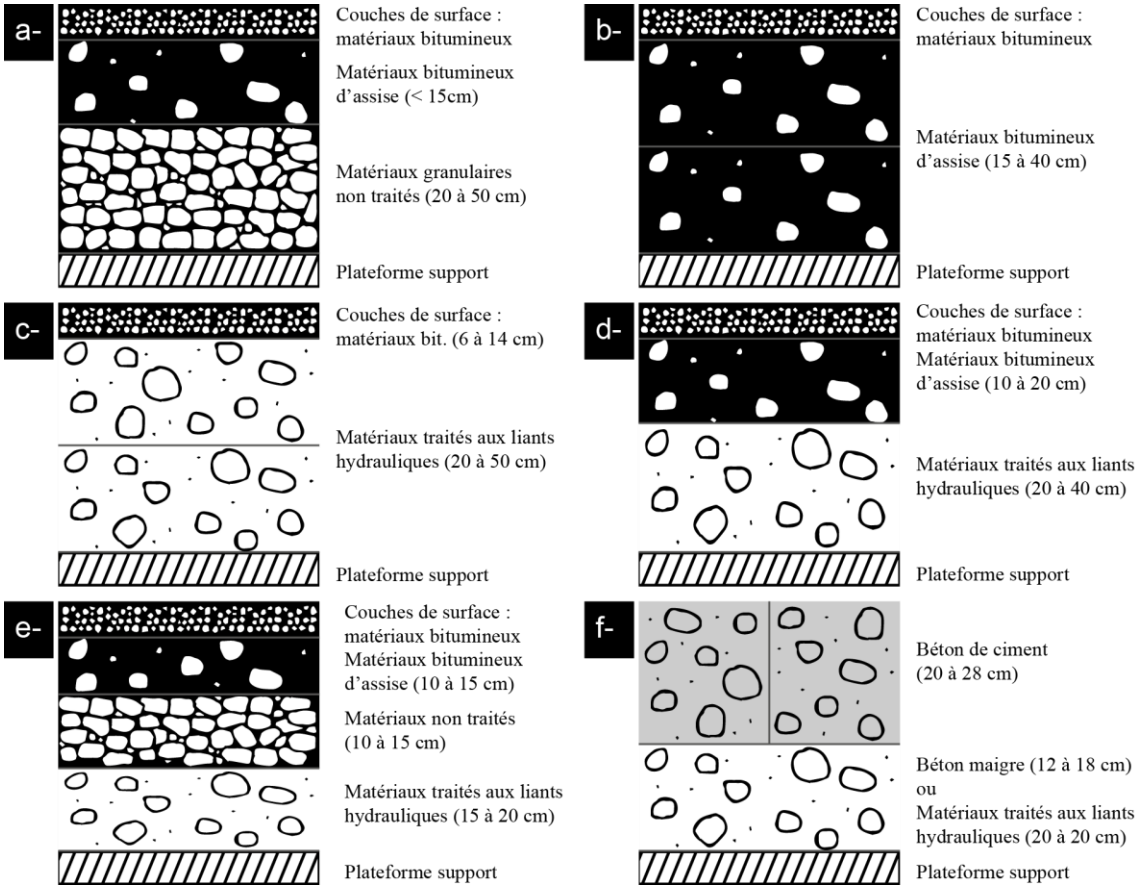
À partir des critères retenus (trafic, durée de service, ou encore la plate-forme), le dimensionnement consiste à définir des structures possibles pour les chaussées, c'est-à-dire la nature, les caractéristiques et l'épaisseur des matériaux : la méthode française est rationnelle, et se déroule en deux étapes (calcul par modélisation pour la tenue mécanique et une vérification au gel de la structure). La formulation des couches de structure est réalisée à l'aide de différents matériaux. Nous nous bornons ici à citer les trois principaux types de matériaux, les matériaux non traités, les matériaux traités au liant bitumineux (MTLB) et les matériaux traités au liant hydraulique (MTLH). À partir de ces trois types de matériaux, six familles de structures de chaussée sont généralement identifiées. Cependant, nous observons dans les guides déjà cités, et notamment les guides techniques locaux, un regroupement de ces six familles en trois entités dépendant de la rigidité de l'assise, les structures souples, semi-rigides, et rigides. Bien que cette classification ne soit pas la plus standard, elle nous permet de synthétiser les différentes structures.

Premièrement, les structures souples sont constituées soit d'une assise composée d'une couche fine inférieure à 15 centimètres de matériaux traités au liant bitumineux, et d'une couche épaisse de matériaux non traités, appelés graves non traités (GNT) (**Figure 9-3 a**), soit d'une couche assise bitumineuse épaisse (**Figure 9-3 b**), ici, l'emploi d'un liant bitumineux rend l'assise souple en comparaison d'un liant hydraulique plus rigide. Ces structures sont utilisées pour supporter des trafics faibles (**Cf. Tableau 9-3, Tableau 9-4, p. 174**) tels qu'observés sur les voies de desserte, lorsque l'assise est essentiellement constituée de GNT. En augmentant l'épaisseur de l'assise et en remplaçant les GNT par des MTLB, ces structures sont exploitables pour des chaussées à plus fort trafic, par exemple équivalentes aux voies de transit. Selon les catalogues pré-cités, les structures GNT et bitumineuses épaisses sont séparées ou regroupées. Par exemple, Nantes les sépare en trois types de structure, les souples en GNT, les bitumineuses, et les bitumineuses épaisses, en considérant qu'une chaussée souple ne présente aucun matériau lié en assise.

Deuxièmement, les structures sont dites semi-rigides lorsqu'elles combinent des MTLB et MTLH voire des GNT. Cette combinaison permet de bénéficier de la souplesse du bitume et de la rigidité du liant hydraulique. Elles peuvent être à assise hydraulique (**Figure 9-3 c**), mixte (**Figure 9-3 d**) ou inverse (**Figure 9-3 e**). La différence entre les assises hydraulique et mixte réside dans la proportion de MTLB. La structure mixte contient une proportion équivalente de MTLH et MTLB. En France, la structure semi-rigide la plus courante est celle à assise hydraulique.

Troisièmement, les structures rigides sont essentiellement constituées de MTLH (**Figure 9-3 f**). La couche de surface plus épaisse que pour les autres structures est elle-même en béton de ciment. Ces structures sont très peu exploitées en France pour les chaussées.

Les structures présentées sont spécifiques à la chaussée. En France, l'usage d'un revêtement à liant hydraulique est rare pour les chaussées (***Cf. 10.2.2, p. 193***), c'est pourquoi l'essentiel de ces structures sont présentées avec une couche de surface à liant bitumineux.



Sources : LCPC et Setra 1994

Figure 9-3 – Les six familles de structures de chaussée

L'analyse des guides techniques de Lille, Lyon, Toulouse et Nantes nous permet d'identifier les structures les plus courantes en milieu urbain selon les contextes locaux (**Tableau 9-6**). Les structures souples sont les plus fréquemment citées, et notamment celles constituées d'une assise en GNT ou bitumineuse fine. Les assises bitumineuses épaisses, sont peu exploitées à Toulouse, mais sont présentes dans les guides techniques de Lille, de Lyon et de Nantes. Viennent ensuite les structures semi-rigides dont principalement celles présentant une assise de MTLH. Lyon précise à leur sujet qu'elles sont surtout utilisées pour les voies de transit et de liaison à fort et très fort trafic. Des chaussées rigides sont présentées dans les guides de Lille, de Toulouse et de

Nantes. Nous remarquons dans le cas de Toulouse qu'elles sont essentiellement utilisées pour les chaussées réservées à la circulation piétonnes. Enfin, Nantes ajoute, dans sa liste de structures, les chaussées pavées béton en précisant qu'elles sont réservées aux trafics très faibles.

Tableau 9-6 – Usage des structures dans trois métropoles

	Lille	Lyon	Toulouse	Nantes
Chaussée souple : GNT	☑	☑	☑	☑
Chaussée souple : Bitumineuse				☑
Chaussée souple : bitumineuse épaisse	☑	☑	☒	☑
Chaussée semi-rigide : liant hydraulique	☑	☑	☑	☑
Chaussée semi-rigide : Mixte	☑	☒	☑	☒
Chaussée semi-rigide : inverse	☒	☒	☑	☒
Chaussée béton de ciment (ou rigide)	☑	☒	☑	☑
Chaussée pavées béton	☒	☒	☒	☑

Sources : Lille 2000 ; Toulouse 2008 ; Lyon 2017

Nous constatons également à travers le guide de Lille que des matériaux spécifiques au contexte local sont exploités. Ainsi, le liant hydraulique le plus utilisé sur le territoire lillois est le laitier cendres volantes, c'est-à-dire un sous-produit industriel contenant du clinker – constituant de base du ciment – et des matériaux résiduels issus des hauts fourneaux, tels que les laitiers provenant de la réduction des minerais de fer. Ces constituants apportent des propriétés hydrauliques supplémentaires. La sidérurgie étant développée dans le Nord de la France, les entreprises routières, et les collectivités locales exploitent ces matériaux. Ceci explique certainement la présence plus importante des structures semi-rigides à Lille que dans d'autres villes.

Trois des métropoles présentées mentionnent par ailleurs l'usage de mâchefer d'incinération de déchets non dangereux (MIDND), c'est-à-dire de granulats artificiels issus principalement de l'incinération des déchets urbains. Nous constatons que Lille et Lyon les emploient essentiellement pour la plateforme support, et notamment pour la couche de forme tandis que Toulouse les utilise en remplacement d'autres matériaux granulaires pour la couche de fondation (***Cf. Figure 9-1, p.171***). Dans son guide, Lille rappelle les recommandations du Ministère de l'Environnement pour l'usage des MIDND. En particulier, ceux-ci ne sont pas autorisés en cas de présence de canalisations métalliques ou dans le cas de la mise en place d'un système drainant. Dans le premier cas, il existe un risque de corrosion des canalisations, et dans le second un risque de pollution des eaux.

Ces structures, dont l'usage est synthétisé dans le **Tableau 9-6** pour quatre grandes métropoles françaises, concernent essentiellement les chaussées. Les éléments de la voirie supportant d'autres

mobilités tels que les trottoirs, ne subissent pas les mêmes contraintes mécaniques. Le choix de la structure n'est donc pas le même.

9.3. Les structures d'autres éléments de voirie

Parmi les autres éléments de voirie, dont la structure est dimensionnée, nous identifions les chaussées réservées au transport en commun, les trottoirs et autres espaces piétonniers tels que les places, les espaces cyclables, et les espaces de stationnement.

Les **chaussées de transport en commun**, sont dimensionnées selon les mêmes règles que les chaussées routières classiques en tenant compte de l'agressivité du trafic : la structure doit résister à un trafic lourd. Notamment, Lille indique que la chaussée doit présenter une bonne résistance à un type de dégradation, l'orniérage dû à un trafic canalisé (***Cf. 11.1, p.204***). Lyon intègre d'ailleurs les chaussées de bus dans sa classification des voies de circulation, et considère qu'elles supportent un trafic proche de celui des voies de transit. De ce fait, une structure similaire à celle des chaussées à fort trafic est utilisée.

Les **trottoirs** sont généralement peu sollicités mécaniquement. Toutefois, comme le mentionne Lille, certains trottoirs doivent être accessibles aux véhicules, notamment lorsque des stationnements y sont aménagés. Dès lors que des véhicules accèdent à ces zones, il est recommandé d'adopter une structure unique permettant de supporter un trafic plus ou moins agressif selon le type de stationnement prévu. Pour les trottoirs réservés aux piétons, la structure dépend principalement du revêtement superficiel souhaité. Nous constatons essentiellement un emploi de structures semi-rigides à rigides, voire de structures particulières dans le cas d'un revêtement de surface modulaire tel que les pavés (**Tableau 9-7**). Toulouse mentionne exclusivement les trottoirs revêtus de béton bitumineux ou d'asphalte (***Cf. 10.2.2, p. 193***) avec des assises en GNT.

Tableau 9-7 – Structures de trottoir

Surface	beton hydraulique	Béton Bitumineux / Asphalte / Béton désactivé (BD)	Dalles	Pavés
Assise	3 cm Béton Bitumineux (BB)	8 cm (ou 10 si BD en surface) Béton Hydraulique	Modules 8 cm (6 pour les pavés + épaisseur lit de pose	
	15 cm MTLH	10 cm GNT	15 cm MTLH	

Sources : Lille 2000 ; Toulouse 2008

Les **espaces piétonniers**, autres que trottoirs, sont parfois également accessibles par les véhicules motorisés. Lille recommande alors de se référer au protocole de dimensionnement des chaussées.

Toulouse se concentre sur les espaces réservés aux piétons et propose une structure de 20 cm composée exclusivement de GNT.

Enfin, les **espaces cyclables** ne supportent a priori pas de fortes sollicitations mécaniques. Le Cerema donne des recommandations, qui concernent essentiellement l'aménagement en surface (Cerema 2008). Lille distingue toutefois deux situations : – le cas d'une bande cyclable (**Cf. Partie I, 2.2.2, p. 60**), pour lequel le dimensionnement correspond à celui de la chaussée ; – le cas où l'espace cyclable est séparé en chaussée cyclable ou lié à un trottoir (**Cf. Partie I, 2.2.2, p. 60**), pour lequel la structure doit être légère et économique. Dans ce deuxième cas il est conseillé de se rapporter aux structures proposées pour les trottoirs. Toulouse propose une structure plus souple que pour les trottoirs en concevant une unique couche de GNT de 20 à 30 cm sous le revêtement.

Synthèse III.1

Chaque élément de la voirie est constitué d'une structure définie selon des règles de dimensionnement. Le dimensionnement a d'abord été développé pour un élément de la voirie, la chaussée et s'appuie sur six critères selon la partie de structure concernée (**Tableau 9-8**). Par la suite, il sera intéressant d'enrichir la base de données d'informations liées à ces critères.

Tableau 9-8 – Synthèse des critères de dimensionnement

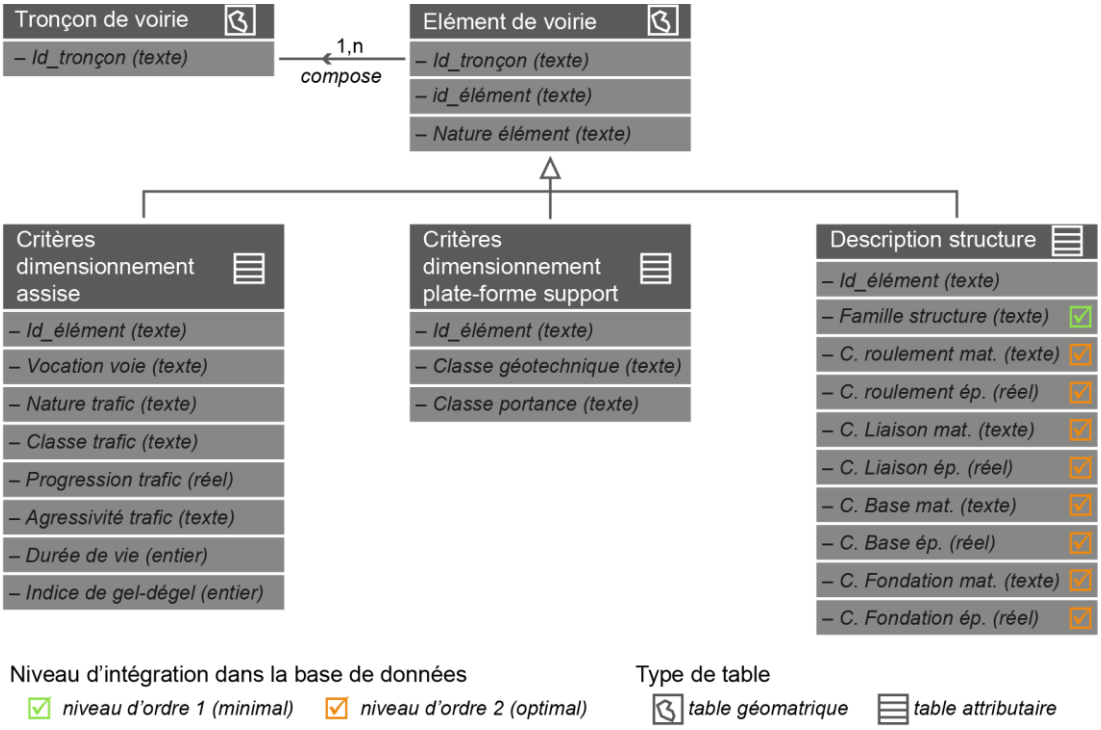
Partie de la structure	Critères
Assise	– la vocation de la voie ; – le trafic : nature, classe, progression et agressivité ; – la durée de service ; – l'indice de gel-dégel.
Plate-forme support	– le classement géotechnique des sols naturels ; – la classe de portance

Auteur : A. Pavard 2020

Malgré des bases communes, nous constatons que le dimensionnement de la voirie urbaine n'a pas fait l'objet d'harmonisation des règles techniques. Pour les chaussées, les collectivités locales utilisent généralement les structures développées pour la voirie à fort trafic, avec une diversité de matériaux toutefois plus importante. Pour les autres éléments de voirie, des documents techniques nationaux ont été rédigés plus tardivement dans les années 2000. Ceci laisse supposer une prise de conscience de la variété des usages des éléments de voirie en milieu urbain et le besoin de préciser ces nouveaux éléments. Certaines collectivités semblent avoir développé antérieurement leurs propres règles pour ces éléments.

Dans tous les cas, aussi bien pour la chaussée, que pour les autres éléments de la voirie, les gestionnaires ne disposent pas toujours d'informations harmonisées et organisées dans un même format numérique. Finalement, nous avons remarqué que la problématique des réseaux techniques est peu mise en avant lors du processus de dimensionnement des éléments de voirie. Au mieux, des recommandations ponctuelles sont fournies pour l'usage de matériaux spécifiques tels que par exemple les MIDND.

Compte tenu de ces éléments, la base de données voirie devra être enrichie à minima à l'aide d'une information générale sur la structure, et au mieux de l'ensemble des informations liées aux différentes couches, telles que la nature des matériaux et leurs épaisseurs (**Figure 9-4**).



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 9-4 – Synthèse modèle de données

10. La voirie selon son aspect : Quels choix de revêtements ?

Les revêtements correspondent à la couche superficielle de surface. Dans le cas d'une chaussée, il s'agit de la couche de roulement (***Cf. Figure 9-1, p.171***). À notre connaissance, il n'existe pas de codes ou de normes strictes concernant l'emploi d'un revêtement plutôt qu'un autre. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux matériaux utilisés pour la confection des revêtements initiaux de voirie et non aux matériaux utilisés essentiellement pour les réparations tels que les matériaux autoplaçants (Abdo 2008).

1) Dans une première section, nous présentons les critères utilisés par les gestionnaires pour choisir les revêtements de voirie.
2) Dans une seconde section, nous présentons les matériaux les plus courants, ainsi qu'une classification pertinente de ces matériaux, pour la question d'une co-gestion et co-maintenance entre voiries et réseaux.

Ce travail d'analyse et de synthèse est réalisé à partir d'une revue bibliographique établie autour de documents techniques généraux et locaux :

- des services d'État tels que le Cerema proposent des guides de recommandations d'usages pour les revêtements les plus courants, comme le guide technique des revêtements des espaces publics (Cerema 2018a) ;
- localement, des collectivités, notamment les métropoles, établissent des guides spécifiques à leur contexte régional. Par exemple, Bordeaux Métropole et Lille Métropole ont publié respectivement le guide de conception des espaces publics métropolitains (A'urbae et Bordeaux Métropole 2017) et le catalogue des matériaux de voirie et d'espaces publics (Lille Métropole 2003).

10.1. Les critères pour choisir un revêtement

En plus de permettre une lecture efficace du partage de l'espace, les revêtements participent au cadre de vie urbain. Ils lui confèrent du caractère en mettant en valeur, par exemple, des éléments culturels ou patrimoniaux, notamment à l'aide de couleurs ou de matériaux naturels (Cerema 2016). Il existe une grande variété de revêtements ayant des qualités différentes (Ossola 2010 ; Abdo 2014 ; Cerema 2018a). Ainsi, il est essentiel pour les gestionnaires de voirie de connaitre leurs propriétés afin de réaliser un choix éclairé pour la conception et l'aménagement de la voirie. Nous constatons à travers les guides d'aménagement de la voirie urbaine, que le choix du revêtement est réalisé selon une approche multicritère prenant en compte en premier lieu différentes propriétés de performance des matériaux. Les performances concernent la sécurité des usagers, le confort, la résistance de l'infrastructure à des phénomènes extérieurs tels que le climat ou le trafic, la mise en œuvre ou encore l'entretien. Ces critères de sélection se retrouvent dans

les guides classiques de conception des chaussées routières, et ne sont donc pas spécifiques à des problématiques urbaines. Nous observons cependant que d'une part, certains sont réadaptés aux problématiques urbaines, tels que le confort des usagers, qui est élargie à tous les usagers rencontrés en ville et amène donc à des niveaux d'exigence différents ; d'autre part, que des critères plus spécifiques à l'urbain sont ajoutés, tel que l'esthétisme. Ainsi, nous présentons dans une première sous-section le choix du revêtement selon ses caractéristiques, et dans une deuxième sous-section le choix du revêtement selon ses performances et ses domaines d'emploi.

10.1.1. Le choix d'un revêtement : ses caractéristiques

Les usagers directs de la voirie, c'est-à-dire ceux qui utilisent une fonctionnalité de la voirie, ne sont pas les seuls acteurs concernés par la voirie. Deux autres catégories d'acteurs sont classiquement identifiées : – d'abord les différents intervenants techniques et gestionnaires de l'infrastructure ; – ensuite, les riverains, c'est-à-dire, les commerçants, et les habitants, qui entretiennent un lien étroit dû à leur contiguïté avec la voirie. Ceci est d'autant plus vrai en ville que la voirie est au centre du système complexe que forme la ville. Ainsi, elle est à la fois support de multiples activités, infrastructure de liaison, et lieu de vie. Certaines performances concernent alors spécifiquement les usagers, tandis que d'autres sont liées aux riverains, ou encore aux gestionnaires (Leroy 2012) (**Tableau 10-1**).

Tableau 10-1 – Comparaison des caractéristiques recherchées pour les revêtements de voirie selon les trois catégories d'acteurs (usagers, riverains, gestionnaires)

CARACTÉRISTIQUES			
SÉCURITÉ USAGER	X	0	X
CONFORT	X	X	X
RÉSISTANCE	0	0	X
MISE EN ŒUVRE & ENTRETIEN	0	0	X
ASPECT ENVIRONNEMENTAL	0	0	X

Sources : Leroy 2012 / Auteur : A. Pavard, 2020

Pour tous les usagers, l'infrastructure doit être sûre et confortable. Ces notions de sécurité et confort se traduisent au niveau des revêtements par différentes propriétés. D'abord, l'adhérence, qui réduit la glissance tant des véhicules que des piétons, est décrite à l'aide d'indicateurs, la

macrotexture et la *microtexture* (**Cf. Glossaire, p. 20**) relatifs à la texture du revêtement (Aussedat et al. 2003 ; IDRRIM et Cerema-DTecITM 2016). Ensuite, viennent la *stabilité* et *planéité*, nommée « uni », lorsqu'il s'agit d'un revêtement de chaussée (**Cf. Glossaire, p. 20**). Sa qualité évite les déséquilibres ou facilite le maintien d'une trajectoire (Cerema 2018a), et a donc une incidence sur la sécurité ou le confort selon le type d'usager.

Les riverains sont quant à eux impactés par des nuisances dues à leur proximité de la voirie, telles que le bruit résultant du frottement avec les pneumatiques (Sandberg et Descornet 1980 ; Li et al. 2016), ou encore par la chaleur liée à la conductivité thermique des matériaux, notamment à travers les îlots de chaleurs (Stempihar et al. 2012 ; Hendel et al. 2015). L'esthétisme auquel la propreté est associable sont également des critères importants pour cette catégorie d'individus (Vlès, Berdoulay, et Clarimont 2005).

Enfin, les aménageurs et gestionnaires de voirie, doivent tenir compte des différentes attentes des usagers et des riverains pour choisir les revêtements, ce qui nécessite parfois des compromis : les propriétés permettant de sécuriser la circulation des usagers s'avèrent parfois inconfortables pour les usagers eux-mêmes ou pour les riverains. Par exemple, un revêtement de chaussée permettant une bonne adhérence peut entrainer un inconfort de circulation ou des nuisances sonores. D'autre part, outre les performances des matériaux aux conditions de service, les gestionnaires doivent aussi tenir compte des conditions de mise en œuvre et d'entretien des revêtements. En milieu urbain, la rapidité de mise en œuvre, et la facilité d'entretien sont particulièrement importants, et ce dans la mesure où les travaux deviennent souvent sources de nuisances. Les interventions sur voirie, selon les techniques utilisées et leurs délais d'exécution ont une incidence sur la circulation, ainsi que sur le cadre de vie avec des impacts visuels, olfactifs et sonores. Un programme de recherche, le projet FURET portant sur les chantiers en milieu urbain, a été mené entre 2009 et 2013. Ce projet associe des métropoles, des gestionnaires de réseaux techniques, des entreprises routières et des écoles d'ingénierie (Debreu 2013 ; Lille Métropole 2013 ; Christory 2015). Il a permis d'identifier des leviers d'action pour réduire l'impact des chantiers urbains, et les rendre plus furtifs et plus acceptables : – en améliorant la communication à destination des riverains, – en préconisant des solutions techniques et méthodes de travail permettant de limiter les gênes occasionnées.

Au cours de la dernière décennie, de nouveaux critères de performance ont émergé, tels que les impacts environnementaux. La Métropole de Bordeaux, par exemple, mentionne comme critères de choix, la recyclabilité ou encore la perméabilité des revêtements favorisant ou non l'évacuation des eaux pluviales, mais également l'infiltration des hydrocarbures (A'urbae et Bordeaux Métropole 2017).

10.1.2. Le choix d'un revêtement : performances et domaines d'emploi

Les caractéristiques de sécurité, de confort, de durabilité, de mise en œuvre et d'entretien, et d'aspect environnemental dépendent eux-aussi, des propriétés d'usage des éléments constitutifs de la voirie. On parle alors de domaine d'emploi des revêtements. À partir de guides techniques nous avons identifié les principales caractéristiques et performances attendues. Nous avons ensuite choisi un vocabulaire commun et proposons un tableau de synthèse qui présente les attentes, bien que toutes ne soient pas toujours partagées entre les métropoles (**Tableau 10-2**).

Tableau 10-2 – Caractéristiques des revêtements selon les propriétés d'usage

		ESP. PIÉTON			ESP. CYCL.		CHAUSSÉE			STATIO.		CHAUS. BUS	
CARACT.	**PERFORMANCES**												
SÉCURITÉ [1]	Adhérence (Texture) [1]	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X
	Stabilité [1]	0	X	X	0	0	0	0	0	0	X	0	0
	Uni / Planéité [1/2]	0	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	0
	Sans émergence [1]	0	X	X	0	X	0	0	X	0	X	0	0
CONFORT [2]	Marquabilité [1]	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Drainabilité [1/2]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Confort (Texture) [2]	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0
	Conductivité thermique [2]	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	0	0
	Bruit [2]	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	X	0
RÉSISTANCE [3]	Esthétisme [2]	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Propreté (Nettoyabilité) [2]	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0
	Mécanique (orniérage, cisaillement) [3]	0	0	0	0	0	X	X	0	X	0	X	0
MISE EN ŒUVRE [4]	Trafic occasionnel [3]	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0
	Trafic lourd [3]	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	X	0
	Hydrocarbures [3]	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	X	0
	Climatique (Gel / Degel) [3]	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	X	0
	Imperméabilisant [3]	0	0	0	0	0	X	X	0	X	0	X	0
	Espaces restreints [4]	X	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0
ENTRETIEN [5]	Délais [4/5]	0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	0
	Durée de vie [5]	0	0	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0
	Réparabilité [5]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Nettoyabilité [5]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Une performance peut être liée à plusieurs caratéristiques : la numérotation permet d'identifier les liens entre performance et caractéristique

Sources : Lille 2003 ; Toulouse 2008 ; Lyon 2010 ; Bordeaux 2017 ; Cerema 2018a

Auteur : A. Pavard 2020

Un trottoir ne subit pas les mêmes contraintes, notamment mécaniques qu'une chaussée. En effet, une chaussée doit être revêtue d'un matériau résistant aux contraintes induites par des pneumatiques et des charges importantes de façon à limiter les dégradations telles que les pertes d'adhérence et les déformations (***Cf. 11, p.204***). Un trottoir ne supportant que des piétons ne nécessite pas une résistance mécanique importante. Les dimensions de la surface à revêtir ont également un impact sur la mise en œuvre et l'entretien des matériaux. Les chaussées mesurent en moyenne 4 à 7,5 mètres de largeur (Cerema 2016), et ne présentent généralement pas d'obstacles. Des véhicules de travaux peuvent circuler aisément pour aider à la mise en œuvre et l'entretien des revêtements. En revanche, pour les éléments constitutifs de la voirie plus étroits,

tels que les trottoirs, des précautions doivent être prises. La présence de mobiliers urbains tels que les bancs peut complexifier l'entretien et empêcher l'usage de matériel mécanisé imposant. Les matériaux utilisés doivent donc répondre aux contraintes de mise en œuvre et d'entretien. Par ailleurs, un même élément constitutif est souvent partagé entre plusieurs usagers. Un espace piétonnier est circulé par des piétons, des personnes à mobilité réduite (PMR), et parfois par des usagers de modes doux tels que les trottinettes ou les rollers. Tous n'ont pas les mêmes besoins en termes de confort et de sécurité. Un revêtement non stable ou avec des émergences a moins d'incidences sur un piéton que sur un PMR ou un usager mode doux (Ferreira et da Penha Sanches 2007). Les revêtements doivent alors être choisis selon les contraintes liées aux éléments constitutifs de la voirie et leurs usages. Enfin, le choix des revêtements est réalisé selon le partage en surface de la voirie, mais également selon la structure qu'il faut préserver (***Cf. 11, p.204***).

Nous constatons qu'en termes d'usage de la voirie, pour les choix des revêtements, les usages en sursol sont principalement cités, et notamment les mobilités. Cependant, la présence de réseaux techniques enterrés peut également avoir un impact sur le choix des revêtements et l'évolution de leurs performances. En effet, compte tenu de la nécessité d'accéder à ces réseaux, les revêtements doivent a priori être manipulables et réparables aisément, et ce, avec des coûts raisonnables. Le Setra mentionnait la spécificité du milieu urbain dans un document de 1988 relatif à la réhabilitation des chaussées en traversée d'agglomération. Notamment, il relevait le besoin de prendre en compte les réseaux divers (Setra 1988). À ce sujet, il est indiqué que la réhabilitation est un point essentiel devant guider le choix des revêtements en cas de présence de réseaux enterrés. Concernant la réhabilitation, le terme *réparabilité* est couramment utilisé. Il s'agit de la plus ou moins grande facilité à réparer une partie des revêtements.

Plus récemment, le Certu dans son guide méthodologique et pratique d'entretien des chaussées urbaines indiquait que les tranchées relatives aux réseaux enterrés et réalisées sur la voirie endommageaient les revêtements (Certu 2010). Les recommandations nationales du Setra et du Certu s'arrêtaient à ces constats sans proposer plus de recommandations. À l'échelle locale, nous remarquons que des collectivités pointent davantage la problématique des réseaux enterrés pour le choix des revêtements : par exemple, la Métropole de Lyon, dans son guide technique, présente les impacts que peut avoir la présence de réseaux sous la voirie sur la durée de service des revêtements. En effet, lors de levés photographiques (***Cf. 12, p. 220***), nous observons sur le terrain, que les interventions répétées sur les réseaux engendrent un morcellement des revêtements en autant de rustines que de tranchées remblayées. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le revêtement est peu réparable. Cette situation conduit à un patchwork de revêtements (**Figure 10-1 a et b**). Par ailleurs, au-delà de l'aspect esthétique, les interventions sur réseaux peuvent entrainer des dégradations superficielles ou structurelles de voirie (***Cf. 11.1, p. 204***). Ces

dégradations nécessitent alors une reprise intégrale du revêtement, ou une réhabilitation de la structure (**Figure 10-1 c**). Ainsi, l'information sur la réparabilité d'un revêtement dans les guides techniques est en partie liée implicitement à la présence de réseaux enterrés.

Source : A. Pavard, 2018

Figure 10-1 – Chaussée et trottoir après intervention sur réseaux

Les critères présentés sont généralement tous repris par les gestionnaires de voirie. Nous constatons que chacun se les approprie et en fait une synthèse différente en détaillant ou non certains points (**Cf. Annexe I, p. 350**). Ainsi, nous notons à travers les exemples de Lille, Lyon et Toulouse des priorités différentes : – Lille insiste sur les aspects rendus possibles par les matériaux tels que les couleurs ou encore les finitions, leurs domaines d'application et les conditions d'approvisionnement ; – Lyon accorde plus d'importance à l'entretien et à la maintenance des revêtements ; – Toulouse se focalise sur les caractéristiques physiques et la mise en œuvre des matériaux. Finalement, les sensibilités de chaque gestionnaire se retrouvent également dans la classification qu'ils proposent pour les matériaux.

10.2. Classification des matériaux de revêtement

Nous observons à travers nos exemples trois principales classifications des revêtements dans les guides techniques (**Tableau 10-3**). La première classification s'appuie sur la modularité des revêtements. Les revêtements modulaires sont prêts à l'emploi et à être posés par un simple assemblage de modules existants. Par opposition les matériaux non modulaires sont répandus en surface lors de la mise en œuvre sur le chantier. Ils sont constitués par le mélange de granulats – sables et graviers – et d'un liant pouvant être hydraulique ou non. Le terme béton est alors généralement utilisé. Lille et Bordeaux utilisent cette classification (Lille Métropole 2003 ; A'urbae et Bordeaux Métropole 2017). La deuxième classification décompose également les revêtements en modulaires et non modulaires mais affine cette distinction selon la nature des matériaux les constituant. Le Cerema, le Pays Gâtine Parthenay, et Lyon ont recours à cette classification (Grand Lyon 2010 ; Pays de Gâtine Parthenay 2011 ; Cerema 2018). Enfin, la dernière classification est basée sur le domaine d'application des revêtements : par exemple les

revêtements pour les trottoirs ou pour les chaussées. Le guide technique de Toulouse en est un exemple (Ville de Toulouse 2008).

Nantes ne propose pas de classification particulière et s'appuie essentiellement sur le guide de conception et de dimensionnement des structures de chaussée de 1994 (LCPC et Setra 1994) pour présenter les revêtements. Nous remarquons que la différenciation modulaire et non modulaire est utilisée presque exclusivement en milieu urbain. Ceci s'explique par la faible utilisation des matériaux modulaires pour les autres voiries. Le catalogue des matériaux de voirie de Lille présente les matériaux modulaires comme particulièrement intéressants pour les interventions sur réseaux par tranchée. En effet, leur caractère modulaire donne la possibilité de les démonter et remonter en limitant l'impact visuel final. À l'inverse, les revêtements courants, non modulaires sont moins adaptés dans ces situations : soit ils présentent des raccords inesthétiques après interventions en donnant un aspect rustine, ou patchwork aux chaussées et trottoirs (Lille Métropole 2003) ; soit le délai et les contraintes de mise en œuvre ne sont pas adaptées pour des rénovations ponctuelles (Grand Lyon 2010).

Tableau 10-3 – Classification des matériaux selon les gestionnaires ou organismes

Gestio. / organisme	Classes	Modélités
Lille Métropole **Bordeaux Métropole**	**Classification selon la modularité**	✓ Matériaux modulaires ✓ Matériaux non modulaires
Pays de gâtine parthenay **Cerema** **Lyon Métropole**	**Classification selon la modularité avec éclatement de la classe « non modulaires » selon la nature de leur liant, et « modulaires » selon la nature des modules**	➔ **Non modulaires :** ✓ Asphaltes ✓ Revêtements bitumineux (Lyon : enrobés) ✓ Bétons de ciment ✓ Traitements de surface à base de résine (Lyon : Matériaux répandus) ➔ **Modulaires** : ✓ Pavés et dalles ✓ Autres revêtements (bois et alvéolaires) ➔ **Autres** : ✓ Revêtements sablés ✓ Mélanges terre – pierre
Toulouse Métropole	**Classification selon l'espace de voirie à revêtir**	✓ Matériaux de revêtement – trottoir ✓ Matériaux de revêtement – chaussée

Sources : Lille 2003 ; Toulouse 2008 ; Lyon 2010 ; Gâtine Parthenay 2011 ; Bordeaux 2017 ; Cerema, 2018

Ainsi, la modularité d'un revêtement est liée à sa réparabilité. Ce critère apparait essentiel pour la problématique des réseaux enterrés. La distinction entre matériaux modulaires et non

modulaires est alors pertinente dans la mesure où elle permet d'identifier rapidement les revêtements démontables et donc les plus aisément réparables lors d'interventions sur réseaux enterrés. Cependant, au sein de ces deux grandes classes, il existe des matériaux ayant des spécificités rendant leur usage plus ou moins approprié selon les fonctionnalités des espaces de voirie.

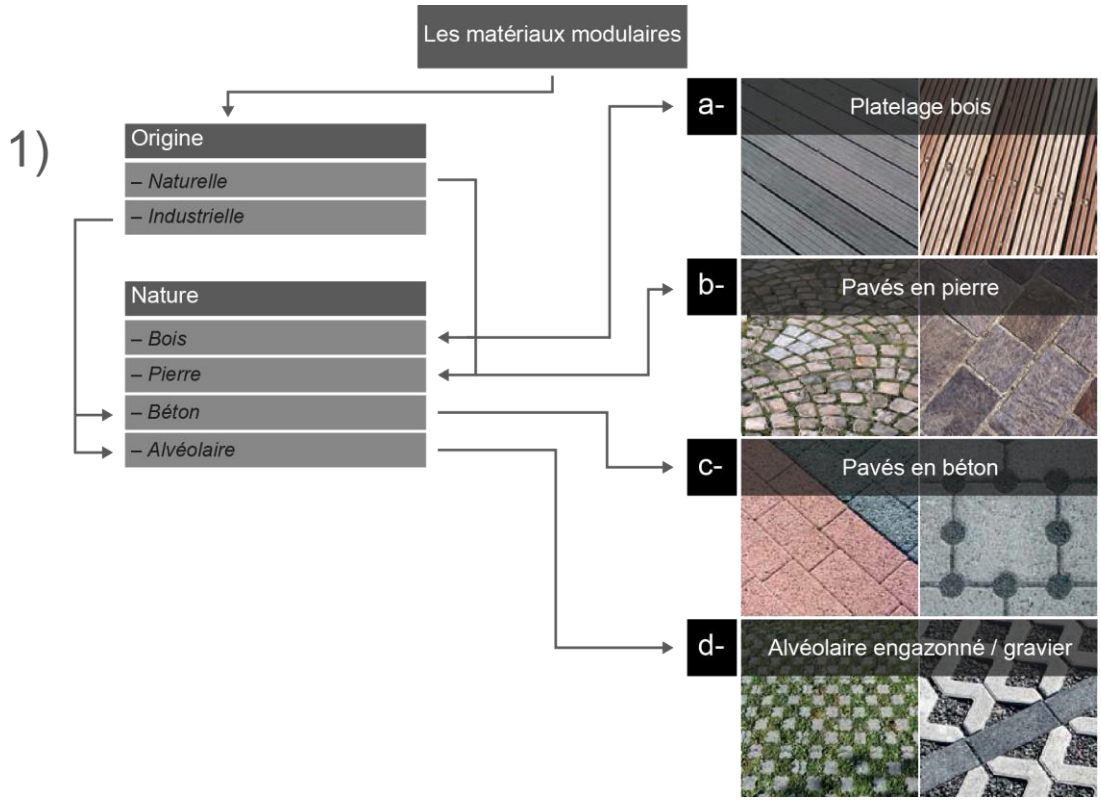
Nous présentons ci-après les matériaux de revêtement. Dans une première sous-section, nous abordons les matériaux modulaires, et dans une seconde, les matériaux non modulaires.

10.2.1. Les matériaux modulaires

Selon les guides des collectivités, les matériaux modulaires sont particulièrement adaptés au milieu urbain, notamment par leur diversité d'aspects qui permet de mettre en valeur et différencier les espaces. Il est ainsi possible de varier les modules selon : leur origine et leur nature, leurs caractéristiques (telles que la couleur, les dimensions, les formes et les finitions), ou encore leur agencement.

L'origine est soit naturelle, avec des matériaux prétaillés tels que le bois (**Figure 10-2 a)** et la pierre (**Figure 10-2 b)**, soit industrielle avec des matériaux de type béton de ciment modulaire (**Figure 10-2 c)** et les alvéolaires (**Figure 10-2 d)**.

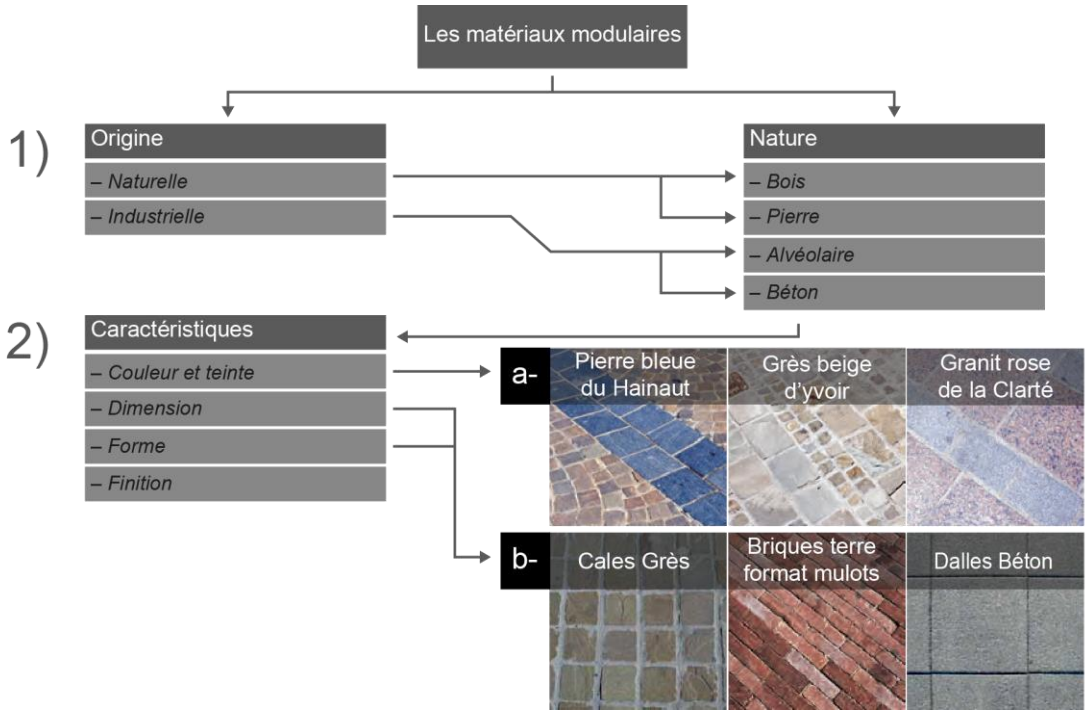
Un béton de ciment classiquement appelé béton, est un matériau plein constitué d'un mélange de granulats et d'un liant hydraulique, le ciment. Un alvéolaire, est lui, constitué de dalles ajourées. Ces dalles sont confectionnées en béton, brique ou plastique et garnies d'un substrat de végétaux ou de granulats. La nature des modules est choisie selon les fonctionnalités de l'espace à revêtir. Ainsi, les alvéolaires sont utilisés pour des espaces peu circulés, principalement piétonniers ou de stationnement. Ces revêtements étant poreux, ils permettent une bonne infiltration des eaux pluviales. L'usage du bois est généralement réservé à des espaces piétons, et notamment des parcs ou des berges pour préserver le caractère naturel des lieux. Les modules en pierre naturelle ou en béton sont quant à eux employés pour les espaces piétonniers ou carrossables.



Sources : Bordeaux Métropole et A'urba, 2017 ; Lille Métropole, 2003

Figure 10-2 – Nature des matériaux modulaires

Ces modules se déclinent ensuite selon des caractéristiques. D'abord, il existe de nombreuses couleurs et teintes : pour la pierre selon ses origines – pour les bétons et les alvéolaires selon les granulats qui les composent ou les garnissent – pour les bois selon leurs essences. Cette variété facilite le partage de l'espace selon les fonctions qui lui sont attribuées, améliore l'esthétique et la mise en valeur des espaces tels que les lieux historiques (**Figure 10-3 a**). Ensuite, les modules prennent différentes tailles et formes (**Figure 10-3 b**). Les dimensions des modules, et notamment leur épaisseur ou leur forme, ont un impact sur les trafics qu'ils peuvent supporter. Pour l'épaisseur, les modules épais, c'est-à-dire d'au moins 6 cm sont recommandés pour un trafic faible (***Cf. 9.1, p. 170***), tandis qu'ils doivent être d'au moins 8 cm pour un trafic fort (Angers Loire Métropole 2016). Les modules les plus larges et les moins épais sont moins résistants, ils sont alors utilisés principalement pour les espaces piétonniers étendus tels que les places ou parvis. La forme des modules a également une incidence sur leur employabilité selon le trafic : les angles aigus et les profils étroits, plus fragiles, sont évités pour les espaces carrossables.

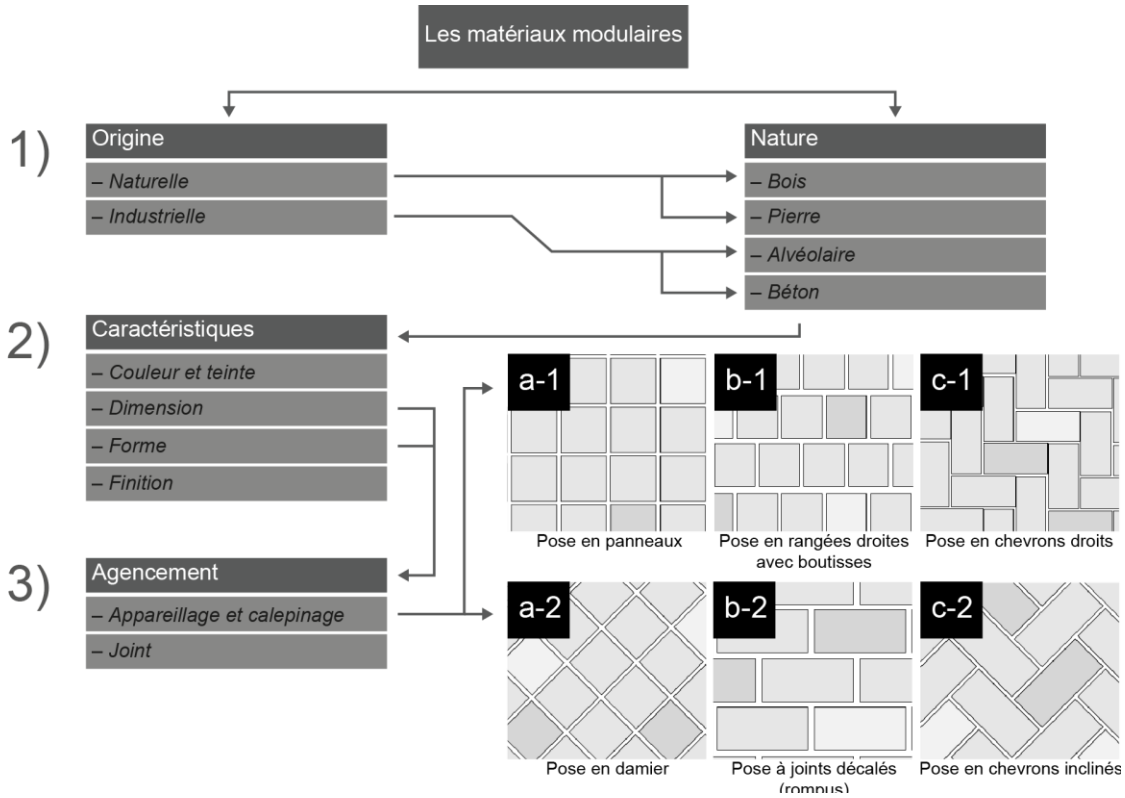


Sources : Bordeaux Métropole et A'urba, 2017 ; Lille Métropole, 2003

Figure 10-3 – Couleurs et dimensions des matériaux modulaires

Enfin, la finition des modules est également importante. Celle-ci en plus de donner des aspects visuels différents permet de renforcer ou de donner des propriétés particulières au revêtement final. Notamment, la rugosité, et donc l'adhérence du revêtement est renforçable ou atténuable. Les finitions sont classées selon une échelle de rugosité allant des finitions lisses aux finitions rugueuses.

Une fois les modules sélectionnés, le dernier critère concerne l'agencement des modules choisi selon le type d'usage (Ossola 2010). Il s'agit à la fois de la disposition des modules les uns par rapport aux autres, appelée appareillage et calepinage, mais également des joints utilisés (**Figure 10-4**).



Sources : Lille Métropole, 2003

Figure 10-4 – Appareillage ou calepinage des matériaux modulaires

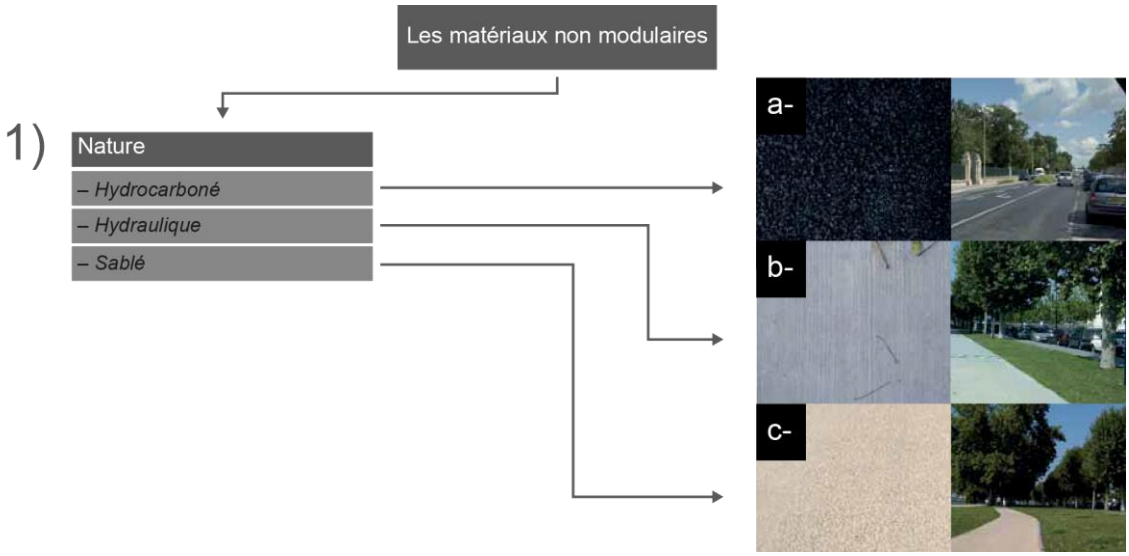
La pose des modules conditionne directement la durée de service des revêtements modulaires selon le trafic supporté (Pays de Gâtine Parthenay 2011). Par exemple, les pavés d'une chaussée carrossable subissent des déplacements, notamment lors de l'accélération et du freinage des véhicules. Pour limiter ces déplacements, il faut rompre les lignes de joints de façon à ce que chaque pavé s'appuie sur plusieurs autres pavés. Un appareillage à lignes de joints continus (**Figure 10-4 a**) est utilisable pour les zones piétonnes, tandis que pour supporter la circulation de véhicules, l'appareillage doit être à lignes de joints discontinues selon l'axe de circulation, pour un trafic léger (**Figure 10-4 b**) ou en chevrons pour un trafic plus important (**Figure 10-4 c**). Lors d'interventions sur voirie, il est essentiel que le revêtement de réfection respecte l'appareillage existant (Grenoble Alpes Métropole 2018). De la même façon, les joints sont réalisés selon l'usage de l'espace de voirie. Ils peuvent être perméables, lorsqu'ils sont enherbés ou constitués de granulats, ou imperméables lorsqu'ils sont réalisés à l'aide d'un matériau à base de liant. Les joints imperméables sont privilégiés pour les espaces circulés par des véhicules afin d'éviter l'infiltration d'hydrocarbures dans le sol. Au-delà de l'usage, le type de joint a une incidence sur la facilité de démontage des modules : pour le démontage, un joint perméable permet d'éviter de casser des modules, tandis qu'un joint imperméable nécessite de casser plusieurs modules. **De façon plus générale, des poses à joints rigides ne permettent pas toujours la récupération des pavés. Ainsi, en plus de la modularité des revêtements, la démontabilité de ces derniers**

est à prendre en compte. Les chaussées démontables sont davantage étudiées depuis le début des années 2000 (De Larrard et al. 2007 ; De Larrard 2009), et ce notamment pour des questions de rapidité des interventions. Pour autant, cette technologie est encore peu utilisée.

Nous constatons que le coût des modules s'étend d'une vingtaine d'euros au m² pour des alvéolaires à près de 300 euros au m² pour des modules de pierre naturelle ou de bois. Par ailleurs, l'importance de la production des modules est variable. Il est alors recommandé de choisir la nature, les couleurs ou teintes, les dimensions et les formes d'une part en limitant la diversité de façon à concevoir des stocks aisément, et d'autre part en s'assurant de la facilité d'approvisionnement. Ces deux critères sont essentiels pour la maintenance des revêtements. En effet, la dégradation naturelle des revêtements, mais aussi les interventions, notamment sur réseaux enterrés, conduiront à remplacer certains modules.

10.2.2. Les matériaux non modulaires

Les guides techniques consultés classent généralement les matériaux non modulaires en trois familles selon la nature du liant les composant : – les revêtements à liant hydrocarboné ou équivalent végétal, appelés aussi matériaux bitumineux (**Figure 10-5 a**) ; – à liant hydraulique, nommés bétons de ciment (**Figure 10-5 b**) ; – et enfin, les sablés liés ou non (**Figure 10-5 c**).



Sources : Bordeaux Métropole et A'urba, 2017

Figure 10-5 – Les trois familles de matériaux non modulaires

Le liant hydrocarboné utilisé en industrie routière est issu du pétrole (**Cf. Annexe G, p. 346**). Le bitume est un matériau de couleur noire, visqueux voire presque solide à température ambiante.

Il est agglomérant et adhésif, imperméable, et son comportement mécanique (de solide élastique à fluide visqueux) dépend de la température et fréquence de sollicitation (**Cf. Glossaire, p. 20**). Le mélange entre les granulats et le liant, ainsi que la mise en œuvre sont réalisés à différentes températures et permet de réaliser des enrobés par exemple : – à chaud, le bitume fluide est mélangé à une température supérieure à 130°C ; – à froid, le bitume est préparé sous forme d'émulsion liquide et manipulable à moins de 60 °C. Après mise en œuvre, un délai est nécessaire avant la remise en circulation, dépendant du type de technique. On parle alors de temps de refroidissement pour les matériaux réalisés à chaud ou de temps de rupture pour les émulsions. En France, les matériaux à chaud sont toujours les plus utilisés, du fait notamment d'un temps de remise en circulation rapide et du fait d'un grand nombre d'installations industrielles sur tout le territoire. D'autres liants d'origine végétale ont été développés. Ces liants de couleur miel sont peu utilisés (Pays de Gâtine Parthenay 2011), à cause de leur prix. Leur couleur clair permet de les distinguer aisément des matériaux bitumineux, de les colorer aisément par l'ajout de pigments et les rend particulièrement intéressants pour identifier les espaces réservés aux modes doux. Leurs caractéristiques de souplesse les rendent également confortables et conduisent certains à les utiliser en remplacement des matériaux à liant hydraulique.

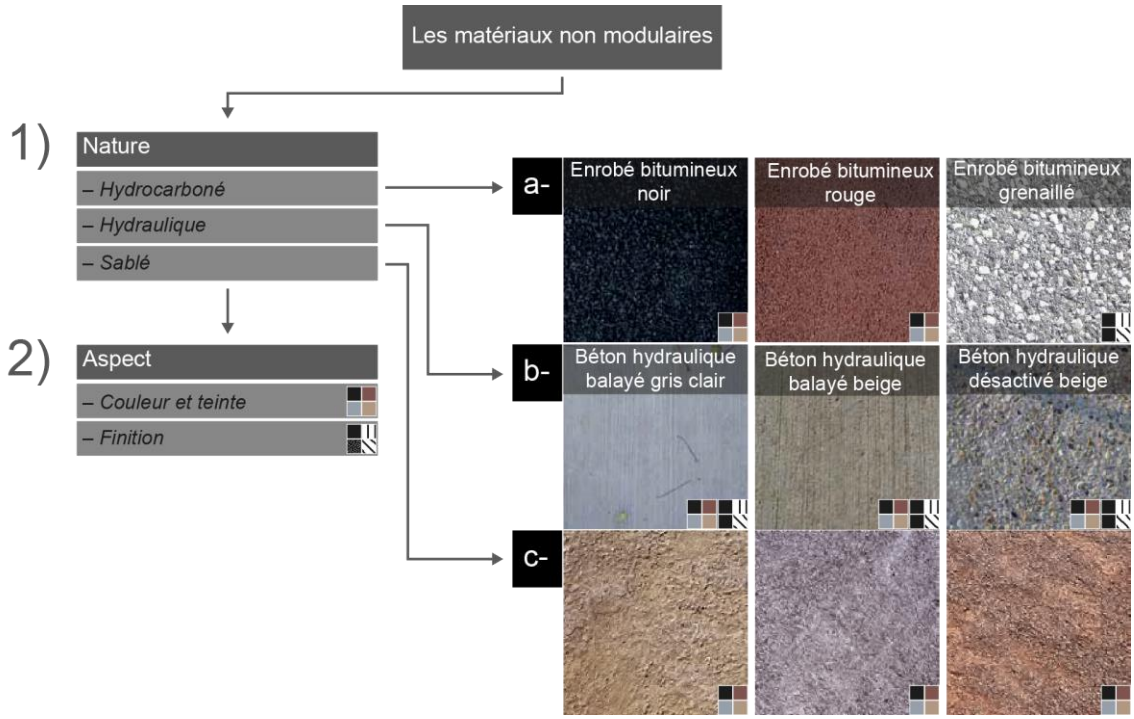
Les bétons à liant hydraulique, sont appelés matériaux blancs en opposition aux matériaux noirs, les matériaux hydrocarbonés. Ils sont plus rigides compte tenu de l'emploi du ciment. Dans certains pays comme en Allemagne ou en Amérique du Nord, ils sont utilisés classiquement pour les revêtements de chaussée de par leur forte durabilité. Toutefois leur rigidité les rend davantage sujets aux fissurations. Des traitements particuliers sont alors nécessaires afin de limiter ces dégradations tels que par exemple la fissuration contrôlée. Cette méthode consiste à pré-fissurer le revêtement et à combler les sillons à l'aide d'un mastic constitué d'un liant hydrocarboné par exemple, afin d'assouplir le revêtement. En France, ils sont particulièrement utilisés en milieu urbain pour des lieux spécifiques ou emblématiques, tels que des centres historiques ou culturels qu'ils mettent en valeur grâce aux différentes finitions qu'ils permettent. Ils sont également utilisés pour les espaces de mobilités douces ou espaces à mobilité mixte. Les bétons sont mis en œuvre à température ambiante, le temps de séchage important, lié à la prise hydraulique est contraignant pour la remise en circulation. À ce titre, la Métropole du Grand Lyon les déconseille en cas de présence importante de réseaux enterrés. Les interventions sur les réseaux et le temps de séchage suite à la rénovation du revêtement seraient trop astreignants.

Enfin, les revêtements sablés, constitués uniquement de sable, sont des revêtements stabilisés. En d'autres termes, ils se maintiennent en l'état de façon durable. Afin de limiter son aspect pulvérulent, et éviter l'apport de sable dans les réseaux d'assainissement, le sable est parfois stabilisé à l'aide d'un liant. Le choix du liant est alors fait selon la couleur du sable et sa porosité,

il est soit minéral tel que la chaux ou le ciment, soit synthétique. Les revêtements sablés, par leur aspect naturel, sont principalement utilisés dans des espaces paysagers, à destination des piétons tels que des places, ou des espaces de jeux, ou encore pour des circulations douces ou très faibles.

Chacune de ces trois familles comportent plusieurs sous familles de revêtements, se distinguant par trois paramètres principaux concernant le liant, les granulats, et l'épaisseur finale du revêtement. La variation de ces paramètres permet de constituer des revêtements d'aspects et de caractéristiques différents.

Différents aspects sont réalisables par modification du liant et par sélection de granulats (**Figure 10-6)**. Les aspects facilitent le partage de la voirie, bien que cela ne soit pas codifié à l'échelle nationale. En plus, ils permettent à l'aide de couleurs ou teintes claires, d'une part de limiter les effets d'îlots de chaleur en réduisant l'effet albédo, et d'autre part de diminuer l'éclairage public et donc la consommation d'énergie. La couleur noire du bitume est liée à la présence de particules solides et noires, les asphaltènes. Ceux-ci prédominent dans le mélange avec les granulats, et produisent systématiquement un revêtement noir. Afin de modifier la couleur des revêtements bitumineux noirs, l'utilisation de pigments tels que utilisés avec les liants végétaux est envisageable ou alors le bitume noir est remplacé par un liant pétrolier de synthèse clair.



Sources : Lille Métropole 2003 ; Gâtine Parthenay 2011 ; Bordeaux Métropole et A'urba 2017

Figure 10-6 – Couleurs et finitions des matériaux non modulaires

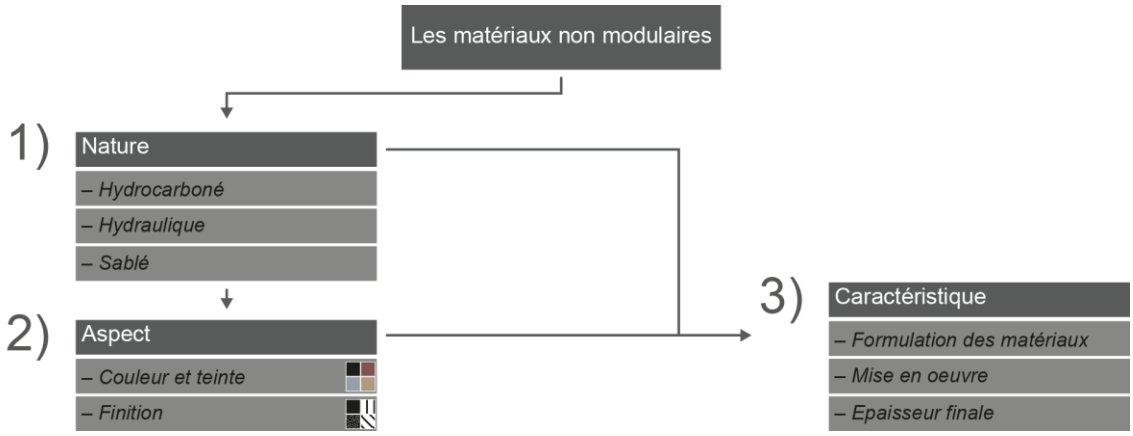
Parmi les pigments classiquement utilisés, nous relevons les pigments d'oxyde de fer pour le rouge, d'oxyde de chrome pour le vert ou encore d'oxyde de titane pour le blanc. Une deuxième méthode consiste à choisir la couleur en se calant sur celles des granulats et procéder à un grenaillage qui permet, par exemple, de faire ressortir les granulats en éliminant le liant en surface (**Figure 10-6 a**) (Bertrand 2002). Le liant hydraulique est constitué d'un ciment blanc ou gris. Sa couleur est modifiable par l'ajout d'adjuvant, c'est-à-dire de colorants. Ce procédé est autorisé à condition de conserver une couleur existante dans la nature. De la même façon que pour les revêtements à liant hydrocarboné, une finition en surface permet de faire ressortir de façon plus ou moins importante les granulats et donc leur couleur (**Figure 10-6 b**). Le procédé sur les revêtements à liant hydraulique a comme pour les matériaux modulaires un impact sur l'adhérence du revêtement. In fine, la couleur des revêtements sablés dépendra essentiellement du sable utilisé (**Figure 10-6 c**).

Ces opérations modifiant la couleur, augmentent le coût des revêtements. L'utilisation de pigments d'oxyde de fer, le moins onéreux, multiplie par exemple par deux le prix d'un revêtement bitumineux. Lors d'interventions, notamment sur des réseaux localisés sous des revêtements colorés, la réfection ponctuelle du revêtement soulève deux problèmes : d'une part le coût lié à la production d'une petite quantité d'un matériau bitumineux coloré conduit parfois le gestionnaire à utiliser un matériau bitumineux classique noir pour les réparations (**Figure 10-7 a**) (Pays de Gâtine Parthenay 2011), d'autre part le raccord de couleur avec l'enrobé en place est difficile (**Figure 10-7 b et c**). Les pigments sont sensibles aux UV du soleil et perdent de leur intensité au cours du temps. Il est alors difficile de reproduire un matériau avec la même teinte.

Auteur : A. Pavard, 2019

Figure 10-7 – Difficultés de rénovation des revêtements colorés

Au-delà de la question de la couleur, les caractéristiques des revêtements sont principalement liées à : – la formulation des matériaux, c'est-à-dire à la granularité et à la quantité de liant ; – à la réalisation du revêtement (mise en œuvre) ; – à l'épaisseur finale du revêtement (**Figure 10-8**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 10-8 – Les matériaux non modulaires : l'obtention de leurs caractéristiques

En regroupant les matériaux bitumineux selon leur température de mise en œuvre, nous identifions deux principaux types de revêtement de surface selon la température d'application :

- à chaud sont par exemple les asphaltes coulés (AT pour trottoir ou AC pour chaussée) et les bétons bitumineux (BB) qui se déclinent eux-mêmes en semi-grenu (BBSG), à module élevé (BBME) drainants (BBDr), minces (BBM), et très minces (BBTM) ;
- à froid sont les Enduits Superficiels d'Usure (ESU), et certains enrobés bitumineux déclinés en Matériaux Bitumineux Coulés à Froid (MBCF) et Bétons Bitumineux à l'Émulsion (BBE).

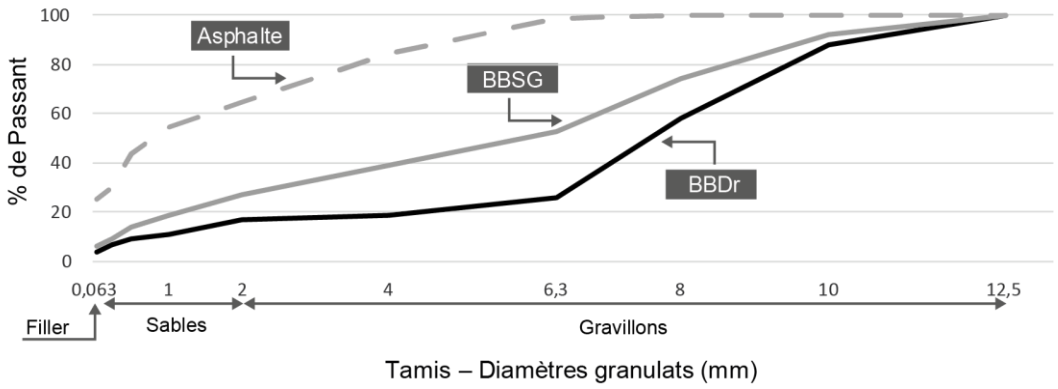
À travers les guides techniques locaux nous constatons que ces revêtements ne sont pas toujours tous identifiés et présentés tels que nous pouvons le voir dans le **Tableau 10-4** de synthèse.

Tableau 10-4 – Différentes présentations des revêtements à liant bitumineux

	Cerema	Lille	Bordeaux	Lyon	Toulouse	Gâtine*
BBDr	☒	Regroupés en *Enrobés*	Regroupés en *Bétons Bitumineux*	Regroupés en *Béton Bitumineux*	☑	☑ Regroupés en *Enrobés noirs colorés ou grenaillés*
BBM	☑			☑	☑	
BBSG	☑				☑	
BBTM	☑				☑	
BBME	☑				☑	
MBCF	☑				☒	
BBE	☑				☒	
Asphalte	☑	☑	☑	☑	☑	☒
ESU	☑	☒	☑	☑	☒	☑
Spécificités locales	☒	☒	☒	☒	Béton Bit. Tiède (BBT) Béton Bit. phonique Coulis Bitumineux	☒
	☑ Matériaux présentés / ☒ Matériaux non présentés * Gâtine Parthenay					

Sources : Lille 2003 ; Toulouse 2008 ; Lyon 2010 ; Gâtine Parthenay 2011 ; Bordeaux 2017 ; Cerema, 2018

Concernant la formulation des matériaux, nous nous bornons ici à présenter le principe général. Pour plus de détails sur chaque revêtement, nous renvoyons aux différents guides techniques et normes les décrivant. Les matériaux bitumineux sont généralement constitués de 95% en masse de granulats et 5% en masse de liant bitumineux. Les granulats varient selon deux paramètres principaux : – leur nature qui détermine notamment la qualité des matériaux, notamment pour les revêtements de surface la résistance au polissage ; – leurs tailles, sélectionnées selon des besoins spécifiques et normées en classes granulaires, utilisées pour la confection des matériaux bitumineux. Lors de la confection de chaque type de matériau, un squelette granulaire est constitué à partir de granulats de différentes tailles appelés gravillons, sables et filler. Une discontinuité dans la formulation (**Figure 10-9**), créée par l'absence d'une taille intermédiaire de granulats permet de créer des vides dans la formulation et confère au matériau des caractéristiques de surface intéressantes telles que la rugosité, la drainabilité (BBDr) ou encore des performances acoustiques (Corté et Benedetto 2004 ; Benedetto et Corté 2004). Les BBDr conviennent peu au milieu urbain. Les vides se colmatent facilement avec des pollens, des feuilles ou d'autres matériaux volatiles présents à proximité (Grand Lyon 2010). À l'opposé des BBDr, les Asphaltes coulés sont des matériaux produits en mélangeant un squelette granulaire composé en grande partie (25% en masse) de filler (matériau très fin), au liant de façon à former un revêtement compact et imperméable. En France, il est utilisé presque exclusivement en milieu urbain. Compte tenu de ces caractéristiques, il est essentiellement appliqué sur les trottoirs ou sur certaines chaussées. Entre le BBDr et l'Asphalte coulé figure le BBSG, l'un des bétons bitumineux les plus utilisés en technique routière et notamment en revêtement de chaussée urbaine. Nantes le précise dans son guide en soulignant qu'il offre de multiples possibilités d'usages (Communauté urbaine Nantes Métropole 2012). Finalement, le pourcentage massique de liant bitumineux est défini selon des critères permettant au produit fini de garantir les performances attendues.



Sources : Interne IRC

Figure 10-9 – Exemples de courbes granulométriques (Asphalte, BBSG, BBDr)

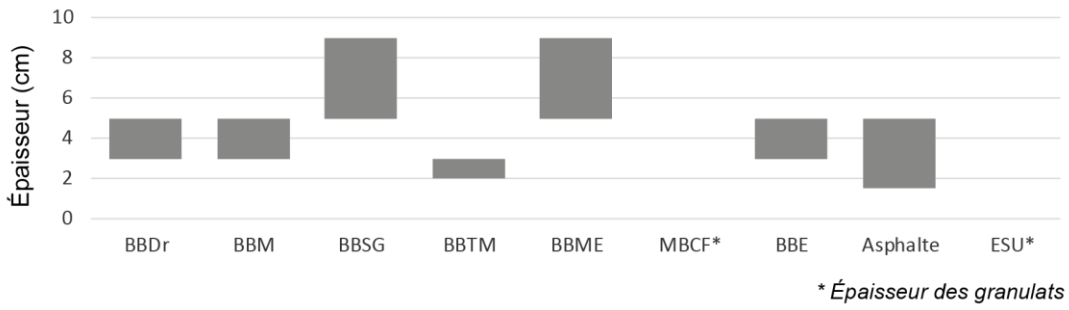
La fabrication du matériau bitumineux se réalise soit en centrale d'enrobage et est transporté sur le chantier pour les matériaux enrobés à chaud, soit en centrale de blanc ou sur place pour les matériaux à froid. L'application du revêtement varie ensuite selon la surface à revêtir, et l'espace disponible, et selon le revêtement à appliquer : application manuelle souvent pour les petites surfaces, par exemple à l'aide d'un râteau (**Figure 10-10 a**), et application mécanisée à l'aide d'un finisseur, par exemple, pour les grandes (**Figure 10-10 b**). Ensuite, le compactage permet d'obtenir l'épaisseur et la compacité visée dans le matériau pour garantir les propriétés souhaitées selon le revêtement (**Figure 10-10 c**). Enfin, d'autres revêtements tels que l'asphalte coulé sont appliqués sur les trottoirs manuellement à l'aide d'une taloche et ne nécessitent pas de compactage.

Sources : A. Fabre, 2016

Figure 10-10 – Application d'un revêtement bitumineux

L'application d'un enrobé bitumineux après intervention sur réseau enterré est souvent délicate. Les emprises à recouvrir étant généralement étroites, un revêtement nécessitant un compactage est moins aisé à mettre en œuvre et nécessitent un matériel adapté. Par ailleurs la mise en œuvre de joints de raccord sera importante afin d'éviter l'infiltration d'eau dans la structure et le sol support.

Les revêtements bitumineux une fois mis en œuvre présentent des épaisseurs différentes selon les performances mécaniques attendues (**Figure 10-11**). Des revêtements minces à très minces, dont l'épaisseur est inférieure à trois centimètres sont plus fréquemment utilisés pour des espaces piétonniers ou cyclables voire des chaussées à faible trafic. Des revêtements plus épais sont utilisés pour des chaussées supportant des trafics plus importants et notamment un trafic poids lourd, ou un trafic canalisé tel qu'observé sur les chaussées réservées aux bus. Les MBCF et ESU sont des cas particuliers principalement utilisés pour de la rénovation en surface des revêtements bitumineux, l'ESU étant moins utilisé en milieu urbain de par ses propriétés acoustiques médiocres.



Sources : Toulouse 2008 ; Cerema, 2018

Figure 10-11 – Amplitude des épaisseurs des revêtements bitumineux

Les bétons hydrauliques, sont des matériaux essentiellement utilisés hors chaussée. Leur formulation pour les revêtements de voirie vise alors des propriétés superficielles principalement esthétiques. Nous constatons dans les guides techniques locaux que les critères de quantité et de taille des granulats sont de ce fait surtout importants pour les finitions que l'on réalisera en surface. Ainsi, les bétons hydrauliques, sont généralement englobés sous la dénomination béton coulé (BC) avec une variante selon l'épaisseur du revêtement, les bétons de ciment minces collés (BCMC). En revanche, de nombreuses finitions de surface sont souvent décrites dans ces guides. Celles-ci permettent de faire ressortir ou non les granulats et d'améliorer ainsi l'esthétique ou l'adhérence du revêtement. La finition la plus fréquente est similaire au grenaillage des bétons bitumineux. Pour les bétons hydrauliques, il s'agit de la désactivation, consistant à enlever le liant hydraulique présent en surface. Le béton désactivé ainsi obtenu présente un rendu esthétique souvent plébiscité par les collectivités territoriales. Il participe à l'embellissement de l'espace urbain en se rapprochant de la couleur naturelle des granulats (Pays de Gâtine Parthenay 2011). Plus récemment, et de la même façon que pour les BBDr, des bétons hydrauliques poreux ou perméables ont été développés en réduisant la quantité des petits granulats.

Nous présentons dans le **Tableau 10-5** une synthèse des matériaux des bétons présentés dans les guides techniques consultés. Contrairement à la majorité des matériaux bitumineux, les bétons hydrauliques sont généralement appliqués manuellement à l'aide d'une règle et d'une taloche. Ils ne nécessitent pas de compactage. **Notre analyse est ici limitée par la quantité de guides locaux de voirie étudiés et par l'absence de guides généraux pour l'usage de ces matériaux pour la voirie**. **Nos conclusions sur ces matériaux ne peuvent être considérées comme faisant doctrine.**

Tableau 10-5 – Les différents revêtements à liant hydrauliques

	Cerema	Lille	Bordeaux	Lyon	Toulouse	Gâtine parthenay
BC	☑	☒	Regroupés en *Béton Hydraulique*	☒	☒	☑
BCMC	☑	☒		☒	☒	☒
Bét. désactivé	aspects possibles présentés pour les BC et BCMC	☑		☑	☑	☑
Bet. sablé		☒		☑	☒	☒
Bet. poncés		☒		☑	☒	☒
Bet. balayé		☒		☑	☑	☑
Bet. Poreux	☒	☒		☑	☒	☑

☑ Matériaux présentés / ☒ Matériaux non présentés

Sources : Lille 2003 ; Toulouse 2008 ; Lyon 2010 ; Gâtine Parthenay 2011 ; Bordeaux 2017 ; Cerema, 2018

Les revêtements sablés sont quant à eux appliqués sur des épaisseurs allant de 8 à 10 centimètres pour les sables avec liant et de 10 à 16 centimètres pour les sables non liés. Un compactage mécanique est ensuite nécessaire afin d'obtenir la stabilité souhaitée. L'utilisation d'un liant hydraulique nécessite un temps de séchage pour la prise hydraulique, et donc une fermeture à la circulation. Par ailleurs, la réparabilité du revêtement est moins aisée dès lors qu'un liant est mélangé au sable.

En conclusion, les revêtements non modulaires sont en général moins réparables, que les modulaires. Le plus souvent, les interventions sur ces matériaux sont visibles. Ils semblent alors moins pertinents lorsque des réseaux sont localisés sous la voirie. **Parmi les revêtements non modulaires, les asphaltes coulés font exception. Bien que classés parmi les matériaux à liant bitumineux, ces matériaux présentent des caractéristiques physico-mécaniques différentes. Leur nature et leur mise en œuvre permet une bonne réparabilité du revêtement malgré une différence de teinte visible.** Au-delà, les matériaux non modulaires présentent d'autres atouts. D'abord, leur coût est compris entre moins de 10 euros le m² pour les revêtements les plus simples sans finition particulière, à 120 euros le m² pour les revêtements avec finition tels que les bétons hydrauliques balayés alors que le modulaire varie le plus souvent entre 30 euros le m² pour les matériaux synthétiques et 150 euros le m² pour les matériaux naturels. Ensuite, leurs performances mécaniques permettent une utilisation avec moins de contraintes pour des chaussées, et notamment lorsque ces chaussées supportent un trafic poids lourd. Enfin, leur surface étant plus homogène, ils génèrent généralement moins de nuisances sonores que les matériaux modulaires lors de la circulation de véhicules. Le Cerema ainsi que la Métropole de Bordeaux proposent dans leurs guides des fiches synthèses permettant d'identifier le meilleur revêtement selon le domaine d'application souhaité (**Cf. Annexe J, p.357**).

Synthèse III.2

La voirie urbaine présente des aspects variés en surface. Cette diversité résulte des choix faits en fonction des différents usages qu'il convient d'identifier et qui conduisent à des choix de matériaux de revêtement dépendant de plusieurs critères (**Tableau 10-6**). Aucun revêtement ne permet de répondre de façon optimale à l'ensemble de ces critères. Le gestionnaire doit alors réaliser un choix en privilégiant au moins l'un d'eux.

Tableau 10-6 – Synthèse des critères et modalités généraux pour le choix d'un revêtement

Critères	Modalités
Les catégories d'acteurs (Cf. 10.1.1 p. 183)	Usagers – Riverains – Gestionnaires
Les performances attendues du revêtement (Cf. 10.1.2 p. 185)	Sécurité – Confort – Résistance sollicitations – Mise en œuvre – Entretien
Les propriétés d'usage des éléments de voirie (Cf. 10.1.2 p. 185)	– Espaces piétonniers : piétons, PMR, mob. Douces – Espaces cyclables : cyclistes et autres – Chaussée : Véhicules légers, PL, mob. Douces – Chaussées bus : bus, cyclistes – Stationnement : Véhicules, PMR
Les contraintes d'espace / surface à revêtir (Cf. 10.1.2 p. 185)	– Largeur de l'élément de voirie – Encombrement : mobilier urbain

Auteur : A. Pavard 2020

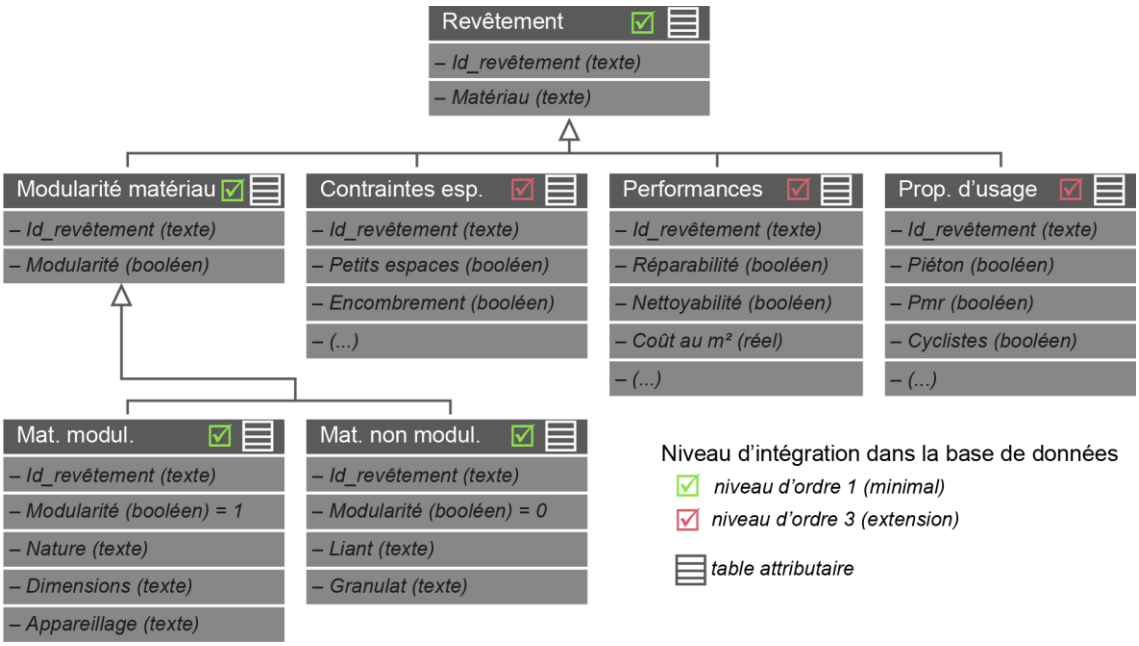
Au-delà de ces critères généraux de choix, nous observons en milieu urbain l'usage de matériaux très différents. Dans des contextes environnementaux, historiques, et culturels spécifiques, le gestionnaire tend à adapter son choix, en privilégiant par exemple des matériaux d'aspects naturels ou esthétiques. Ainsi, en plus des matériaux classiques (non modulaires) utilisés hors agglomération, nous relevons l'emploi de finitions et de couleurs différentes pour ces matériaux. Par ailleurs de nombreux autres matériaux sont utilisés tels que les matériaux modulaires. Tous ces matériaux ont des avantages et inconvénients (**Tableau 10-7**). La principale différence citée entre les matériaux modulaires ou non concerne la réparabilité. Des collectivités locales relèvent que les matériaux modulaires sont plus aisément réparables et de ce fait plus intéressants pour la voirie urbaine qui accueille des réseaux en sous-sol.

Tableau 10-7 – Synthèse des avantages et inconvénients des matériaux modulaires et non modulaires

	Avantages	Inconvénients
Modulaires	Réparabilité Diversité (nature / couleur) : – Esthétisme – Partage de voirie – Usages différents	Délais de pose Bruit lié au roulement Prix Approvisionnement Nettoyabilité
Non modulaires	Coût (matériaux standards) Mise en œuvre (mat. Liant hydrocaroné) Diversité (finitions / couleur) : – Partage de voirie – Esthétisme	Coût (couleur / finition) Mise en œuvre (mat. Liant hydraulique) Réparabilité (sauf asphalte coulé)

Auteur : A. Pavard 2020

Cette analyse a permis de lister les matériaux utilisés et de souligner l'importance de fixer le vocabulaire pour les décrire, afin d'enrichir par la suite la base de données. Par ailleurs, bien que dépassant notre objectif de recherche, les critères de choix des revêtements (**Tableau 10-6**) pourraient être inclus dans la base de données pour aider les décideurs. Afin de simplifier la prise de décision, ces critères pourront être paramétrés pour identifier rapidement leurs intérêts (**Figure 10-12**).



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 10-12 – Synthèse modèle de données complémentaire

11. La voirie dans tous ses états : Quelles informations sur les dégradations et comment les collecter ?

Tout au long de sa durée de service, la voirie subit des dégradations. Celles-ci sont occasionnées de différentes façons : le vieillissement de l'infrastructure, les contraintes mécaniques qui lui sont appliquées ou encore la présence de réseaux techniques enfouis nécessitant une intervention par tranchée.

L'objectif de ce chapitre est alors de saisir le processus de dégradation. Le chapitre est alors organisé comme suit :

1) dans une première section, nous présentons les différentes dégradations de la voirie ainsi que leurs causes ;
2) dans une seconde section, nous expliquons les principales méthodes de collectes « exploitables », c'est-à-dire les processus d'auscultation permettant d'obtenir des informations d'état des éléments de voirie, et ce notamment pour le milieu urbain.

11.1. Les dégradations entre observations et mesures

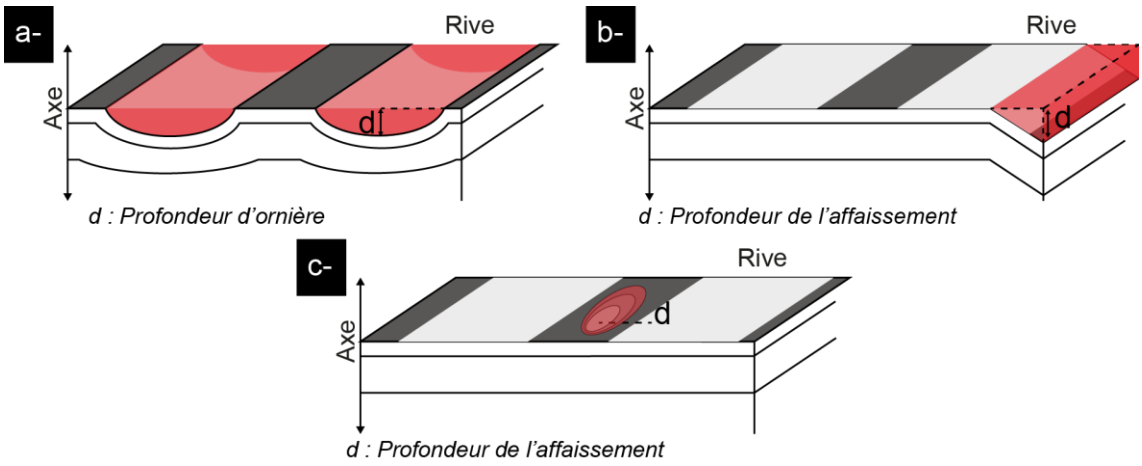
L'analyse des guides techniques existants montre que les dégradations de voirie sont essentiellement traitées au niveau des chaussées. En France, les seuls guides normatifs traitant des dégradations des trottoirs bornent leur analyse aux trottoirs localisés sur les ouvrages d'art (Setra 2005 ; Cerema 2018b). Au Canada, des travaux du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) nous permettent de faire le parallèle entre les dégradations observables sur les trottoirs et les chaussées (CERIU 2007). Le constat est similaire pour les espaces cyclables. Ainsi, dans cette section nous nous appuyons principalement sur l'analyse des dégradations des chaussées. Notre objectif est d'identifier les dégradations les plus fréquentes en milieu urbain, et d'analyser le lien entre ces dégradations et la présence de réseaux enterrés. Nous procédons à cette analyse en distinguant les dégradations selon deux types classiquement utilisés : les *dégradations structurelles* et les *dégradations superficielles*.

11.1.1. Les dégradations structurelles

Il est question de **dégradations structurelles** lorsque les couches inférieures (couches d'assise) de l'infrastructure sont atteintes. À partir de 1971 le LCPC a produit un catalogue des dégradations des chaussées, dont la dernière mise à jour date de 1998 (LCPC 1998). Dans ce catalogue, le LCPC identifiait deux familles de dégradations structurelles : les déformations structurelles et les fissurations de fatigue.

Les déformations structurelles peuvent être liées au sol support, notamment si ce dernier se révèle peu portant et insuffisamment protégé par les couches structurelles de la chaussée. Elles peuvent également être induites par un choix inadapté de matériaux pour la constitution de la structure de chaussée, ou encore liées à un défaut de mise en œuvre. Le LCPC relevait notamment : l'*orniérage à grand rayon* (**Figure 11-1 a**), les *affaissements de rive* (**Figure 11-1 b**) ou de *flache* (**Figure 11-1 c**).

L'**orniérage à grand rayon** se forme sur une ou les deux bandes de roulement sous le passage des essieux. Il s'agit d'une déformation permanente longitudinale. L'orniérage est à grand rayon lorsque l'enfoncement vertical est supérieur à 80 cm. L'**affaissement de rive** correspond à un enfoncement localisé entre le bord et la bande de roulement d'une rive. L'**affaissement est flache** lorsque l'enfoncement se réalise hors rive et de forme arrondie. Cette déformation apparait le plus souvent dans le cas d'une structure souple.



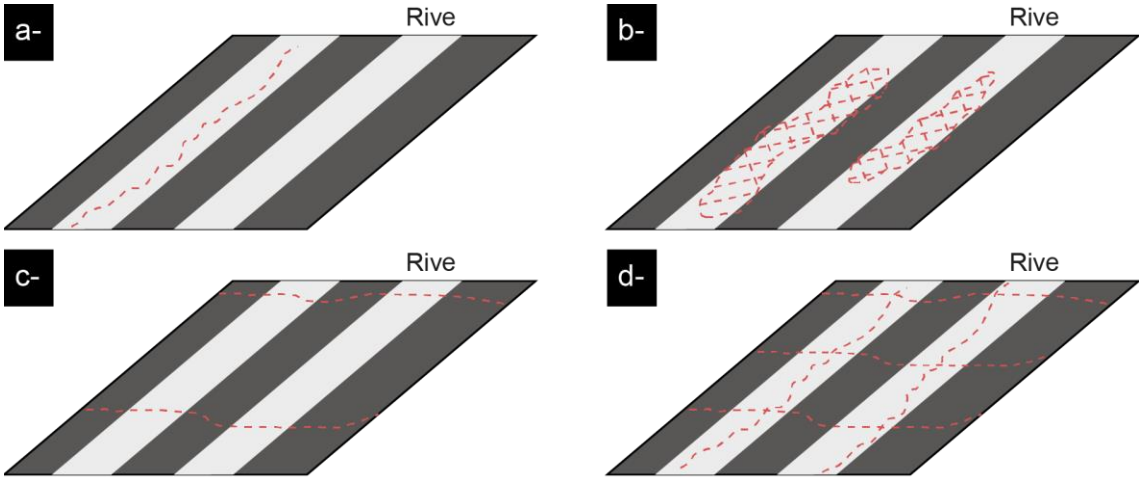
Sources : LCPC 1998

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 11-1 – Les déformations structurelles

Bien que le LCPC ne le mentionnait pas dans son guide, l'apparition de déformations est également corrélée à la présence de réseaux enterrés. Nous avons en particulier observé lors de nos terrains des affaissements au niveau de tranchées remblayées. Ces affaissements sont transversaux, longitudinaux ou diagonaux selon l'orientation du réseau et donc de la tranchée. Contrairement aux affaissements de rives, ils se forment lorsque le remblai est instable et que le compactage des matériaux est insuffisant ou n'a pas été réalisé de façon similaire à la structure préalablement présente. Il s'agit alors d'un tassement différentiel. Dans un guide sur les dégradations des chaussées urbaines revêtues de pavés ou de dalles, le Certu indiquait d'ailleurs que des affaissements, des flaches et des orniérages peuvent apparaitre sur les chaussées pavées après des interventions par tranchées sur réseaux (Certu 1998b).

Des fissures sont initiées en surface ou dans l'assise et se propagent à toute la structure. Elles apparaissent essentiellement sur les bandes de roulement parallèlement à l'axe de la chaussée : il s'agit de *fissures longitudinales* (**Figure 11-2 a**), qui évoluent généralement en *faïençage* dont les mailles se rétrécissent progressivement (**Figure 11-2 b**). Des *fissures transversales* de retrait sont également observables, le plus souvent dans le cas des structures à liant hydraulique (**Figure 11-2 c**). Les fissures transversales peuvent produire en s'agrandissant, des bourrelets, c'est-à-dire des renflements linéaires. Lorsque des fissures longitudinales et transversales se forment sur une même chaussée, elles conduisent à des *fissures en dalles* (**Figure 11-2 d**). Les fissurations peuvent apparaitre avec une dégradation accélérée de la structure. C'est le cas notamment lorsqu'un affaissement se produit au niveau des remblais de tranchées après intervention sur réseaux enterrés.



Sources : LCPC 1998

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 11-2 – Les fissurations de fatigue

Les espaces cyclables et piétonniers subissent des contraintes mécaniques plus faibles. Cependant, des dégradations structurelles apparaissent également sur ces espaces. Ces dégradations accélérées sont d'abord liées aux usages inappropriés qui sont faits de ces espaces, notamment par le passage ou le stationnement de véhicules. Elles peuvent aussi s'expliquer par des interventions sur réseaux enterrés réalisées par tranchées ouvertes. Dans tous les cas, les structures de ces espaces évolueront classiquement et se dégraderont comme les chaussées.

Les dégradations structurelles s'observent à terme en surface. Par ailleurs, d'autres dégradations apparaissant au-préalable en surface et induisent des désordres structurels. Il s'agit des dégradations superficielles.

11.1.2. Les dégradations superficielles

Les **dégradations superficielles** sont classées en deux familles. Elles dépendent essentiellement du revêtement présent. Il s'agit des *arrachements*, et des *remontées* ou *mouvements de matériaux*.

Les **arrachements** sont des dégradations liées à la rupture d'adhésion entre les matériaux constitutifs du revêtement. La perte d'adhésion conduit généralement à une disparition des matériaux. Le LCPC identifiait plusieurs types d'arrachements, et ce principalement pour les revêtements de chaussées non modulaires. Le guide du Certu sur les dégradations des revêtements modulaires permet de compléter ces informations sur les dégradations des revêtements modulaires (Certu 1998b).

Les arrachements se caractérisent soit par un départ, soit par l'usure d'un des matériaux constituant le revêtement, c'est-à-dire, les granulats ou le liant pour les revêtements non modulaires, et les modules ou les joints pour les modulaires (**Tableau 11-1**).

Tableau 11-1 – Les arrachements en surface

Dégradation	Type	Description
Plumage	Départ matériaux	Arrachement des gravillons
Peignage		Arrachement de gravillons dans des sillons parallèle à l'axe de la chaussée
Désenrobage		Départ du mastic (liant + granulats les plus fins)
Pelade		Arrachement par plaque
Nid de poule		Cavité circulaire créée par le départ de matériaux
Joint désagrégé		Désagrégation de joints entre modules
Départ de pavés		Déchaussement d'un à plusieurs modules
Glaçage	Usure matériaux	Usure des gravillons conduisant à un aspect lisse et brillant en surface
Tête de chat		Apparition de pierres dures en surface après usure de la couche de roulement
Ecaillage		Désintégration superficielle en surface d'un revêtement à liant hydraulique
Epaufrure		Effritement des bords de dalles au niveau des joints
Délitage		Cassure du module dans le sens naturel de ses couches
Cassure / fracture		Cassure ou fracture d'un module sur toute l'épaisseur. Il peut s'agir de cassure d'angle ou de cassure oblique
Fissure de joints		Fissuration ou faïençage de joints entre modules

Sources : Certu 1998 ; LCPC 1998

Les **remontées** ou **mouvements de matériaux** résultent exclusivement du choix des matériaux et de leur mise en œuvre. Ils sont donc exclus de notre portée de recherche. Nous présentons à titre indicatif les cas classiques (**Tableau 11-2**).

Tableau 11-2 – Les remontées ou mouvements de matériaux

Dégradation	Description
Ressuage	Remontée de liant en surface du revêtement
Empreinte	Enfoncement localisé du revêtement
Indentation	Enfoncement des granulats dans l'enrobé sous l'action du trafic
Remontée de fines	Remontée en surface des granulats les plus fins et provenant de l'assise
Rejet de pompage	Ejection d'eau ou de boue en surface au niveau de fissures lors du passage de véhicules

Sources : LCPC 1998

Enfin, le LCPC indiquait que deux autres dégradations superficielles sont observables, l'*orniérage à petit rayon,* lorsque l'enfoncement vertical est inférieur à 80 cm, ainsi que certaines fissurations non spécifiques aux bandes de roulement et pouvant être longitudinales ou de formes diverses. Ces fissurations apparaissent soit avec le vieillissement du liant bitumineux, soit à cause de sa sensibilité thermique.

Nous observons que certaines dégradations superficielles, notamment des arrachements, peuvent être induites par des désordres structurels. Par exemple, une déformation structurelle conduisant à des faïençages en surface, produit à terme des arrachements tels que les pelades ou les nids de poule. Dans tous les cas il convient d'identifier la source de la dégradation.

11.1.3. Les causes de dégradation

Nous avons déjà constaté que les structures de chaussées les plus présentes en milieu urbain sont les structures souples GNT puis souples bitumineuses (***Cf. 9.2, p.176***). Dans des contextes locaux particuliers comme Lille, nous avons également identifié l'emploi des structures semi-rigides à assise traitée au liant hydraulique. Par ailleurs, les structures des trottoirs et espaces cyclables s'apparentent le plus souvent à des structures souples ou semi-rigides (***Cf. 9.3, p.179***)

Pour les structures souples GNT, le LCPC relevait que les contraintes induites par le trafic sont transmises à la structure qu'avec une faible atténuation. Ceci est lié au fait que la plus grande partie des matériaux utilisés sont non traités, c'est-à-dire sans liant. De ce fait, les contraintes vont produire des déformations de l'assise. Des déformations permanentes et des fissurations pourront alors apparaitre en surface. Dans des conditions identiques, les structures bitumineuses présentent une rigidité et une résistance en traction plus importantes que les souples GNT. Les contraintes sont transmises à la structure avec une forte atténuation. Les dégradations structurelles sont de ce fait moins significatives en dehors d'évènements particuliers, tels que des interventions sur réseaux. En surface, cela se traduit par peu de déformations permanentes, mais de possibles fissurations de fatigue. Enfin, les semi-rigides sont des structures atténuant les contraintes verticales. Les déformations permanentes sont généralement inexistantes. En revanche, l'assise

étant rigide, elle subit des tractions significatives. Il est alors fréquent d'observer des fissures transversales, puis longitudinales qui conduiront à un faïençage à grandes mailles ou par dalles.

Un guide d'auscultation des chaussées souples a proposé une classification des dégradations selon leurs causes (Sauterey et Autret 1977). Cette classification ne tient pas compte de la localisation de réseaux enterrés (**Tableau 11-3**). Or, nous avons relevé que les réseaux enterrés ont une incidence sur l'intégrité des chaussées, et notamment lorsqu'une intervention est réalisée par le biais d'une tranchée. Nous proposons d'ajouter à cette classification ce dernier critère, et ce, en nous appuyant sur notre analyse des causes des différentes dégradations réalisées en amont (***Cf. 11.1.1 et 11.1.2, pp. 204 et 207***).

Tableau 11-3 – Typologie des dégradations selon les causes

	CAUSE / DÉGRADATION	TRAFIC	DRAINAGE ASS.	SOUS-DIM. COUCHE INF.	SOUS-DIM. COUCHE SUP.	QUANTITÉ DE MATÉRIAUX	MISE EN ŒUVRE	ACTION CHIMIQUE	ÂGE ÉLEVÉ DU REVÊTEMENT	SOL SUPPORT	RÉSEAU ENTÉRRÉ
STRUCTURE	Orniérage	X	0	X	0	X	0	0	0	X	X
	Affaissement	X	X	X	0	0	X	0	0	0	X
	Flache	0	X	0	0	0	X	0	0	X	0
	Fissure	X	0	X	0	0	0	0	0	X	X
	Faïençage	0	X	X	0	0	0	0	0	X	X
	Bourrelet	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0
SURFACE	Pelade	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0
	Plumage	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0
	Nid de poule	0	X	0	0	0	X	0	X	0	X
	Tête de chat	0	0	0	X	0	X	0	X	0	0
	Glaçage	0	0	0	0	X	X	0	X	0	0
	Empreinte	X	0	0	0	0	X	0	0	0	0
	Ressuage	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0

Sources : Sauterey et Autret 1977 – Auteur : A. Pavard, 2020

La présence de réseaux enterrés conduit principalement à des dégradations structurelles. Ces dégradations sont constatées essentiellement suite à des interventions par tranchées. Le vieillissement même des canalisations peut également conduire à leur détérioration, notamment lors de la présence de fuites. Lorsqu'il s'agit d'un réseau humide, c'est-à-dire transportant un fluide liquide, le déversement du fluide conduit alors à une détérioration du sol support et de la structure.

11.2. Les méthodes de collectes actuelles

En 2014, l'Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM) a publié un livre blanc portant sur l'entretien et la préservation du patrimoine d'infrastructure de transport (IDRRIM 2014). Suite à cette publication, l'IDRRIM souhaitait une meilleure sensibilisation des décideurs publics aux besoins d'entretien des infrastructures. En concertation avec les décideurs

publics, un Observatoire National de la Route (ONR) a été créé en 2016. L'ONR a notamment pour objectif de favoriser le développement des connaissances sur l'état du réseau routier ainsi que sur les moyens existants pour son entretien. L'observatoire a publié son premier rapport en 2017 portant sur l'état des connaissances de la voirie et la disponibilité des outils d'auscultation et d'entretien (IDRRIM 2017). Cette expertise a mis en évidence que l'État et les départements disposent de compétences et d'outils permettant de produire une connaissance fine de leur patrimoine. Par ailleurs, les résultats des enquêtes ont montré qu'il existe une grande hétérogénéité en termes de données existantes du fait de la variété des méthodes utilisées pour ausculter la voirie et collecter les informations. À ce titre, les collectivités locales présentent la plus grande diversité des situations. Il s'est avéré que les méthodes développées pour la voirie nationale et départementale ne sont pas toujours compatibles avec la voirie locale, du fait de l'emprise des chaussées urbaines, des aménagements et de l'occupation en surface, ou encore de la circulation. De plus, les communes et groupements de communes ne disposent pas des mêmes moyens humains, techniques et budgétaires pour assurer le suivi de leurs voiries.

Dans cette section nous identifions d'abord les principales méthodes d'auscultation de voirie utilisées. Ensuite, nous présentons les outils d'auscultation les plus nombreux et essentiellement développés pour les chaussées afin de relever les limites de leur exploitation pour la voirie urbaine. Finalement nous apportons un éclairage sur le développement des outils d'auscultation des autres éléments constitutifs de la voirie tels que les trottoirs ou espaces cyclables.

11.2.1. L'auscultation : quelles méthodes ?

Au début des années 1990, la Direction des Routes met en place un système d'évaluation et de suivi de la voirie nationale non concédée. Ce système repose sur une notation en trois points réalisé par un agent qualifié : – une note patrimoine (Np) relative à l'état structurel des chaussées ; – une note surface (Ns) concernant les dégradations de surface des chaussées et leur niveau d'adhérence ; – une note globale (Ng) synthétisant les deux précédentes (Setra 2000). Il s'agit de l'Image de la Qualité du Réseau routier National (IQRN).

Les notes sont calculées sur la base d'un rapport entre le coût de travaux élémentaires permettant la remise en état de la chaussée, et les coûts au mètre carré des travaux les plus importants pour la structure et la surface. Les tronçons de chaussée sont décomposés en sections de 100 à 200 mètres, et chacune de ces sections est caractérisée par une note allant de 0 pour un état de ruine, à 20 pour un état neuf. Les notes sont regroupées par classe afin de synthétiser l'information en 5 niveaux de qualité allant de A pour un niveau excellent à E pour un niveau mauvais (**Tableau 11-4**).

Tableau 11-4 – Notation et définition de l'état des chaussées selon la méthode IQRN

Classe de notes	Niveau de qualité	Définitions
20	A	EXCELLENT (absence de dégradation)
19	B	BON (présence de dégradations mineures localisées)
17-18	C	ACCEPTABLE (présence de dégradations mineures étendues)
13-16	D	MEDIOCRE (présence de dégradations graves étendues)
<13	E	MAUVAIS (présence de dégradations graves généralisées)

Sources : Setra 2000

Cette notation s'appuie sur des relevés des dégradations structurelles et superficielles réalisés sur un tiers de la voirie nationale tous les ans. Les relevés sont cadrés par les méthodes d'essai du LCPC (LCPC 1998) et le relevé des dégradations (LCPC 1997). Le guide de relevé des dégradations, rédigé en 1992 et mis à jour en 1997, propose sept modes opératoires, notés du M1 au M7 selon les objectifs du relevé (**Cf. Annexe K, p. 361**). Le mode opératoire 2 s'applique aux études de programmation des travaux d'entretien pour les chaussées à fort trafic tandis que le mode opératoire 3 est à destination des chaussées à moyen ou faible trafic. Ces deux modes opératoires sont toujours utilisés pour la voirie nationale et départementale. Ils permettent de relever et de quantifier les dégradations de type : – déformations structurelles ; – fissurations de fatigues ; – dégradations superficielles ; – réparations ultérieures, c'est-à-dire la présence de tranchées remblayées ou de nids-de-poule rebouchés (***Cf. 11.1.1, p. 204 et 11.1.2, p. 207***). Les méthodologies proposées s'appuient sur différents appareils facilitant le relevé visuel. Par exemple, il s'agit de véhicules disposant de systèmes embarqués permettant des relevés assistés par ordinateurs, des systèmes photographiques ou vidéo. À partir de 2008, une deuxième version de l'IQRN est développée. Celle-ci est détaillée dans le guide de Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier (GEPUR) relatif à la voirie interurbaine et de travers d'agglomérations rédigé par l'IDRRIM en 2017 (CoTITA Est, IDRRIM, et USIRF 2016). Des modes opératoires simplifiés sont notamment proposés selon les besoins des gestionnaires de voirie.

Dans son rapport de 2017, l'ONR constatait que sur les 57 départements interrogés, seuls 8% utilisaient l'IQRN (IDRRIM 2017). Des départements ont estimé le système IQRN trop onéreux et non adapté à la voirie départementale. Afin de répondre à leurs besoins, ces départements ont adapté le système en : – éliminant certains essais, tels que la rugosité pour l'adhérence ; – utilisant le mode opératoire 6 davantage adapté à la voirie à faible trafic et à travers d'agglomération que les modes opératoires 2 et 3 (LCPC 1997) ; – supprimant la segmentation de 200 mètres. Ces adaptations ont conduit à la création de différents systèmes d'Image de Qualité des Réseaux routiers Départementaux (IQRD). L'ONR relevait par ailleurs que 40% des départements ayant participé à l'enquête n'utilisaient aucun système d'indicateur permettant de qualifier l'état de

leurs voiries. À l'échelle de la voirie locale, les besoins étant plus spécifiques encore, chaque collectivité utilise souvent ses propres méthodes de notation. Nous constatons par exemple, que l'IQRN ou les IQRD, sont des systèmes de notation n'intégrant pas la question des réseaux enterrés sous voirie. Or, comme la voirie locale est davantage impactée par la présence de ces réseaux, les gestionnaires doivent en tenir compte. Enfin, les bilans de l'ONR et les échanges réalisés avec des collectivités locales suggèrent que la taille de la collectivité a une incidence sur les méthodes utilisées au niveau de la simplicité, du coût, et de l'hétérogénéité. Un deuxième volet du guide GEPUR devant traiter spécifiquement la voirie urbaine est annoncé par l'IDRRIM depuis 2016.

À partir de 2016, le Cerema a été chargé de moderniser et d'homogénéiser le système d'auscultation et la notation de l'état de la voirie. Pour cela, des axes de développement ont été identifiés pour chaque échelle de voirie. D'abord, il a été constaté que la voirie nationale s'est diversifiée au cours des dernières décennies, notamment avec le développement des voies lentes. Les voies lentes, supportant davantage de trafic poids lourds, requièrent des auscultations plus régulières que les autres voies. De ce fait, des solutions automatisées d'auscultation se révèlent incontournables (Wasner 2019). Les nouveaux outils développés permettent par ailleurs de produire des informations en 3D (IQRN3D). Ensuite, pour la voirie départementale, deux méthodologies sont développées en parallèle selon la nature principale ou secondaire des voies de circulation. Notamment, le programme de Gestion des Réseaux Secondaires (GERESE) est en cours de développement au sein du Cerema Méditerranée sur la base de l'expérience du département de Haute-Garonne. Ce programme devrait être décliné pour la voirie urbaine. Selon ses auteurs, la voirie urbaine ne bénéficie toujours pas d'une méthodologie adaptée à ses enjeux, c'est-à-dire aux chaussées étroites, à la circulation lente, aux entraves sur chaussée, ou encore à la présence de réseaux enterrés. Sur la même période, un projet national sur la durée de vie des chaussées (DVDC), administré par l'Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil (l'IREX), rassemble des organismes publics et privés concernés par la construction et la gestion des infrastructures routières. Ce projet qui prendra fin en 2021/22 vise notamment à améliorer les méthodes d'auscultation des réseaux routiers. DVDC s'appuie sur le constat que l'IQRN est ancienne et est aujourd'hui d'une part insuffisante pour qualifier l'état structurel des chaussées, d'autre part, et inadaptée pour les voiries départementales et communales (Hornych et al. 2016). Ainsi, le projet DVDC propose de réaliser plusieurs actions :

- produire un état de l'art sur les nouvelles méthodes d'auscultation ;
- favoriser l'évolution de la doctrine pour l'auscultation ;
- produire de nouveaux indices permettant de mieux décrire l'état des chaussées.

Pour cela, DVDC s'appuie sur les différents travaux réalisés sur l'IQRN, ainsi que sur les travaux menés plus récemment par l'IDDRIM (le GEPUR), ou par le Cerema (l'IQRN3D et le GERESE). En revanche, nous observons que DVDC ne traite pas spécifiquement des voiries en espace urbain et notamment la problématique des réseaux enterrés sous voirie.

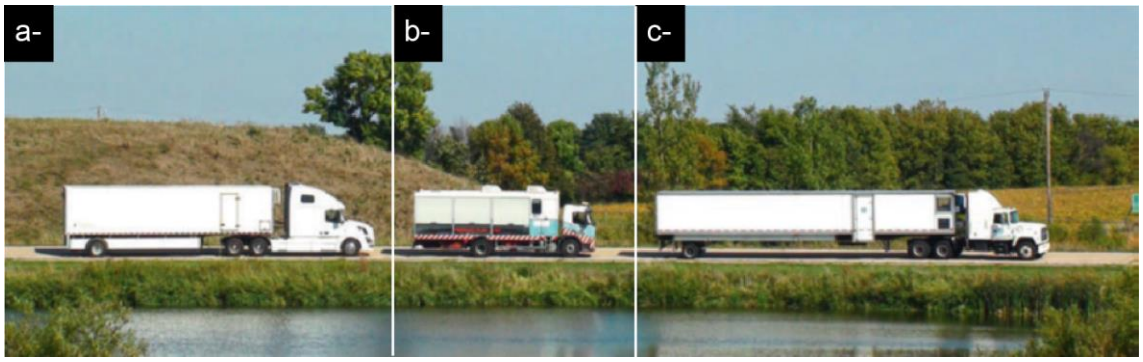
11.2.2. L'auscultation : quels outils pour les chaussées ?

Les solutions techniques développées jusqu'à présent, et permettant les relevés automatisés, sont généralement lourdes, et équipées sur des véhicules utilitaires volumineux. Leur emploi est contraint à un certain type de circulation : – des itinéraires linéaires ; – une vitesse régulière et généralement supérieure à 50 km/h. Ces contraintes limitent leur emploi en milieu urbain dense. Par ailleurs, les solutions de relevés automatisés ne permettent pas de collecter simplement tous les types de dégradation. Les déformations sont généralement plus aisément identifiées que certains critères d'état de surface tels que l'adhérence.

Pour les chaussées souples que l'on retrouve fréquemment en voirie urbaine, Sauterey et Autret indiquaient en 1977 trois solutions permettant de réaliser des auscultations selon le type de mesure souhaitée :

- la portance ou rigidité des chaussées par une mesure de déflexion par déflectographe ;
- l'état global de surface par une visite à pieds ;
- l'état des structures à l'aide de carottage (Sauterey et Autret 1977).

Concernant la déflexion, les résultats de l'enquête menée par l'ONR montrent que ces analyses sont parmi les premières abandonnées pour l'auscultation du réseau routier secondaire. La documentation technique et les programmes de recherche plus récents tels que DVDC montrent que les outils de mesure de déflexion sont des outils de gros rendement (**Figure 11-3**) (Hornych et al. 2016). Bien qu'il existe des outils destinés à de plus faibles rendement, tels que l'essai à la poutre Benkelman, l'utilisation d'un camion chargé, et le blocage partiel de la circulation restent nécessaires (Le Boursicaud 2018).



Légende : a) Traffic Speed Deflectometer (TSD), b) Curviamètre, c) Rolling Wheel Deflectometer (RWD)

© Photograph Courtesy of Federal Highway Administration

Sources : Hornych et al. 2016

Figure 11-3 – Exemples de matériel de mesure de déflexion à grand rendement

Pour l'état global des chaussées, l'ONR dans son bilan sur l'auscultation des chaussées oppose *auscultation visuelle* à *auscultation automatique*. L'**auscultation visuelle** englobe alors toutes les démarches visant à analyser l'état de la chaussée à l'aide d'un repérage manuel réalisé par un opérateur. Ce repérage peut être réalisé soit directement sur le terrain, soit à l'aide d'images ou vidéos prises en amont. L'ONR tire deux enseignements : Premièrement, il constate, qu'effectivement, les méthodes de relevés automatisés sont davantage utilisées pour l'identification des déformations structurelles que pour les relevés d'état de surface. Deuxièmement, les pratiques prouvent que la voirie locale est généralement moins auscultée à l'aide de solutions automatisées que par relevés visuels. Le **Tableau 11-5** reprend les principaux résultats obtenus à travers les réponses de 46 départements à l'enquête de l'ONR de 2018. L'information est présentée pour chaque classe de voirie et selon le type de dégradation. Nous observons alors la part des départements utilisant les relevés automatisés ou visuels, le renouvellement de l'auscultation en nombre d'années (périodicité), et la part du linéaire de voirie auscultée.

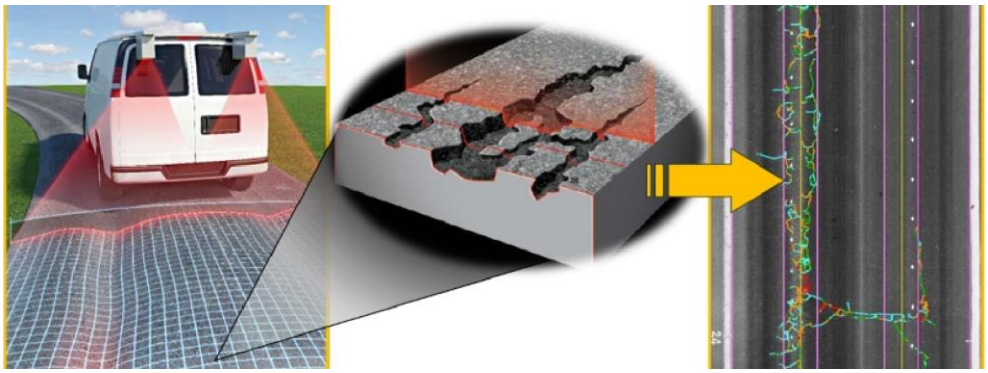
Tableau 11-5 – Méthode et périodicité de contrôle par les départements (Réponses de 46 départements)

		État de la surface			Déformation		
	Méthode	% Échantillon	Périodicité	% linéaire	% Échantillon	Périodicité	% linéaire
C1	Automatisée	38	4,1	89,9	49	4,0	90,2
	Visuelle	62	3,6	92,1	51	2,6	92,2
C2	Automatisée	40	4,4	88,1	48	4,2	95,2
	Visuelle	60	2,7	92,0	52	3,0	94,1
C3	Automatisée	19	4,3	73,8	25	5,0	79,0
	Visuelle	81	2,7	91,9	75	2,8	90,1
	C1 : réseau structurant / C2 : réseau principal / C3 : réseau local						

Sources : IDRRIM, ONR 2018

Ainsi, pour les dégradations superficielles, les auscultations visuelles sont toujours les plus utilisées pour la voirie locale départementale : plus de 80% de l'auscultation se fait par méthodes visuelles contre 60% sur la voirie structurante ou principale. Par ailleurs, la voirie locale départementale représente plus de 60% de l'ensemble de la voirie départementale. Nous expliquons le sous-investissement dans l'auscultation automatisée pour ces voiries par le coût des techniques, la lourdeur des opérations, ainsi que les difficultés de mise en œuvre sur ces infrastructures. Entre 2017 et 2019 l'ONR a étendu son enquête à des métropoles. Les résultats obtenus pour 10 métropoles confirment les tendances observées pour les départements. D'abord, les méthodes automatisées sont utilisées essentiellement pour la voirie structurante, alors que des méthodes visuelles sont privilégiées pour la voirie locale. Ensuite, les auscultations automatisées sont généralement renouvelées tous les 5 ans contre tous les 3 ans pour les auscultations visuelles. Cette même enquête est en cours de déploiement auprès d'intercommunalités plus petites telles que des communautés d'agglomération ou de communes (IDRRIM 2018, 2019).

À l'inverse, pour les déformations structurelles, l'ONR a relevé que les méthodes automatiques sont davantage utilisées que pour les dégradations superficielles. Les experts du programme DVDC constatent le développement de nouvelles technologies de mesure. Ils mentionnent notamment les technologies radar déjà expérimentées, lesquelles permettent une observation de la structure des chaussées, aussi bien au niveau des dégradations que de l'identification du type de structure mise en œuvre. Ces technologies nécessitent toujours des calibrages à l'aide d'informations issues d'auscultation par méthodes destructives, les carottages, afin d'améliorer la détection des interfaces de chaussées et des matériaux (Hornych et al. 2016). D'autres technologies ont également été introduites dans le domaine de l'auscultation, telles que le Laser Imaging Detection And Ranging (LiDAR) (**Figure 11-4**).



Sources : Romdas, 2020

Figure 11-4 – Exemple d'outil d'auscultation équipé d'un LiDAR

Dans les années 2010 plusieurs outils ont été développés permettant des auscultations précises avec des prises de mesures au millième de millimètre. Par ailleurs, certains d'entre eux enregistrent des images 3D sur des sections de chaussées de 2,5 à 10 mètres de longueur. Ces images rendent possible la détection automatique de la majorité des dégradations structurelles et superficielles, et l'obtention d'indicateurs de niveau de qualité sur des sections courtes. Le programme DVDC réalise une étude sur ces outils, en comparant notamment l'Aigle 3D du Cerema, le Siman de NextRoad, le DiagWay 2 de DiagWayn ainsi que l'Evalis 3D de Technologies Nouvelles. Outre le fait que ces outils sont principalement utilisés pour la voirie interurbaine, la précision des mesures et la quantité de données produites sont discutables. En effet, à l'échelle d'une section de chaussée, l'emprise globale des dégradations selon leur type, et l'évolution de cette emprise sont a priori des informations suffisantes pour mesurer le niveau de qualité de cette section. Ainsi, produire des mesures millimétriques permettant de suivre chaque dégradation ponctuellement, est intéressant, mais aussi chronophage, onéreux et gourmand en capacité de stockage des données.

En conclusion, de nombreux freins restent à être levés, notamment en termes de coût et d'adaptation des technologies au contexte urbain. Or, si l'auscultation automatisée des chaussées urbaines est difficile, elle l'est plus encore pour leurs dépendances telles que les trottoirs et les espaces cyclables, sur lesquelles les véhicules ne peuvent pas circuler. Cependant, il est important de pouvoir suivre l'état de ces dépendances.

11.2.3. L'auscultation : quels outils pour les espaces piétonniers et cyclables ?

Nous constatons que la documentation portant sur l'auscultation des dépendances de voirie est limitée aussi bien en France qu'à l'international. Lors d'un Congrès sur les infrastructures (Congrès INFRA) organisé à Québec en 2011 par le CERIU, (Blanchette 2011) indiquait que l'auscultation des trottoirs était un sujet peu abordé au sein des municipalités et bénéficiant de

peu de documents de références. Il présentait ensuite une méthode d'auscultation visuelle mise en place par le CERIU pour les trottoirs. Comme pour les chaussées, cette méthode s'appuie sur :

- des agents qualifiés ;
- un guide méthodologique ;
- une fiche d'auscultation à remplir (**Cf. Annexe K, Figure K-1, p. 365**) ;
- un équipement permettant la prise de photographie ;
- un matériel de carottage.

L'auscultation peut être réalisée à l'aide d'un véhicule léger sur lequel est installé une caméra (**Figure 11-5**).

Sources : Blanchette 2011

Figure 11-5 – Exemple de véhicule pour l'auscultation visuelle des trottoirs

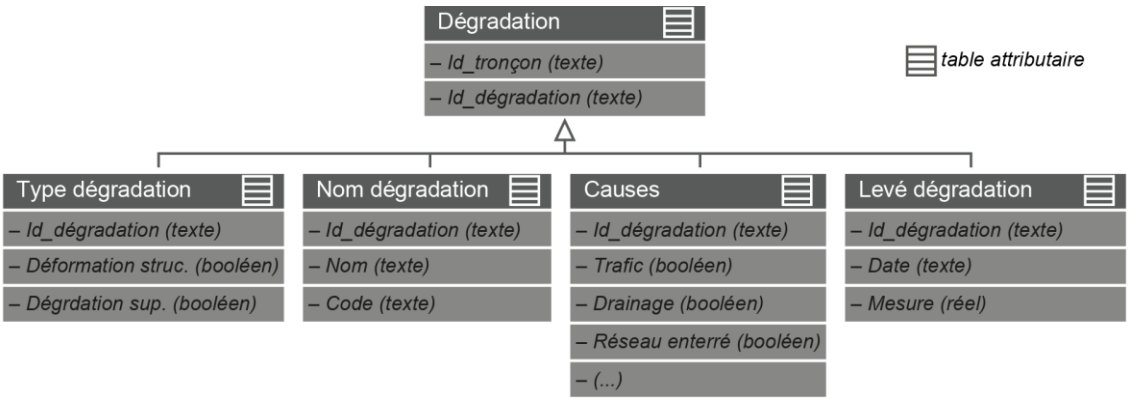
Concernant les espaces cyclables, le CERIU a également publié deux guides d'auscultation des espaces cyclables en 2017 et 2019. Les méthodes proposées s'appuient finalement sur les méthodes existantes pour les chaussées, et dépendent directement de la localisation et de la configuration de l'espace cyclable. Ainsi, une bande cyclable sur chaussée en milieu hors urbain est auscultée à l'aide des mêmes techniques que celles mises en œuvre sur ces chaussées. En revanche, une chaussée cyclable propre en milieu urbain fera l'objet d'une auscultation visuelle à pied ou à l'aide d'un véhicule léger, et selon des modalités similaires à celles retenues pour les trottoirs.

La faible auscultation des dépendances n'est pas liée à un désintérêt des gestionnaires de voirie de ces espaces. Au contraire, il s'agit plutôt d'un manque de moyens techniques et humains pour réaliser ces auscultations. En France, la Poste propose aux collectivités un service appelé « Proxi Vigie Urbaine ». L'un des objectifs de ce service est de fournir aux collectivités abonnées des informations sur les trottoirs et espaces cyclables que parcourent chaque jour les facteurs (Foucaud 2016). À l'aide d'un smartphone équipé d'une application, les facteurs relèvent les dégradations et prennent une photo. Les informations sont ensuite transmises aux services

techniques de la collectivité. Cette solution permet de relever les dégradations les plus visibles, mais ne se soustrait pas à une auscultation plus fine, et réalisée par un professionnel.

Synthèse III.3

Au cours du temps, la voirie subit des sollicitations extérieures qui la font évoluer et qui peuvent conduire à sa dégradation. L'infrastructure doit alors être entretenue afin de ne pas atteindre un niveau de ruine nécessitant sa reconstruction complète. Des opérations d'entretien permettent d'éviter l'apparition de dégradations importantes, et ainsi, de préserver un niveau de service adapté à la sécurité et au confort des usagers (**Cf. Annexe H, p. 43**). Une connaissance des causes possibles de dégradations permet d'une part de limiter l'émergence de ces dégradations, d'autre part, d'adapter les solutions d'entretien afin d'éviter la réapparition prématurée de dégradations. L'identification des dégradations passe par des méthodes d'auscultation. Celles-ci permettent de relever pour des sections de voirie homogènes en longueur les dégradations selon leur type, leur niveau de gravité, et leur évolution dans le temps. À partir de ces informations, un niveau de qualité est attribué à chaque section de voirie afin de hiérarchiser et prioriser les interventions. Croiser ensuite cette information avec la présence de réseaux enterrés et l'entretien prévu sur ces réseaux permet d'optimiser les interventions. Ainsi, dans la perspective de construire un outil utile à la cogestion de la voirie et des réseaux enterrés, il est essentiel d'introduire dans la base de données des informations sur les dégradations de la voirie à un temps t, ainsi que leur évolution (**Figure 11-6**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 11-6 – Synthèse intégration des éléments de dégradation dans le modèle de données

Initialement pratiquées sur la base d'opérations visuelles, les méthodes ont évolué par l'adaptation de nouvelles technologies afin d'automatiser l'auscultation. Toutefois, ces méthodes ont principalement été développées pour les chaussées, et notamment pour les chaussées interurbaines. La voirie urbaine représente le patrimoine de voirie le plus important. Par ailleurs, elle ne présente pas les mêmes enjeux, par exemple en termes de sécurité, ou de présence de

réseaux enterrés. De plus, la voirie urbaine est support d'une plus grande diversité de fonctionnalités, et notamment de mobilités variées ayant conduit à son partage en plusieurs espaces distincts tels que les trottoirs ou les espaces cyclables. À notre connaissance, il n'existe pas de guide national pour l'auscultation de la voirie urbaine. Les méthodes utilisées, lorsqu'elles existent, ne sont généralement pas harmonisées, et ce notamment en raison de la complexité de cette infrastructure. Les travaux publiés et menés outre-Atlantique, au Canada, sur l'auscultation des dépendances de voirie par le CERIU sont des bases intéressantes pour développer un processus et une méthodologie adaptés au milieu urbain et à ces enjeux. La suite de nos travaux s'appuie alors sur une proposition méthodologique permettant de collecter et d'enrichir une base de données voirie à l'aide d'information sur les dégradations.

12. Mieux connaitre la voirie : Comment enrichir une base de données spatiale de voirie par des informations sur les matériaux et dégradations ?

Les trois chapitres précédents ont permis d'identifier les différents éléments ou caractéristiques nécessaires à notre base de données, aussi bien pour les structures, les revêtements, que les dégradations. Toutefois, nous avons constaté que d'une part le vocabulaire technique n'est pas harmonisé entre les différents gestionnaires, d'autre part que chacun ne prend pas en compte l'ensemble de ces caractéristiques. **Bien sûr, notre analyse n'est pas exhaustive. Des organismes et collectivités semblent avoir développé des outils plus avancés : par exemple le Grand Lyon par son outil LyVIA. Pour autant, l'accès à la documentation relative à ces projets locaux s'est révélé impossible**[5]**.** L'objectif de ce chapitre est de présenter nos choix pour l'enrichissement de notre référentiel spatial de voirie. Celui-ci est réalisé en visant à une harmonisation en termes de sélection des caractéristiques et de vocabulaire.

1) Dans une première section, nous avons construit un processus de levé des matériaux et d'auscultation visuelle. Pour l'auscultation visuelle, nous nous sommes basés sur la documentation du LCPC pour les chaussées, et sur celle du CERIU pour les trottoirs et espaces cyclables.
2) Dans une seconde section, nous avons développé et mis en œuvre une méthode pour réaliser les levés.

Bien que de la documentation existe et soit diffusée, les bases de données des gestionnaires, lorsqu'elles sont construites, ne sont pas aisément accessibles. La constitution d'un corpus de données complet, au moins pour notre cas d'étude (Cachan), était essentielle. En effet, celui-ci devait nous permettre à la fois de poursuivre le développement de notre démarche, et de mettre en œuvre des analyses de coprésence entre voirie et réseaux enterrés (**Cf. Partie IV, 4, p. 86**). Les gestionnaires de la voirie de Cachan n'étaient pas en mesure de fournir des données. Ce manque était finalement une opportunité de travailler à l'élaboration d'un processus de recueil de données homogènes. Ainsi, sans pour autant prétendre à un travail de niveau expert, nous avons collecté des données en suivant deux étapes.

12.1. Construction d'un processus de levé des matériaux et d'auscultation

Concernant les levés des revêtement et des structures, l'analyse des documents techniques (***Cf. 9 et 10, p. 170 et 182***) nous a permis d'identifier les principaux matériaux et de les repérer sur le terrain. Cette opération de levé est réalisable simplement sur les revêtements, en revanche, la structure étant en sous-sol, est de fait inaccessible sans destruction. Nous constatons que lors

[5] Pour le Grand Lyon des prises de contact ont été initiées, et ce par différentes entrées : des services internes (géomatique, voirie), mais également des partenaires (GRDF)

d'interventions sur les réseaux enterrés, l'ouverture d'une tranchée permet d'observer l'ensemble de la structure de la voirie. Pour les gestionnaires ne disposant pas d'informations sur leurs voiries, profiter des ouvertures de tranchées est une solution pour collecter et enrichir progressivement une base de données. Dans le cadre de nos travaux, nous nous limitons à une collecte d'informations sur les revêtements. La méthode mise en place pourra par la suite s'appliquer à la collecte de données sur les structures à partir des ouvertures de tranchées. Pour les dégradations, nous avons identifié à travers nos lectures, deux points essentiels permettant de mener une auscultation visuelle. Le premier point consiste à préparer une fiche permettant de saisir les informations sur le terrain. Le second point vise à identifier les éléments à ausculter, l'échelle d'auscultation, et le pas de distance à utiliser pour les levés.

12.1.1. Première étape : Conception d'une fiche de levé matériaux et auscultation

Dans le cadre de notre problématique, tous les éléments de voirie sous lesquels peuvent prendre place des réseaux enterrés ont un intérêt. Ainsi, nous incluons dans notre procédure de collecte d'informations les chaussées et chaussées propres, les espaces cyclables, les trottoirs, et les espaces de stationnement. Par ailleurs, nous conservons la possibilité d'ajouter des remarques complémentaires relatives à l'élément ausculté (**Tableau 12-1**).

Tableau 12-1 - Les éléments de voirie levés et leurs attributs

Eléments de voirie	Attribut fiche
Chaussée	Chaus.
Chaussée cyclable	Cycl.
Chaussée propre (bus)	Bus
Espace piétonnier	Trot.
Précision supplémentaire	Prec. Sup.

Auteur : A. Pavard, 2019

Les levés sur les revêtements visent à recueillir essentiellement deux informations : le type de revêtement, c'est-à-dire le matériau principal, et l'homogénéité du revêtement sur la section de tronçon auscultée. Nous avons relevé l'utilisation d'une grande diversité de matériaux (***Cf. 10.2, p. 187***), dont certains ne sont pas identifiables par une simple auscultation visuelle. Notamment, il n'est généralement pas possible de repérer aisément les différences entre les bétons bitumineux. Nous limitons de ce fait l'identification des matériaux à de grandes classes telles que présentées dans le **Tableau 12-2**.

Tableau 12-2 – Liste des matériaux levés et leurs codes

Familles de matériaux	Matériaux	Code
Bétons bitumineux	Béton bitumineux noir	BBn
	Béton bitumineux noir grenaillé	BBng
	Béton bitumineux rouge	BBr
	Béton bitumineux (liant clair) blanc	BBb
	Asphalte coulé	As
Bétons hydraulique	Béton hydraulique balayé	BHb
	Béton hydraulique désactivé	BHd
Matériaux modulaires	Pavés en grès	Pge
	Pavés ou dalles de béton hydraulique	Ph
	Pavés de granite	Pga
	Alvéolaires	Al

Auteur : A. Pavard, 2019

Finalement, pour les dégradations, nous nous appuyons sur les bordereaux mis en place par le LCPC pour la chaussée (**Cf. Annexe K, p. 361**), et le CERIU pour les trottoirs et les espaces cyclables (**Cf. Annexe K, p. 365**). Le LCPC et le CERIU incluent dans leurs bordereaux de relevé des informations sur les dégradations à identifier, l'unité de mesure, et le niveau de gravité. Dans le cadre de notre problématique d'interactions entre voirie et réseaux enterrés, nous bornons notre auscultation aux dégradations susceptibles d'être liées à la présence de réseaux enterrés (***Cf. Tableau 11-3, p. 209***). Par ailleurs, certaines dégradations sont généralement moins fréquentes en milieu urbain (***Cf. 11.1.3, p. 208***). Ainsi, nous conservons les déformations structurelles, les fissurations de fatigue, les arrachements dont les nids de poule et les déchaussements de modules. (**Tableau 12-3**). Par ailleurs, nous limitons notre auscultation à la simple identification des dégradations. **En effet, compte tenu du temps nécessaire, et des moyens techniques à mettre en œuvre, nous ne mesurons pas ces dégradations et nous n'apportons pas de jugement de gravité. Cependant, nous relevons l'importance de ces deux aspects qu'il est essentiel de conserver dans un modèle de données pour une gestion cohérente de la voirie**.

Tableau 12-3 - Liste des dégradations à lever et leurs codes

Familles dégradations	Dégradations	Code	Unité de mesure
Déformations structurelles	Affaissement	AF	Surfacique (étalement) et centimétrique (profondeur)
	Orniérage	OR	Surfacique (étalement) et centimétrique (profondeur)
Fissurations de fatigue	Longitudinale	LO	Centimétrique
	Transversale	TR	Centimétrique
	Faïençage	FA	Surfacique
Arrachement	Nid de Poule	NI	Surfacique
	Déchaussement de pavé	DP	Numéraire et surfacique
	Désintégration des joints	DJ	NA

Sources : A. Pavard, 2019

En plus des dégradations classiques, nous incluons, comme le LCPC dans sa méthode de relevé des dégradations, la présence de réfections antérieures telles que les remblayages de tranchées ou de trous (LCPC 1997). Ces réparations peuvent avoir un impact sur la dégradation prématurée de la voirie selon leur mise en œuvre.

Au-delà des dégradations, nous ajoutons également la présence d'arbres, lesquels sont parfois sources de désordres structurels à la fois sur la voirie et sur les réseaux enterrés. Concernant les réseaux enterrés, différentes normes et lois prévoient des distances minimales d'implantation des arbres à proximité de réseaux selon leur nature et le fluide transporté. L'information de localisation d'arbre est alors essentielle dans une démarche de mise en place de cogestion de la voirie et des réseaux enterrés. Il serait par ailleurs intéressant de poursuivre ce travail de levé en intégrant l'essence des arbres présents. En effet, les arbres selon leur essence présentent des systèmes racinaires différents. Notamment, le système racinaire est dit traçant lorsqu'il se développe à l'horizontal, et pivotant lorsqu'il se développe à la verticale. Le déploiement des racines à l'horizontale ou à la verticale a une incidence directe sur les réseaux selon leur localisation, comme sur les autres infrastructures (Zanetti et al. 2008).

Finalement, à partir des informations que nous avons choisies de collecter, nous produisons une fiche de levé. Cette fiche s'organise en cinq grandes rubriques permettant d'identifier l'élément de voirie ausculté (chaussée, espace cyclable, chaussée bus, trottoir, stationnement et précision supplémentaire), le revêtement (son type et son homogénéité), les dégradations (les déformations, les fissures et les arrachements), les travaux anciens (tranchées remblayées et patchwork de trous rebouchés), ainsi que la présence d'arbre (**Figure 12-1**) (**Cf. Annexe L, p. 366**).

Date														
	Elément de voirie						Revêtement		Dégradations			Travaux		Arbre
ID	Chaus.	Cycl.	Bus	Trot.	Statio.	Prec. sup.	Type	Homog.	Def.	Fis.	Arr.	Tran.	Patch.	
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
(...)														

Auteur : A. Pavard, 2019

Figure 12-1 – Extrait d'une fiche d'auscultation

12.1.2. Deuxième étape : Où réaliser les levés et selon quel pas ?

Nous avons observé qu'historiquement les levés étaient réalisés de manière visuelle et à pied sur des sections de tronçon de 100 à 200 mètres (***Cf. 11.2.1, p. 210***). L'auscultation automatique a permis de réduire le pas des sections auscultées à 10, voire à 5 ou 2,5 mètres (***Cf. 11.2.2, p. 213***). Les nouvelles technologies permettent par ailleurs de mesurer chaque déformation avec une précision au millième de millimètre. À condition de disposer d'un espace de stockage et de moyens de calculs suffisants, cela permettrait de suivre chaque dégradation sans avoir recours au partitionnement en sections des tronçons de voirie (**Figure 12-2 a**).

Contrairement à la possibilité offerte par les nouvelles technologies de suivre les dégradations individuellement et avec une grande précision, nous proposons de maintenir une auscultation par section de tronçon. Pour chaque tronçon, les dégradations similaires peuvent alors être agrégées (**Figure 12-2 b**). Cette solution bien que moins précise à l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre. Cette simplicité permet par ailleurs de réduire le coût des opérations d'auscultation, de faciliter le suivi de chaque section en limitant les objets géographiques à suivre, et d'éviter une collecte importante de données.

Id dégradation	Type	Longueur	Epaisseur	Surface
1	Fissure Longitudinale	155 cm	10 mm	Na
2	Fissure Longitudinale	70 cm	5 mm	Na
3	Fissure Transversale	67 cm	8 mm	Na
4	Faïençage	Na	Na	0,75 m²
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)

Id section	Type	Longueur totale	Epaisseur moyenne	Surface totale
1	Fissure Longitudinale	(145 + 70) = 215 cm	(145X10 + 70X5) / 215 =8 mm	Na
2	Fissure Transversale	67 cm	8 mm	Na
2	Fissure Longitudinale	110 cm	9 mm	Na
2	Faïençage	Na	Na	0,70 m²
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)

Légende : a) à la dégradation ; b) à la section

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 12-2 – Echelles d'auscultation

En milieu urbain les tronçons de voirie ont des longueurs généralement inférieures à 200 mètres. Le cas d'étude de Cachan, par exemple, est constitué de 1 133 tronçons dont la longueur moyenne est de 69 mètres. Par ailleurs, 75 % des tronçons présentent une longueur inférieure à 92 mètres (**Tableau 12-4**). Nous observons également que les tronçons supérieurs à 200 mètres sont généralement des tronçons d'Autoroute ou de voirie départementale. Finalement la taille des tronçons de voirie en milieu urbain étant réduite, il est envisageable de réaliser les auscultations en prenant comme échelle le tronçon de voirie.

Tableau 12-4 – Répartition des tronçons de voirie selon leur taille (Cachan)

Valeurs de dispersion	Min.	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Max.
Longueur (m)	3	26	52	92	748
% tronçons	25%	25%	25%	25%	

Cependant, afin de procéder à une hiérarchisation des tronçons de voirie pour prioriser les opérations de maintenance, il serait essentiel de partitionner les tronçons en sections de taille homogène et comparable. Un pas réduit d'une dizaine de mètres fournirait une image fine de l'état de la voirie. Dans le cadre de nos travaux, pour des questions de moyens et de temps, nous avons opté pour des levés réalisés à chaque extrémité de tronçons de voirie et sur chaque élément

constitutif de la voirie. De plus, nous avons limité notre observation à l'état général de chaque tronçon, lequel sera qualifiée d'état homogène ou hétérogène.

Après avoir identifié les informations souhaitées et mis en place un processus permettant de les collecter, nous nous sommes intéressés à la méthode permettant de réaliser des levés sur terrain. Notre méthode s'appuie sur une auscultation visuelle à pied et par la prise des photographies géolocalisées. Les images prises au moment de l'auscultation permettent avant tout de disposer d'une trace des opérations de levés réalisées.

12.2. Développement et mise en œuvre d'une méthode sur le cas d'étude

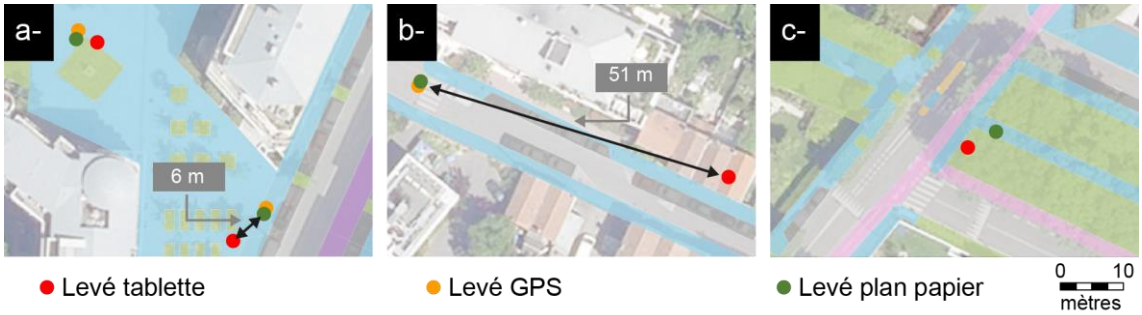
Une première étape a été de définir l'outil le plus pertinent pour la réalisation des levés visuels. Pour cela, nous avons comparé les résultats de trois outils de prise de photographies géolocalisées. Les outils mis en comparaison étaient une tablette, un GPS équipé d'un appareil photo, et une représentation cartographique sous forme d'orthophotographie, de la zone à lever avec un appareil photo indépendant.

12.2.1. Comparaison de trois outils de levé

La tablette est un appareil standard du commerce accessible au grand public, équipé d'une puce GPS de précision métrique, et permettant de réaliser des photographies. Le coût moyen de l'appareil est de 300 à 400 euros. Nous avons identifié que la précision de localisation de la tablette est améliorable par l'activation du BlueTooth et du Wifi qui permet de bénéficier de la localisation d'une part des autres outils émettant des ondes BlueTooth, et d'autre part des bornes Wifi. Ces paramètres d'améliorations sont a priori pertinents dans le cas de levés en milieu urbain dense, où ces outils sont largement déployés.

Le GPS exploité est un appareil professionnel de la gamme « Spectra Precision », utilisé notamment pour des travaux topographiques sur terrain. Cet appareil présente une précision centimétrique. Le coût moyen de l'équipement et de l'abonnement au service GPS dépasse 10 000 euros. Finalement, l'orthophotographie est imprimée à l'échelle 1 : 2 000, et les emplacements des levés sont pointés dessus manuellement. Des photographies sont réalisées avec un appareil photo indépendant standard. Le coût moyen de cette solution, hors appareil photo, ne dépasse pas 5 euros. Au-delà de la précision et du coût du matériel, l'encombrement et le poids de ce dernier a également un impact. La tablette et l'orthophoto imprimée sont des outils légers et peu encombrants. À l'inverse, un GPS nomade pèse en moyenne 3 kilogrammes, tandis que la canne supportant la station peut mesurer jusqu'à 2 mètres. De ce fait, la tablette et l'orthophoto imprimée sont des outils plus aisément manipulables.

Les résultats issus de cette opération sont contrastés et permettent d'identifier les limites de chaque outil. Dans des conditions optimales c'est à dire lorsque la densité de bâti n'est pas importante et en l'absence de couvert végétal, les levés réalisés par les trois méthodes sont similaires avec des écarts maximaux de 5 à 6 mètres (**Figure 12-3 a**). Généralement, le levé réalisé à l'aide de la tablette est celui s'écartant le plus des deux autres. Lorsque le levé est réalisé dans une zone plus dense, nous constatons premièrement des difficultés pour le GPS nomade à capter un signal pour se localiser et deuxièmement une perte ou approximation du signal capté par la tablette. Cette dernière se raccroche parfois au signal le plus proche pouvant être éloigné de plusieurs dizaines de mètres du point levé (**Figure 12-3 b**). Enfin, lorsque le point levé se situe sous un couvert végétal dense, le GPS nomade ne capte plus aucun signal et empêche ainsi le levé (**Figure 12-3 c**).



Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018 – Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 12-3 – Comparaison de trois méthodes de levé géolocalisé (Tablette, GPS et Orthophoto)

À partir de 40 points de levés, nous constatons que seuls 36 levés ont pu être réalisés à l'aide du GPS nomade. La distance médiane entre les levés réalisés par GPS et par l'orthophoto est inférieure à 1 mètre. Cette faible distance permet de conclure qu'une identification manuelle du lieu levé est fiable. Par ailleurs, en pratique, nous avons analysé qu'un levé sur l'orthophoto est plus rapide qu'un levé par GPS, et ce en raison du délai de localisation du GPS. Finalement, nous relevons un écart moyen de 23 mètres entre les levés tablette et les levés orthophoto, qui exclut le choix de la tablette trop imprécise au niveau géolocalisation.

Ainsi, au regard de la validité des levés, du coût de chaque solution, et de l'encombrement, nous optons pour la suite de nos travaux pour des levés sur orthophoto. Concernant l'appareil de photographie, nous observons qu'aujourd'hui la majorité des outils permettant de prendre des photos, dont les téléphones, ont des précisions supérieures à 10 Méga Pixel. Nous jugeons ce niveau de précision suffisant pour le travail réalisé, moyennant une procédure bien définie de la prise de photo, explicitée ci-après (***Cf. 12.2.2, p.228***).

Il est cependant important de noter que contrairement aux levés réalisés par tablette et GPS, ceux issus des orthophotos imprimées nécessitent un travail post-levé, c'est-à-dire que l'orthophoto doit être numérisée, géoréférencée dans un SIG, et les points saisis dans une base de données géographiques. Cette étape peut être éliminée en utilisant un SIG embarqué sur tablette. Le SIG embarqué permet de réaliser des levés manuels et de les enregistrer en direct dans une base de données géographiques. Il est par ailleurs envisageable de développer une application permettant dans le même temps de saisir les informations présentées précédemment (***Cf. 12.1.1, p. 221***). Le **Tableau 12-5** présente une synthèse comparative des trois méthodes examinées.

Tableau 12-5 – Comparaison des caractéristiques des trois outils

	Tablette	GPS professionnel	Ortophoto imprimée
Coût	≥ 300 euros	≥ 10 000 euros	≤ 5 euros
Encombrement	Faible	Moyen	Faible
Précision	métrique	centimétrique	centimétrique
Validité mesure	Très faible	Bonne	Bonne
Obstacles	Densité bâti Couvert végétal		Na

Auteur : A. Pavard, 2020

12.2.2. Réalisation des levés

La zone de levés est préparée en amont de la sortie sur terrain. À partir d'une ortophoto à l'échelle 1 : 2 000 les points de levés sont par contre identifiés durant la phase d'auscultation. Le choix des points de levés en temps réel permet d'éviter de cibler des zones non accessibles au moment de l'auscultation. Par exemple, des véhicules stationnés peuvent empêcher le levé sur une partie d'un trottoir, ou encore la présence de travaux peut limiter l'accès à une zone. Pour chaque levé, une ligne du bordereau d'auscultation est remplie (***Cf. Figure 12-1, p. 224***), et une photographie est réalisée.

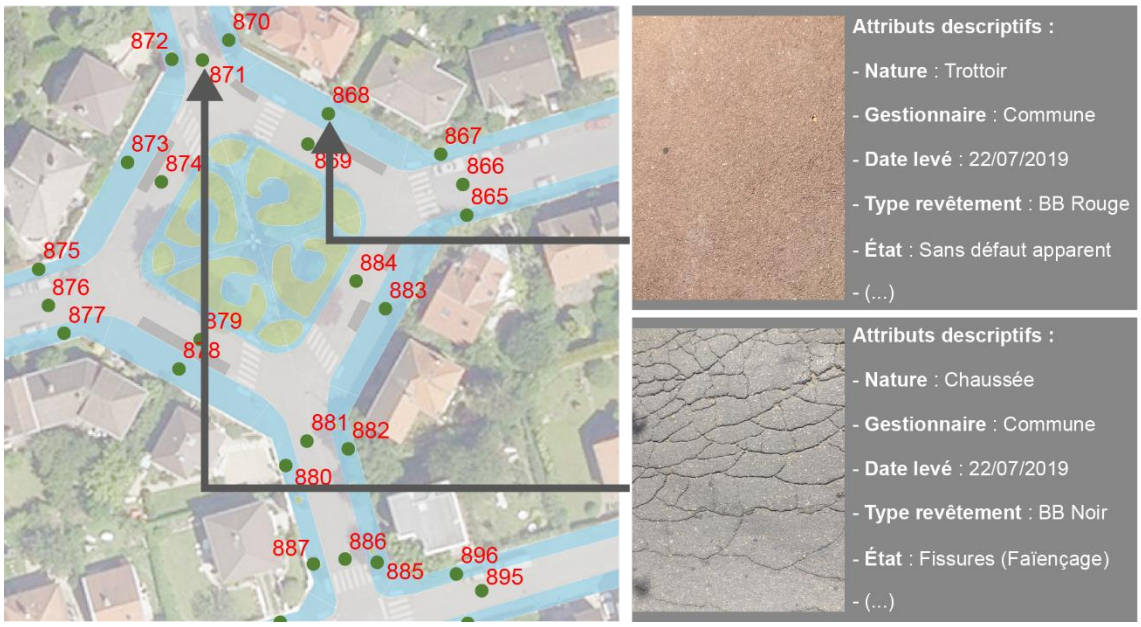
La prise de photographie doit respecter certaines règles afin que les images récoltées puissent être exploitables, comparables entre elles et réutilisables ultérieurement par exemple pour de la reconnaissance automatique de revêtements ou de dégradations. Idéalement, les photographies devraient être réalisées à la même hauteur sans zoom, avec un même niveau d'ensoleillement et un même niveau d'humidité de l'élément de voirie pris en photo. Ces deux paramètres ne sont pas contrôlables, y compris lors d'une même opération d'auscultation. Au cours d'une opération, des parties de voirie peuvent se retrouver à l'ombre de bâtiments ou de couvert végétal. Par ailleurs, de l'eau a pu être déversée pour le nettoyage d'un élément de la voirie, modifiant ainsi l'intensité de la couleur. Un repère ou gabarit peut alors être placé sur l'élément que l'on souhaite prendre en photographie. Il s'agira par exemple d'un disque de couleur blanche (**Figure 12-4**).

Au-delà de ces paramètres, l'identification d'une échelle de l'espace photographié est un point important pour la reconnaissance du matériau en place. Cette échelle peut soit être définie par une hauteur standard fixe de prise d'image, soit à l'aide d'une réglette disposée sur l'élément photographié. Lors de nos premières auscultations, nous avons opté pour l'utilisation d'une hauteur standard fixe. Cette solution s'est révélée difficilement réalisable selon les configurations des éléments de voirie et les obstacles rencontrés. L'utilisation d'une règle de mesure est alors plus adaptée (**Figure 12-4**).

Sources : A. Pavard, 2020

Figure 12-4 – Photographie de revêtement avec étalon de couleur et règle de mesure

Après calibrage de la méthodologie, 2 426 levés ont été réalisés sur le terrain d'étude de Cachan afin de couvrir l'ensemble de la voirie de la commune. Finalement, une base de données géographiques a été produite (**Figure 12-5**). Celle-ci se compose d'objets graphiques ponctuels correspondant aux levés terrains. À chaque point sont associés des attributs relatifs aux matériaux et à leur état à la date du relevé, tels que définis précédemment (***Cf 12.1.1 p. 221***). Chaque élément levé est décrit par sa nature, son gestionnaire, la date du levé, le type de revêtement, son état ou encore la présence d'arbre. Les photographies réalisées au cours des levés sont également associées par le biais de liens d'accès.



Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018 – Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 12-5 – Construction d'une base de données géographique des levés

L'information stockée sur les objets graphiques ponctuels est transférable sur les objets graphiques surfaciques de voirie. Généralement, pour les tronçons de taille inférieure à 30 mètres un seul levé par élément de voirie a été réalisé. Pour les tronçons plus grands, un levé pour chaque élément a été réalisé à chaque extrémité. Ce procédé visait à obtenir une information sur l'état général des tronçons. À partir des données levées sur les grands tronçons, deux solutions sont alors possibles :

- une solution simple consiste à agréger les informations obtenues à chaque extrémité, et ainsi récupérer d'une part l'état le plus dégradé, d'autre part, le cumul des types de dégradations identifiés à chaque extrémité ;
- une solution plus avancée consiste à découper les tronçons en deux parties égales et affecter à chaque partie les informations levées aux extrémités.

Synthèse III.4

De nombreux gestionnaires de voirie urbaine ne disposent que d'informations ponctuelles sur les structures, les revêtements, et l'état de leurs voiries. Par exemple, la commune de Cachan gestionnaire de sa voirie et l'Établissement Public Territorial du Grand Orly Seine et Bièvres auquel la commune est rattachée dans le cadre de la constitution de la Métropole de Paris ne disposaient pas de données homogènes et rassemblées.

Sur la base de la synthèse documentaire faite au niveau des matériaux et des dégradations, et des informations recueillies en matière d'auscultation, nous avons défini et mis en place un processus

d'auscultation pour la voirie urbaine (chaussées et dépendances) en identifiant les informations nécessaires à une cogestion de cette voirie et des réseaux enterrés. Le bordereau développé permet d'identifier l'élément ausculté, son revêtement, les dégradations présentes à un instant t et (potentiellement) corrélées à l'implantation d'un réseau enterré sous voirie, les rénovations précédentes, ainsi que la présence d'arbres. Les levés sont réalisés visuellement à pied à l'aide d'une orthophoto permettant de localiser chaque levé. Ce processus intègre par ailleurs un levé visuel par photographie à la fois pour illustrer les auscultations et pour une utilisation ultérieure à des fins de reconnaissance automatique de revêtement et de dégradation. L'ensemble du processus pourra par ailleurs être implémenté dans un outil embarqué de type SIG permettant d'identifier le lieu levé, de lui associer les informations souhaitées et la photographie réalisée.

Finalement, le développement de ce processus revêt deux enjeux. D'abord, il était nécessaire pour nous afin d'obtenir des données sur le terrain d'études de Cachan et de poursuivre notre travail de conception du référentiel spatial de voirie et son application à travers la question de la coprésence des éléments de voirie et des réseaux enterrés (**Cf. Partie IV, 13.3.1, p. 248**). Ensuite, dans une démarche évolutive, il permet d'apporter des éléments de réflexion pour la mise en place d'une procédure simple et harmonisée d'auscultation des éléments de voirie pour les gestionnaires ne disposant pas d'informations sur leurs infrastructures.

Conclusion Partie III

Cette partie a mis en évidence la diversité d'informations sur les éléments de voirie, que ce soit lors de sa constitution ou durant sa période de service. De ces informations, nous avons pu tirer les données essentielles à intégrer dans une base de données dans la perspective d'une gestion conjointe de la voirie et des réseaux enterrés.

Dans un premier temps, une présentation des familles de structures des chaussées, et des autres éléments de la voirie a permis de pointer la diversité des matériaux utilisés. Il est essentiel d'intégrer dans une base de données de voirie une information descriptive de la structure initiale de ses éléments. A minima, il s'agira de la famille de structure. Au mieux, chaque couche de la structure sera décrite à l'aide d'un attribut matériau et d'un attribut épaisseur. La diversité de matériaux utilisés est liée à des contextes locaux, par exemple l'emploi de cendres volantes à Lille provenant des hauts fourneaux, mais également à des contraintes propres à l'infrastructure et aux fonctionnalités qui lui sont attachées. Le choix des matériaux et des structures répond à des règles, que l'on appelle règles de dimensionnement permettant de garantir une durabilité de structure vis-à-vis de sollicitations mécaniques et aussi climatiques. Notamment, les professionnels se basent sur la nature des sols supports, les indices de gel-degel de la région, et du trafic présent et prévu sur le tronçon de voirie à dimensionner. Le dernier indicateur qu'est le trafic est généralement disponible sur les données linéaires de voirie (**Cf. Partie II, 5.1, p. 103**), et peut être transféré sur les données surfaciques à partir de la méthode de mise en cohérence des objets graphiques linéaires et surfaciques que nous avons développée et présentée dans la partie précédente (**Cf. Partie II, 8, p. 152**)

Dans un second temps, une présentation détaillée des revêtements de surface de la structure a été réalisée. Les matériaux utilisés pour ces revêtements sont particulièrement variés et parfois spécifiques au milieu urbain. Leur choix est établi à partir de critères combinant à la fois les caractéristiques et performances inhérentes aux matériaux, ainsi que les usages faits des éléments de voirie à revêtir. Certains matériaux sont particulièrement adaptés lorsqu'il s'agit d'intervenir sur des réseaux enterrés sous voirie. Ainsi les matériaux modulaires, généralement démontables, sont plus facilement réparables. Au-delà, le coût des matériaux est une donnée également importante. L'usage de revêtements moins onéreux est une solution lorsque le gestionnaire est en mesure de savoir que plusieurs interventions sur réseaux sont susceptibles d'être réalisées. Mais ce choix optimisé de matériaux, selon la modularité, la réparabilité, ou encore le coût, nécessite d'analyser et de valider la coprésence ou non des réseaux enterrés et des éléments de voirie. Cette analyse fait l'objet de la partie suivante.

La voirie évolue dans le temps et souvent se dégrade. Un dimensionnement est réalisé sur la base d'une durée de service de la voirie, pouvant être différente entre la structure et la surface. Chaque élément subit des sollicitations extérieures, liées aux conditions climatiques, aux fonctionnalités en surface et en sous-sol, ainsi qu'aux sols supports. Ces sollicitations conduisent à des dégradations structurelles ou simplement superficielles. Une analyse de ces dégradations a permis d'identifier les plus susceptibles d'être liées ou provoquées par la présence de réseaux enterrés. En effet, les réseaux enterrés ont un impact sur la voirie, soit lors d'incidents sur le réseau, soit lors d'intervention par tranchée ouverte sur le réseau. Les gestionnaires ont recours à des procédures d'auscultation afin de connaitre l'état de leurs voiries et ainsi de hiérarchiser et prioriser les opérations de maintenance. Les procédures et les méthodes permettant de les réaliser ont souvent été développées pour la voirie interurbaine. Pour la voirie urbaine dense, il n'existe pas de méthode harmonisée développée au niveau national. Les gestionnaires de voirie urbaine ont alors généralement peu d'outils accessibles et adaptés aux besoins de la voirie urbaine dans son ensemble (chaussées et dépendances) et à ses enjeux.

Il apparait essentiel de disposer d'informations sur les structures de voirie, les revêtements, mais également sur l'état des éléments de voirie, et ce dans le temps de façon à suivre l'évolution de la voirie. Ces informations harmonisées doivent être intégrées régulièrement dans une base de données géographiques évolutive de la voirie afin que celle-ci soit opérante pour une cogestion de la voirie et des réseaux. La constitution d'un corpus de données sur la voirie afin d'analyser les données utilisées par les gestionnaires a permis d'identifier un manque. En effet, les gestionnaires de voirie urbaine sollicités dans ces recherches n'étaient généralement pas en mesure de fournir de données harmonisées sur leur voirie. Lorsqu'ils en disposaient, ces données étaient très récentes, parfois hétérogènes et encore partielles. Ainsi, les gestionnaires préféraient ne pas transmettre ces informations. La démarche de recherche initiée nécessitant ces informations, nous avons conçu et mis en œuvre une démarche d'auscultation permettant de relever des informations sur les revêtements et les dégradations en milieu urbain. Elle s'appuie sur un bordereau d'auscultation à partir duquel nous identifions l'élément de voirie ausculté, la nature du revêtement et son homogénéité, les principales dégradations pouvant être liées à la présence de réseaux enterrés, les rénovations ultérieures, et la présence d'arbres ayant un impact sur les réseaux et les autres infrastructures environnantes. Ce relevé s'accompagne de photographies réalisées et géolocalisées sur une représentation précise du terrain. Celles-ci sont ensuite reliées aux informations levées à l'aide des bordereaux dans une base de données géographiques. Cette première démarche d'auscultation, précieuse pour l'acquisition de données, a cependant été longue et peut certainement être optimisée. Un travail de développement ultérieur est envisageable pour produire un outil d'auscultation sur tablette intégrant simultanément le levé d'informations sur les bordereaux papiers, et les photographies géolocalisées sur l'orthophoto.

Par ailleurs, les photographies en plus d'illustrer les levés, permettent de constituer une première banque d'images de revêtements et de dégradations, références intéressantes pour développer une méthode d'identification automatique des revêtements et des dégradations.

Dans la partie suivante, nous nous concentrons sur une première application du référentiel spatial de voirie développé. Celle-ci sera réalisée à travers l'analyse de la coprésence des éléments de voirie et des réseaux enterrés.

« *Ainsi, le sol communal, d'abord consacré exclusivement à l'écoulement extérieur des eaux et au parcours des piétons et voitures, est appelé à être partagé souterrainement, et suivant des tracés raisonnés et combinés à l'avance, entre les égouts, les conduites d'eau, et les conduites de gaz, afin que ces trois réseaux soient autant isolés que possible les uns des autres, et se nuisent le moins que faire se pourra au droit des nombreux points de rencontre de leurs plans respectifs.* » (Henri-Charles Emmery, Annales des Ponts et chaussées – Partie technique, 1936)

Partie IV : Apport des données géographiques de voirie – Application à l'analyse des relations spatiales entre voiries et réseaux techniques enterrés

Introduction

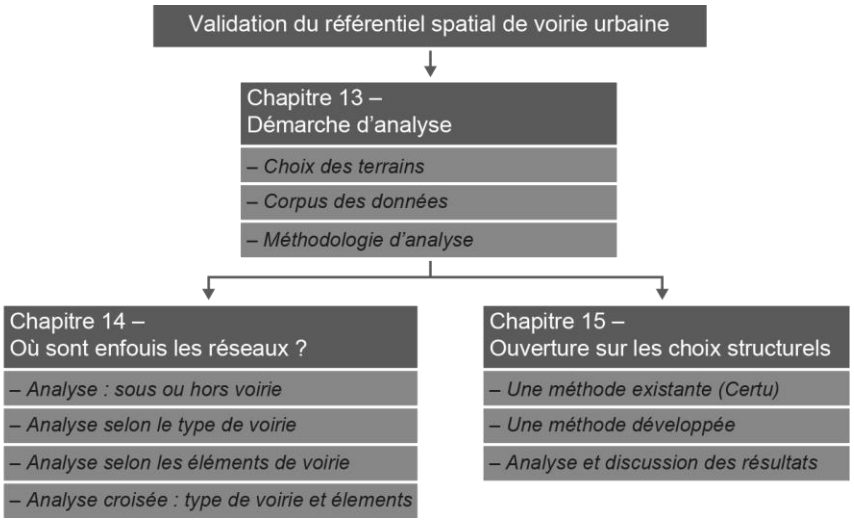
Cette dernière partie vise à répondre à la problématique initiale pratique de l'interaction spatiale et structurelle entre les voiries et les réseaux techniques enterrés et a ainsi un objectif double :

- Premièrement, elle vise à valider les choix que nous avons faits et la démarche que nous avons développée dans les deuxième et troisième Parties pour la conception d'un référentiel spatial de voirie.
- Deuxièmement, elle vise à mettre en évidence les connaissances qu'un tel référentiel spatial permet de produire.

Pour ceci, nous présentons une démarche d'analyse des relations spatiales et structurelles entre la voirie et son environnement à partir de l'exemple des réseaux techniques.

La **Figure 4** illustre l'organisation de cette partie en trois chapitres :

- Dans un premier chapitre, dans la continuité des travaux précédents, nous présentons d'une part les terrains d'analyse retenus et les corpus de données utilisés, et d'autre part la méthodologie développée pour répondre à des questions thématiques
- Dans un deuxième chapitre, nous mettons en œuvre notre démarche d'analyse permettant d'étudier des relations spatiales entre voiries et réseaux techniques. L'analyse des résultats devra permettre de décrire si des logiques préférentielles de localisation des réseaux existent vis-à-vis de la voirie.
- Dans un dernier chapitre, nous ouvrons une discussion sur les relations structurelles entre la présence de réseaux et les matériaux des voiries ainsi que leurs dégradations.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure 4 – Schéma d'organisation de la Partie IV

13. Comment analyser les relations spatiales entre voiries et réseaux – Données et méthode

L'objectif de ce chapitre est de présenter la démarche que nous avons développée pour analyser les relations spatiales et structurelles entre voiries et réseaux.

1) Dans une première section, nous argumentons le choix de trois terrains pour l'analyse des relations spatiales entre les voiries et les réseaux techniques.
2) Dans une seconde section, nous présentons les corpus de données utilisés pour nos analyses.
3) Finalement, dans une dernière section, nous exposons la démarche méthodologique que nous proposons de mettre en œuvre.

13.1. Le choix des terrains : des configurations variées et des données disponibles

Afin d'analyser les relations spatiales et structurelles entre les voiries et les réseaux, la sélection de nos terrains d'analyse devait valider deux critères :

1) disposer de données de voiries et de réseaux techniques sur un même territoire urbain ;
2) représenter une diversité de configurations pour la voirie et les réseaux techniques.

13.1.1. Le premier critère : la disponibilité des données

Pour le premier critère, nous nous appuyons sur nos analyses des données de voiries (**Cf. Partie II, 6, p. 117**) que nous complétons par des recherches sur les données de réseaux. Les questions de localisations préférentielles et de relations structurelles conduisent à sélectionner des terrains pour lesquels nous disposons :

- d'au moins un jeu de données de réseaux techniques pour mener les analyses d'interactions spatiales entre voiries et réseaux ;
- d'une classification hiérarchique ou administrative des tronçons de voirie, laquelle nous permettra d'analyser sous quel type de voirie passent les réseaux techniques ;
- d'une décomposition de la voirie selon les éléments constitutifs, avec à minima la possibilité de distinguer les trottoirs des chaussées, laquelle nous permettra d'analyser les choix de localisation des réseaux techniques sous les tronçons de voirie ;
- d'informations sur les structures de voirie afin d'analyser les relations structurelles.

En partie II, nous avons analysé les données de voirie de six municipalités (San Francisco, Copenhague, Montréal, Victoria, Paris et Bordeaux). La construction de données de voirie comprenant une décomposition de l'infrastructure en tous ses éléments constitutifs a été présentée en partie II. Elle a été mise en œuvre sur la municipalité de Cachan, et sur une partie de la

municipalité de Rouen, le centre-ville. La partie III (**Cf. Partie III, 12,p. 220**), a présenté une démarche exploratrice pour relever des informations sur les matériaux des voiries et leurs dégradations. Cette démarche a également été développée et testée sur Cachan. Ainsi, le **Tableau 13-1** synthétise les informations dont nous disposons pour différentes municipalités étudiées. Nous avons ainsi retenu Cachan et Rouen comme premier terrain d'analyse, ainsi que Victoria comme terrain secondaire. Cependant, ces choix n'ont pas été faits sur le seul critère de la disponibilité des données.

Tableau 13-1 – Synthèse choix des terrains selon la disponibilité des données

municip.	Pays	Voirie		Réseaux techniques	Terrain d'analyse
		Décomposition	Structure (matériaux et dégradations)		
San Francisco	USA	☒	☒	☒	☒
Copenhague	Danemark	☒	☒	☒	☒
Montréal	Canada	☑	☑	☒	☒
Victoria		☑	☒	☑	☑
Cachan	France	☑	☑	☑	☑
Rouen		☑	☒	☑	☑
Paris		☑	☒	☒	☒
Bordeaux		☑	☒	☒	☒

Auteur : A. Pavard 2020

13.1.1. Le second critère : la diversité

Pour le second critère, nous supposons que l'époque et le processus d'urbanisation ont un impact sur l'aménagement des voiries et la localisation des réseaux techniques. Dans la partie II, nous avions évoqué les différences de tracés des voiries entre les territoires anciennement et plus récemment urbanisés (**Cf. Partie II, 6.1, p. 117**). Ainsi, des villes françaises comme Paris et Bordeaux présentent des voiries composées de tronçons articulés et parfois courbés tandis que des villes d'Amérique du nord, telles que San Francisco aux Etats-Unis ou Montréal et Victoria au Canada, disposent d'une voirie essentiellement en damier ou en grille liée à la combinaison de lignes droites. Au-delà du tracé, les villes américaines, plus récentes, ont généralement été développées avec des tronçons de voirie plus larges permettant des aménagements plus étendus des chaussées et des trottoirs que dans les villes européennes plus anciennes. Les choix de Cachan, Rouen et Victoria nous permettent de disposer alors d'un terrain représentatif des grands types de tracés de voiries mis en évidence en partie II (**Cf. Partie II, 6.1, p. 117**). Cachan et Rouen ont comme Paris, Bordeaux et Copenhague des tracés de voiries articulés et courbés. Victoria est un des exemples analysés pour les tracés en grille ou damier. Rappelons que l'objectif ici est de tester une démarche d'analyse permettant de montrer l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de

voirie. Ces choix de terrain sans être exhaustifs permettent d'analyser une variété de situations. Une présentation de l'historique et de la situation administrative de ces terrains renforce d'ailleurs cette idée.

1) **Cachan**, terrain proche du laboratoire est aussi une municipalité au développement ancien, bien ancrée dans la métropole parisienne. Ces traces historiques remontent à l'Antiquité, même si elle s'est principalement développée au cours du XIXème siècle lors de la révolution industrielle et de l'expansion de Paris. Elle appartient aujourd'hui à l'Etablissement Public Territorial (EPT) du Grand Orly Seine Bièvre (***Figure 13-1 b-1, p. 242***). Cachan est de ce fait une municipalité de la Métropole de Paris située dans le département du Val de Marne, au sud de la petite couronne de la municipalité de Paris. Selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (Insee), Cachan possédait en 2016 une population de 30 200 habitants pour une superficie de 2,74 km², soit une densité d'environ 11 000 habs./km² (***Figure 13-1 c-1, p. 242***). Avec 12 autres municipalités parmi les 24 de l'EPT, Cachan a transféré sa compétence voirie conformément aux lois MAPTAM et NOTRe. Le département du Val-de-Marne demeure toutefois responsable de la voirie départementale (**Cf. Partie I, Tableau 3-1, p. 76**).

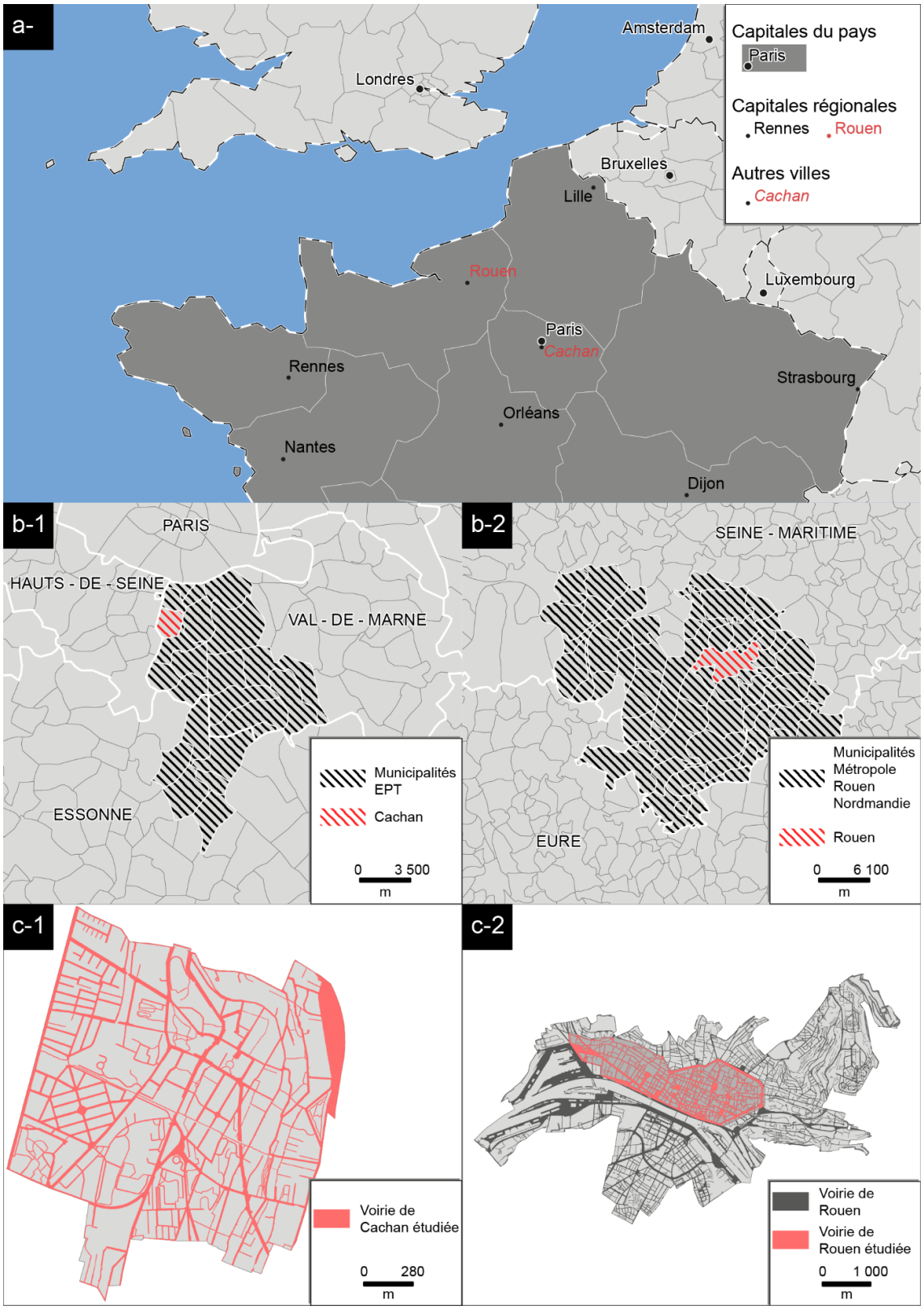
2) **Rouen** est le deuxième terrain d'analyse. La variété d'aménagements de la voirie en fait un choix intéressant. En effet, la ville a connu une destruction importante lors de la seconde guerre mondiale (Bouillot 2010). Contrairement au Havre qui fut presque entièrement détruite, les incendies et les bombardements qui ont frappé Rouen se sont concentrés sur le centre historique et dans un périmètre de 500 mètres de part et d'autre de la Seine (Pusateri 1998). Rouen a alors connu une reconstruction de certains de ces quartiers tandis que d'autres sont restés inchangés ou se sont transformés progressivement. Pour les quartiers reconstruits, Cipolat-Gotet (2018) a relevé une baisse importante de la densité du tissu urbain. Ceci est notamment lié à l'élargissement et à la création de nouvelles voiries, mais aussi à la création et à l'agrandissement d'espaces publics tels que des places et des squares. Selon l'auteur, l'aération du tissu urbain a été limitée, et ce dans la mesure où l'architecte Jacques Gréber en charge du projet avait une vision ancienne de la ville, et ne souhaitait pas créer de places ou d'espaces publics démesurés. Pour autant, la reconstruction de la ville s'est opérée jusque dans les années 1960. Gasperini (2004) indique qu'avec l'expansion économique et démographique ainsi qu'avec la croissance de la circulation automobile, la reconstruction avait connu lors de sa dernière phase une modification majeure. Afin de désengorger le centre-ville, il a été décidé de développer des infrastructures de transport plus importantes notamment sur les quais de la rive droite, et d'implanter de nouveaux espaces de stationnement.

En plus d'être la capitale du département de la Seine-Maritime, Rouen est aujourd'hui le siège de la Métropole Rouen Normandie regroupant 71 municipalités (***Figure 13-1 b-2, p. 242***). Selon l'Insee en 2016, Rouen comptait 110 117 habitants pour 21,38 km², soit une densité d'environ 5 150 habs./km². Contrairement à l'EPT du Grand Orly Seine Bièvre, la Métropole de Rouen Normandie a récupéré l'intégralité des compétences voirie, et gère de ce fait 2 700 km de voirie dont 740 km de voirie anciennement départementale (Métropole Rouen Normandie - Direction de la communication s. d.). Pour des questions de temps de traitement pour la production des données de référence de voirie, et de disponibilité de données réseaux, nous avons choisi de restreindre la zone d'étude au centre-ville (***Figure 13-1 c-2, p. 242***). Celle-ci représente 3,7km² soit 17,3% de Rouen, et englobe environ 23% de la surface de sa voirie. Cette zone a l'avantage de couvrir des secteurs dont l'aménagement a été réalisé à différentes périodes :

- le sud-est a largement été reconstruit entre 1945 et 1960 ;
- le nord conserve en grande partie sa structure médiévale ;
- les quais ont été entièrement réaménagés dans les années 1960 ;
- l'ouest est un secteur mixte mêlant urbain, résidentiel, portuaire et industriel et est un terrain privilégié pour les nouveaux aménagements de la ville. L'avenue Pasteur a notamment été réaménagée pour accueillir le Bus à Haut Niveau de Service (BHNS).

Ainsi, Rouen apporte l'exemple d'un territoire ayant connu des reconstructions majeures au cours du XXème siècle. Celles-ci ont impacté les tracés de voirie, et nous pouvons le supposer, ont aussi eu un rôle sur l'implantation des réseaux.

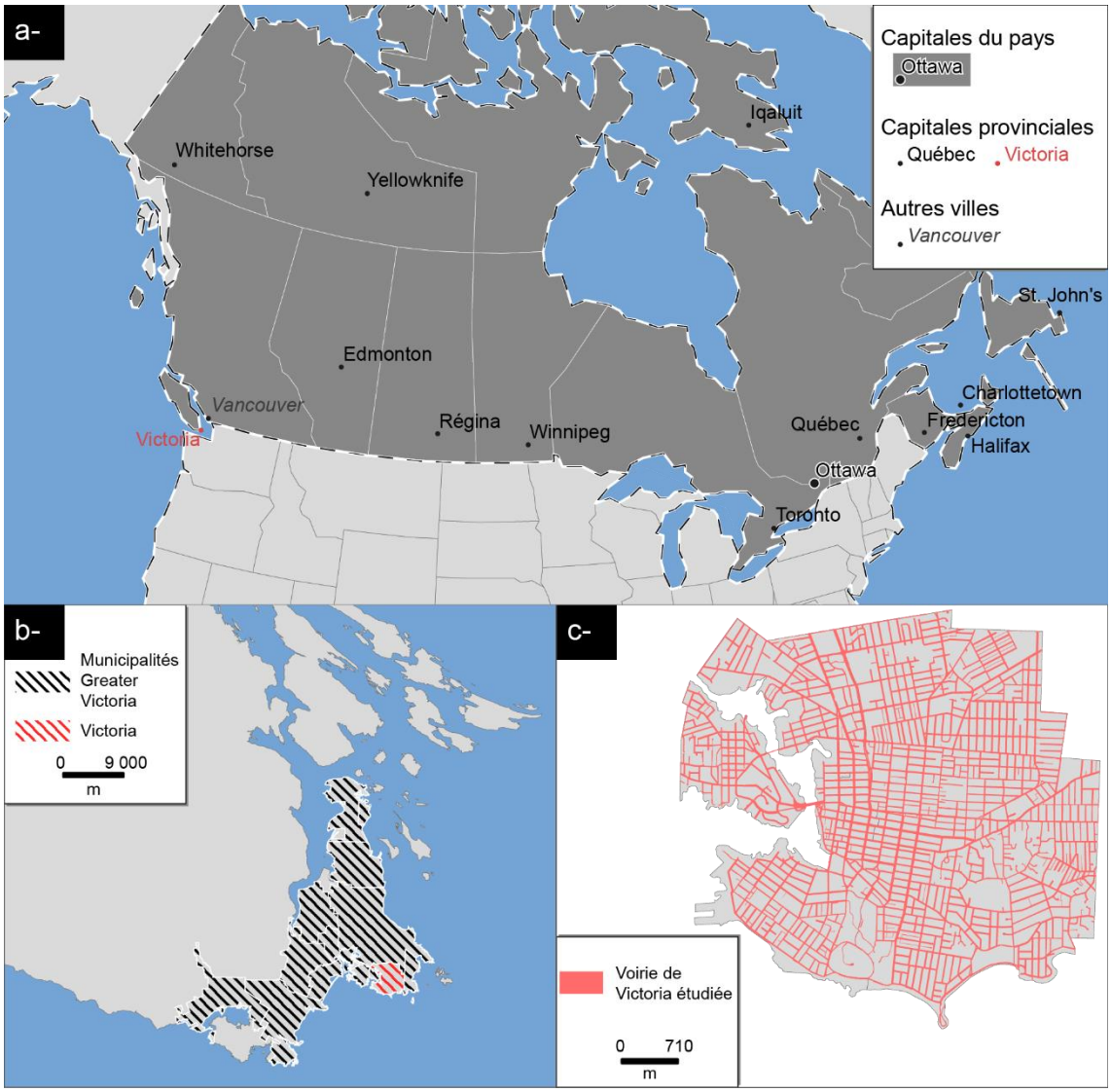
3) **Victoria** est notre dernier terrain d'analyse. Nous disposons de données de voirie et de réseaux fournies par la municipalité. Le choix de Victoria permet de confronter les résultats obtenus sur des terrains français à un terrain étranger présentant un modèle urbain différent : une ville américaine développée à partir du milieu du XIXème siècle, avec une organisation en damier. Victoria est la capitale de la province de la Colombie Britannique (***Figure 13-2 a, p. 243***) et le siège de la région métropolitaine de Victoria (***Figure 13-2 b, p. 243***). La municipalité est localisée au sud de l'Île de Vancouver. En 2016, l'office national de statistique dénombrait dans la municipalité 85 792 habitants sur 19,68 km², soit environ 4 359 habs./km² (***Figure 13-2 c, p. 243***). Au Canada, les municipalités ont les compétences pour la voirie dont la gestion ne dépend pas du gouvernement provincial ou national.



Sources : European Commission, Eurostat (ESTAT), GISCO 2018 ; © IGN, BD TOPO®, BD GEOFLA® 2018

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 13-1 – Terrains d'analyses : Cachan et Rouen (France)



Sources : Commission for Environmental Cooperation, 2006 ; CityOfVictoriaBC, 2019 – Auteur : A. Pavard 2020

Figure 13-2 – Terrains d'analyses : Victoria (Canada)

13.2. Les corpus de données

Au-delà de la disponibilité des données, celles-ci ne sont pas identiques :

- Pour les données de voiries deux éléments varient, la granularité sémantique, c'est-à-dire la décomposition des objets géographiques intégrés dans les données, et les attributs descriptifs des voiries.
- Pour les données de réseaux, le type de réseau varie.

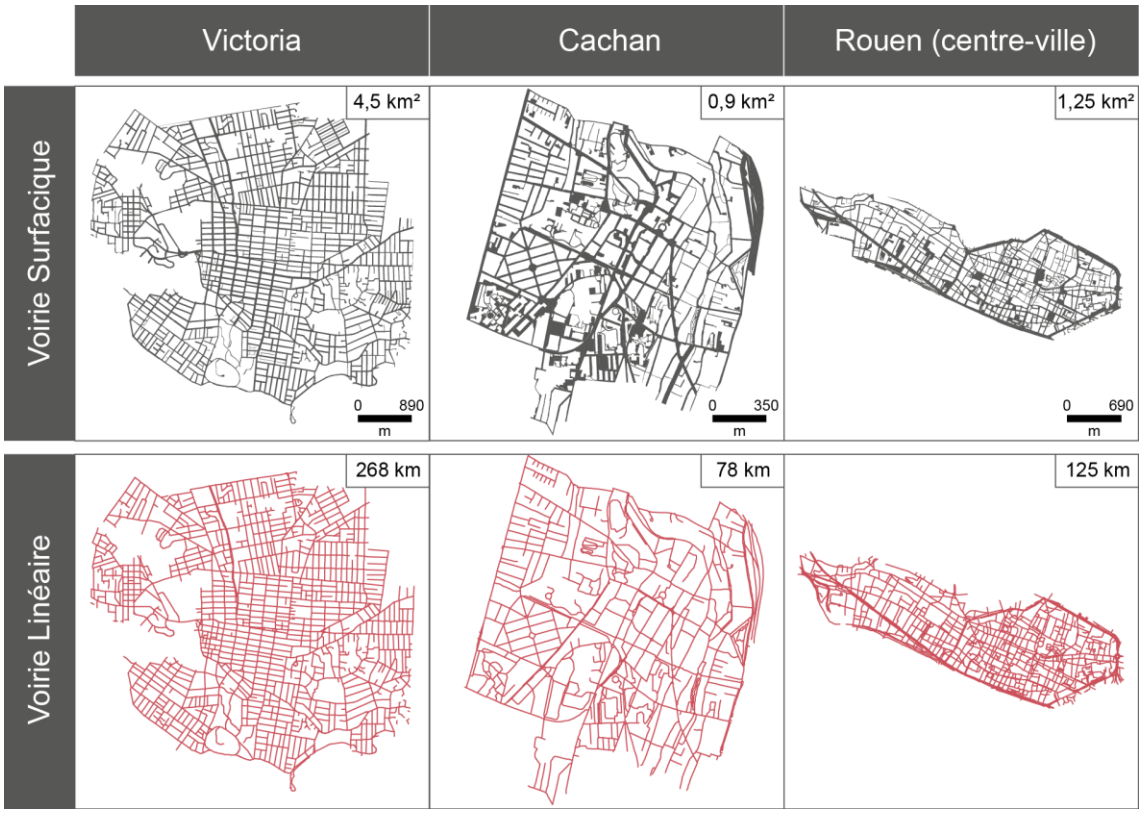
13.2.1. Les données de voirie

Dans la partie II nous avons analysé les modèles de données de voirie existants et présenté différents cas de bases de données. Nous avions alors conclu que les bases de données fondées sur une représentation linéaire de la voirie étaient les plus répandues, et les bases de données

utilisant une représentation surfacique étaient peu développées. Nous avions également constaté que les bases de données surfaciques pouvaient suivre des normes variées (**Cf. Partie II, 5.2.1, p. 107**).

Pour chacun de nos terrains nous disposions de données linéaires de voirie produites par des organismes locaux (Victoria) ou nationaux (Cachan et Rouen). Les données surfaciques de voirie proviennent de nos travaux (Cachan et Rouen) et de la municipalité (Victoria) (**Figure 13-3**) :

- la voirie de Victoria couvre 4,5km² pour 268 km linéaire ;
- la voirie de Cachan couvre 0,9 km² pour 78 km linéaire ;
- la voirie du secteur étudié pour Rouen centre-ville couvre 1,25km² pour 125 km linéaire.



CityOfVictoriaBC, 2019 ; IGN, BD TOPO®, 2018 / Auteur : A. Pavard 2020

Figure 13-3 – Corpus de données voirie pour Victoria (CA), Cachan (FR) et Rouen centre-ville (FR)

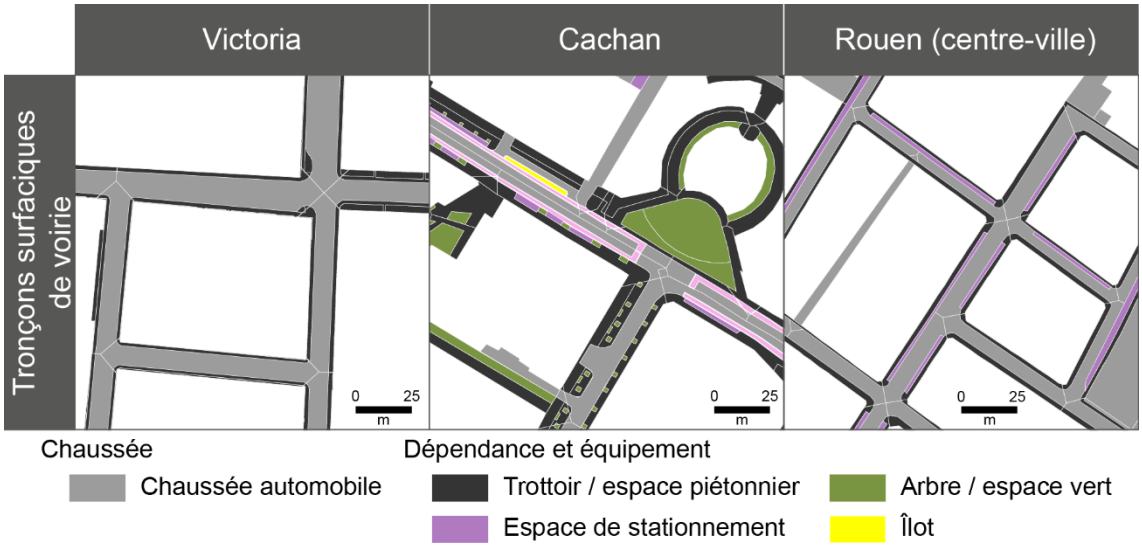
D'abord, les données surfaciques de voirie ont des granularités sémantiques différentes (***Cf. Tableau 13-1, p. 239***). En effet, pour le niveau de granularité le plus élevé, elles distinguent, comme pour Cachan, tous les éléments constitutifs (chaussées, trottoirs, stationnement et autres). À l'inverse, pour le niveau de granularité le plus faible, elles distinguent uniquement les chaussées et les trottoirs, comme pour Victoria.

Ensuite, les données linéaires et surfaciques de voiries sont décrites par des attributs différents. Pour les données linéaires, les classifications hiérarchiques (vocation ou administrative) ne sont pas les mêmes entre les données canadiennes et françaises :

- Les données linéaires de voirie de Victoria sont enrichies d'un attribut noté « class_v » relatif à la vocation des voies.
- Les données linéaires de voirie de Cachan et de Rouen sont issues de la BD TOPO produite par l'IGN. Ces données sont enrichies d'un attribut noté « Cl_Admin » indiquant la classe administrative de chaque tronçon de voirie. Les modalités prises par les tronçons sont alors « Autoroute », « Nationale », « Départementale » ou encore « Autre ».

Pour les données surfaciques, la structure des voiries est décrite uniquement pour Cachan, à travers des attributs décrivant la couche de roulement (ou revêtement) : le matériau principal et ses dégradations.

La mise en cohérence des données surfaciques et linéaires de voirie à l'aide de la méthodologie développée dans le cadre de la thèse (**Cf. Partie II, 8, p. 152**) permet de découper les données surfaciques de voirie en tronçon de voirie et d'attribuer à chaque tronçon surfacique les informations contenues dans les tronçons linéaires (**Figure 13-4**).



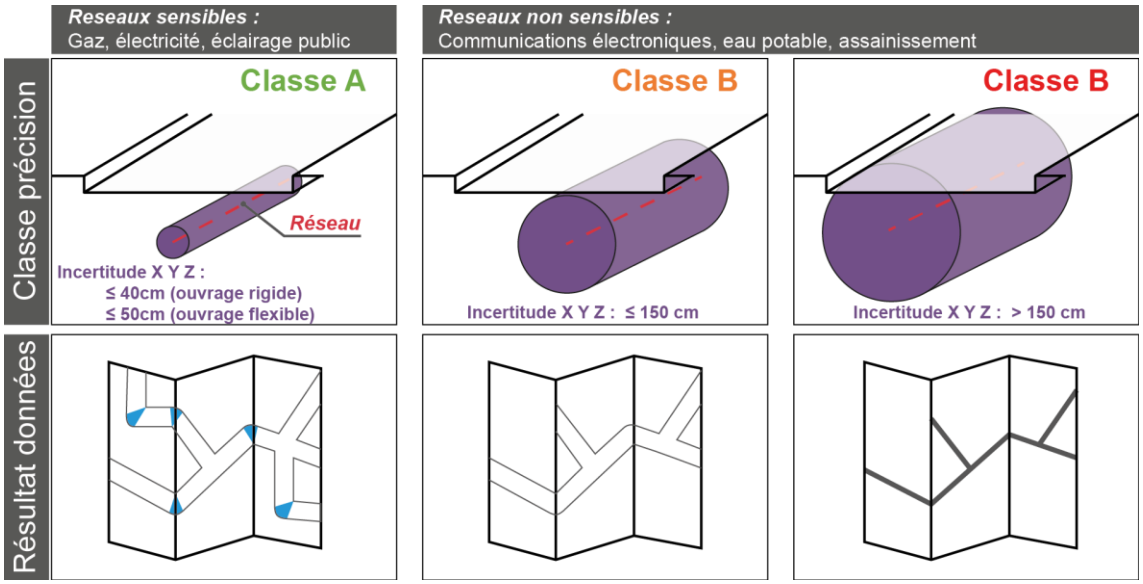
CityOfVictoriaBC, 2019 ; IGN, BD TOPO®, 2018 / Auteur : A. Pavard 2020

Figure 13-4 – Décomposition des donnés surfacique de voirie

13.2.2. Les données de réseaux techniques

Les réseaux techniques font partie de l'environnement de la voirie. Ces réseaux sont regroupés en deux catégories : les réseaux dits sensibles tels que les réseaux de gaz, d'électricité basse et haute tension ou encore de chaleur, et les réseaux non sensibles pour la sécurité tels que l'eau, l'assainissement, ou encore de télécommunication. La sensibilité d'un réseau pour la sécurité tient

compte de son impact sur les potentiels dégâts humains et matériels qu'il peut engendrer dans le cas où il viendrait à être endommagé au cours d'une intervention. La localisation de ces réseaux techniques est donc importante. Nous avons choisi de ne pas aborder dans cette partie les questions de la représentation et de la précision des données de ces infrastructures. Rappelons seulement que la précision des données de réseaux techniques est déjà encadrée par la loi dite anti-endommagement et les décrets DT/DICT (**Cf. Partie I, 3.3.2, p. 83**). Actuellement, les données sont classées selon trois niveaux de précision pour la localisation des infrastructures en longitude, latitude et profondeur (X Y Z) (**Figure 13-5**). La loi dite anti-endommagement impose aux gestionnaires de réseaux sensibles, de localiser leurs réseaux avec une incertitude de localisation inférieure à 40 cm (canalisation rigide) ou 50 cm (canalisation flexible). Pour les réseaux non sensibles l'incertitude est autour de 150 cm. Ces différences d'incertitude de localisation des réseaux conduisent à la production de données géographiques plus ou moins précises et détaillées. Nous considérerons ici que les données dont nous disposons pour les réseaux sensibles sont de classe A et les autres de classe B. Nous supposerons par ailleurs que nos données sont complètes, laissant de côté les problématiques de la précision et de l'exhaustivité des données.



Sources : D. Martinez n.d ; SOGELINK 2017

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 13-5 – Classe et niveau de précision des données selon le type de réseau technique

Les données de réseaux représentent des ouvrages de natures variées comprenant :

- les conduites principales,
- les branchements reliant les bâtiments aux conduites principales,

– plusieurs types d'ouvrages visibles en surface, les affleurants, tels que les regards, les boites à clef ou encore des éléments de signalisation.

Nous avons choisi de concentrer la mise en œuvre de notre démarche d'analyse sur les conduites principales. D'abord, nous avons exclu les ouvrages visibles et ayant une emprise réduite sur la voirie. Ensuite, nous avons écarté les branchements, dans la mesure où ceux-ci ne sont pas toujours répertoriés par les gestionnaires.

Au-delà des points communs entre les données de réseau, on observe des spécificités liées au fluide transporté (**Tableau 13-2**) :

– L'**assainissement** se partage à minima en réseau d'eau usée (EU) ou « sewer » pour Victoria, et en réseau d'eau pluviale (EP) ou « storm » pour Victoria. Cachan, comme de nombreuses municipalités françaises disposent également d'un réseau unitaire (UN) où sont traitées de façon indifférenciée les eaux usées et les eaux pluviales.
– L'**électricité** se partage selon le niveau de tension d'électricité transporté par le réseau. Ainsi, il existe un réseau de haute tension noté « HTA » et un réseau de basse tension noté « BT ». Pour Cachan, une faible proportion du réseau n'est pas identifiée selon la tension et apparait de ce fait en « non renseigné ».
– Le **gaz** est présenté par son réseau de distribution, c'est-à-dire par les canalisations acheminant le gaz des réseaux de transport jusqu'aux consommateurs. Nous constatons que certains branchements sont inclus dans les données sans pouvoir les distinguer des canalisations.

Tableau 13-2 – Longueur des canalisations principales selon les réseaux

		Victoria	Cachan	Rouen (centre-ville)
Assainissement	***Total***	**508 km**	**55,5 km**	☒
	Réseau Eau usée (EU)	239 km	8 km	☒
	Réseau Eau pluviale (EP)	269 km	9 km	☒
	Réseau Unitaire (UN)	inexistant	35,5 km	☒
	Non renseigné	inexistant	3 km	☒
Electricité total	***Total***	☒	**136,5 km**	☒
	Réseau Haute tension (HTA)	☒	64 km	☒
	Réseau Basse tension (BT)	☒	72 km	☒
	Non renseigné	☒	0,5 km	☒
Gaz	***Total***	☒	**58,5 km**	**134 km**

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

13.3. Méthodologie d'analyse

Notre objectif ici est de mettre en évidence l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie, en développant une méthodologie permettant de traiter des questions thématiques. La mise en œuvre de cette méthodologie sur les trois terrains d'analyse mettra en évidence le type de connaissance que le référentiel spatial de voirie peut permettre de produire.

13.3.1. Méthodologie pour savoir : Où sont enfouis les réseaux techniques ?

Afin d'analyser les relations spatiales entre les réseaux techniques enfouis et les voiries, nous avons conçu une méthodologie en plusieurs étapes.

Tout d'abord, il s'agit d'identifier les réseaux enfouis sous voirie et ceux enfouis sous d'autres espaces tels que des bâtiments, des parcs et jardins, ou encore des espaces ouverts privés. Pour cela un croisement spatial entre les réseaux techniques et les voiries sans distinction permet de quantifier la longueur totale des réseaux enfouis sous ou hors voirie. Dans la suite de notre démarche, seuls les réseaux enfouis sous voirie seront considérés. Toutefois, on pourra mener d'autres analyses pour comprendre les logiques de localisation lorsque les réseaux ne passent pas sous voirie.

Ensuite, en ne considérant que les réseaux enfouis sous voirie, nous analysons plus finement les logiques d'implantation (**Figure 13-6**) :

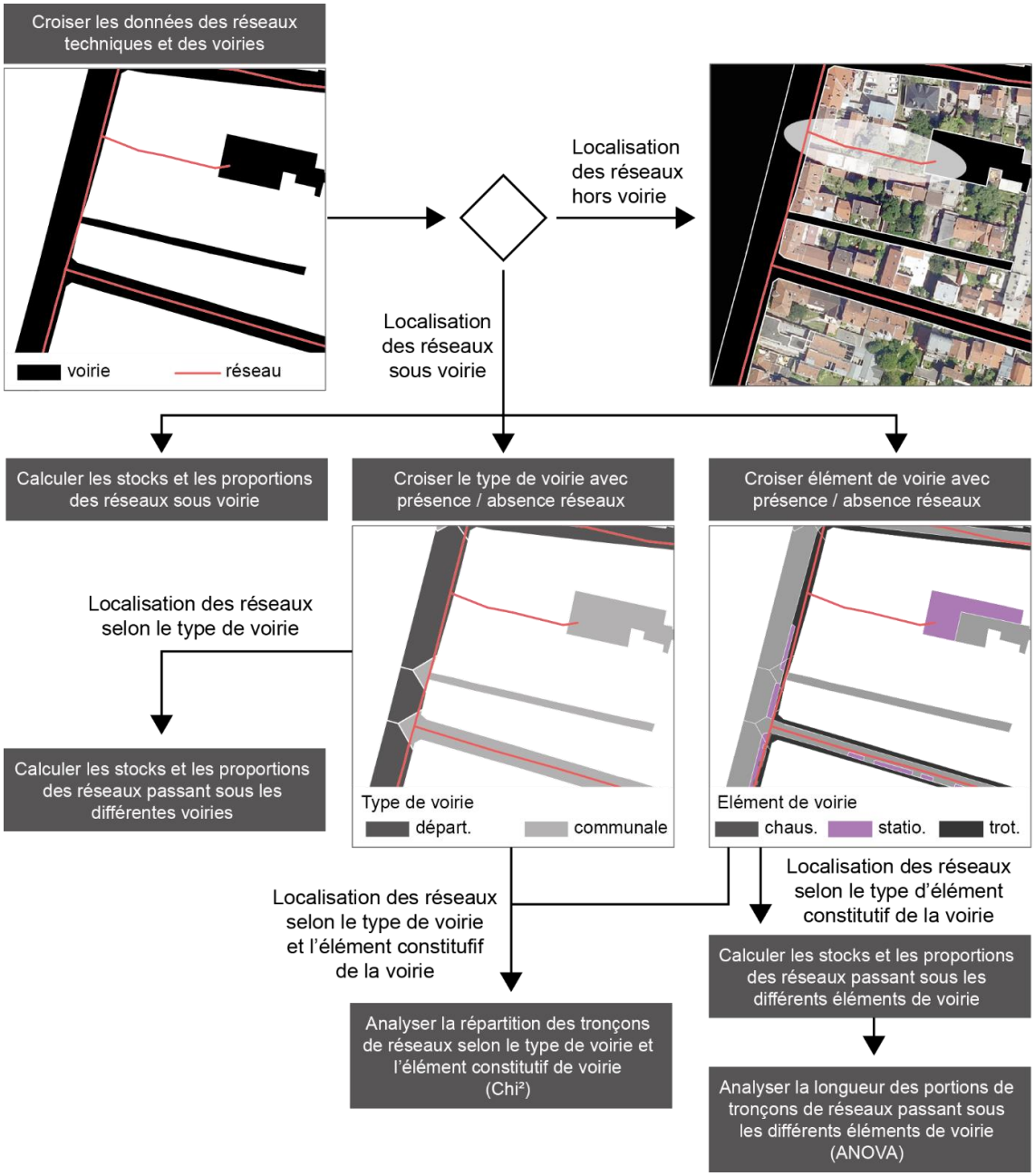
- **Premièrement**, **nous cherchons à identifier des logiques d'implantation des réseaux sous les voiries selon leur niveau hiérarchique**. **Par exemple, les réseaux sont-ils davantage enfouis sous les voiries locales ?**
- **Deuxièmement**, **nous cherchons à mettre en évidence des logiques d'implantation des réseaux sous les éléments constitutifs des voiries. Par exemple, les réseaux sont-ils davantage enfouis sous les trottoirs ?**

Pour ces deux premières étapes, un croisement spatial des réseaux avec les tronçons de voiries est réalisé. Ensuite, des décomptes en stock de longueur des réseaux et en taux sont produits selon les niveaux hiérarchiques des voiries, puis selon les éléments constitutifs des voiries.

- **Troisièmement**, **nous cherchons à analyser l'existence ou non d'une logique d'implantation des réseaux croisée, entre la hiérarchie et les éléments constitutifs des voiries**. **Par exemple, les réseaux sont-ils davantage enfouis sous les dépendances dans le cas des voiries de niveau hiérarchique élevé ?**

Pour cette dernière étape, nous utilisons les informations issues des deux croisements spatiaux précédents. Leur combinaison permet de réaliser une analyse bivariée dite du Chi². Le test du Chi² est une analyse statistique conçue pour déterminer si les différences observées entre deux distributions (les tronçons de réseaux localisés sous les voiries selon leur niveau hiérarchique, et

selon l'élément constitutif) de fréquences (les sommes des longueurs des tronçons de réseaux), relèvent du hasard, ou au contraire d'une logique de distribution.



Auteur ; A.Pavard 2020

Figure 13-6 – Schéma de la démarche et de sa mise en œuvre

13.3.2. Méthodologie pour savoir : Quelles relations structurelles entre réseaux et voiries ?

L'étude des relations structurelles entre réseaux et voiries peut être réalisée à deux niveaux distincts :

1) les relations entre les choix des matériaux de voirie et la présence ou non de réseaux techniques enfouis ;
2) les relations entre les dégradations observées sur la voirie et la présence ou non de réseaux techniques enfouis.

Concernant les choix des matériaux et des structures de voirie lorsque des réseaux y sont enfouis. Les catalogues de matériaux analysés en partie III n'ont pas mis en évidence un choix de matériau selon la présence ou non d'un réseau. Cependant, nous avons identifié qu'en présence de réseaux, certains matériaux pouvaient être plus intéressants, notamment de par leur réparabilité. Cette analyse vise à mettre en évidence un possible phénomène de choix intuitif, non explicité par les gestionnaires. Dans tous les cas, nous démontrerons l'intérêt de disposer d'une information sur les matériaux et les structures de voirie, dans une logique de co-maintenance voiries et réseaux. Pour cela, nous proposons une analyse exploitant les données produites sur Cachan, pour quantifier les surfaces de voirie en fonction des différents matériaux. Le croisement de cette information avec la localisation des réseaux permettra d'initier une réflexion sur les choix techniques, économiques, mais aussi environnementaux pour les matériaux de revêtement.

Concernant les dégradations de voirie, celles-ci sont liées à de nombreux facteurs, dont plusieurs sont indépendants de la présence de réseaux techniques. De la même façon que pour la question des matériaux, nous proposons ici une première quantification des portions de voirie dégradées selon la présence ou non de réseaux techniques. Cette analyse pourrait être améliorée dans des travaux ultérieurs à partir :

- d'informations détaillées sur les dégradations et leur localisation ;
- de l'intégration dans un modèle des différentes causes de dégradation afin d'identifier ce qui relève ou non des réseaux.

Synthèse IV.1

Ce chapitre a présenté les terrains retenus (Cachan, Rouen centre-ville et Victoria), les corpus de données aussi bien en termes de données de voirie (granularité sémantique) que de données de réseaux (localisation de réseaux techniques de différentes natures).

Ensuite, il a présenté la méthodologie que nous avons développée pour la mise en œuvre des analyses sur les relations spatiales et structurelles entre les voiries et les réseaux. Celle-ci peut être appliquée lorsque l'on dispose d'un référentiel spatial de voirie et de données de réseaux techniques. Cette méthodologie doit permettre aux gestionnaires de voirie :

- d'enrichir leurs connaissances sur leurs voiries et les liens qu'elles entretiennent avec leur environnement ;
- de renforcer leurs stratégies de gestion en optimisant les choix structurels des voiries, ainsi que leurs stratégies de maintenance en reliant structure et dégradations des voiries selon la localisation des réseaux.

La méthodologie d'analyse comporte deux composantes permettant de montrer l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie tel que nous l'avons défini (**Tableau 13-3**) :

- composante spatiale : la localisation des réseaux techniques par rapport aux voiries ;
- composante structurelle : les choix structurels voiries / réseaux.

Tableau 13-3 – Méthodologie d'analyse : données utilisées

	Analyse	Terrain	Assain.	Elect.	Gaz
Où sont enfouis les réseaux techniques ?	Localisation des réseaux sous Voirie ou hors voirie	Victoria	☑	☒	☒
		Cachan	☑	☑	☑
		Rouen centre-ville	☒	☒	☑
	localisation des réseaux selon le type de voirie	Victoria	☑	☒	☒
		Cachan	☑	☑	☑
		Rouen centre-ville	☒	☒	☑
	localisation des réseaux selon les éléments constitutifs de la voire	Victoria	☑	☒	☒
		Cachan	☑	☑	☑
		Rouen centre-ville	☒	☒	☑
Quel intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie : ouverture sur les choix structurels voiries-réseaux, et la maintenance de la voirie	Localisation des réseaux et les choix structurels pour les voiries	Victoria	☒		
		Cachan	☑	(tous les réseaux ensemble)	
		Rouen centre-ville	☒		
	Localisation des réseaux et la dégradation des voiries	Victoria	☒		
		Cachan	☑	(tous les réseaux ensemble)	
		Rouen centre-ville	☒		

Auteur ; A.Pavard 2020

14. Où sont enfouis les réseaux techniques ?

L'objectif de ce chapitre est de présenter la mise en œuvre de la méthodologie développée précédemment (***Cf. 13.3.1, p. 248***), et permettant d'analyser les relations spatiales entre les réseaux techniques enfouis et les voiries.

1) Dans une première section nous analysons le lien de coprésence entre voiries et réseaux
2) Dans une seconde section, nous étudions les relations spatiales entre le type de voirie et la présence ou non de réseaux.
3) Dans une troisième section, nous discutons des logiques d'enfouissement des réseaux selon les éléments constitutifs de la voirie.
4) Finalement, nous menons une analyse croisée entre type de voirie, éléments constitutifs de voirie et présence de réseaux.

Cette mise en œuvre est limitée, aussi bien par le nombre de terrains d'analyse que par le nombre de réseaux techniques. Les résultats obtenus permettront uniquement de donner des tendances pour les terrains d'analyse, et ne seront pas généralisables. À notre connaissance, il n'existe aujourd'hui pas d'études sur le sujet permettant de croiser et comparer nos résultats.

14.1. Les réseaux sont principalement enfouis sous les voiries

Notre premier résultat porte sur l'importance de l'emprise de la voirie en milieu urbain. Elle est de l'ordre de 20 à 35% : 22,9% pour Victoria, 32,1% pour Cachan et 33,8% pour le centre-ville de Rouen. Ensuite, nous constatons une logique similaire d'enfouissement des réseaux sous la voirie, et ce quels que soient les réseaux et les terrains d'étude. Ce taux d'enfouissement des conduites se situe autour de 90 à 95% (**Tableau 14-1**). Compte tenu de la surface occupée par les voiries dans les municipalités, et de la proportion des réseaux techniques localisés sous les voiries, nous pouvons confirmer l'intuition que l'infrastructure routière est un lieu privilégié pour l'implantation des réseaux.

Tableau 14-1 – Synthèse de la localisation des réseaux sous voirie

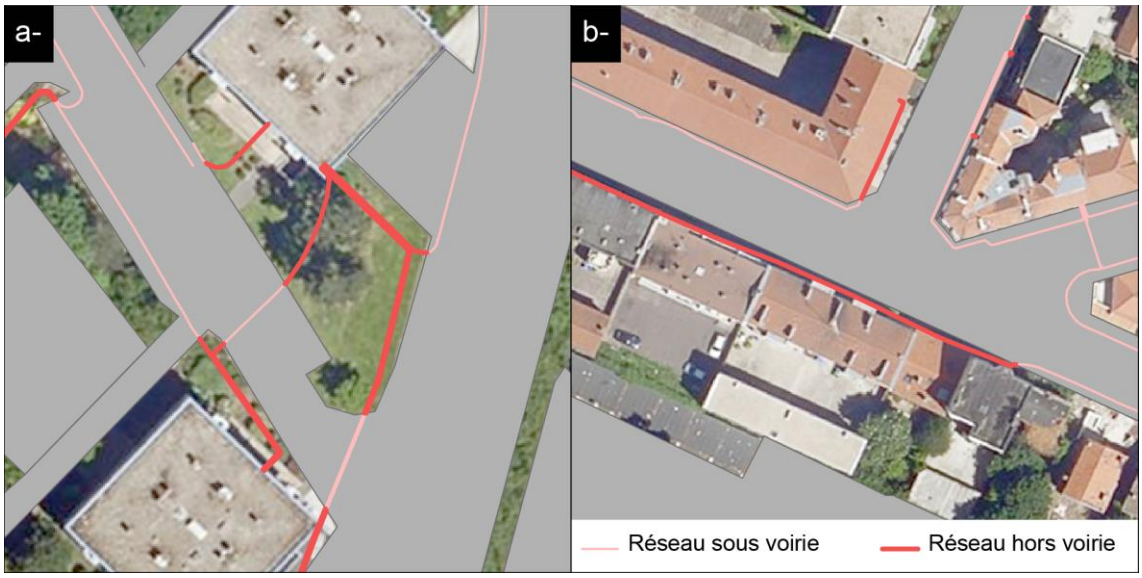
	Victoria		Cachan		Rouen (centre-ville)	
Assainissement	90 %	456 km	95%	53 km		
Electricité	☒	☒	88%	136 km	☒	☒
Gaz	☒	☒	94%	55 km	95,8%	132 km

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

Nous observons par ailleurs que ces valeurs globales de répartition peuvent lisser des situations hétérogènes au sein même des différents réseaux. Nous avons indiqué que le réseau d'assainissement se décompose en deux ou trois catégories : les eaux usées (EU), les eaux

pluviales (EP), et pour les cas français l'unitaire (UN). De la même façon le réseau d'électricité se décompose en deux catégories selon le niveau de tension transporté : basse (BT) et haute tension (HTA).

Les tableaux en **Annexe M** (**Cf. p. 367**) présentent de façon plus détaillée les résultats de localisation des réseaux. Ainsi, nous observons que pour le réseau d'assainissement, la répartition entre les différentes catégories (EP, EU, UN) sous voirie et hors voirie est comparable, pour un même terrain : généralement moins de 10% hors voirie et plus de 90% sous les voiries. En revanche, nous constatons un écart de plus de 10% pour le réseau électrique BT et HTA de Cachan : 83% du câblage de basse tension passent sous la voirie contre 94% pour le câblage haute tension. Les données décrivant le réseau de distribution d'électricité de Cachan traduisent cette situation. En effet, le réseau de basse tension a pour vocation d'alimenter l'ensemble des bâtiments. Par ailleurs, au-delà des branchements classiques permettant de relier les bâtiments aux conduites principales, certaines conduites principales semblent distribuer directement l'électricité dans des bâtiments. La **Figure 14-1 a** illustre cette situation. Une autre explication de cette situation relève sans doute aussi de la précision des données soit des voiries ou des réseaux (**Figure 14-1 b**).



Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018 ; Enedis, 2020

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 14-1 – Exemple de localisation du réseau d'électricité de basse tension à Cachan

14.2. La voirie locale est davantage susceptible d'accueillir des réseaux

Un attribut de la BD TOPO de l'IGN distingue les tronçons de voirie selon leur classe administrative (**Tableau 14-2**). Ainsi nous observons pour Cachan et Rouen centre-ville que :

- les voiries *communales et autres* occupent la surface la plus importante : 75,6% pour Cachan et 83,8% pour Rouen centre-ville ;
- les voiries *départementales* représentent 22,6% à Cachan et 14,2% à Rouen centre-ville ;
- la voirie *nationale* est absente de Cachan tandis qu'elle représente 1,5% de la voirie de Rouen centre-ville ;
- 1,8% de la voirie de Cachan est classée *autoroute*, contre 0,5% pour Rouen centre-ville.

Tableau 14-2 – Répartition des voiries selon leur classe administrative : Cachan et Rouen centre-ville

	Autoroute	Nationale	Départementale	Communale + Autre	Total
Cachan (m²)	15 863	0	194 419	651 872	862 154
Cachan (%)	1,8	0	22,6	75,6	100
Rouen centre-ville (m²)	6 742	18 484	178 102	1 052 370	1 255 698
Rouen centre-ville (%)	0,5	1,5	14,2	83,8	100,0

Sources : IGN, BD TOPO®, 2018

Les données de Victoria n'ont pas permis la même distinction de la voirie. Nous avons travaillé ici sur la classification en fonction de la vocation présente dans les données (**Tableau 14-3**). Elle se rapproche de celle utilisée pour les calculs de dimensionnement en France (**Cf. Partie I, Tableau 2-1, p. 69**). Nous émettons ici l'hypothèse que l'argument d'une localisation préférentielle des réseaux sous les voiries communales plutôt que sous les voiries d'échelons administratifs supérieurs se décline de la même façon avec la vocation des voiries. De là, nous avons déterminé si les réseaux de Victoria sont davantage implantés sous les voiries dites locales et de desserte que sous les voiries collectrices ou artérielles. La répartition des voiries selon leur vocation est la suivante : 63,7% de voirie locale et autre, 14,5% de voirie collectrice, et 21,8% de voirie artérielle.

Tableau 14-3 – Répartition des voiries selon leur classe hiérarchique : Victoria

Terrain	Artérielle	Collectrice	Locale et autre	Total
Victoria (m²)	1 351 297	901 111	3 957 213	6 209 621
Victoria (%)	21,8	14,5	**63,7**	100

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

Les résultats sur la répartition générale des réseaux sous les voiries semblent effectivement attester une logique préférentielle d'implantation des réseaux sous les voiries communales (**Tableau 14-4**). Ainsi, nous observons pour Cachan une localisation sous la voirie communale ou autre de 63% des réseaux d'assainissement, 65% des réseaux d'électricité et 69% des réseaux

de gaz. La situation est encore plus prononcée pour Rouen centre-ville avec plus de 87% des réseaux de gaz enfouis sous la voirie locale ou autre.

Tableau 14-4 – Répartition des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Cachan et Rouen centre-ville

Terrain	Réseau	Nat. (m)	Nat. (%)	Dep. (m)	Dep. (%)	Autre (m)	Autre (%)	Tot. (m)
Cachan	***Assainissement***	N.D.	N.D.	19 546	37	33 361	**63**	52 913
	Electricité	N.D.	N.D.	42 640	35	78 050	**65**	120 689
	Gaz	N.D.	N.D.	16 982	31	37 992	**69**	54 974
Rouen	***Gaz***	666	0,5	16 007	12,1	115 447	**87,4**	132 120

Sources : EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

Cependant, cette première observation générale est cependant à nuancer. Tout d'abord, une analyse plus fine sur le réseau d'assainissement de Cachan, selon son type (EP, EU, UN), et son gestionnaire (commune ou département), révèle des situations variables. Le **Tableau N-3** en **Annexe N** (**Cf. p. 369**) révèle :

- d'une part, que les réseaux d'eaux usées (EU) sont majoritairement localisés sous les voiries départementales, tandis que les réseaux d'eaux pluviales sont répartis à proportions équivalentes entre les voiries départementales et communales, et enfin, les réseaux unitaires (UN), les plus importants à Cachan, sont principalement localisés sous les voiries communales ;
- d'autre part, que les réseaux d'assainissement gérés par le département sont majoritairement enfouis sous les voiries départementales, tandis que les réseaux d'assainissement gérés par la commune sont enfouis de préférence sous les voiries communales.

Le **Tableau N-3** en **Annexe N** (**Cf. p. 369**) révèle quant à lui que si les réseaux électriques de basse tension (BA) sont majoritairement enfouis sous les voiries communales, les réseaux électriques de haute tension (HTA) sont enfouis à proportions équivalentes sous les voiries départementales et communales.

Au-delà des distinctions internes aux réseaux, rappelons que les voiries départementales à Cachan représentent 22,6% des voiries, tandis qu'elles ne représentent que 14,2% des voiries dans Rouen centre-ville. Dès lors que l'on observe le mètre linéaire de réseau rapporté au m² des voiries selon leur classe administrative, la tendance est moins tranchée, voire inversée (**Tableau 14-5**). Ainsi, nous observons systématiquement à Cachan une densité plus importante de réseaux sous les voiries départementales. Dans Rouen centre-ville, les voiries communales et autres sont les plus densément occupées par les réseaux de gaz.

Tableau 14-5 – Répartition des réseaux techniques rapportée à la surface des voiries : Cachan et Rouen centre-ville

		Nat. (m / m²)	Dep. (m / m²)	Autre (m / m²)	Total (m)
Cachan	***Assainissement***	N.D.	**0,10**	0,05	52 913
	Electricité	N.D.	**0,22**	0,12	120 689
	Gaz	N.D.	**0,09**	0,06	54 974
Rouen Rest.	***Gaz***	0,04	0,09	**0,11**	132 119

Sources : EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

À Victoria, nous observons (**Tableau 14-6**) une logique préférentielle de localisation des réseaux d'assainissement sous la voirie locale de la municipalité, avec 62% du linéaire des réseaux d'assainissement. Les voiries artérielles et collectrices accueillent respectivement 22% et 16% du linéaire d'assainissement. Le linéaire des réseaux rapporté à la surface voirie des différentes classes de vocation révèle cependant des densités équivalentes. Par ailleurs, la répartition des réseaux d'assainissement sous les différentes voiries est stable, même en décomposant les réseaux d'assainissement en réseau d'eaux pluviales et d'eaux usées (**Cf. Annexe N, Tableau N-1, p. 369**).

Tableau 14-6 – Répartition des réseaux d'assainissement selon la classe hiérarchique de la voirie : Victoria

	Artérielle (m)	Collectrice (m)	Locale (m)	Total (m)
Mètre	102 459	70 849	282 958	456 265
%	22	16	**62**	100
M / m² (voirie)	0,08	0,08	0,07	0,07

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

Ces premiers résultats de répartition des réseaux en fonction des classes administratives ou de vocation laissent apparaitre des logiques préférentielles d'enfouissement des réseaux sous les voiries communales ou locales. La décomposition des réseaux, notamment d'assainissement avec les réseaux d'eaux pluviales, usées ou unitaires (Cachan et Rouen) et d'électricité avec les réseaux de basse ou haute tension (Cachan), montre que ces propos doivent être modulés selon le type de réseau. Enfin, l'analyse des densités des réseaux selon les types de voirie montre finalement une densité plus importante de réseaux sous les voiries d'échelon administratif supérieur (Cachan et Rouen), ou un équilibre selon la vocation des voiries (Victoria).

14.3. Les trottoirs sont privilégiés pour implanter les réseaux

La construction des référentiels de voirie pour Cachan et Rouen centre-ville nous permet de distinguer plusieurs éléments constitutifs. Les contraintes de temps n'ayant pas permis d'obtenir une même granularité sémantique pour Rouen que pour Cachan, nous choisissons de regrouper

certains éléments de voirie sur Cachan afin de disposer de bases de données comparables. Ainsi, nous regroupons les espaces en fonction du type d'usage et d'implantation :

- Les piétonniers sont regroupés en une seule classe composée des chemins, trottoirs, places, etc.
- Les parkings et stationnements propres localisés en parallèle des chaussées ou des trottoirs sont regroupés. Tandis que les stationnements sur chaussée ou trottoir sont affectés respectivement aux chaussées ou aux trottoirs.
- Les espaces cyclables ne comportent que les chaussées cyclables propres. Les bandes cyclables sont affectées aux chaussées ou aux trottoirs selon leur implantation.
- La classe « autres » comporte les aménagements verts indépendants non implantés sur une chaussée, un trottoir ou un espace de stationnement.

Concernant Rouen centre-ville, les espaces cyclables et les autres éléments indépendants tels que les espaces verts n'ont pas été identifiés. Ainsi, les voiries de Cachan se composent de 50,8% de chaussées, 33,1% d'espaces piétonniers, 0,7% d'espaces cyclables propres, 11,5% de parking et stationnements propres et 3,8% d'espaces autres. Pour Rouen centre-ville, nous relevons 54,8% de chaussées, 30,6% d'espaces piétonniers et 14,6% d'espaces de stationnements (**Tableau 14-7**).

Tableau 14-7 – Composition des voiries de Cachan et Rouen centre-ville

	Chaussée	Piétonnier (chemin, trottoir, etc.)	Cyclable propre	Parking et statio. propre	Autre	Total voirie
Cachan (m²)	438 311	285 499	6 061	99 253	33 030	862 155
Cachan (%)	**50,8**	33,1	0,7	11,5	3,8	100,0
Rouen centre-ville (m²)	730 647	408 139	☒	195 179	☒	1 333 965
Rouen centre-ville (%)	**54,8**	30,6	☒	14,6	☒	100,0

Sources : EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

Les données de Victoria distinguent seulement les chaussées des espaces piétonniers. Les voiries de la municipalité se composent de 72,4% de chaussées et de 27,6% d'espaces piétonniers (**Tableau 14-8**).

Tableau 14-8 – Composition des voiries de Victoria

	Chaussée	Piétonnier (chemin, trottoir, etc.)	Total voirie
Victoria (m²)	4 493 976	1 715 646	6 209 623
Victoria (%)	72,4	27,6	100

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

La répartition des réseaux selon les éléments constitutifs de la voirie met en évidence des tendances communes aux trois terrains (**Tableau 14-9**) :

– les réseaux d'assainissement sont majoritairement enfouis sous les chaussées. Nous supposons que cette localisation des réseaux d'assainissement est imputable à deux paramètres. D'abord, historiquement les réseaux d'assainissement étaient implantés en milieu de chaussée. Ensuite, les réseaux d'assainissement sont des réseaux dits humides. Leur implantation doit donc être réalisée à distance de la végétation, et notamment des arbres. Or les arbres en milieu urbain sont implantés sur les dépendances telles que les trottoirs ;
– les réseaux d'électricité et de gaz sont majoritairement enfouis sous les trottoirs pour Cachan. À Rouen (centre-ville), la répartition de localisation des réseaux de gaz est homogène entre les chaussées et les trottoirs. Dans la mesure où nous limitons notre analyse au centre-ville de Rouen, la répartition homogène des réseaux de gaz sous les chaussées et trottoirs pourrait s'expliquer par un encombrement déjà important des trottoirs plus étroits en centre-ville historique.

Tableau 14-9 – Répartition des réseaux selon les éléments constitutifs des voiries : Cachan, Rouen centre-ville et Victoria

	Chaussée		Piétonnier (chemin, trottoir)		Cyclable propre		Parking et statio. propre		Autre		Total
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)
Cachan											
Tot assain.	*34 679*	*65,5*	*16 357*	*30,9*	*353*	*0,7*	*1 375*	*2,6*	*149*	*0,3*	*52 913*
Tot élec.	*25 915*	*21,5*	*89 183*	*73,9*	*978*	*0,8*	*3 658*	*3,0*	*954*	*0,8*	*120 689*
Total gaz	*17 541*	*31,9*	*33 374*	*60,7*	*1 402*	*2,6*	*2 611*	*4,7*	*46*	*0,1*	*54 974*
Rouen centre-ville											
Total gaz	*58 955*	*45,7*	*58 121*	*45,0*	*N.D*	*N.D*	*11 961*	*9,3*	*N.D*	*N.D*	*129 037*
Victoria											
Tot. Assain.	*405 186*	*89*	*51 079*	*11*	*N.D*	*N.D*	*N.D*	*N.D*	*N.D*	*N.D*	*456 265*

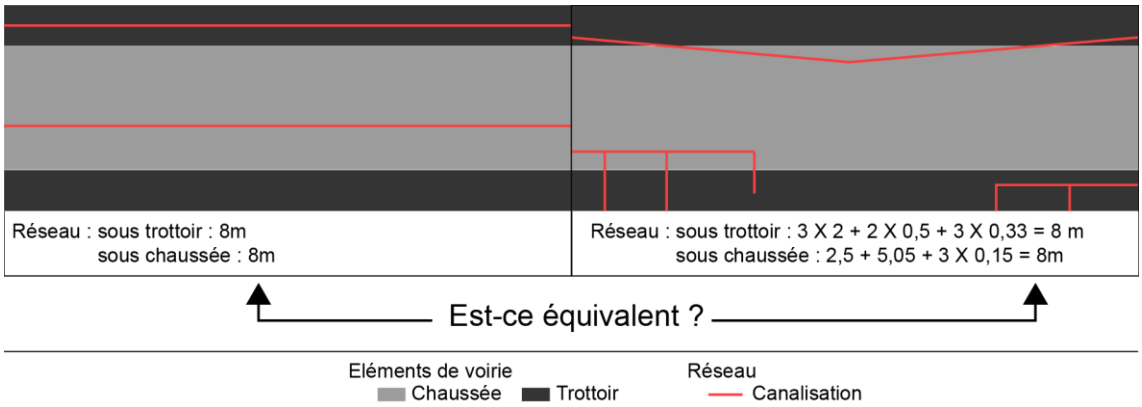
Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; GRdF, 2019 ; Enedis, 2020

Une analyse plus fine à partir de la décomposition des réseaux d'assainissement (EP, EU, UN) et d'électricité (BT et HTA) ne laisse pas apparaitre de différences majeures (**Cf. Annexe O, p. 371**).

Le morcellement des tronçons de réseaux techniques à partir des éléments constitutifs des voiries conduit à s'interroger sur la pertinence de mener une analyse sur la somme des longueurs des portions de tronçons de réseaux obtenues (**Figure 14-2**). En effet, nous pouvons supposer qu'en découpant les tronçons des réseaux par les éléments constitutifs, un biais est créé en produisant

une quantité importante de petites portions de réseaux. Ainsi, une somme élevée de mètres linéaires de réseaux sous les différents éléments constitutifs pourrait relever :

- de débordements ponctuels des tracés de réseaux liés à la précision des tracés ;
- d'équipements de raccordement des réseaux, et notamment des branchements passant par exemple sous les trottoirs et non identifiés comme tels dans les bases de données.



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 14-2 – Exemple : longueurs équivalentes de réseaux

Ces découpages pourraient alors produire des portions de tronçons très petites pour les éléments de voirie les plus étroits tels que les trottoirs. Afin d'exclure une relation entre la taille des portions de réseaux obtenues et les éléments constitutifs de la voirie, nous avons réalisé des analyses permettant d'étudier les variances des longueurs des portions de réseaux localisées sous chaque élément constitutif de voirie. L'analyse de la variance dite ANOVA pour laquelle nous proposons les résultats en **Annexe Q** (**Cf. p. 376**) nous permet de rejeter l'hypothèse d'une relation entre la taille des portions de réseaux obtenues et les éléments constitutifs sous lesquelles elles se trouvent.

Ces deux analyses indépendantes sur la localisation des réseaux techniques à partir de nos terrains d'analyse nous ont permis d'identifier les tendances suivantes :

- Les réseaux sont généralement enfouis sous les voiries locales ;
- Les réseaux ne sont pas systématiquement enfouis sous les trottoirs.

Le croisement des résultats complète alors cette analyse. Pour cela, nous réalisons une dernière étape pour étudier la relation entre la présence de réseau, le type de voirie et l'élément constitutif de la voirie.

14.4. L'implantation des réseaux selon le type de voirie et l'élément constitutif de la voirie

Notre objectif est de montrer comment à partir des référentiels de voirie, il est possible de mettre en évidence des logiques préférentielles de localisation des réseaux. En particulier ici, de savoir simultanément sous quel type de voirie et quel élément de voirie les réseaux sont enfouis.

Pour cela, nous avons réalisé une analyse croisée entre la localisation des réseaux sous les éléments de voirie et le type de voirie à partir du test statistique appelé le Chi². La démarche de ce test est présentée en **Annexe R** (**Cf. p. 379**). Elle nous a permis de mettre en évidence des sur et sous-représentations des réseaux sous les éléments constitutifs de voirie selon le type de la voirie, par rapport à une répartition aléatoire des réseaux. Les résultats détaillés sont présentés en **Annexe S** (**Cf. p. 384**).

Pour le réseau d'assainissement de Victoria, nous relevons que lorsque les canalisations sont enfouies sous les voiries artérielles et locales, les trottoirs sont privilégiés. À l'inverse, lorsqu'elles sont enfouies sous les voiries collectrices, les chaussées semblent privilégiées (**Tableau 14-10**).

Tableau 14-10 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations d'assainissement à Victoria

	Chaussée	Trottoir
Artères	-	+
Collectrices	+	-
Locales	-	+

Auteur : A. Pavard 2020

Précédemment, nous avons observé que les réseaux bien que majoritairement implantés sous les voiries locales étaient également présents avec une densité importante sous les voiries départementales. L'analyse croisée nous permet d'identifier qu'à Cachan (**Tableau 14-11**), les dépendances (trottoirs, stationnement, et chaussées cyclables) semblent privilégiées, lorsque les canalisations d'assainissement et fourreaux d'électricité sont implantées sous la voirie départementale. En revanche, lorsqu'elles sont implantées sous les voiries autres, dont les voiries communales, les chaussées semblent privilégiées. Cela peut s'expliquer par deux raisons :

- La première concerne l'aménagement des voiries locales à Cachan pouvant présenter des dépendances étroites et donc rapidement saturées en réseaux. À l'inverse, les dépendances des voiries départementales étant plus larges, elles pourraient accueillir plus de réseaux.
- La deuxième concerne une logique administrative. Les dépendances des voiries départementales sont gérées par les municipalités. Ainsi, les gestionnaires de réseaux

pourraient privilégier de s'adresser à un seul gestionnaire de voirie plutôt que de multiplier les interlocuteurs.

Nous constatons par ailleurs une situation inverse pour les canalisations de gaz : lorsqu'elles sont enfouies sous les voiries départementales, les chaussées et les stationnements semblent privilégiés, tandis que sous les voiries communales, les espaces piétonniers dont les trottoirs sont privilégiés. Cette situation peut s'expliquer par une volonté d'éloigner les canalisations de gaz – lesquelles forment un réseau très sensible – des autres réseaux.

Tableau 14-11 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations d'assainissement, d'électricité, et de gaz à Cachan

		Autre	Chaussée	Chaus. Cycl.	Esp. Piéton	Statio.
Assainissement	Autre	-	+	-	-	-
	Dep.	+	-	+	+	+
Electricité	Autre	+	+	-	-	-
	Dep.	-	-	+	+	+
Gaz	Autre	=	-	-	+	- -
	Dep.	=	+	+	-	+

Auteur : A. Pavard 2020

Finalement, dans le centre de Rouen (**Tableau 14-12**), les logiques d'implantation des canalisations de gaz semblent similaires à celles de Cachan :

- lorsqu'elles sont enfouies sous les autres voiries, dont les voiries locales, les dépendances sont privilégiées ;
- lorsqu'elles sont enfouies sous les voiries départementales et nationales, les chaussées sont privilégiées.

Tableau 14-12 – Synthèse de l'analyse croisée pour la localisation des canalisations de gaz à Rouen (centre-ville)

	Chaussée	Piétonnier	Stationnement
Autre	-	+	+
Dép.	+	-	-
Nat.	+	-	-

Auteur : A. Pavard 2020

Nous avons mis en œuvre notre démarche d'analyse uniquement sur les variables décrivant le type de voirie et la nature des éléments constitutifs. De la même façon, d'autres caractéristiques pourraient être introduites pour tester leur influence sur la localisation des réseaux. De plus, les

réseaux d'assainissement et d'électricité ont été analysés dans leur ensemble sans distinction en eaux usées, eaux pluviales et unitaires pour l'assainissement ou encore en basse tension et haute tension pour l'électricité. Or, nous avions observé à partir de nos premières analyses des logiques de localisation parfois différentes en fonction de ces sous-ensembles. Pour aller plus loin dans cette analyse elle-même, la démarche pourrait être étendue. Afin d'approfondir les connaissances, il conviendrait de la mettre en œuvre en :

- décomposant les réseaux d'assainissement (EP, EU, UN), et d'électricité (BT, HTA) ;
- en utilisant d'autres caractéristiques telles que les largeurs des chaussées et de leurs dépendances ou encore la présence de petites et grandes végétations. La largeur des éléments de voirie pourrait expliquer l'éloignement de certains réseaux, notamment des réseaux très sensibles. La présence de végétation pourrait quant à elle expliquer des différences de localisation pour les réseaux humides ;
- en introduisant d'autres réseaux

Synthèse IV.2

La mise en œuvre de notre méthodologie d'analyse sur trois terrains nous permet d'une part de valider notre démarche d'analyse, de montrer l'apport d'un référentiel spatial de voirie, et de produire de premières études sur la localisation de réseaux sous voirie. Ainsi, à partir des terrains d'analyse, nous avons été en mesure de :

- quantifier la localisation de réseaux techniques selon qu'ils sont enfouis sous ou hors voirie ;
- démontrer que si elle existe, la logique préférentielle de localisation des réseaux techniques ne suit pas de règle absolue, mais dépend :
    - du type de réseau, et du gestionnaire de ce réseau ;
    - de la densité d'occupation des dépendances de voirie, et par la même, du respect des règles de sécurité conduisant à éloigner certains réseaux techniques plus sensibles.

Le **Tableau 14-13** synthétise les résultats obtenus par les analyses menées sur les différents réseaux techniques disponibles.

Tableau 14-13 – Synthèse des résultats sur Cachan, Rouen centre-ville et Victoria

Problématique	Résultat
Localisation des réseaux sous Voirie ou hors voirie	Environ 90 % des canalisations principales des réseaux techniques sont localisées sous la voirie
localisation des réseaux selon le type de voirie	Les **voiries locales accueillent davantage de réseaux techniques** : plus de 63% du linaire des canalisations principales. Les **voiries de rang administratif supérieur, bien que moins présentes,** sont **plus densément occupées** par des canalisations principales.
localisation des réseaux selon les éléments constitutifs de la voire	Il existe des logiques d'implantation des canalisations principales sous les éléments de voirie différentes selon le type de réseau : – Les **canalisations d'assainissement** sont **plutôt implantées sous les chaussées** ; – Les **canalisations de gaz et fourreaux d'électricités** sont davantage implantés **sous les dépendances piétonnières**. Ces logiques d'implantation sont également différentes selon le type de voirie : – Les **canalisations de gaz sous voirie locale** sont davantage implantées **sous les dépendances**, tandis que celles **sous voirie de rang administratif supérieur** sont davantage implantées **sous les chaussées** ; – Les **canalisations d'assainissement et les fourreaux d'électricité sous voirie locale** sont davantage implantés **sous les chaussées**, tandis que celles et ceux **sous voirie de rang administratif supérieur** sont davantage implantés **sous les dépendances.**

Auteur : A. Pavard 2020

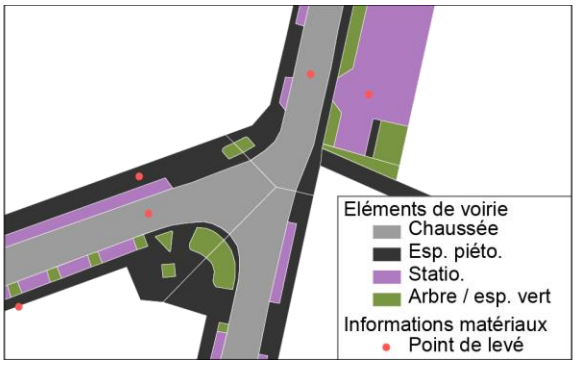
15. Ouverture sur les choix structurels voiries-réseaux et la maintenance de la voirie

Dans ce chapitre, nous mettrons en évidence l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie pour améliorer la gestion et la maintenance des voiries.

1) Dans une première section, nous verrons en quoi ce référentiel peut aider à interroger les choix structurels de voiries selon la présence ou l'absence de réseaux (la gestion).
2) Dans une seconde section, nous ouvrirons une discussion sur l'apport d'un tel référentiel pour aider les gestionnaires de voirie à optimiser les interventions sur leurs infrastructures (la maintenance).

15.1. La localisation des réseaux, et les choix structurels pour les voiries

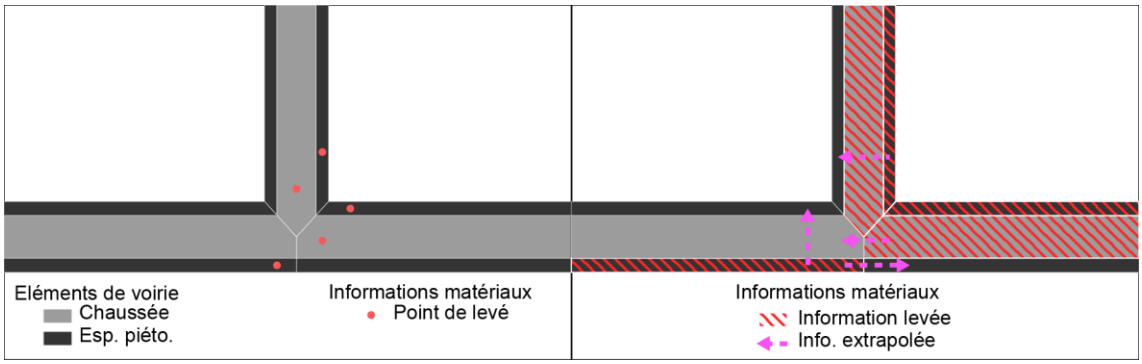
La partie III (**Cf. Partie III, 12, p. 220**) présentait la méthode que nous avons développée pour collecter des informations sur les matériaux de revêtement et les dégradations de voirie. Elle a été mise en œuvre sur le terrain de Cachan. Les opérations de collecte manuelle nous ont conduits à réaliser 2 426 levés sur les revêtements superficiels de voirie. Ces levés couvrent de façon homogène le territoire de la municipalité mais ne permettent pas de disposer d'informations pour tous les éléments constitutifs de la voirie. Comme l'illustre la **Figure 15-1**, certains trottoirs voire certaines chaussées n'ont pas fait l'objet de levé.



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-1 – Exemple de répartition des points de levé

Pour les besoins de notre démonstration, nous affectons aux éléments de voirie ne disposant pas de point de levé des informations de l'élément de voirie le plus proche, de même nature (chaussée, stationnement ou encore espace piétonnier), et disposant d'au moins un point de levé. Cette opération s'apparente à une extrapolation de l'information connue vers des éléments de voirie pour lesquels nous ne disposons pas d'information (**Figure 15-2**). Cette affectation au plus proche voisin présuppose une continuité des revêtements.

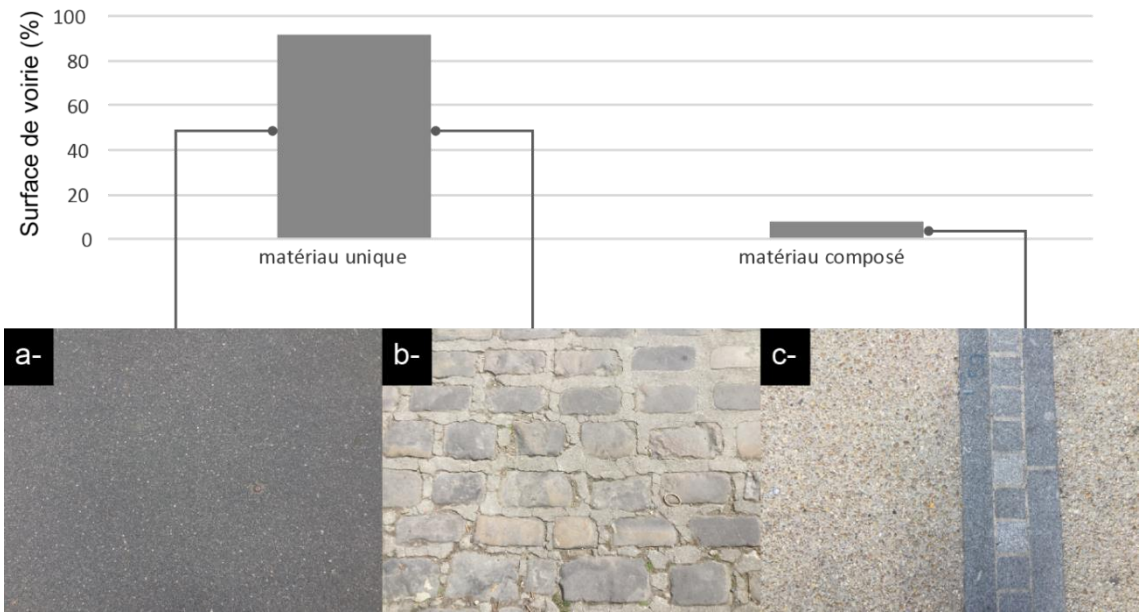


Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-2 – Exemple d'extrapolation d'information

L'extrapolation réalisée nous permet d'obtenir une information quasiment « complète » sur les revêtements de voirie à Cachan selon les éléments constitutifs de la voirie (**Cf. Annexe T, p. 389**). L'analyse de la répartition des revêtements de voirie à Cachan amène à quatre constats :

1) Certains éléments de voirie sont couverts par un revêtement constitué d'un seul type de matériau tel qu'un béton bitumineux (BB) (**Figure 15-3 a**) ou encore un revêtement de pavés naturels (**Figure 15-3 b**). Ces éléments représentent 96% de la surface de voirie. À l'inverse, d'autres éléments de voirie sont couverts par des combinaisons de matériaux (exemple : les revêtements en béton désactivé intercalés de pavés (**Figure 15-3 c**).

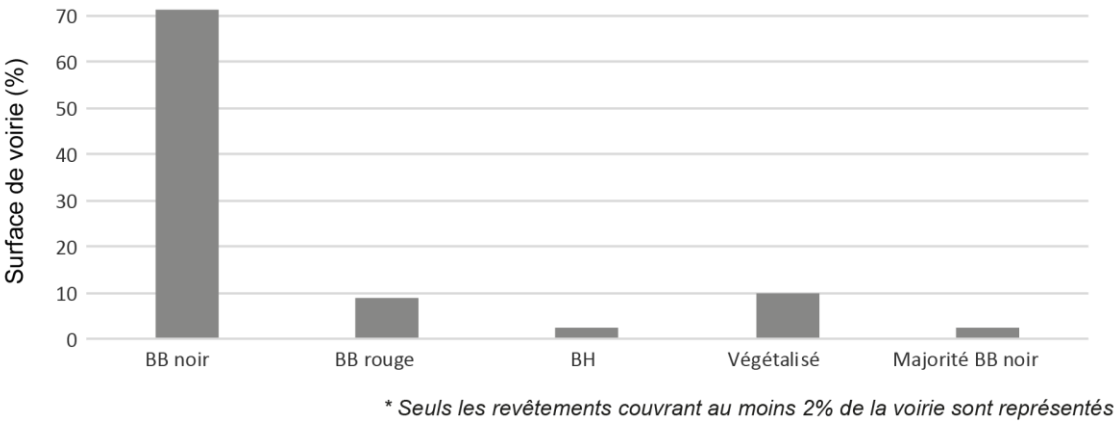


Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-3 – Répartition statistique des revêtements à matériau unique ou composé

2) Les matériaux de revêtement présents à Cachan sont classables en modulaires (pavés, dalles ou encore alvéolaires) et non modulaires (enrobés à liant hydrocarboné ou

hydraulique) tel que relevé en partie III (**Cf. Partie III, 10.2.2, p. 193**). Les bétons bitumineux sont les revêtements les plus présents à Cachan (**Figure 15-4**). En revêtement à matériau unique, ils recouvrent 80% de la surface de voirie. Avec les revêtements à combinaison de matériaux, ils représentent 83% de la surface de voirie. 90% des matériaux bitumineux sont des matériaux dits « noirs », et 10% sont des matériaux dits rouges. Les revêtements composés de matériaux à liant hydraulique, les bétons hydrauliques (BH) ne couvrent que 2,5% de la surface de voirie.



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-4 – Répartition statistique des principaux revêtements présents à Cachan

3) Certains revêtements sont utilisés de façon exclusive ou majoritaire pour les dépendances. Par exemple, les asphaltes, très peu utilisés à Cachan (moins de 0,04%), sont utilisés sur les trottoirs. De la même façon, les bétons bitumineux rouges ou les bétons hydrauliques sont surtout utilisés pour les espaces piétonniers (**Figure 15-5 a et b**). Lorsqu'ils sont utilisés pour les chaussées, les premiers le sont pour traiter les intersections ou les passages piétons de façon à les mettre en valeur (**Figure 15-5 c**), tandis que les seconds sont utilisés pour valoriser ponctuellement l'espace public.

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-5 – Exemples d'usages de revêtement de voirie à Cachan

4) Enfin, à l'échelle de la municipalité, nous constatons une logique spatiale pour l'utilisation de certains revêtements. La cartographie présentée en **Figure 15-6** permet d'observer la répartition spatiale des revêtements de voirie. Pour cette cartographie, les revêtements modulaires ont été regroupés ensemble ainsi que les revêtements à matériaux composés afin de mieux les faire apparaitre.

   Dans le centre-ville, où l'activité est mixte, c'est-à-dire à la fois résidentielle et commerciale, nous observons un usage varié des revêtements en combinant des revêtements à matériau unique, composé, mais aussi des revêtements modulaires ou non modulaires. Ces choix sont liés comme observé dans la littérature en partie III à une volonté d'aménager et de différencier la voirie pour des activités et modes de transport mixtes, ainsi que pour une question de cadre de vie urbain. À l'inverse, dans des quartiers résidentiels, les revêtements sont moins diversifiés avec généralement des chaussées en matériaux à liant bitumineux noir et des trottoirs en matériaux à liant bitumineux rouge.

Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-6 – Répartition spatiale des revêtements à Cachan

À partir de ces quatre constats, il ressort que les choix des revêtements de voirie à Cachan ne sont pas liés à la présence ou non de réseaux techniques enfouis sous les voiries. Un croisement spatial

entre les conduites principales des trois réseaux analysés (gaz, électricité et assainissement) et les éléments de voirie, confirme d'ailleurs qu'il n'existe pas de lien structurel, tout au moins en ce qui concerne les couches de revêtement : plus de 93% des canalisations et fourreaux sont enfouis sous des éléments de voirie revêtus d'un béton bitumineux. Des analyses complémentaires devraient être menées à l'aide d'informations sur les couches inférieures de la voirie (**Cf. Partie III, 9.1, Figure 9-1, p. 171**). Par ailleurs, nous avons observé à travers la littérature qu'il n'y avait pas de préconisations spécifiques en matière de matériaux de voiries compte tenu de la présence ou non de réseaux techniques enfouis. Ainsi, le fait de disposer d'un référentiel spatial de voirie et de son environnement a pour principal intérêt de disposer d'une base d'informations permettant de décrire la voirie à un instant donné, et d'améliorer sa gestion et sa maintenance par la suite. Ce référentiel devrait être alimenté régulièrement par les évolutions ou modifications apportées. Par exemple, lors d'une opération sur un tronçon de voirie ou de réseau technique, les gestionnaires seraient en mesure d'identifier la structure de la voirie avec ces matériaux, et de prendre la meilleure décision pour rénover le tronçon de voirie ou remblayer la tranchée. Ce choix serait alors pris en optant pour des matériaux adaptés en tenant compte, en plus des critères habituels pour l'aménagement de la voirie (**Cf. Partie III, 9 et 10, p. 170 et p. 182**) de :

- la présence des réseaux techniques ;
- la réparabilité des matériaux ;
- le coût des matériaux ;
- les éventuels interventions ultérieures déjà prévisibles.

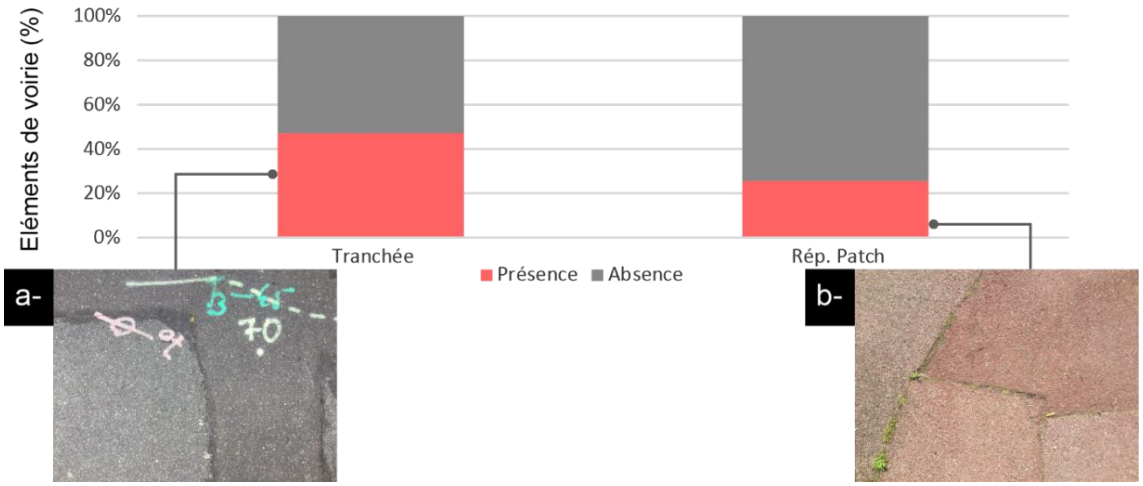
15.2. La localisation des réseaux, et la dégradation des voiries

Dans cette dernière section, nous exploitons l'intérêt des informations sur les dégradations de voirie que nous avons présentées en partie III et levées sur le terrain de Cachan. Au même titre que pour les revêtements, nous ne disposons pas d'informations sur tous les éléments de voirie. Cependant, une extrapolation des informations sur les dégradations de revêtement pour les tronçons de voirie renseignés est hasardeuse et peu envisageable. En effet, si la continuité en termes de revêtement présente une logique d'aménagement, et a été constaté sur le terrain, il n'en n'est pas de même pour les dégradations. Ainsi, nous bornons nos analyses aux 2 426 levés réalisés sur 1 686 éléments de voirie de Cachan. De plus, les revêtements étaient rapportés aux surfaces des éléments voirie dans la mesure où un revêtement est utilisé de façon « homogène » sur un même élément de voirie. Les levés réalisés pour les dégradations sont ponctuels et non mesurés (**Cf. Partie III, 12.1.2, p. 224**). Ainsi, nous bornons nos analyses des dégradations à un nombre d'éléments de voirie impactés plutôt qu'à des surfaces.

Les informations dont nous disposons concernent les principales dégradations de type déformations, fissurations, et arrachements. Nous avons également au cours de nos levés indiqué

la présence de tranchées remblayées et de réparations par patchs. Les informations levées ont été présentées dans la partie III (**Cf. Partie III, 12.1.1, p. 221**). De ces informations, nous posons les constats suivants :

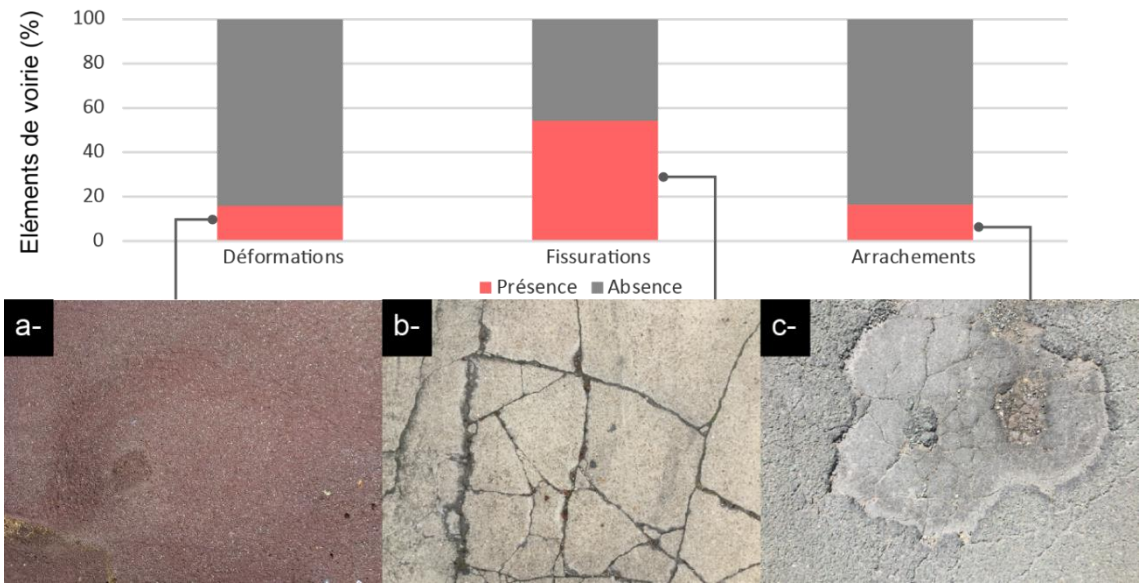
1) Près de la moitié des éléments de voirie auscultés présentent les traces d'une tranchée remblayée, et un quart des éléments présentent les traces de réparation par patch (**Figure 15-7**).



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-7 – Réparation de la voirie : remblayage de tranchée et réparation par patch

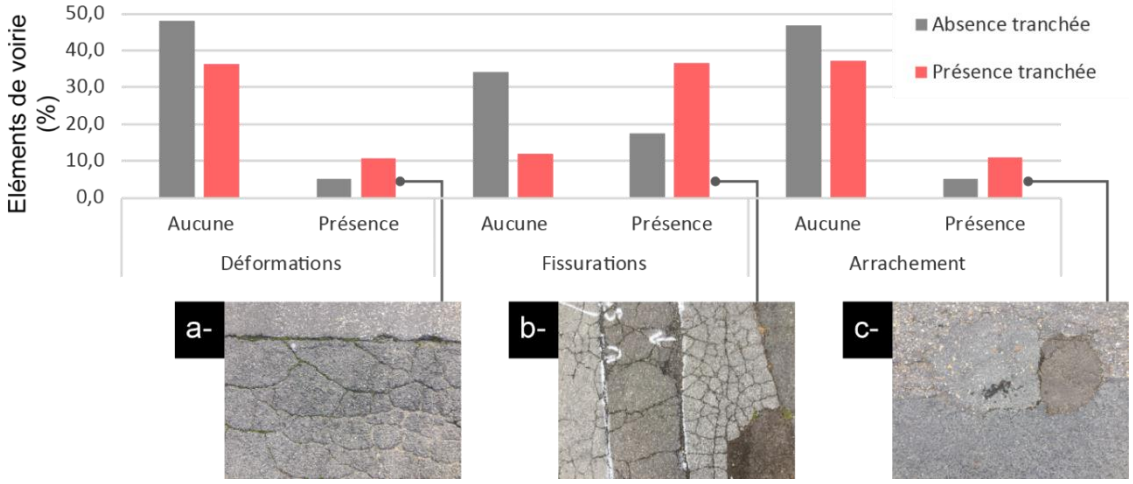
2) Parmi les grandes familles de dégradations, les fissurations sont les plus présentes à Cachan : plus de la moitié des éléments de voirie auscultés présentent au moins un type de fissuration. Les déformations et arrachements sont moins fréquents, avec 16% des éléments de voirie touchés par une déformation ou un arrachement (**Figure 15-8**).



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-8 – Les dégradations de voirie : déformations, fissurations et arrachements

3) En partie III (**Cf. Partie III, 11.1.3, Tableau 11-3, p. 209**) nous avons identifié que certaines dégradations pouvaient être corrélées à la présence de réseaux techniques, et ce, notamment lorsque ces réseaux avaient nécessité une maintenance et donc une ouverture de tranchée : les ornières et les affaissements ont été relevés comme pouvant être induits par des réseaux. De la même façon, certaines fissurations telles que les fissures transverses ou longitudinales et les faïençages, ou encore des arrachements tels que les nids-de-poule peuvent être liés aux réseaux techniques. Une analyse croisée entre la localisation des tranchées et les dégradations nous permet de confirmer ces corrélations par nos observations terrains. La **Figure 15-9** illustre l'analyse croisée. Nous observons que lorsque l'élément de voirie présente des traces d'une tranchée remblayée, il est deux fois plus fréquent d'y trouver une déformation, une fissuration ou un arrachement. Le **Tableau U-2 (Cf. Annexe U, p. 392)** présente des résultats plus complets en décomposant les trois types de dégradations. Ces résultats détaillés semblent confirmer notre analyse présentée en partie III.



Auteur : A. Pavard 2020

Figure 15-9 – Présence de réseau et état de la voirie

Les résultats présentés jusqu'à présent ne portent que sur les informations levées lors de nos auscultations. Les constats présentés sont limités du fait de la précision et de la complétude des informations collectées sur l'état des éléments de voirie. En effet, comme nous l'avons indiqué en partie III, il est nécessaire :

- d'une part de réaliser des auscultations sur un pas régulier de 10 mètres ;
- d'autre part de collecter les dégradations par des mesures et non un simple levé de présence de dégradation.

L'état actuel de notre référentiel spatial de voirie et de son enrichissement par des informations sur les structures de voirie ne permet pas de mener une analyse croisée pertinente entre la localisation des réseaux techniques et l'état des éléments de voirie. De même, nous manquons de données sur l'environnement de la voirie, et notamment sur les réseaux techniques. Il serait pour cela nécessaire de détenir des informations plus complètes sur les voiries ainsi que sur les réseaux :

1) **Concernant les voiries**, il faudrait ajouter des informations sur les matériaux des couches composant les structures avec leurs compositions et leurs épaisseurs, mais également sur l'âge de la structure dans son ensemble et du revêtement. En effet, selon les structures de chaussées, les dégradations observées en surface sont soit superficielles soit structurelles (**Cf. Partie III, 11.1, p. 204**). Ces dernières peuvent être liées à la présence des réseaux, et ont des répercutions en surface (déformations, fissurations ou arrachements). Or, les structures de voirie ne réagissent pas de la même façon selon les contraintes qu'elles subissent, et dans le temps. Par ailleurs, les causes d'apparition de dégradations ne sont pas les mêmes lorsque l'on considère une structure de voirie récente ou ancienne. De

plus, au-delà de la structure dans son ensemble, un revêtement de voirie récent peut induire des conclusions erronées sur l'état de l'élément de voirie.

2) **Concernant les réseaux**, nous ne disposons que de trois réseaux techniques (assainissement, gaz et électricité). Le milieu urbain est parcouru par de nombreux autres réseaux tels que les réseaux de chaleur, des télécommunications, ou encore de la signalisation lumineuse. Une mise en relation des dégradations des voiries avec la présence de réseaux techniques n'est réellement complète et pertinente qu'en incluant l'ensemble des autres réseaux techniques. Identifier des éléments de voirie sans réseaux techniques sur la base des trois seuls réseaux analysés et baser nos analyses dessus peut entrainer des biais d'analyse et des conclusions erronées. Disposer de tous les réseaux permettrait de construire un indicateur d'occupation des éléments de voirie et ainsi de réaliser une analyse croisée avec les dégradations observées sur les voiries et leurs structures.

Synthèse IV.3

Dans ce chapitre, nous avons démontré l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie enrichi d'informations descriptives diverses des éléments de voirie et sur leur environnement. Ce référentiel permet :

- de réunir les informations essentielles à la compréhension des voiries à un instant t ;
- d'augmenter les connaissances des gestionnaires de voirie à l'aide d'analyses croisées ;
- de disposer d'un cadre afin d'optimiser les choix futurs d'aménagement des voiries en préconisant des matériaux en tenant compte de la présence ou non de réseaux techniques, les maintenances prévues sur les réseaux ou les voiries, les coûts de ces matériaux, ainsi que de tous les paramètres déjà identifiés par les gestionnaires (confort, sécurité, ou encore esthétisme).

La mise en œuvre d'une telle base de données dans le cadre d'une analyse sur Cachan nous a permis de montrer comment elle pouvait contribuer à produire de nouvelles connaissances. En particulier, comment avec elle nous avons pu :

- confirmer que les revêtements les plus utilisés sont les bitumineux. Cet aspect observable sur le terrain, et dans la littérature analysée en partie III a pu être ici quantifié dans le cadre de Cachan ;
- constater que les choix des revêtements sont davantage liés à des questions d'usages en sursol de la voirie plutôt qu'à la présence ou non de réseaux techniques. Notamment, nous avons observé des diversités plus importantes de revêtements dans les secteurs à usage mixte, aussi bien en termes d'activités qu'en termes de modes de transport ;
- confirmer à nouveau que les interventions par tranchée ouverte et remblayée ont un impact sur l'état des voiries. Cet aspect également analysé à travers la littérature en partie III a pu être en partie quantifié. Des investigations supplémentaires sont cependant à mener à l'aide de données plus complètes sur les voiries comme sur les réseaux.

Conclusion Partie IV

Cette partie a permis d'éprouver le référentiel spatial de voirie que nous avons conçu. À partir des données collectées ou construites sur trois terrains : Cachan (FR), Rouen (FR) et Victoria (CA), nous avons élaboré et mis en œuvre une démarche d'analyse des interactions voiries et réseaux. Cette démarche visait à apporter des réponses à deux questions thématiques : où sont enfouis les réseaux techniques, et quelles sont les relations structurelles entre voiries et réseaux.

Dans un premier temps, nous avons présenté les corpus de données et les terrains retenus, puis introduit la méthodologie d'analyse que nous avons développée :

1) Le choix des terrains a été déterminé selon deux critères principaux. D'abord, nous devions être en mesure de disposer des données géographiques sur les voiries et les réseaux. Ensuite, les terrains devaient être « représentatifs » des grands types de tracés de voirie (ramifié et en grille). Dans l'idéal, ils devaient présenter différents aménagements de la voirie liées à la topographie ou à l'histoire des lieux. Nous souhaitions également mettre en œuvre une comparaison internationale afin de montrer la reproductibilité de la méthodologie d'analyse.
2) Les données de voirie devaient être représentées à l'aide de données géographiques surfaciques, et catégorisées selon leur vocation ou administration, ainsi que décomposées en éléments constitutifs (chaussées, et dépendances). Un des terrains devait également disposer d'informations sur les structures et dégradations des voiries. Enfin, pour chaque terrain, au moins un réseau technique devait également être disponible sous forme de données géographiques.
3) La méthodologie que nous avons développée devait permettre d'apporter des éléments de réponses qualitatives et quantitatives aux deux questions thématiques identifiées. Pour cela, des analyses géomatiques et spatiales empruntant les méthodes de l'analyse statistique descriptive univariée et bivariée ont été retenues.

Dans un deuxième temps, la mise en œuvre de notre démarche d'analyse sur la question de « où sont enfouis les réseaux techniques », a permis de produire des connaissances sur les trois terrains d'analyse, et de quantifier les relations spatiales entre les voiries et les réseaux. Ces connaissances ont ouvert des réflexions sur les logiques préférentielles d'implantation des réseaux techniques, montrant l'intérêt du référentiel spatial qui a permis de les produire.

Enfin, une analyse exploratoire des données sur les structures et les dégradations des voiries de Cachan a amené des pistes de réflexion sur l'apport que peut avoir le référentiel spatial de voirie développé sur la co-gestion et la co-maintenance des voiries et des réseaux.

« *À présent, je sentais à cinquante centimètres au-dessous de moi la route se déployer comme une bannière, s'envoler, siffler à des vitesses inouïes encore et toujours, pour traverser le continent qui gémissait. Quand je fermais les yeux, ce que je voyais, c'était la route, qui se déroulait à l'intérieur de moi. Quand je les rouvrais, j'apercevais en un éclair l'ombre des arbres qui vibrait sur le plancher de la voiture. Pas moyen de m'échapper. Je me suis résigné à tout.* » (Jack Kerouac, Sur la route, 1957)

Conclusion générale

La voirie routière urbaine est une infrastructure centrale du milieu urbain. De par ses multiples usages, de nombreux acteurs interviennent dessus. La diversité des interventions qu'elle subit altèrent ses performances. Cela soulève la question de la gestion de l'infrastructure et de son optimisation. Jusqu'à présent, des travaux techniques et scientifiques ont appréhendé cette question selon deux angles principaux. Tout d'abord, la gestion est envisagée à partir de l'environnement de la voirie – notamment les réseaux techniques (Bouttier et al. 2013 ; Cerema 2005). Ensuite, lorsque la voirie est mise au centre du processus, c'est souvent en ne tenant compte que d'une seule de ses dimensions, à savoir la dimension technique et non de sa dimension géographique par exemple (Christory 2015 ; Debreu 2013).

En nous inscrivant dans une approche de constructibilité, laquelle « vise à fournir, dès le lancement du projet, une assurance raisonnée quant à l'atteinte des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie » (Gobin 2010), nous avons conçu et développé un référentiel spatial de voirie, dans les SIG. Il tient compte des dimensions géographiques (génie urbain) ainsi que des dimensions techniques (génie civil) de l'infrastructure. Pour développer ce référentiel, et de façon à ce qu'il puisse être utile au plus grand nombre, nous nous sommes appuyés sur un processus de modélisation en géomatique, voulu adaptatif :

- ouvert aux solutions nécessitant peu d'investissements humains, techniques et financiers, ainsi qu'aux solutions à forts investissements ;
- évolutif en proposant des solutions de différents niveaux permettant à tous les gestionnaires de voirie de progresser, selon leur positionnement initial ;
- anticipateur en tenant compte des solutions actuelles et futures ;

Ainsi, l'originalité de cette recherche a reposé sur trois éléments :

1) placer la voirie comme élément central du processus de gestion de l'infrastructure dans son environnement ;
2) allier les dimensions géographiques et techniques de l'infrastructure afin de produire un référentiel de voirie utile à sa gestion ;
3) étudier la voirie avec son environnement afin de quantifier et qualifier des relations spatiales et structurelles entre la voirie et son environnement.

Enfin, nos recherches ont été menées en confrontant systématiquement nos propositions de modélisation à un cas d'études de la région parisienne, la commune de Cachan (94). Aux termes de nos travaux nous disposions de ce fait d'un corpus de données exhaustif sur ce terrain, ce qui nous a permis d'appliquer, de tester et de valider l'ensemble de notre processus de modélisation.

Dans la première partie, nous avons analysé le vocabulaire relatif à la voirie urbaine, vocabulaire riche, parfois ambigu, qu'il convenait de bien définir. De là, nous avons fait émerger une définition que nous avons posée comme socle de notre référentiel. Nous avons construit notre définition en deux temps. D'abord, une analyse de documents historiques, administratifs et législatifs nous a permis de délimiter les contours de la notion de *voirie urbaine*. Il s'agit de l'ensemble des infrastructures destinées à la circulation terrestre qui traversent une agglomération, qu'elles soient privées ou publiques, à l'exception des infrastructures ferroviaires. La voirie urbaine se compose d'un élément central, la chaussée, et de dépendances (trottoirs ou stationnements) et d'équipements (barrières de séparation ou encore éclairage public). Ensuite, nous avons complété cette définition de façon à intégrer les dimensions de la voirie propres à notre problématique, à savoir ses dimensions spatiales et structurelles. Pour cela, nous avons décrit l'objet géographique et technique *voirie* selon deux champs d'études. Le génie urbain nous a permis de concevoir la voirie dans ses dimensions planimétriques en identifiant les éléments constitutifs (chaussées, trottoirs ou encore stationnements) et leurs aménagements. Le génie civil nous a permis de tenir compte de ses dimensions verticales, et ce notamment en intégrant sa structure (nature de matériaux et épaisseurs). Cette définition enrichie de la voirie nous a permis par la suite d'analyser la position des réseaux vis-à-vis des éléments constitutifs de la voirie, ainsi que les choix des matériaux de revêtement et les dégradations structurelles liées à la présence de réseaux sous les voiries.

Dans une seconde partie, en nous appuyant sur notre conception de la voirie, nous avons analysé ses modélisations géomatiques et les représentations existantes afin de proposer la modélisation et la représentation la plus adaptée pour sa gestion dans son environnement. Ainsi, nous avons opté pour une modélisation tenant compte de ses dimensions horizontales en sursol et verticales en sous-sol. Pour la représentation, nous avons choisi la construction d'objets graphiques surfaciques permettant de distinguer chaque élément de voirie, et pouvant être enrichis d'attributs décrivant la structure de chacun d'entre eux (matériaux, épaisseurs). Afin d'aider les gestionnaires de voirie, nous avons développé une méthode générique et automatisable à partir de l'information cadastrale. En comparant les résultats de notre méthode à ceux d'une donnée de référence construite par photo-interprétation, ainsi qu'à ceux d'une méthode couramment déployée et utilisant des données routières linéaires nous avons démontré :

- que notre méthode permet de construire simplement et à moindre coût des données géographiques de voirie composées d'objets graphiques surfaciques représentant l'emprise globale de la voirie ;
- que la méthode utilisant les données routières linéaires pourraient permettre d'identifier les limites des chaussées. À terme, le croisement de ces résultats avec ceux de notre

méthode, rendrait possible la construction de données surfaciques de voirie distinguant les chaussées des dépendances.

Enfin, nous avons relevé que les intersections routières sont modélisées et représentées de différentes façons dans les SIG. Dans les données surfaciques elles sont le plus souvent représentées par un ou plusieurs objets graphiques, tandis que dans les données linéaires, elles sont identifiables uniquement par les points de jonctions des objets graphiques linéaires. Par ailleurs, nous avons montré que selon les besoins, il est nécessaire de transférer des informations entre les différentes bases de données de voirie d'un même territoire. Par exemple, les informations de trafic routier attachées généralement aux données linéaires peuvent être utiles pour les gestions de la voirie. Il est alors utile de pouvoir les relier à des données surfaciques de voirie. De ce fait, nous avons construit notre référentiel de façon à ce qu'il puisse être mis en cohérence avec d'autres référentiels existants. Ainsi, nous avons proposé une démarche et développé une méthode afin de construire des objets graphiques surfaciques interopérables avec des objets graphiques linéaires. Cette démarche repose sur l'affectation d'une portion des intersections à chaque section courante y débouchant. La méthode utilisée s'appuie sur la tessellation de l'espace.

Dans une troisième partie, notre objectif était de proposer un enrichissement du référentiel spatial. Pour cela, l'analyse d'un corpus de documents techniques et scientifiques a permis de comprendre les enjeux de la gestion de la voirie et ce, de sa conception (son dimensionnement) à sa maintenance (son entretien). D'abord, nous avons constaté que les critères de choix concernent essentiellement les activités en surface de la voirie (le trafic routier ou encore le partage de l'espace pour les différentes mobilités) ainsi que le cycle climatique (gel-dégel). En revanche, certains éléments de son environnement, tels que les réseaux techniques, sont peu pris en compte aujourd'hui. Ensuite, nous avons observé que les types de structures de voirie utilisés en milieu urbain sont les mêmes que ceux utilisés sur le reste du territoire car basés sur les mêmes méthodes de dimensionnement. En contrepartie, il s'est avéré que les collectivités locales ont recours et valident des matériaux variés, et notamment des matériaux produits localement. Au-delà des matériaux dans les structures, nous avons également identifié un très large choix de matériaux pour les revêtements de voirie urbaine avec notamment diverses finitions. Certains de ces matériaux tels que les modulaires ou les asphaltes se révèlent spécifiques au milieu urbain et intéressants lorsque des réseaux sont enfouis dessous de par leur niveau de réparabilité. Enfin, nous avons identifié les informations, sur les structures et les dégradations de la voirie, nécessaires à sa gestion dans son environnement. Compte tenu de la faible disponibilité de données sur le sujet, nous avons développé une méthode de collecte d'informations sur le cas d'étude de Cachan pour montrer comment ces informations pouvaient enrichir notre référentiel spatial de voirie.

Dans une dernière partie, nous avons démontré l'intérêt de disposer d'un référentiel spatial de voirie enrichi tel que nous l'avons développé. À cette fin, nous avons mis en œuvre notre référentiel en menant des analyses décrivant les relations spatiales (localisation) et structurelles (matériaux et épaisseurs des structures de voirie ainsi que leurs dégradations) entre la voirie et les réseaux techniques (assainissement, électricité et gaz). Sur le cas de trois terrains (Victoria au Canada, Rouen et Cachan en France), ces analyses ont mis en évidence l'apport du référentiel et les connaissances qu'il peut aider à générer. Les terrains d'analyse ont été choisis de façon à confronter des configurations variées aussi bien pour les voiries que pour les réseaux et en comparant une situation internationale à deux cas français.

Dans un premier temps, nous avons présenté une façon de qualifier et de quantifier les relations spatiales entre voirie et réseaux techniques en mesurant :

- la part des réseaux techniques enfouis sous la voirie et hors voirie ;
- la part et la densité de réseaux techniques enfouis sous les différents niveaux hiérarchiques de voirie et sous les différents éléments constitutifs de voirie ;
- le lien statistique entre la localisation des réseaux techniques selon la classe de voirie et selon l'élément constitutif de voirie.

Les résultats obtenus sur les trois terrains d'analyse ont montré une logique préférentielle d'enfouissement des réseaux techniques sous les voiries (autour de 90%). Il est apparu que cette logique sous les voiries locales (plus de 60%) est surtout liée à la faible représentation des voiries de niveaux hiérarchiques supérieurs en milieu urbain. Les résultats de densité d'occupation des sous-sols de voirie par les réseaux techniques ont d'ailleurs montré un plus fort encombrement des voiries départementales. Concernant l'enfouissement des réseaux sous les différents éléments de voirie, il est apparu que les logiques préférentielles dépendent du type de réseau. Ainsi, nous avons constaté que les réseaux d'assainissement sont plus fréquemment enfouis sous les chaussées – ce qui est contraire aux recommandations – tandis que les autres réseaux sont enfouis en majorité sous les dépendances. Finalement, en croisant les localisations des réseaux selon le niveau hiérarchique des voiries et les éléments constitutifs des voiries, nous avons montré que les logiques d'enfouissement sont nuancées. À titre d'exemple, en considérant le réseau d'électricité de Cachan, nous avons analysé à partir d'exemples que lorsqu'il est enfoui sous les voiries locales il est surreprésenté sous les chaussées, tandis que lorsqu'il est enfoui sous les voiries départementales, il est surreprésenté sous les dépendances.

Dans un second temps, nos analyses exploratoires sur les relations structurelles entre voirie et réseaux techniques ont démontré l'intérêt du référentiel dans une démarche de cogestion de la voirie et de son environnement : il est possible d'établir des choix de revêtements selon la présence ou l'absence de réseaux techniques. De plus, notre recherche sur les dégradations de

voirie a révélé un lien de causalité de la présence des réseaux techniques sous les voiries. En d'autres termes, nous avons mis en évidence pour Cachan que les éléments de voirie les plus dégradées correspondent aux éléments qui surplombent des réseaux enterrés.

Nos diverses conclusions sont réservées aux différents cas d'étude analysés mais finalement, nous concluons que l'élaboration d'un référentiel spatial de voirie dans les SIG est adapté pour la gestion de la voirie et de son environnement, dont font partie les réseaux enterrés. Nous avons identifié dès le début que les SIG sont déployés dans de nombreuses collectivités, en plus d'être alimentés par un vaste ensemble de données géographiques. De plus, ils permettent de représenter les objets techniques dans leur environnement et d'analyser les relations spatiales et structurelles qu'ils entretiennent en empruntant à l'analyse statistique et spatiale. Si les SIG présentent des limites pour la représentation d'objets techniques dans la mesure où ils ne permettent pas de représenter avec précision des objets en trois dimensions, cette troisième dimension peut cependant, être décrite par un enrichissement d'informations attachées aux objets graphiques 2D à l'aide d'attributs décrivant la structure des éléments de voirie (matériaux et épaisseurs).

Au-delà des conclusions inhérentes à notre démarche, cette thèse a également permis d'identifier plusieurs perspectives. En effet, à chaque étape du développement du référentiel spatial de voirie nous avons déterminé des recherches à mener dans la continuité de ce que nous avons initié.

Les recherches menées pour la production du référentiel spatial afin de produire des données décrivant l'emprise géographique de la voirie et de tous ses éléments constitutifs peuvent conduire aux deux prolongements de recherche suivants :

1) D'abord, nous avons identifié un lien probable entre l'organisation du territoire urbain (tissus urbains, fonctions des quartiers ou encore formes d'habitat) et la morphologie des tracés de voirie. Ce lien est déjà étudié, notamment par des géographes et urbanistes (Mohajeri et Gudmundsson 2014 ; Topcu et Southworth 2014 ; Hamaina et al. 2012). Toutefois, les travaux réalisés s'attachent généralement à analyser ce lien en considérant les axes de circulation de la voirie et non son emprise. En d'autres termes, il s'agit généralement d'étudier la longueur des tronçons de voirie, leur orientation et leur connectivité relativement à l'organisation du territoire. De notre point de vue, une analyse des relations entre les formes urbaines et l'aménagement de la voirie, c'est-à-dire le tracé de voirie en tenant compte de son emprise, permettrait de mieux modéliser les variations de l'emprise spatiale de la voirie en milieu urbain.
2) Ensuite, concernant la construction de données surfaciques de voirie, nous avons démontré un lien entre l'estimation des surfaces de voirie par la méthode du Certu et les surfaces de chaussée estimées dans les données de référence. L'analyse des résidus du

modèle suggérait la présence de paramètres permettant d'améliorer cette estimation. Notamment, les tracés de voirie semblent varier selon le tissu urbain, et plus spécifiquement selon l'organisation et l'affectation du bâti (les quartiers résidentiels pavillonnaires, les quartiers résidentiels collectifs, ou encore les quartiers mixtes). Identifier plus précisément les paramètres afin de modéliser les largeurs de chaussées permettrait d'automatiser un processus simple de construction des données de voirie en distinguant les chaussées des dépendances.

Lors de l'étude des informations essentielles à intégrer dans le référentiel spatial de voirie, afin de détenir une description suffisante de la dimension technique de l'infrastructure pour assurer sa gestion, nous avons mis en exergue deux axes de recherche à développer :

1) D'abord, nous avons constaté un manque de données décrivant l'infrastructure existante. Ce manque est souvent lié au morcellement des informations dans différents formats et différents services ou organismes. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode rapide de collectes d'informations sur les matériaux de voiries urbaines. Les travaux de collecte d'informations sur les revêtements de voirie que nous avons initiés sur le terrain d'étude de Cachan ont été longs avec une méthode manuelle, mais pourraient être poursuivis de façon à produire une banque d'images de référence des matériaux. Cette banque permettrait par la suite d'identifier automatiquement les revêtements sur de nouvelles photographies : soit à l'aide d'une analyse d'images par classification, soit à l'aide de méthodes plus récentes basées sur l'intelligence artificielle. Dans le prolongement de ces recherches, une application pourrait être développée sur les matériaux et épaisseurs des structures de voirie urbaine.
2) Ensuite, nous avons démontré que la voirie urbaine souffre d'un retard en termes de méthodes et d'outils d'auscultation. Des travaux récents s'intéressent à cette question (Hornych et al. 2016 ; CoTITA Est et al. 2016). Malgré cela, la problématique des réseaux techniques apparait souvent de façon succincte. Le développement d'une méthode d'outils propres aux enjeux de la voirie urbaine permettrait d'améliorer l'efficacité et le coût des levés d'informations. Notamment, nous estimons que ceci devrait se faire à l'aide d'une solution embarquée et enrichie du référentiel spatial développé dans cette thèse. Ainsi, au-delà de la simplification de l'opération de levé, les informations enrichiraient immédiatement le référentiel.

Finalement, en proposant des analyses exploratoires sur les relations spatiales entre voirie et réseaux, nous avons enrichi un champ de recherche jusqu'à présent peu exploité. Les résultats obtenus aussi bien sur les relations spatiales que structurelles ont permis de voir le potentiel du référentiel spatial développé pour améliorer les connaissances sur l'infrastructure routière. Une

analyse étendue à davantage de terrains et prenant en compte une variété plus large de réseaux techniques, ou autres éléments de l'environnement permettrait d'accroitre davantage ces connaissances.

Bibliographie

Références bibliographiques

1. AASHTO. 1972. *AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway Officials. 6 vol. Washington: American Association of State Highway Officials.
2. Abdo, Joseph. 2008. « Matériaux de remblayage : Les matériaux autocompactants à base de ciment ». *Cimbéton*, Collection Technique, juin, 37.
3. ———. 2014. *Tome 1 : Finitions, gestes et techniques*. Specbea. Vol. 1. 3 vol. Les bétons décoratifs : voiries et aménagements urbains. Specbea.
4. Aljr H., 2017, Influence de la tranchée sur les chaussées en milieu urbain : Analyse des données d'une expérimentation à grande échelle. Lille 1.
5. Allain, Rémy. 2014. *Morphologie urbaine : géographie, aménagement et architecture de la ville*. U. géographie. Paris : A. Colin.
6. Alonzo, Éric. 2018. « Quand les routes n'étaient pas que des objets techniques ». Présentation Congrès présenté à Congrès de l'IDRRIM, Lille, 10 octobre.
7. Angers Loire Métropole. 2016. « Charte du Paysage urbain ». Charte. Angers : Angers Loire Métropole.
8. Armstrong, M. A. 2013. *Basic Topology*. Springer Science & Business Media.
9. Arrêté du 15 février 2012. 2012. *Arrêté du 15 février 2012 pris en application du chapitre IV du titre V du livre V du code de l'environnement relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques de transport ou de distribution*.
10. Association PCM. 1964. *Bulletin du PCM, n°4 - 61ème année*. IMP. DE L'ANJOU. Vol. 61. Paris : IMP. DE L'ANJOU.
11. Aubert, Jean-Marc, et Laure Tourjansky-Cabart. 2000. « L'allocation de la voirie dans les centres-villes ». *Revue française d'économie* 15 (2) : 157-94. https://doi.org/10.3406/rfeco.2000.1493.
12. Augello, Daniel. 2001. « La machine qui a changé la machine ». *Gallimard*, Les cahiers de médiologie, 2 (12) : 216-23. https://doi.org/10.3917/cdm.012.0216.
13. A'urbae, et Bordeaux Métropole. 2017. « Guide de Conception des Espaces Publics métropolitains ». Guide d'aménagement. Bordeaux : Agence d'urbanisme Bordeaux Métropole Aquitain. https://www.aurba.org/productions/guide-de-conception-des-espaces-publics-metropolitains/.
14. Aussedat, G., A. Barbiero, A. Bauduin, J. Bellanger, G. Caroff, M. T. Do, P. Dupont, et al. 2003. « Aide au choix des couches de roulement vis-à-vis de l'adhérence ». *Revue Générale des Routes (RGRA)*, n° 813 (janvier).

15. Banaszak, Olivier, et Mathieu Koehl. 2008. « SIG et 3D au service des collectivités territoriales : l'expérience de la Ville du Havre ». *Revue XYZ*, nº 114 : 50-58.

16. Barillot, Jean, Hervé Cabanes, et Philippe Carillo. 2018. *La route et ses chaussées : Manuel de travaux publics*. Blanche BTP. Eyrolles.

17. Barjot, Dominique, et Jacques Dureuil. 2008. *150 ans de génie civil : une histoire de centraliens*. Roland Mousnier. Paris : Presses Paris Sorbonne.

18. Barles, Sabine, et André Guillerme. 1994. « L'environnement souterrain urbain. Une mine pour la recherche ». *Les Annales de la Recherche Urbaine* 64 (1) : 64-70. https://doi.org/10.3406/aru.1994.1820.

19. Barnaud, Cécile, Tanya Promburom, Guy Trébuil, et François Bousquet. 2007. « An Evolving Simulation/Gaming Process to Facilitate Adaptive Watershed Management in Northern Mountainous Thailand ». *Simulation & Gaming* 38 (3): 398-420. https://doi.org/10.1177/1046878107300670.

20. Barthélemy, Marc. 2011. « Spatial Networks ». *Physics Reports* 499 (1-3): 1-101. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002.

21. Baumgartner, Albert, Carsten Steger, Helmut Mayer, Wolfgang Eckstein, et Heinrich Ebner. 1999. « Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping and Context ». *Photogrammet. Eng. Remote Sensing* 65 (7) : 777–786.

22. Begoc, Roger. 2000. « Lumières Publiques ». *Les cahiers de mediologie* N° 10 (2) : 229-35.

23. Béguin, Michèle, Denise Pumain, Hélène Mathian, Olivier Finance, Élisabeth Pascard, et Lilliane Lizzi. 2017. *La représentation des données géographiques : statistique et cartographie*. Cursus. Paris : Armand Colin.

24. Benedetto, Hervé Di, et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux routiers bitumineux : Tome 2, Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Paris : Hermes Science Publications.

25. Bertrand, Mélanie. 2002. « Utilisation de granulats colorés pour la formulation d'enrobés bitumineux colorés ». Masters, Montréal : École de technologie supérieure. http://espace.etsmtl.ca/815/.

26. Billard, Valérie, Benoît Hiron, Frédéric Murard, Elise Loubet-Loche, et Odile Seguin. 2010. « Amélioration de la sécurité des usagers vulnérables - Fiche 02, Les Trottoirs. » Cerema.

27. Blanchard, Nicolas. 2011. « Analyse d'une forme urbaine spécifique à Lyon : la traboule ». *Bulletin du Centre de recherche en sciences humaines de l'Université de Toyo*, nº 13 (mars) : 45-63.

28. Blanchette, Alain. 2011. « Auscultation et inspection des trottoirs ». Présenté à Congrès Infra, Québec, 7 novembre.

29. Bordeaux Métropole. 2018. « Cahier des clauses techniques particulières - Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS) ». Bordeaux Métropole.

30. Bordin, Patricia. 2002. *SIG : concepts, outils et données*. Paris : Hermes Science publications : Lavoisier.

31. ———. 2006. « Méthode d'observation multi-niveaux pour le suivi de phénomènes géographiques avec un SIG ». Marne-la-Vallée : Paris-Est Marne-la-Vallée. http://www.theses.fr/2006MARN0330.

32. Bouillot, Corinne. 2010. « La mémoire des bombardements à Rouen après la Seconde Guerre mondiale : une mise en perspective ». *Études Normandes* 59 (3) : 59-71. https://doi.org/10.3406/etnor.2010.1814.

33. Bousquet, François, Olivier Barreteau, Christian Mullon, et Jacques Weber. 2013. *Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables*. *Rendre possible*. Editions Quæ.

34. Bouttier, B., Y. Gourbeyre, A. Duquesne, S. Denhez, et M. Hassine. 2013. « Évaluation d'une technologie intrusive pour le diagnostic du patrimoine enterré d'eau potable ». *Techniques Sciences Méthodes*, nº 1/2 : 48-55. https://doi.org/10.1051/tsm/201301048.

35. Brault, Jérôme, et Benjamin Courtois. 2017. Echanges sur la gestion de la voirie routière à le Perray-en-Yvelines.

36. Bredon, Glen E. 2013. *Topology and Geometry*. Springer Science & Business Media.

37. Brès, Antoine. 1998. « Le système des voies urbaines : entre réseau et espace ». *Flux*, Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et Territoires, 14 (34) : 4-20. https://doi.org/10.3406/flux.1998.1233.

38. ———. 2006. « De la voirie à la rue : riveraineté et attrition. Des stratégies d'inscription territoriale des mobilités périurbaines ». *Flux*, nº 66-67 : 87-95. https://doi.org/10.3917/flux.066.0087.

39. Bretagnolle, Anne, Timothée Giraud, et Nicolas Verdier. 2010. « Modéliser l'efficacité d'un réseau : Le cas de la poste aux chevaux dans la France pré-industrielle (1632-1833) ». *Espace géographique* 39 (2): 117. https://doi.org/10.3917/eg.392.0117.

40. Cambray, Béatrix de. 1993. « Three-Dimensional (3D) Modelling in a Geographical Database ». In *Proceedings of the Auto-Carto'11, Eleventh International Conference on Computer Assisted Cartography*, 338-47. Minneapolis, USA.

41. Cerema. 2005. *Guide pratique des galeries multiréseaux*. Cerema. Voiron, France : Techni-cités.

42. ———. 2008. *Recommandations pour les aménagements cyclables*. Cerema. Références - 77. Lyon, France : Cerema.

43. ———. 2016. *Voirie urbaine : guide d'aménagement*. Cerema. Vol. 1. 1 vol. Lyon ; Bron : Cerema.

44. ———. 2018a. *Revêtements des espaces publics : Guide technique*. Cerema. Références. Lyon : Cerema.

45. ———. 2018b. *Surveillance et entretien courant des ouvrages d'art routiers – Guide technique à l'usage des communes*. Cerema. Connaissances. Lyon : Cerema.

46. Cerema Ouest. 2017. « Coûts des techniques de construction et d'entretien des chaussées - Analyse Bretagne-Pays de la Loire ». Cerema.

47. CERIU. 2007. « Gestion et entretien des bordures et trottoirs ». Guide technique. Montréal : CERIU.

48. Certu. 1998a. *Dossier de voirie d'agglomération : projet d'agglomération et schéma de voirie, environnement*. CERTU.

49. ———. 1998b. *Dégradations des chaussées urbaines revêtues de pavés ou de dalles*. Certu. Dossiers du Certu (DOCE) 76. Certu.

50. ———. 2008. « Sécurité et hiérarchie des voies urbaines ». Cerema.

51. ———. 2009. *Le profil en travers, outil du partage des voiries urbaines*. Lyon : CERTU, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.

52. ———. 2010. *Entretien des chaussées urbaines : guide méthodologique et pratique*. CERTU. Lyon, France : CERTU.

53. Certu, et Cete Normandie-Centre. 2013. « Mesure de la consommation d'espace à partir des fichiers fonciers ». Lyon : Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, CERTU, CETE Nord Picardie.

54. CG3P. 2006. *Article L2111-2 - Règles générales*. *Code général de la propriété des personnes publiques*.

55. Christian, Bertrand, Lionel Patte, Pilar Lesage, et Jean-Marc Pouchain. 1997. « Catégorisation des voies urbaines et sécurité routière ». Report. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).

56. Christory, Jean-Pierre. 2015. « Chantiers Furtifs Urbains ». Congrès présenté à Congrès Infra, Québec, décembre 2.

57. Cipolat-Gotet, Jean-Marie. 2018. « Chapitre 11. La reconstruction de Rouen (1940-1965) : transformations urbaines et mutations sociales ». In *La Reconstruction en Normandie et en Basse-Saxe après la seconde guerre mondiale : Histoire, mémoires et patrimoines de deux régions européennes*, édité par Corinne Bouillot, 215-31. Normandie. Mont-Saint-Aignan : Presses universitaires de Rouen et du Havre.

58. Circulaire du 30 avril 2007. 2007. *Circulaire du 30 avril 2007 relative aux orientations à prendre en compte dans le cadre des conventions d'assistance technique fournie par l'Etat aux collectivités pour des raisons de solidarité et d'aménagement du territoire - ATESAT, pour la période 2007-2009*.

59. Circulaire du 31 août 1961. 1961. *Circulaire du 31 août 1961 Relative à la gestion technique de la voirie communale (conditions d'intervention du service des Ponts-et-Chaussées)*.

60. CNIG, et AFIGEO. 2017. « Spécifications CNIG du thème Plan du Corps de Rue Simplifié à très grande échelle ». Rapport de recommandations Version 2.0. Conseil National de l'Information Géographique.

61. Code de la route. 2001. *Article R411-2 - Pouvoirs généraux de police*. *Code de la route*.

62. ———. 2010a. *Article L110-2 - Définitions*. *Code de la route*.

63. ———. 2010b. *Article R110-2 - Définitions*. *Code de la route*.

64. Code de la voirie routière. 1989a. *Article L112-2 - Alignement*. *Code de la voirie routière*.

65. ———. 1989b. *Article L112-8 - Droits des riverains*. *Code de la voirie routière*.

66. ———. 1989c. *Article L115-1 - Coordination des travaux exécutés sur les voies publiques situées à l'intérieur des agglomérations*. *Code de la voirie routière*.

67. ———. 1989d. *Article L141-8 - Entretien des voies communales*. *Code de la voirie routière*.

68. ———. 1989e. *Article R141-4*. *Code de la voirie routière*.

69. ———. 2004. *Article L131-4 - Voirie départementale*. *Code de la voirie routière*.

70. ———. 2015a. *Article L111-1 - Définitions*. *Code de la voirie routière*.

71. ———. 2015b. *Article L141-3 - Emprise du domaine public routier communal*. *Code de la voirie routière*.

72. Code général des collectivités territoriales. 2010. *Article L5217-2 - Compétences*. *Code général des collectivités territoriales*.

73. Code rural et de la pêche maritime. 1992. *Article L162-1 - Les chemins et les sentiers d'exploitation*. *Code rural et de la pêche maritime*.

74. Collectif ComMod. 2005. « La modélisation comme outil d'accompagnement ». *Natures Sciences Sociétés* Vol. 13 (2) : 165-68.

75. Communauté urbaine Nantes Métropole. 2012. « Structures et revêtements de voirie – Guide technique ». Guide technique. Nantes : Communauté urbaine Nantes Métropole.

76. Conseil d'Etat. 1989. *Décision judiciaire de Conseil d'Etat, 27 septembre 1989*.

77. ———. 1998. Conseil d'Etat, Section, du 20 mai 1998, 188239, publié au recueil Lebon Lebon.

78. Contrada, F, A Kindinis, J-F Caron, et C Gobin. 2019. « An Early-Design Stage Assessment Method Based on Constructibility for Building Performance Evaluation ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 609 (octobre) : 072070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072070.

79. Contrada, Francesca. 2019. « L'apport de la Constructibilité au pré-design. Évaluation et support au choix des solutions techniques. » *http://www.theses.fr*. Thesis, Paris Est.

80. Corté, Jean-François, et Hervé Di Benedetto. 2004. *Matériaux routiers bitumineux : Tome 1, Description et propriétés des constituants*. Paris : Hermes Science Publications.

81. Coste, Michel, et Marcel Roncayolo. 1980. « La photo-interprétation des formes urbaines ». *L'Espace géographique* 9 (1) : 57-69. https://doi.org/10.3406/spgeo.1980.3526.

82. CoTITA Est, IDRRIM, et USIRF. 2016. « GEPUR : Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier - Méthodes, outils et techniques - Volet n°1 Routes Interurbaines et traverses d'agglomérations ». Guide technique. Grand Est : Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité - IDRRIM.

83. Cristia, Émilien, Pierre-Paul Zalio, et François Guéna. 2018. « Quand le BIM met la maquette à l'épreuve du numérique ». *SHS Web of Conferences* 47 : 01007. https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701007.

84. David, Benoît, et Pascal Fasquel. 1997. « Qualité d'une base de données géographique : concepts et terminologie ». Report. Institut géographique national.

85. De Larrard, François. 2009. *Expérimentations sur les chaussées urbaines démontables*. LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC). https://doi.org/10.3829/erlpc.eg22-fr.

86. De Larrard, François, Jean-Maurice Balay, Thierry Sedran, Jean-Marie Masson, Philippe Duramé, Robert Bélouard, Pierre Pommelet, et al. 2007. « Les chaussées urbaines démontables : Une nouvelle technologie pour les chantiers furtifs ». In , 13. Paris.

87. De Schutter, Tom. 2005. « Voirie : La voirie et l'espace public : rôles et enjeux ». *Union des Villes et Communes de Wallonie*, décembre, 10.

88. Deboudt, Bertrand. 2009. « Fiche vélo : Les bandes cyclables ». Certu.

89. Debreu, Bernard. 2013. « Dossier Furet : les leviers de l'acceptation des chantiers urbains. » *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, nº 913 (juillet) : 91.

90. Décret du 28 décembre 1926. 1926. *Décret du 28 décembre 1926 concernant l'unification des compétences en matière de police de la circulation et de la conservation des voies publiques*. *Décret-loi*.

91. Décret n°61-371. 1961. *Décret n°61-371 Conditions d'exercice du concours technique du service des Ponts-et-Chaussées en matière de voirie des collectivités locales ; Mission (Evaluation recettes et dépenses, préparation des procédures, des programmes, rédaction des marchés) Frais de gestion ; Interventions occasionnelles.*

92. DGCL. 2007. « Code général de la propriété des personnes publiques ». Guide pratique. Paris : DGCL.

93. Diamédo, Chloé, Barthélémy Birolaud, Romain Cipolla, Marie Molino, Floriane Boulay, et Simon Mauroux. 2013. « La compétence voirie. Un profil juridique en 40 questions-réponses ». Rapport d'études. Groupement des autorités responsables des transports (GART), Association des communautés de France (AdCF).

94. Directive 92/50/CEE. 1992. *Directive 92/50/CEE du Conseil, du 18 juin 1992, portant coordination des procédures de passation des marchés publics de services*. *209*.

95. DREAL. 2014. « Consommation d'espace. Emprise des infrastructures routières ». *Observation et statistiques*, 1 octobre 2014.

96. Dumolard, Pierre, Nathalie Dubus, et Laure Charleux. 2003. *Les statistiques en géographie*. Belin atouts. Géographie. Paris : Belin.

97. Dupuis, Franck. 2003. « Tessellations de Voronoï appliquées aux structures protéiques ». Phd thesis, Université Paris-Diderot - Paris VII. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006058.

98. Dupuy, Gabriel. 1981. « Pour un génie urbain problématique ». *Les Annales de la Recherche Urbaine* 13 (1) : 3-21. https://doi.org/10.3406/aru.1981.1020.

99. ———. 1987. « Les réseaux techniques sont-ils des réseaux ? » *L'Espace géographique* 16 (3): 175-84. https://doi.org/10.3406/spgeo.1987.4241.

100. Dupuy, Gabriel, Philippe Menerault, P. Besson, K. Chatzis, Jean Laterrasse, Christian Lefevre, F. Lozada, Georges Ribeill, Franck Scherrer, et Pierre Veltz. 1989. « Génie urbain, territoires et information ». *Les Annales de la Recherche Urbaine* 44 (1) : 213-23. https://doi.org/10.3406/aru.1989.1496.

101. Etienne, Michel. 2010. *Modélisation d'accompagnement*. Update Sciences & technologies. Editions QUAE GIE.

102. Faivre d'Arcier, Bruno. 1990. « L.A.S.C.A.R. (Logiciel d'Aide au Suivi des Coûts d'Aménagement des Rues) : méthode d'analyse fonctionnelle des dépendes de voirie ». Report. Lyon : Inrets et Let.

103. Faivre d'Arcier, Bruno, Jean-Pierre Christory, et Dominique Mignot. 1993. « Approche patrimoniale et gestion de la voirie urbaine ». Report. Paris : Inrets, Lrop et Let.

104. Ferreira, Marcos A.G., et Suely da Penha Sanches. 2007. « Proposal of a Sidewalk Accessibility Index ». *Journal of Urban and Environmental Engineering* 1 (1) : 1-9.

105. Foucaud, Isabelle de. 2016. « Le facteur traque désormais les trottoirs abîmés, tags ou dégradations dans la ville ». *Le Figaro.fr*, 2 décembre 2016, sect. Entreprises. https://www.lefigaro.fr/societes/2016/12/02/20005-20161202ARTFIG00004-le-facteur-traque-desormais-les-trottoirs-abimes-tags-ou-degradations-dans-la-ville.php.

106. Foulard, Sophie, et Pauline Zeiger. 2013. « Comment fabrique-t-on le Mos ? » *Mos 1982-2012 - Du ciel à la carte*, Les Cahiers de l'IAU îdF, Volume 1 (168) : 10-13.

107. Fournier, Jean-Claude, et Jean-Charles Pomerol. 2010. *Théorie des graphes et applications : avec exercices et problèmes*. Informatique. Paris : Hermes Science publications : Lavoisier.

108. Gaborit, P, et N. Azambre. 2017. « Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées métropolitaines ». Lyon : Grand Lyon.

109. Gaborit, P., N. Azambre, J. Rampignon, C. Berdier, C. Babillotte, et C. Soulie. 2017. « Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées métropolitaines ». Guide technique. Lyon : Grand Lyon.

110. Gasperini, Alain. 2004. « L'urbanisme à Rouen au temps de Jean Lecanuet ». *Études Normandes* 53 (3) : 61-79. https://doi.org/10.3406/etnor.2004.1556.

111. Gautreau, Arthur. 2009. « Communication de crise et paralysies du réseau d'alimentation d'EDF des années 1970 à 2000 ». *Annales historiques de l'électricité* N° 7 (1) : 69-81.

112. Genre-Grandpierre, Cyrille. 1999. « La géométrie fractale : un outil de description des réseaux, des flux et de l'accessibilité ». *Revue Géographique de l'Est* 39 (vol. 39 / 4).

113. Gobin, Christophe. 2010. *Réussir une construction en éco-conception*. Presses Des Mines. Développement Durable. Presses Des Mines.

114. ———. 2013. « La constructibilité : un nouveau concept… ». *Le Moniteur*, novembre.

115. Goldberg, Andrew V., et Chris Harrelson. 2005. « Computing the Shortest Path: A Search Meetsgraph Theory ». In *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 156-65. New York, NY : Association for Computing Machinery.

116. Gramond, Delphine. 2019. « Une trame "fraîche" comme outil d'atténuation potentielle des îlots de chaleur urbains : rôles de la végétation ». In *Ecocity, Knowledge city, Smart city : Vers une ville écosoutenable ?*, Première édition, 51-70. Environnement Et Société. Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.

117. Grand Lyon. 2010. « Le référentiel de conception et de gestion des espaces publics ». Lyon : Grand Lyon.

118. Grenoble Alpes Métropole. 2018. « Règlement général de voirie métropolitain ». Règlement de voirie. Grenoble : Grenoble Alpes Métropole.

119. Grimal, Richard. 2010. « Mobilité à longue distance : plus de voyages s'effectuent en train, mais les seniors restent adeptes de la voiture ». *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, La Revue du CGDD, décembre, 123-50.

120. Guenoun, Marcel, François Meyssonnier, et Emil Turc. 2015. « Les démarches de réduction des coûts dans les collectivités territoriales françaises : enjeux et état des lieux ». *Politiques et management public*, nº Vol 32/3 (juillet) : 265-83.

121. Guérois, Marianne, Antonin Pavard, Anne Bretagnolle, et Hélène Mathian. 2016. « Les temps de transport pour délimiter des aires urbaines fonctionnelles ? Une investigation critique à partir de trois métropoles européennes ». *Belgeo. Revue belge de géographie*, nº 2 (juin). https://doi.org/10.4000/belgeo.17789.

122. Hamaina, Rachid, Thomas Leduc, et Guillaume Moreau. 2012. « Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires ». *Cybergeo : European Journal of Geography*, nº 581 (janvier): 12. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25009.

123. Hamlat, Smail. 2007. « Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles ». Thesis, Nantes.

124. Harismendy, Patrick. 1999. « Du caillou au bitume, le passage à la « route moderne » (1900-1936) ». *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest* 106 (3) : 105-28. https://doi.org/10.3406/abpo.1999.4045.

125. Hendel, Martin, Arnaud Grados, Morgane Colombert, Youssef Diab, et Laurent Royon. 2015a. « Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? » In *Congrès Français de Thermique*, 8. La Rochelle.

126. ———. 2015b. « Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? » In *Congrès Société Française de Thermique 2015*, 8. La Rochelle.

127. Héran, Frédéric. 2005. « De la ville adaptée à l'automobile à la ville pour tous. L'exemple parisien ». In *Déplacements : Architectures du transport : territoires en mutation*, Coédition Recherches éditions, 173-86. Questionnements. Paris : Recherches : IPRAUS.

128. ———. 2015. *Le retour de la bicyclette - Une histoire des déplacements urbains en Europe, de 1817 à 2050*. La Découverte. Vol. 1. 1 vol. Cahiers libres 432. Paris : Editis.

129. ———. 2017. « Vers des politiques de déplacements urbains plus cohérentes ». *Norois*, nº 245 : 89-100.

130. Hiron, B., H. Cluzel, C. Chain, C. Damas, J. Nouvier, A. Bacelar, H. Treve, et M. Dejeammes. 2006. « Panorama des équipements de la voirie utilises en milieu urbain ». *TEC (Transport, Environnement, Circulation)*, nº 188 (janvier) : 15-21.

131. Hornych, Pierre, Luc-Amaury George, Sébastien Wasner, et Jean-Michel Simonin. 2016. « Auscultation des chaussées – Projet national DVDC ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, nº 934 (février) : 6.

132. Hutchison, David, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell, Moni Naor, et al. 2010. « Learning to Detect Roads in High-Resolution Aerial Images ». In *Computer Vision – ECCV 2010*, édité par Kostas Daniilidis, Petros Maragos, et Nikos Paragios, 6316:210-23. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15567-3_16.

133. IDRRIM. 2014. « Entretenir et préserver le patrimoine d'infrastructures de transport : une exigence pour la France ». Livre Blanc. Paris : IDRRIM.

134. ———. 2017. « L'ONR et l'acquisition des données auprès des gestionnaires ». Rapport ONR. Paris : IDRRIM.

135. ———. 2018. « Rapport ONR 2018 ». Rapport ONR. Paris : IDRRIM.

136. ———. 2019. « Rapport ONR 2019 ». Rapport ONR. Paris : IDRRIM.

137. ———. 2020. *Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic*. Bron, Cerema, 144 p.

138. IDRRIM, et Cerema. 2016. *L'adhérence des chaussées : état de l'art et recommandations, octobre 2015 : guide technique*. Cerema. Provins : Cerema.

139. Isambert, François-André (1792-1857). 1825. *Traité de la voirie rurale et urbaine, ou des chemins et des rues communaux, d'après la loi du 28 juillet 1824, considérée avec les lois et règlements antérieurs, et les statuts anglais.* Vol. 1. Paris : Lecointe et Durey.

140. Keiichi, ISHIDA. 2005. « Techniques, formes et usages de l'espace des voies publiques : les cas de la voirie urbaine en France et au Japon - essai de mis au point d'une méthode d'enquête iconographique ». Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

141. Kostof, Spiro. 1993. *The City Shaped: Urban Patterns and Meanings Through History*. Reprint. New York ; Boston ; London : Bulfinch.

142. Lagesse, Claire, Philippe Bonnin, Patricia Bordin, et Stéphane Douady. 2016. « Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris, Modelling and characterization of spatial networks : an application to the Paris street network ». *Flux*, nº 105 (octobre) : 33-49. https://doi.org/10.3917/flux.105.0033.

143. Laptev, I., H. Mayer, T. Lindeberg, W. Eckstein, C. Steger, et A. Baumgartner. 2000. « Automatic Extraction of Roads from Aerial Images Based on Scale Space and Snakes ». *Machine Vision and Applications* 12 (1) : 23-31. https://doi.org/10.1007/s001380050121.

144. Larrivée, Suzie, Yann Bédard, et Jacynthe Pouliot. 2006. « Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D ». *Revue internationale de géomatique* 16 (1) : 9-27. https://doi.org/10.3166/rig.16.9-27.

145. Lasserre, Guy. 1962. « Colloque national de Géographie appliquée. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique ». *Les Cahiers d'Outre-Mer* 15 (58) : 196.

146. Layton, Lyndsey. 2000. « D.C. Official Puts Streets Director on Notice; Control Demanded Over Utility Work ». *Washington Post*, 16 mars 2000, sect. B01.

147. LCPC. 1997. *Méthode d'essai LPC n°38-b : Relevé des dégradations de surface des chaussées*. LCPC. Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai. Paris : LCPC.

148. ———. 1998. *Méthode d'essai LPC n°52 : Catalogue des dégradations de surface des chaussées*. LCPC. Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai. Paris : LCPC.

149. LCPC, et Setra. 1981. *Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic*. Paris ; Bagneux : LCPC ; SETRA.

150. ———. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. Paris ; Bagneux : LCPC ; SETRA.

151. ———. 1998. *Catalogue des structures types de chaussées neuves*. Bagneux ; Paris : SETRA ; LCPC.

152. Le Boursicaud, Vinciane. 2018. « New uses of deflection bowls measurements to characterize the structural conditions of pavements ». Thèses, Nantes : Ecole centrale de Nantes.

153. Leheis, Stéphanie, et Laura Ziliani. 2010. « Refaire la route sur la route. Adapter les infrastructures routières existantes aux enjeux de développement durable : quelles

pratiques et quels effets ? Les cas de Marseille et Buenos Aires ». In *Journées du Pôle Ville de l'Université Paris-Est*. Champs-sur-Marne, France.

154. Lenoel, François, et Jean-Pierre Maillard. 2005. « Mission d'évaluation de l'Assistance Technique de l'Etat pour des raisons de Solidarité et d'Aménagement du Territoire - ATESAT ». 2004-0259-01. Les Rapports. Conseil Général des Ponts-et-Chaussées.

155. Leroy, Christine. 2012. « Routes et voiries : Construction et Maintenance ». *Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment*, Cahier pratique, nº 5679 (septembre) : 6-30.

156. Levitte, Agnès. 2012. « Intrigues de piétons ordinaires ». *Communications* n° 90 (1) : 63-81.

157. Li, Qing, Fengxiang Qiao, et Lei Yu. 2016. « Impacts of Pavement Types on In-Vehicle Noise and Human Health ». *Journal of the Air & Waste Management Association* 66 (1): 87-96. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1119217.

158. Lille Métropole. 2003. « Catalogue des matériaux de voirie et d'espaces publics ». Catalogue voirie. Lille : Lille Métropole.

159. ———. 2013. « La notion de chantier furtif ». Lille, 5 novembre.

160. Lillesand, Thomas, Ralph W. Kiefer, et Jonathan Chipman. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.

161. Littré, Émile. 1873. *Dictionnaire de la langue française*. Hachette. Vol. 4. 5 vol. Paris : L. Hachette.

162. Loi d'orientation n°92-125. 1992. *Loi d'orientation n°92-125 du 6 février 1992 relative à l'administration territoriale de la République*.

163. Loi du 15 octobre 1940. 1940. *Loi du 15 octobre 1940 sur le rattachement des services de la voirie départementale et vicinale à l'administration des Ponts-et-Chaussées*.

164. Loi Grenelle n°2010-788. 2010. *Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement*.

165. Loi MURCEF n°2001-1168. 2001. *Loi n°2001-1168 du 11 décembre 2001 portant mesures urgentes de réformes à caractère économique et financier (MURCEF). MURCEF*.

166. Loi n°46-942. 1946. *Loi n°46-942 du 7 mai 1946 instituant l'Ordre des géomètres experts*.

167. Loi n°48-1530. 1948. *Loi n°48-1530 du 29 septembre 1948 relative à l'intervention des fonctionnaires des Ponts-et-Chaussées, dans les affaires intéressant les collectivités locales et divers organismes*.

168. Loi n°66-1069. 1966. *Loi n°66-1069 du 31 décembre 1966 relative aux communautés urbaines*.

169. Loi n°82-213. 1982. *Loi n°82-213 du 2 mars 1982 relative aux droits et libertés des communes, des départements et des régions*.

170. Loi n°85-704. 1985. *Loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.*

171. Loi n°89-413. 1989. *Loi n°89-413 du 22 juin 1989 relative au code de la voirie routière (partie législative)*.

172. Loi n°95-1350. 1995. *Loi n°95-1350 du 30 décembre 1995 tendant à faciliter la transformation des districts en communautés urbaines*.

173. Loi n°96-142. 1996. *Loi n°96-142 du 21 février 1996 relative à la partie Législative du code général des collectivités territoriales*.

174. Loi n°99-586. 1999. *Loi n°99-586 du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale*.

175. Loi n°2004-809. 2004. *Loi n°2004-809 du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales*.

176. Loi n°2010-1563. 2010. *Loi n°2010-1563 du 16 décembre 2010 de réforme des collectivités territoriales*.

177. Loi n°2013-1278. 2013. *Loi n°2013-1278 du 29 décembre 2013 de finances pour 2014*.

178. Loi n°2014-58. 2014. *Loi n°2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles*.

179. Loi n°2015-991. 2015. *Loi n°2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République*.

180. Lorrain, Dominique. 1987. « Le grand fossé ? Le débat public/privé et les services urbains ». *Réseaux* 5 (26) : 113-37. https://doi.org/10.3406/reso.1987.1315.

181. Lucas, J. M., M. Leger, J. Gelle, et C. Conan. 1995. « Routes départementales en traversée d'agglomération - Règles usuelles de répartition des charges d'entretien ».

182. Mairie de Paris - Division des plans de voirie. 2011. « Cahier des normes ». Mairie de Paris.

183. Marshall, Stephen. 2005. *Streets & Patterns*. 1st ed. London ; New York: Spon.

184. ———. 2006. « Un réseau viaire favorable aux transports collectifs ». *Flux* n° 66-67 (4) : 96-110.

185. Menerault, Philippe. 1994. « Contribution à une analyse morphologique des réseaux viaires ». *Flux*, Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et Territoires, 10 (16) : 49-67. https://doi.org/10.3406/flux.1994.982.

186. ———. 1995. « Le territoire de gestion de la voirie urbaine en France : entre intercommunalité et supra-communalité ». *Politiques et management public* 13 (4) : 131-59. https://doi.org/10.3406/pomap.1995.2079.

187. Miklasz, Marion. 2018. « Étude et mise en œuvre d'une démarche BIM à Brest métropole ». Other, Brest métropole, 24 rue Coat ar Gueven, 29200 Brest.

188. Mineau, Dimitri. 2003. « L'apport des SIG en urbanisme (The contribution of GIS to town planning) ». *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 80 (4) : 443-53. https://doi.org/10.3406/bagf.2003.2356.

189. Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2017. « Assises nationales de la mobilité ». Gouvernemental. Assises Nationales de la mobilité - Plateforme participative. 2017.

190. Mohajeri, Nahid, et Agust Gudmundsson. 2014. « Street Networks in Relation to Landforms: Implications for Fast-Growing Cities ». *Journal of Geographical Sciences* 24 (2): 363-81. https://doi.org/10.1007/s11442-014-1093-3.

191. Mozol, Patrick. 2013. « II. Le rôle des syndicats d'électrification et la gestion des réseaux publics de distribution d'électricité : entre opportunités et contraintes ». *Annuaire des Collectivités Locales* 33 (1) : 79-93. https://doi.org/10.3406/coloc.2013.2396.

192. Nafi, A., et R. Tourment. 2016. « Gestion patrimoniale : pilotage par la performance dans une optique de durabilité du service ». *Sciences Eaux et Territoires*, nº 20 : 70-77.

193. Offner, Jean-Marc. 2004. « XII. Les transferts de compétences dans le domaine des routes ». *Annuaire des Collectivités Locales* 24 (1) : 143-56. https://doi.org/10.3406/coloc.2004.1534.

194. Ordonnance n°59-30. 1959. *Ordonnance n°59-30 tendant à instituer les districts urbains dans les grandes agglomérations*.

195. Ordonnance n°59-115. 1959. *Ordonnance n°59-115 relative à la voirie des collectivités locales.*

196. Ordonnance n°2004-566. 2004. *Ordonnance n°2004-566 portant modification de la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.*

197. Ortolan, Joseph-Louis-Elzéar (1802-1873). 1857. *Explication historique des Instituts de l'empereur Justinien, précédée de l'Histoire de la législation romaine, et d'une Généralisation du droit romain.* 6e éd. Vol. 1-2. 3 vol. Paris : Librairie de jurisprudence de H. Plon.

198. Ossola, Marie-Françoise. 2010. *Pierres Naturelles : conception et réalisation de voiries et d'espaces publics.* RGRA. Paris : Revue générale des routes et des aérodromes (RGRA).

199. Papon, Francis, et Régis De Solère. 2009. « Les modes actifs : marche et vélo de retour en ville ». *La Revue*, 16.

200. ———. 2010. « Les modes actifs : marche et vélo de retour en ville ». *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, La Revue du CGDD, décembre, 65-82.

201. Pays de Gâtine Parthenay. 2011. « De la définition et des bons usages des matériaux de revêtement et du petit mobilier urban relatifs à l'espace public ». Guide. Parthenay : Syndicat Mixte d'Action pour l'Expansion de la Gâtine.

202. Perna, Andrea, Pascale Kuntz, et Stéphane Douady. 2011. « Characterisation of Spatial Network-like Patterns from Junctions' Geometry ». *Physical Review E* 83 (6) : 066106. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.066106.

203. Poreau, Jean-Claude. 2009. « Fiche vélo : Les pistes cyclables ». Certu.

204. Pornon, Henri. 2015. *SIG : La dimension géographique du système d'information*. Dunod.

205. Pusateri, Patrice. 1998. « La reconstruction de Rouen à l'épreuve du temps ». *Études Normandes* 47 (1) : 9-40. https://doi.org/10.3406/etnor.1998.2326.

206. Rampignon, J. 2009. « Guide technique de conception et de dimensionnement des chaussées communautaires – Fascicule 2 – Dimensionnement des structures de chaussées neuves et élargissements de voies ». Guide technique. Lyon : CETE Lyon, INSA - EDU, Grand Lyon - DV -VQL.

207. Ravion, Isabelle. 1999. « Concours des services techniques de l'Etat (DDE, DDAF) aux collectivités locales - Marchés privés ». *Moniteur*, nº 5002 (octobre) : 63-64.

208. Reigner, Hélène. 2004. « La territorialisation de l'enjeu « sécurité routière » : vers un basculement de référentiel ? » *Espaces et sociétés* no 118 (3) : 23-41.

209. Reynaud, Jean-Luc. 2008. « Le profil en travers, outil du partage des voiries urbaines ». Présenté à Journée Une voirie pour tous, Aix-en-Provence, 7 octobre.

210. Roche, Sebastian. 1997. « Les SIG : un regard nouveau sur l'espace et sa gestion ». *L'Espace géographique* 26 (1) : 60-66. https://doi.org/10.3406/spgeo.1997.1032.

211. Routes de France. 2018. « Routes et rues, au cœur de toutes les mobilités ». L'état des routes 2018. Paris : Routes de France.

212. Rouveyran, Thomas, et Cécile Fontaine. 2012. « La réforme « anti-endommagement des réseaux » ». *Le Moniteur*, novembre, 57-58.

213. Ruiz, A, W Kornus, J Talaya, et J L Colomer. 2004. « Terrain Modeling n an Extremely Steep Mountain: A Combination of Airborne and Terrestrial Lidar ». In *Proceedings of XX Congress of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS*, 5. Istanbul.

214. Salvo, Magali Di. 2006. « Calculs d'accessibilité : impact des spécifications du réseau routier sur les calculs d'accessibilité. Données sources méthodes ». Report. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).

215. Sandberg, Ulf, et Guy Descornet. 1980. « Road Surface Influence on Tire/Road Noise – Part I ». In *The 1980 International Conference on Noise Control Engineering*. Miami, USA: Statens väg- och transport for sknings institut.

216. Sangaré, Issa, et Serge Thibault. 1996a. « Génie urbain urbanisme, assainissement et voiries, le cas de Tours ». Report.

217. Sauterey, R., et P. Autret. 1977. *Guide d'auscultation des chaussées souples*. Paris : Editions Eyrolles.

218. Sénat. 2002. « Entretien de voirie d'intérêt communautaire - Sénat ». Site officiel du gouvernement. Sénat - Un site au service des citoyens. 11 juillet 2002. https://www.senat.fr/questions/base/2002/qSEQ020700613.html.

219. Sénécal, Gilles, Jacques Malézieux, et Manzagol Claude. 2002. *Grands projets urbains et requalification*. Éditions de la Sorbonne. Géographie. Paris : PUQ.

220. Service Gestion des Territoires. n.d. « Guide de gestion du domaine public routier ». Guide de gestion du domaine public routier. Haute-Garonne : Direction départementale des Territoires.

221. Setra. 1988. « La réhabilitation des chaussées en traversée d'agglomération : Guide méthodologique ». Guide technique B 8887. Bagneux : Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement du territoire, et des Transports / Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).

222. ———. 2000. « I.Q.R.N : Image Qualité du Réseau routier National ». Note d'information. Lyon : Setra.

223. ———. 2005. *Les trottoirs sur les ponts et aux abords immédiats : synthèse des aménagements : guide technique*. Cerema (ex-Setra). Bagneux : SETRA.

224. ———. 2006. « Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes ». SKU1803175340. Cerema (ex-Setra).

225. Siret, Daniel, Marjorie Musy, Fabien Ramos, Dominique Groleau, et Pascal Joanne. 2006. « Développement et mise en œuvre d'un SIG 3D environnemental urbain ». *Revue Internationale de Géomatique* 16 (1): 71-91.

226. Staccioli, Romolo Augusto. 2003. *The Roads of the Romans*. L'Erma di Bretschneider. Los Angeles: The J. Paul Getty Museum.

227. Stempihar, Jeffrey J., Tina Pourshams-Manzouri, Kamil E. Kaloush, et Maria Carolina Rodezno. 2012. « Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis ». *Transportation Research Record* 2293 (1): 123-30. https://doi.org/10.3141/2293-15.

228. Ticha, Hamza Ben. 2017. « Vehicle Routing Problems with Road-Network Information ». Saint-Étienne : École des Mines de Saint-Étienne.

229. Topcu, Mehmet, et Michael Southworth. 2014. « A Comparative Study of the Morphological Characteristics of Residential Areas in San Francisco » 11 (2): 173-89.

230. Ville de Toulouse. 2008a. « Cahier " Revêtements de sol" ». Cahier de l'espace public. Toulouse : Services Techniques de la Ville de Toulouse.

231. ———. 2008b. « Profils, structures et revêtements de voirie ». Guide technique. Cahier de l'espace public. Toulouse : Service de la Voie Publique, Mairie de Toulouse.

232. Vlès, Vincent, Vincent Berdoulay, et Sylvie Clarimont. 2005. « Espaces publics et mise en scène de la ville touristique ». Rapport final de recherche. Pau : Université de Pau et des Pays de l'Adour, Laboratoire SET UMR 5603 CNRS-UPPA.

233. Wasner, Sébastien. 2019. « Vers de nouvelles approches de gestion du patrimoine routier ». 19 novembre.

234. Zanetti, C., M. Vennetier, P. Mériaux, P. Royet, S. Dufour, et M. Provansal. 2008. « L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages ». *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, nº 53 : 49-67.

235. Zimmerman, Rae. 2002. « Enjeux et gestion des interactions entre les différents réseaux d'infrastructure, Abstract ». *Flux*, nº 47 : 54-68. https://doi.org/10.3917/flux.047.0054.

Références sitographiques

1. grandorlyseinebievre.fr. 2016. « Site de l'EPT du Grand-Orly Seine Bièvre ». Institutionnel. Grand-Orly Seine Bièvre. 2016. Consulté le 16 juin 2020. https://www.grandorlyseinebievre.fr/presentation/competences.

2. Métropole Rouen Normandie - Direction de la communication. s. d. « Compétence voirie et règlement de voirie ». Administration publique. Métropole Rouen Normandie. Consulté le 16 juin 2020. https://www.metropole-rouen-normandie.fr/competence-voirie-et-reglement-de-voirie.

ANNEXES

Table des ANNEXES

A. Annexe – Typologie fonctionnelle de la voirie selon la nature et l'usage des liaisons routières 307

B. Annexe – La compétence de voirie : Une histoire liée à la décentralisation 311

C. Annexe – Paramétrage de la méthode Certu 322

D. Annexe – Construction d'une droite de régression 325

E. Annexe – Comparaison des emprises de voirie selon les différentes méthodes 327

F. Annexe – Méthodologie détaillée permettant de rendre interopérable les données de voirie surfaciques et linéaires 335

G. Annexe – Une brève histoire de la conception et fabrication des chaussées 346

H. Annexe – Les différentes maintenances de la voirie 349

I. Annexe – Exemples de fiches de matériau de revêtement de voirie 350

J. Annexe – Le choix des matériaux selon leurs caractéristiques et leurs domaines d'emploi 357

K. Annexe – Extrait de modes opératoires d'auscultation 361

L. Annexe – Extrait de fiche de levé remplie 366

M. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous ou hors voirie 367

N. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous la voirie selon le type de voirie 369

O. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous la voirie selon l'élément constitutif de la voirie 371

P. Annexe – Démarche d'analyse de la variance (ANOVA) 373

Q. Annexe – Résultats des ANOVA 376

R. Annexe – Démarche d'analyse du Chi² 379

S. Annexe – Résultats des Chi² 384

T. Annexe – Analyse des revêtements de voirie à Cachan 389

U. Annexe – Analyse des dégradations de voirie à Cachan 392

A. Annexe – Typologie fonctionnelle de la voirie selon la nature et l'usage des liaisons routières

Le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) dans son guide d'aménagement de la voirie urbaine pose comme synonyme de voirie urbaine le terme *rue* (Cerema 2016, p.8). Dans sa thèse, Keiichi (2005) rapproche également ces deux termes : « (…) *l'ensemble des voies : la voirie, le réseau voirie et routier, des voies, …, ou globalement la rue* ». Doit-on en conclure que seules les *rues* composent la *voirie urbaine* ? Qu'en est-il des avenues, des boulevards, etc. ?

Voirie et *rue* sont en fait deux termes renvoyant à des objets géographiques différents. La première correspond à l'infrastructure-support que nous avons décrite dans le deuxième chapitre de la Partie I, tandis que la seconde est une forme particulière de la *voirie* de par ses aménagements et le rôle qu'elle occupe en milieu urbain. Keiichi (2005) écrit « *qu'il existe plusieurs types de rue : rue, boulevard, avenue, route, etc.* ». L'inclusion du terme *rue* dans cette liste descriptive pointe sa polysémie. Dans le cas présent, il serait plus juste de parler de « types de voirie » que de « types de rue ». Nous proposons de revenir sur la classification la *voirie* basée sur la nature de cette dernière. Pour cela, nous nous intéressons aux rôles structurels de la voirie sur le territoire, de façon à identifier la voirie primaire, secondaire, et tertiaire (Trève et De Neuville 2008).

a. La voirie primaire – les routes, boulevards et avenues

La voirie primaire structure le territoire en reliant entre elles les agglomérations et permet la circulation. Au regard de ces éléments, la voirie primaire peut se décomposer en sous-catégories : routes, boulevards et avenues.

Le mot route vient du latin via rupta, voie rompue, c'est-à-dire, une voie que l'on a réalisée « *en rompant la forêt et, ou le terrain* ». Dès lors, bien qu'utilisé aujourd'hui dans un sens plus large pour désigner l'itinéraire suivi pour un point A à un point B, le terme *route* désigne les voies de communication terrestres ayant été aménagées par l'Homme (Littré 1873) : axes tracés pour la circulation à pied ou par véhicule (véhicule motorisé ou non – cycle, voiture individuelle, bus, etc., supporté ou non par une infrastructure lourde – chemin de fer, route pavée, bitumée ou de terre, etc.). *Route* évoque la linéarité si bien qu'utilisée au quotidien, elle désigne une infrastructure importante permettant de relier deux villes. Dans l'antiquité, on parlait des routes romaines, par la suite des routes royales et aujourd'hui des routes nationales ou départementales. Le code de la route actuel (Code de la route 2010a), pose les aspects règlementaires liés au terme *route* : La route y est vue comme un axe de communication terrestre favorisant les liaisons interurbaines de part des infrastructures conséquentes pouvant supporter un trafic élevé.

Le mot boulevard vient du langage propre au génie militaire ancien. Il désignait le terre-plein d'un rempart, le terrain d'un bastion ou d'une courtine. Aujourd'hui, le terme désigne par extension un axe permettant de réaliser le tour d'une ville, souvent en lieu et place d'anciens remparts (**Figure A-1**). Une utilisation plus récente lui fait désigner toute voie ayant une largeur importante, et un caractère structurant fort pour la ville dans laquelle elle s'inscrit.

Légende : a) Boulevard de Montparnasse, b) Boulevard Voltaire, c) Boulevard des Maréchaux

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure A-1 - Exemples de Boulevards à Paris

L'avenue est une grande voie traversant une ville et conduisant en un lieu remarquable. Elle est souvent bordée d'arbres. Un bon exemple demeure l'Avenue des Champs-Elysées (**Figure A-2**).

Légende : a) Avenue de l'observatoire, b) Avenue Ledru-Rollin, c) Avenue Georges Barmanos

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure A-2 - Exemples d'Avenues à Paris

b. La voirie secondaire – les rues, ruelles, et allées (Figure A-3)

La voirie peut dépasser son rôle de liaison interurbaine ou de voie structurant la ville, c'est le cas généralement de la *voirie secondaire*. Son aménagement permet de l'inclure dans la vie urbaine en lui donnant un rôle social (lieu de rencontre), économique (activités commerçantes), tout en lui laissant leur rôle initial de support pour la circulation des biens et des personnes. La voirie primaire telle que les avenues ou les boulevards peut également dépasser le rôle de support pour la circulation, et d'autant plus lorsqu'elle est touristique. Cependant cet aspect concerne

principalement la voirie secondaire. La voirie secondaire est composée de rues, de ruelles, d'allées et de passages, supportant un trafic moindre que la voirie primaire.

La rue est un « *chemin bordé de maisons ou de murs dans une ville, dans un bourg, dans un village* »[6]. La rue se caractérise par une largeur faible et ne dispose pas de contre-allée. Cette définition, au regard des éléments morphologiques avancés peut finalement s'appliquer aux boulevards et avenues. Les seules différences observables concernent la présence ou non de contre-allée ainsi que le gabarit. Ceci est d'autant plus vrai que les us et coutumes conduisent à dénommer les voies de circulation soit selon des éléments topographiques (reliefs, hydrographie, etc.), soit en hommage à des individus. Lorsque les autorités souhaitent rendre un hommage, un glissement sémantique conduit alors à associer les termes de boulevard et d'avenue non plus exclusivement à des voies à fort gabarit, mais également à des voies de faible gabarit.

<u>Légende</u> : a) Rue centre urbain historique, b) Rue secteur résidentiel collectif, c) Rue secteur résidentiel individuel

Auteur : A.Pavard, 2018

Figure A-3 - Exemples de rues à Meaux (77) et Champigny (94)

Lorsque la rue a un rôle de desserte plus locale, ou tout simplement une structure architecturale moins imposante, on parle de ruelle (ou venelle) ou d'allée. La première est similaire à une rue, si ce n'est qu'elle est plus étroite, tandis que la seconde est en général bordée d'arbres.

La rue ou ruelle couverte prend le nom de passage, avec des déclinaisons selon les régions ou les pays, pouvant recouvrir des différences mineures. Nous faisons le choix de les regrouper toutes dans cette même catégorie formée autour des passages : Les traboules en Rhône-Alpes, les trages ou traiges en Franche-Comté, les traverses, les cours, etc. Ces voies sont le plus souvent aménagées pour favoriser la circulation entre des espaces privés, ou pour desservir des bâtiments enclavés. Compte tenu de leurs rôles, on peut se questionner quant à leur positionnement parmi la voirie secondaire. Pour autant, étant donné leur emplacement (en milieu urbain) et le fait

[6] Définition de l'Académie française

qu'elles permettent généralement de relier des rues entre-elles, nous faisons le choix comme (Blanchard 2011) d'affirmer leur classement parmi les voiries secondaires.

Ces éléments descriptifs relèvent davantage des coutumes d'aménagement que d'une règlementation précise. Ils reflètent les distinctions observables entre les différentes voies routières. Pour autant, comme nous l'avons souligné, des exceptions existent, comme dans l'exemple de l'utilisation du terme *avenue*.

c. La voirie tertiaire ou locale – les impasses, et les chemins

La dernière classe de voirie concerne la voirie tertiaire, laquelle a un rôle soit de desserte extérieure à la ville, soit de desserte d'un bâtiment ou d'un groupement de bâtiments.

En dehors de la ville, où pour leurs grands espaces verts, on parle de *chemin*. Ce terme tout comme celui de *route* est souvent utilisé pour décrire un itinéraire emprunté par un individu (quel chemin dois-je prendre pour me rendre à … ?). Pour autant, lorsqu'il s'agit de donner une appréciation sur l'importance du tracé, les deux termes ne renvoient pas la même image. Ainsi, chemin, qui nous vient du gaulois *cammano* a donné naissance à des dérivés tel que cheminement qui renvoie davantage une image de sinuosité et de tranquillité. Le chemin est un axe de communication ayant un rôle de desserte pour des espaces reculés (zones pavillonnaires enclavées et ou éloignées des axes de communications supérieurs), naturels (cours d'eau, zones forestières). Les chemins peuvent avoir des fonctions variées et de ce fait prendre des noms différents : D'abord, il y a des chemins ruraux et les chemins forestiers, qui pour les premiers desservent des zones pavillonnaires éloignées, et pour les seconds traversent des zones forestières. Ensuite, des chemins de halage longent les cours d'eau. Enfin, d'autres sont à usage privé pour desservir des terrains agricoles. C'est le cas des chemins et sentiers d'exploitation, ou des pavillons, les chemins de voisinage ou de quartier, ainsi que les chemins de desserte, de culture ou d'aisance ;

Pour finir, les *impasses* autrement nommées *villas* forment un dernier type de voies tertiaires. Celles-ci peuvent ressembler à des rues ou ruelles, mais à la différence de ces dernières, seule une extrémité débouche sur une autre voie.

Ainsi, loin d'être un synonyme de voirie, rue fait partie d'un ensemble de termes permettant de décrire les aménagements de la voirie selon sa fonction (type de déplacement, partage de l'espace selon le mode de déplacement), et selon son environnement (urbain ou rural).

B. Annexe – La compétence de voirie : Une histoire liée à la décentralisation

La compétence voirie se décompose en trois volets : – la création avec l'acquisition de terrain pour une nouvelle construction ou le reclassement d'une voie ; – l'aménagement par l'élargissement, le redressement, ou l'établissement d'un plan d'alignement de la voirie ; – l'entretien par l'exécution des travaux nécessaires au maintien en bon état des voies (Diamédo et al. 2013). Au fil des décennies, cette compétence est passée sous la houlette de plusieurs administrations. Les plus récentes modifications à ce sujet datent de la réforme de décentralisation des pouvoirs de l'Etat visant à donner davantage de compétences de gestion aux collectivités territoriales locales. Cela devait permettre notamment aux élus locaux de mieux répondre aux enjeux propres à leur territoire. La gestion de la voirie locale faisait notamment partie de ces compétences. Nous pouvons dire que la décentralisation en 1990 se présente comme une date charnière

a. Jusque 1990 : La voirie, un terrain de conflits entre les administrations

Dès 1836, lorsque les départements obtiennent leurs propres techniciens habilités à gérer la voirie, ceux-ci se retrouvent en concurrence avec le service des Ponts-et-Chaussées. En 1895, un projet de loi tente de faire des départements l'instance publique gérante de la voirie routière nationale. Le projet finalement avorté, est remplacé par une loi de 1940 qui confère toute latitude pour la gestion de la voirie au service des Ponts-et-chaussées en leur rattachant les services de voirie départementaux (Loi du 15 octobre 1940).

i. L'autonomie communale ou le renfort de l'ingénieur public national

Au-delà de la voirie départementale, le pouvoir de l'ingénierie publique est également renforcé à l'échelon local par une loi de 1948. Celle-ci autorisait les agents de l'État à intervenir hors du champ concurrentiel, auprès des communes et de leurs groupements sur une simple délibération de la collectivité et une autorisation préfectorale (Loi n°48-1530 1948). Il fallut attendre 1959, et une ordonnance conférant la gestion aux communes de leur voirie, pour que le débat autour d'une gestion locale de l'infrastructure soit relancée (Ordonnance n°59-115 1959). Pour autant, l'appareil législatif fit un rétropédalage suite à la réaction de l'Association des Ingénieurs des villes (Ponts et Chaussées et Mines), qui tenta de faire valoir ses capacités à exercer la gestion de la voirie aux différents échelons. Dans le même temps, les petites communes manifestèrent leur inquiétude de ne pas être en mesure de gérer leur patrimoine routier. Ainsi, deux ans plus tard, en 1961, un décret et une circulaire permirent aux communes de faire appel aux services techniques de l'Etat ou d'autres collectivités (Décret n°61-371 1961 ; Circulaire du 31 août 1961 1961). Ces actes juridiques marquèrent le début de l'aide technique à la gestion communale (ATGC). Pour

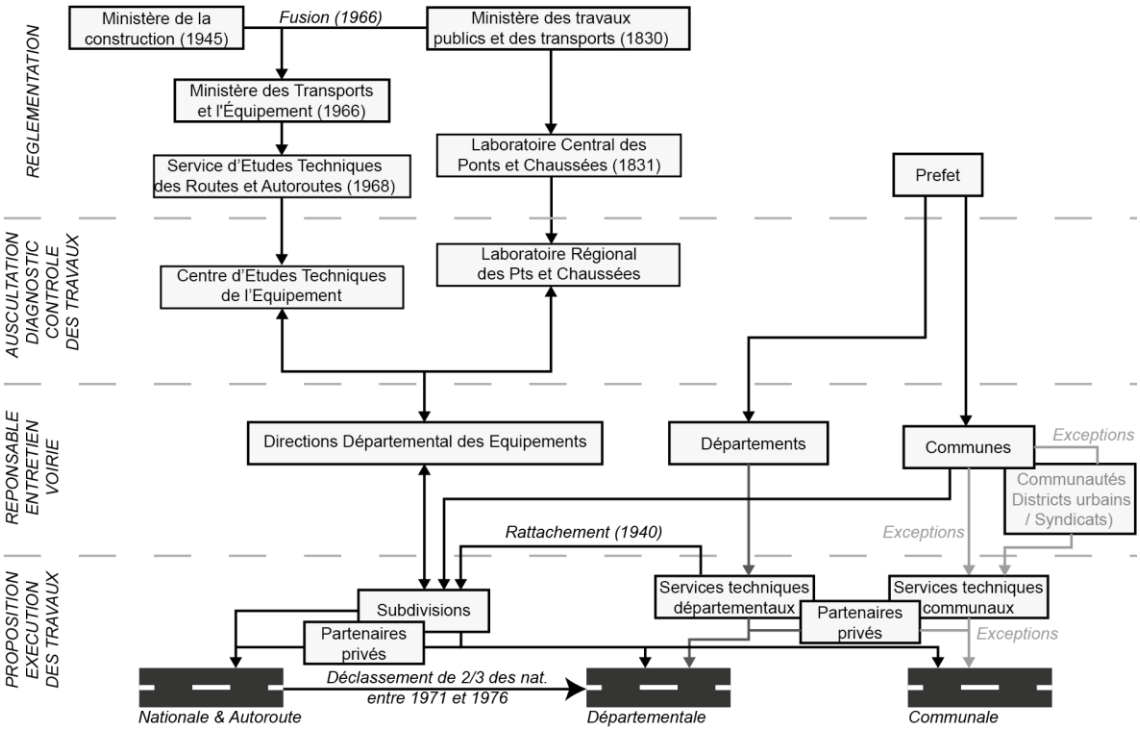
l'association des ingénieurs des villes, ce fut un succès. Dans son bulletin d'avril 1964, l'association indiquait d'ailleurs que 95% des communes – soit 90% de la longueur des voies communales françaises – avaient souhaité bénéficier de l'ATCG (Association PCM 1964).

Jusque dans les années 1990, les services techniques d'Etat furent finalement très peu concurrencés aux échelles locales, si ce n'est dans les très grosses communes urbaines. Lorrain en 1987, a réalisé une étude sur la gestion d'autres services publics tels que l'assainissement ou les réseaux de chaleurs. Il concluait que la tutelle de l'Etat avait pour effet de maintenir en sous-qualification des agents municipaux (Lorrain 1987). Cette situation était transposable au cas de la gestion de la voirie, et expliquait le lien de dépendance entre les communes et les services techniques de l'Etat. La création du ministère de l'Equipement en 1966 aurait pu déstabiliser ce processus décisionnel. Au contraire, il renforça finalement cet échelon pourtant plus adapté à une France rurale qu'à une France où l'urbanisation était en plein développement. Entre la fin du XIXème siècle avec les Syndicats de communes, les districts urbains – créés par ordonnance en 1959 qui disparaissent finalement en 1995 car non viables du fait de l'absence d'une unité urbaine – peu de structures étaient en mesure de prendre l'ascendant sur les services de l'Etat (Ordonnance n°59-30 1959 ; Sangaré et Thibault 1996). Finalement, seuls les plus grands espaces urbains de plus de 500 000 habitants réunis à partir de 1966 sous la forme de communautés urbaines, disposaient de moyens techniques et humains suffisants pour autogérer leur voirie (Loi n°66-1069 1966).

En 1992, l'émergence d'une nouvelle vision de l'intercommunalité permit à d'autres territoires de s'émanciper par la création de deux nouveaux établissements publics à caractère industriel et commercial (EPIC) à fiscalité propre : les communautés de communes et les communautés de villes (Loi d'orientation n°92-125 1992). En parallèle de la création des deux structures, la loi proposa au titre de compétences optionnelles de ces entités : la création, l'aménagement et l'entretien de la voirie routière, les plans de déplacements urbains et les transports urbains. Elle posa également les bases de la complémentarité entre les compétences voirie et transports publics urbains. Pour autant, à cette époque, si la plupart du temps les entités intercommunales géraient les transports collectifs urbains, seulement une petite partie d'entre elles prenaient en charge la régie voirie. Menerault (1995) indiquait notamment que c'était le cas pour seulement la moitié des 31 collectivités urbaines – parmi les plus grandes de France métropolitaine – analysées dans le cadre de son étude. L'auteur faisait également état d'une dichotomie nord/sud laissant supposer que la vision de l'aménagement urbain, et donc des transports dépendait au moins en partie de la culture : la moitié nord du pays semblait avoir davantage intégré la complémentarité entre voirie et transports publics en donnant la double compétence à ses entités intercommunales. Nous émettons l'hypothèse que cette dichotomie se traduit encore aujourd'hui dans les logiques

d'aménagements de la voirie et notamment le choix des matériaux utilisés (**Cf. Partie III, 9, p. 170**).

Finalement, la **Figure B-1** résume la situation en termes de gestion de la voirie, telle qu'elle était au début des années 1990.



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure B-1 – Gestion de la voirie avant décentralisation

ii. Le difficile essor des intercommunalités

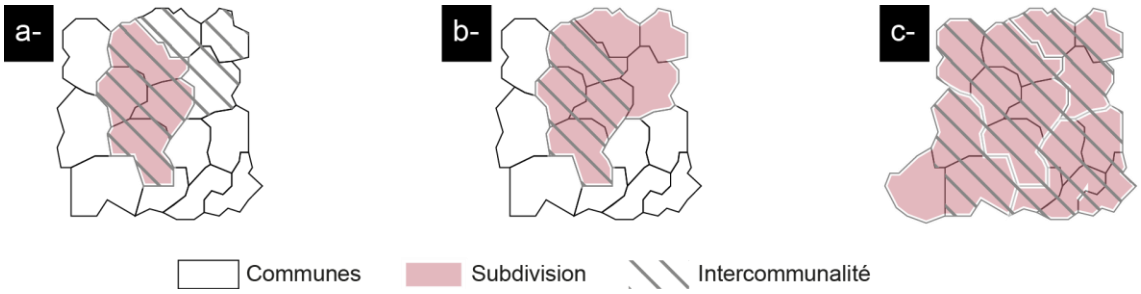
Lorrain (1987) dans son étude opposa également les régies municipales des grandes villes aux sociétés privées. Il remarqua que les premières étaient bloquées dans leur périmètre et ce, quelle que soit la qualité de leurs prestations, tant les petites communes redoutaient la formule intercommunale de crainte de subir sans contrepartie une politique imposée par une collectivité plus puissante. À ce titre, les oppositions politiques et l'esprit local renforcèrent la frontière entre petites et grandes communes. Si une telle logique conduisit les communes de banlieue à opter pour d'autres formes de gestion, pour l'assainissement notamment, on comprend qu'il en allait de même pour la gestion de la voirie. Ceci est certainement d'autant plus vrai lorsque l'on mesure l'importance de la voirie pour l'aménagement et la vie d'une commune. Cette situation décrite par Lorrain fait écho aux témoignages plus récents de deux agents publics[7] de la commune du Perray-en-Yvelines (7 000 habitants) en charge de l'espace public. Lors d'une rencontre en 2017,

[7] J. Brault, directeur des services, et B. Courtois, responsable du service technique

nous avions soulevé la question du transfert des compétences voiries de leur commune vers la communauté d'agglomération de Rambouillet Territoires regroupant 36 communes pour 80 000 habitants. Ces derniers avaient alors émis des réserves, arguant de l'hétérogénéité des situations en terme d'investissements financiers, et donc techniques et humains, dans la communauté d'agglomération (Brault et Courtois 2017). La crainte de perdre une compétence et avec elle le contrôle d'un élément structurel important de l'espace urbain demeure encore aujourd'hui sous-jacente.

La décentralisation enclenchée en 1982, est un processus lent (Loi n°82-213 1982). Dans les années 1990, les nouvelles structures intercommunales étaient toujours en concurrence avec les services de l'équipement de l'Etat. Ces services organisés en 1300 subdivisions territoriales (maille la plus fine) formaient des entités supra-communales. L'organisation de ces entités qui s'est opérée sur le long terme et à partir d'une France métropolitaine principalement dominée par le rural, expliqua certainement la difficulté pour les structures intercommunales à prendre le pas sur les compétences qui devraient leur échoir. D'autant qu'à cette époque, l'activité des subdivisions se répartissait sur les trois grands domaines de la voirie : 30% pour de la voirie communale, 40% pour de la voirie départementale et enfin 30% pour de la voirie nationale (Offner 2004).

Du point de vue des communes, les subdivisions revêtaient certains avantages. En effet, elles présentaient une complétude dans le sens où elles couvraient la totalité du territoire, et une organisation hiérarchique du territoire par l'emboitement des cellules administratives autour de trois niveaux : – le national ; – le départemental (les DDE) ; – le pluri-cantonal (la subdivision). À l'inverse, les structures intercommunales encore toute jeunes présentaient un territoire morcelé et donnaient plus d'importance aux communes urbaines denses qu'aux communes périurbaines et rurales. Ces différences rendirent difficile le transfert de compétences des subdivisions vers les structures intercommunales, d'autant plus que leurs découpages respectifs ne favorisaient pas toujours une bonne interopérabilité. En effet, une subdivision pouvait : être contenue entièrement dans une entité intercommunale plus grande, contenir une entité intercommunale plus petite, ou encore, plusieurs subdivisions pouvaient s'inscrire et même dépasser une unique entité intercommunale (**Figure B-2**).



Auteur : A.Pavard, 2020

Figure B-2 – Exemple de chevauchements entre les subdivisions et intercommunalités

Ce contexte associé d'une part à la méfiance des petites communes vis-à-vis des grandes communes urbaines, et d'autre part à leurs moyens financiers limités, empêcha un développement logique des structures intercommunales. En 1995 Menerault enquêta 434 communes regroupées dans 31 collectivités urbaines. Il observa qu'aucune commune de plus de 80 000 habitants ne faisait appel à l' l'aide technique à la gestion communale (ATGC) tandis que 95,8% des communes de moins de 2 000 habitants l'utilisaient (Menerault 1995).

b. De la fin des années 1990 à nos jours - la décentralisation moteur de la réorganisation de la compétence voirie routière

En Europe, le conseil communautaire au début des années 1990 a posé les bases d'une restructuration des services d'Etat (Directive 92/50/CEE 1992). Cette directive confirmait le souhait de la commission européenne de structurer depuis les années 1970 le marché intérieur européen en favorisant l'ouverture et la transparence des commandes publiques. Dans sa démarche, la commission européenne s'était rapidement heurtée au cloisonnement des marchés nationaux et n'avait pu que constater le protectionnisme de ces états membres. Afin de favoriser le développement d'un marché unique, et par là même d'assurer une égalité quant à l'accès de toutes entreprises européennes aux marchés publics nationaux, une série de mesures ont été prises des années 1970 aux années 2000. Sur le plan national, bien que la modernisation de l'appareil législatif soit engagée, la réorganisation est très lente. En 1989, la mise en place du code de la voirie routière réaffirmait les compétences du maire quant à la voirie traversant sa commune, et plus précisément en agglomération (Loi n°89-413 1989). Depuis, le Code de la voirie routière (1989c) indique qu'à « *l'intérieur des agglomérations, le maire assure la coordination des travaux affectant le sol et le sous-sol des voies publiques et de leurs dépendances, sous réserve des pouvoirs dévolus au représentant de l'Etat sur les routes à grande circulation* ». Par ailleurs, il revient au maire selon le code de la route de fixer les limites de l'agglomération. Ces aménagements législatifs n'ont pas remis en question pour autant les relations étroites entre les communes et les services d'ingénierie de l'Etat (Code de la route 2001). En revanche, ils tendent

à complexifier la gestion des voiries départementales et nationales lorsque celles-ci traversent l'agglomération. En effet, si les départements et l'Etat restent propriétaires, et donc responsables de l'entretien de leur voirie, le maire doit exercer son rôle de police de l'ordre public. Ainsi, comme le relevaient Lucas et al. (1995), le maire a le devoir d'assurer la sûreté et la commodité des passages en agglomération, et ce quel que soit le niveau administratif de la voirie. Pour cela, il doit réaliser les aménagements relatifs à la sécurité des usagers, et s'assurer du bon fonctionnement des équipements tels que la signalisation ou l'éclairage. Par ailleurs, il a l'obligation de doter les sections de voirie d'un trottoir ou d'un accotement.

En d'autres termes, selon notre définition de la voirie routière (**Cf 1.3, p. 48**), la commune est responsable d'une partie de la voirie, alors même que celle-ci relève du domaine public du département ou de l'Etat. Et ce, dans le sens où elle doit gérer, c'est-à-dire créer, aménager et entretenir les dépendances, dont les trottoirs.

i. La fin de l'hégémonie des services de l'Etat

Ce n'est qu'à la fin des années 1990 que l'administration a commencé à être remise en cause, notamment suite à deux arrêtés : l'un du Conseil d'État, l'autre du Tribunal administratif de Besançon (Conseil d'Etat 1998 ; Ravion 1999). Par le premier, le Conseil d'État a imposé la concurrence entre les établissements publics suite à un contentieux quant à la construction et l'exploitation d'un ouvrage d'art dans la communauté de communes du Piémont de Barr (Bas-Rhin). Le second a fait suite à la sanction d'une commune (Boussières dans le Doubs) ayant consulté trois architectes ainsi que la direction départementale de l'agriculture et de la forêt pour une mission de maîtrise d'œuvre publique tout en sachant qu'elle n'était pas tenue de procéder à une mise en concurrence. Par ces jugements qui font jurisprudence, c'est l'idée que les services déconcentrés de l'Etat formulent une offre dans un secteur concurrentiel où il n'y a pas carence de l'initiative privée qui a été condamnée. En 1996, un nouvel outil regroupant les dispositions législatives et réglementaires relatives au droit des collectivités territoriales a permis de restructurer les pouvoirs de chaque collectivité (Loi n°96-142 1996). Depuis, les maires et conseils municipaux doivent diriger les travaux communaux, pourvoir aux besoins de la voirie, et prévoir leurs budgets en conséquence.

À la suite, la loi Murcef de 2001 a accéléré la modernisation de l'ingénierie publique. Elle a notamment permis de poser un cadre juridique quant à la mise en concurrence : « *Les services de l'État, des régions et des départements peuvent, dans les conditions prévues par le code des marchés publics, apporter leur concours technique aux communes, à leurs établissements publics et aux établissements publics de coopération intercommunale (article I-1-1)* » (Loi MURCEF n°2001-1168 2001). Elle a par ailleurs remplacé l'ATCG par une assistance technique fournie par

l'Etat pour des raisons de solidarité et d'aménagement du territoire (ATESAT), et a défini plus précisément les limites d'utilisation de l'aide proposée depuis 1961 :

> « *Les communes et leurs groupements qui ne disposent pas, du fait de leur taille et de leurs ressources, des moyens humains et financiers nécessaires à l'exercice de leurs compétences dans les domaines de la voirie, de l'aménagement et de l'habitat bénéficient, à leur demande, d'une assistance technique fournie par les services de l'État, dans des conditions définies par une convention passée entre le représentant de l'État et, selon le cas, le maire ou le président du groupement* » (Loi MURCEF n°2001-1168 2001).

Le seuil d'acceptation des communes a par ailleurs été fixé selon un double critère financier et démographique défini selon trois strates[8]. La loi a également cadré les missions pouvant être confiées au service de l'Etat. Pour la voirie, ces missions s'articulent autour d'une assistance à la gestion, l'entretien, et la réparation de la voirie, notamment en fournissant une aide à la programmation des travaux, à la conduite des études, à la passation des marchés de travaux et à la direction des contrats de travaux. De même, une assistance similaire a été mise en place pour les ouvrages d'art intéressant la voirie ou liés à son exploitation. Cette assistance nécessitait une convention conclue entre l'État et la collectivité, sur une durée d'un an, renouvelable deux fois par tacite reconduction.

L'intérêt de cette aide aux petites communes a été attesté par son large succès auprès de ces dernières. Sur 33 500 éligibles, 31 000 ont eu recours à l'ATESAT. Ainsi, son renouvellement a été acté jusqu'à 2009 (Circulaire du 30 avril 2007).Un rapport de 2005 du conseil général des Ponts et Chaussées relevait que l'aide liée à la voirie était à poursuivre tout en transférant les tâches les plus simples aux collectivités. Par ailleurs, les spécialistes préconisaient de ne plus systématiser l'aide, et de ne l'adresser qu'à la demande explicite des élus (Lenoel et Maillard 2005). Ce même rapport soulignait le fait que les demandes concernaient massivement l'entretien, la surveillance et la gestion de la voirie communale. Or, ces activités relevaient d'un savoir technique inaccessible à la majorité des communes, et ce d'autant plus que l'ATESAT obligeait la réalisation d'un diagnostic complet sur l'état des voies et des ouvrages d'art. Bien que l'État souhaita promouvoir les coopérations entre les communes, l'ATESAT allait à l'encontre de ce principe, dans la mesure où les petites collectivités pouvaient se soustraire d'une coopération avec les grandes communes urbaines. Finalement, une loi de 2013 a mis fin à l'ATESAT, les derniers

[8] Typologie des communes selon le nombre d'habitant et les recettes fiscales :
- Les communes de 1 et 1.999 hab. et dont le potentiel fiscal est inférieur à 1,1 million d'euros ;
- Les communes de 2.000 et 4.999 hab. et dont le potentiel fiscal est inférieur à 1,6 million d'euros ;
- Les communes de 5.000 et 9.999 hab. et dont le potentiel fiscal est inférieur à 2,7 millions d'euros ;
- Les groupements de communes : de 15.000 habitants pour un potentiel fiscal inférieur à 1 million d'euros.

projets organisés sous cette assistance devant se terminer en décembre 2015 (Loi n°2013-1278 2013).

ii. L'émancipation des intercommunalités

À partir de 1995 et 1999, l'échelon intercommunal peu présent jusqu'alors s'est affirmé, ceci par le biais d'une remise en question de l'intégration des communes dans les intercommunalités et de la gestion de la voirie. Notamment, une loi de 1995 a rendu possible la transformation des districts urbains en une forme plus intégrée, les communautés urbaines (Loi n°95-1350 1995 ; Loi n°99-586 1999). Avant 1999, les communautés mises en place pouvaient exercer une compétence voirie amputée de la partie gestion liée aux équipements destinés aux habitants d'une commune. La loi de 1999 a empêché cette séparation des compétences. Depuis, lorsqu'il est décidé que les nouvelles communautés prennent en charge la voirie, elles doivent alors prendre la compétence dans son intégralité. Cette nouvelle règlementation a soulevé la question des voiries créées par les communautés. En effet, si la compétence voirie leur a échut, la loi n'a prévu aucun cadre légal concernant la constitution d'un patrimoine intercommunal. Ainsi, les voies dans leur ensemble restèrent la propriété des communes. Malgré tout, la notion « d'intérêt communautaire » a été introduite par la loi de 1992 qui a permis la création des communautés de villes et des communautés de communes (Loi d'orientation n°92-125 1992). L'intérêt communautaire devait permettre d'identifier les compétences transférées à la communauté de celles qui restaient au niveau des communes. Par ailleurs, cette notion avait pour objectif de laisser une plus grande marge de manœuvre aux communes périphériques peu rassurées par l'emprise éventuelle des communes-centres sur leur territoire.

Ainsi, la loi permet depuis 1999 aux communes de transférer les missions à l'intercommunalité dès lors que le coût, la technicité, l'ampleur ou l'objectif des travaux s'inscrivent dans un intérêt intercommunal. La notion d'*intérêt communautaire* a donc permis de délimiter plus précisément les compétences de chacune des parties plutôt que de donner un cadre à ce qui devait relever du patrimoine de l'intercommunalité ou de la commune. En 2002, le ministre de l'intérieur, de la sécurité intérieure et des libertés locales a indiqué en réponse à une question similaire que :

> « *Les voies nouvelles créées par les communautés de communes faisant partie intégrante de leur domaine public propre, aucune règle n'impose ni ne justifie qu'elles soient rétrocédées aux communes pour être classées parmi les voies communales. Le code de la voirie routière ne prévoyant pas l'existence d'une voirie communautaire, la voirie des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) ne peut être qualifiée comme telle. Cependant, cette absence de qualification n'a aucune incidence sur l'exercice de la compétence voirie ni sur les droits et obligations qui en découlent pour l'assemblée délibérante et le président de l'EPCI* » (Sénat 2002).

En 2010, la réforme des collectivités territoriales, a contribué à poursuivre les regroupements intercommunautaires pour en limiter le nombre. Elle a également permis d'abaisser le seuil légal de création des communautés urbaines (de 500 000 hab. à 250 000 hab.), et a fait émerger la notion de « métropole ». La métropole est un nouvel EPCI qui regroupe des communes contigües et sans enclave autour d'un projet d'aménagement et de développement économique, écologique, éducatif, culturel et social. Les métropoles doivent permettre d'améliorer la compétitivité et la cohésion des territoires sur le plan national (Loi n°2010-1563 2010). Jusque-là les communautés urbaines faisaient figure d'exemple en termes d'intégration des communes, dans le sens où elles étaient les seules structures depuis 1966 à obtenir de plein droit et sans contrainte la compétence voirie communale. La loi de 2010 a été encore plus loin pour les métropoles en leur permettant d'exercer « *de plein droit, en lieu et place des communes membres, la création, aménagement et entretien de voirie* » (Code général des collectivités territoriales 2010). De plus, elle a affecté aux métropoles la « *gestion des routes classées dans le domaine public routier départemental, ainsi que de leurs dépendances et accessoires* ». Enfin, une réforme de 2014 a achevé l'inscription des métropoles dans le paysage des intercommunalités, tout en renforçant l'ensemble de cet échelon (Loi n°2014-58 2014).

Concernant les voiries nationale et départementale non afférentes aux communes, une loi de 2004 a acté un nouveau transfert des routes nationales vers les départements (Loi n°2004-809 2004). Ce transfert s'est accompagné d'un déclassement de la voirie nationale en voirie départementale, accordant toute latitude aux départements quant à leur gestion. L'Etat conserve depuis cette date dans son patrimoine uniquement la voirie n'ayant pas vocation départementale et celle devant rejoindre le domaine public routier communal. Dans le cas des collectivités, régions et départements d'outre-mer, un déclassement a également été réalisé vers le niveau administratif équivalent aux régions, ceci dans la perspective de donner plus d'autonomie à ces territoires. En outre-mer, la voirie nationale est devenue voirie territoriale. À ce titre, si le projet prévisionnel de la loi NOTRe de 2015 envisageait de transférer la compétence voirie des départements vers les régions, cette idée a finalement été abandonnée et le pouvoir des départements s'en est vu au contraire renforcé (Loi n°2015-991 2015). En revanche, les régions ayant une vue d'ensemble de leur territoire et donc des enjeux en termes de transports, ont gardé un droit de regard sur les projets de construction et d'entretien de la voirie à enjeu régional, et surtout ont gagné en compétence dans la gestion des transports publics. La loi NOTRe a permis d'achever la couverture du territoire français par les EPCI à fiscalité propre, tout en limitant leur nombre par le jeu des fusions. De 2016 à 2017, soit en seulement une année, le nombre d'EPCI a diminué de 39% (**Tableau 3-1**). Cette diminution est principalement enregistrée parmi les communautés de communes qui ont diminué à hauteur de 45%.

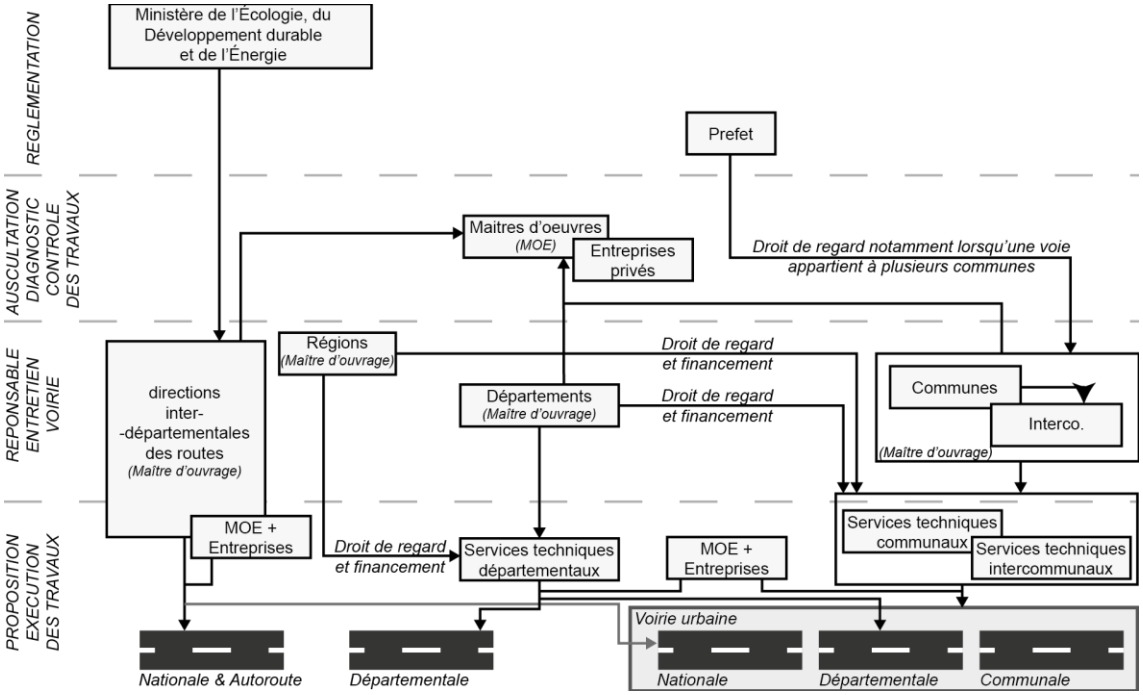
Tableau B-1 – Groupements intercommunaux (EPCI fiscalité propre)

EPCI fiscalité propre	2016*	2017*	Evolution	Compétence voirie
Métropoles (y compris Lyon)	14	15	8%	**Compétences <u>obligatoires</u>** (depuis 2010) : - ***Voirie communale*** : Création, aménagement et entretien - ***Voirie départementale*** : Gestion des routes et dépendances et accessoires.
Comm. urbaines	11	15	36%	**Compétences <u>obligatoires</u>** (depuis 1966) : - ***Voirie communale*** : voirie et signalisation
Comm. d'agglo.	196	218	11%	**Compétences <u>optionnelles</u>** (depuis 1992) : - ***Voirie communale*** : la création, l'aménagement et l'entretien
Comm. de communes	1 842	1 019	-45%	
Total	2 062	1 266	-39%	

** France métropolitaine et territoires d'outre-mer*

Source : INSEE, 2017

Finalement, la **Figure B-3** résume l'organisation de la gestion de la voirie telle qu'elle existe aujourd'hui avec l'ajout du maillon intercommunal.



Auteur : A.Pavard, 2018

Figure B-3 – Gestion de la voirie après la réforme de décentralisation

Cette analyse des intervenants gestionnaires de la voirie et leur évolution dans le temps, permet de comprendre la complexité de l'organisation de la gestion de cette infrastructure. Comme nous l'observons à travers la structure mise en place suite à la décentralisation, le rôle de chaque échelon territorial n'est pas toujours clairement identifiable. Ceci est d'autant plus vrai lorsque la voirie considérée se trouve en agglomération, c'est-à-dire lorsqu'il est question de la voirie urbaine. Le développement et l'empilement des structures intercommunales a renforcé cette complexité et contribue aujourd'hui au floue persistant quant à savoir qui gère quoi. Par ailleurs le processus amorcé il y a quelques décennies maintenant, est un processus lent, et le transfert de compétences se fait parfois par étape, entrainant de ce fait une multitude de situations.

C. Annexe – Paramétrage de la méthode Certu

Le Certu dans un document méthodologique indique les largeurs à affecter selon le type de voie renseigné dans la BD TOPO de l'IGN (**Tableau C-1**). Nous observons des manques dans les spécifications proposées. Par exemple, toutes les largeurs ne sont pas indiquées pour les tronçons de classe administrative « Autres », tel que les largeurs de BDD pour les Routes à 2 chaussées (CERTU et CETE Normandie-Centre 2013).

Tableau C-1 – Affectation des largeurs selon le type de voie

		Largeurs			
Cl. Admin.	**voies**	**BAU ou BDD**	**Berme**	**Zone sécurité**	**Emprise voirie**
Autoroutes	3,50 m pour les 2 × 2 voies et les 2 × 3 voies	3,00 m	1,00 m	8,50 m	Largeur de la zone de sécurité + largeur d'une voie = 8,50 + 3,50 = 12 m
Routes nationales	3,50 m (routes principales)	2,50 m	1,00 m (0 si franchissement)		**Nombre de voies égal à 0 ou 1** : largeur de l'emprise = (largeur corrigée*/2) + largeur BDD + largeur berme **Nombre de voies supérieur ou égal à 2** : largeur de l'emprise = (largeur corrigée* / nombre de voies) + largeur BDD + largeur berme
Routes Dép.	**RD à 1 chaussée** : 3,00 m.	**RD à 1 chaussée** : 0,50 m (si nb voies = 0 ou 1). 1 m (si nb voies >= 2)			
	RD à 2 chaussées : 3,50 m.	**RD à 2 chaussées** : 1,50 m (si nb voies = 0 ou 1) 2,50 m (si nb voies >= 2)			
Autres	**Chemins, Escaliers, Pistes cyclables et Routes 1 chaussée** : 2 m **Bretelles et Routes 2 chaussées** : 2,50 m **Bretelles autoroutières** : 3 m	Largeur variant de 0 mètre pour les chemins, gué ou radier, piste cyclable, sentier, route empierrée à 2 mètres pour les bretelles	**Chemins, Gués ou Radiers, Pistes cyclables, Sentiers, Routes empierrées** : 0 m **Bretelles et Routes 2 chaussées** : 1,00 m		

Sources : CERTU et CETE Normandie – Centre, 2013

Bien qu'absentes dans la présentation méthodologique, nous avons pu compléter ces informations à l'aide d'une annexe du document technique du Certu présentant la table attributaire de données construites sur un territoire. Nous proposons un résumé extrait des données produites dans le tableau suivant (**Tableau C-2**).

Tableau C-2 – Tableau des largeurs des zones tampons à attribuer aux tronçons

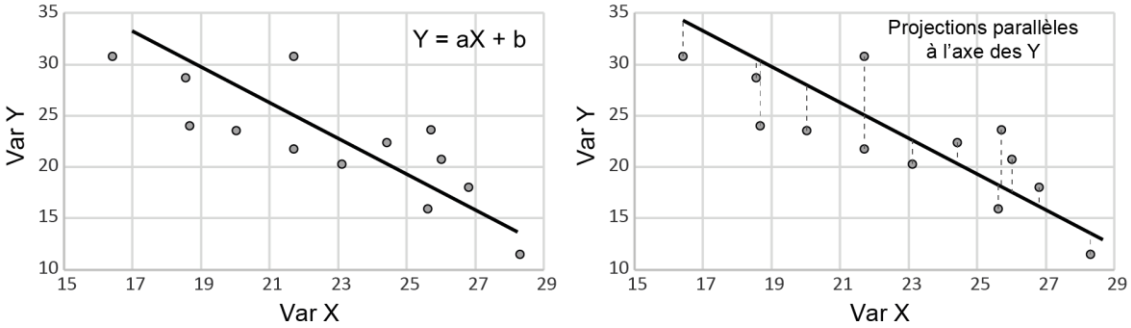
cl_admin	Nature	Franch.	Nb. Voies	Larg Voie	Larg BAU / BDD	Larg Berme	Larg Buffer
Autre	Bac	NC	1	2,0	0,0	1,0	2,0
	Chemin	Gué ou radier	1	2,0	0,0	0,0	1,0
	Chemin	NC	1	2,0	0,0	1,0	2,0

	Escalier		2	4,0	0,0	1,0	3,0
	Piste cyclable	Tunnel	1	2,0	0,0	0,0	1,0
	Route empierrée	Gué ou radier	1	2,0	0,0	0,0	1,0
	Sentier	NC	1	2,0	0,0	1,0	2,0
			2	4,0	0,0	1,0	3,0
		Pont / Tunnel	1	2,0	0,0	0,0	1,0
	Route à 1 chaussée	Gué ou radier	1	2,0	0,0	0,0	1,0
			2	4,0	0,0	0,0	2,0
		NC	1	2,0	0,5	0,8	2,3
			2	4,0	0,5	0,8	3,3
			3	6,0	0,5	0,8	3,3
			4	8,0	0,5	0,8	3,3
			5	10,0	0,5	0,8	3,3
			6	12,0	0,5	0,8	3,3
			7	14,0	0,5	0,8	3,3
			8	16,0	0,5	0,8	3,3
			10	20,0	0,5	0,8	3,3
		Pont / Tunnel	1	2,0	0,5	0,0	1,5
			2	4,0	0,5	0,0	2,5
			3	6,0	0,5	0,0	2,5
			4	8,0	0,5	0,0	2,5
			5	10,0	0,5	0,0	2,5
			6	12,0	0,5	0,0	2,5
			7	14,0	0,5	0,0	2,5
			10	20,0	0,5	0,0	2,5
	Route à 2 chaussées	NC	1	2,5	1,0	1,0	3,3
			2	5,0	1,5	1,0	5,0
			3	7,5	1,5	1,0	5,0
			4	10,0	1,5	1,0	5,0
			5	12,5	1,5	1,0	5,0
			6	15,0	1,5	1,0	5,0
			8	20,0	1,5	1,0	5,0
		Pont / Tunnel	1	2,5	1,0	0,0	2,3
			2	5,0	1,5	0,0	4,0
			3	7,5	1,5	0,0	4,0
			4	10,0	1,5	0,0	4,0
	Quasi-autoroute	NC	1	2,5	2,0	1,0	4,3
			2	5,0	2,0	1,0	5,5
			3	7,5	2,0	1,0	5,5
			4	10,0	2,0	1,0	5,5
			5	12,5	2,0	1,0	5,5
			6	15,0	2,0	1,0	5,5
		Pont / Tunnel	2	5,0	2,0	0,0	4,5
			3	7,5	2,0	0,0	4,5
			4	10,0	2,0	0,0	4,5
			5	12,5	2,0	0,0	4,5
	Bretelle	NC	1	3,0	2,0	1,0	4,5
			2	6,0	2,0	1,0	6,0
			3	9,0	2,0	1,0	6,0
			4	12,0	2,0	1,0	6,0
			7	21,0	2,0	1,0	6,0
		Pont / Tunnel	1	3,0	2,0	0,0	3,5
			2	6,0	2,0	0,0	5,0
			3	9,0	2,0	0,0	5,0
Dép.	Route empierrée Sentier	NC	1	3,5	0,0	0,0	1,8
	Route à 1 chaussée	NC	1	3,0	0,5	1,0	3,0
			2	6,0	1,0	1,0	5,0
			3	9,0	1,0	1,0	5,0
			4	12,0	1,0	1,0	5,0
			5	15,0	1,0	1,0	5,0
			6	18,0	1,0	1,0	5,0
		Pont / Tunnel	1	3,0	0,5	0,0	2,0
			2	6,0	1,0	0,0	4,0
			3	9,0	1,0	0,0	4,0
			4	12,0	1,0	0,0	4,0
			5	15,0	1,0	0,0	4,0

			6	18,0	1,0	0,0	4,0
	Route à 2 chaussées / Quasi-autoroute	NC	1	3,5	1,5	1,0	4,3
			2	7,0	2,5	1,0	7,0
			3	10,5	2,5	1,0	7,0
			4	14,0	2,5	1,0	7,0
			5	17,5	2,5	1,0	7,0
			6	21,0	2,5	1,0	7,0
		Pont / Tunnel	1	3,5	1,5	0,0	3,3
			2	7,0	2,5	0,0	6,0
			3	10,5	2,5	0,0	6,0
			4	14,0	2,5	0,0	6,0
	Bretelle	NC	1	3,5	2,0	1,0	4,8
			2	7,0	2,0	1,0	6,5
			3	10,5	2,0	1,0	6,5
		Pont / Tunnel	1	3,5	2,0	0,0	3,8
			2	7,0	2,0	0,0	5,5
			3	10,5	2,0	0,0	5,5
Nat.	Route à 1 ou 2 chaussées Quasi-autoroute Bretelle	NC	1	3,5	2,5	1,0	5,3
			2	7,0	2,5	1,0	7,0
			3	10,5	2,5	1,0	7,0
			4	14,0	2,5	1,0	7,0
			5	17,5	2,5	1,0	7,0
		Pont / Tunnel	1	3,5	2,5	0,0	4,3
			2	7,0	2,5	0,0	6,0
			3	10,5	2,5	0,0	6,0
			4	14,0	2,5	0,0	6,0
Autoroute	Autoroute Bretelles Route à 1 ou 2 chaussées	NC	1	3,5	3,0	1,0	12,0
			2	7,0	3,0	1,0	12,0
			3	10,5	3,0	1,0	12,0
			4	14,0	3,0	1,0	12,0
			5	17,5	3,0	1,0	12,0
			6	21,0	3,0	1,0	12,0
		Pont / Tunnel	1	3,5	3,0	0,0	6,5
			2	7,0	3,0	0,0	6,5
			3	10,5	3,0	0,0	6,5
			4	14,0	3,0	0,0	6,5
			5	17,5	3,0	0,0	6,5
			6	21,0	3,0	0,0	6,5

D. Annexe – Construction d'une droite de régression

Une régression linéaire consiste à déterminer une droite s'ajustant à un nuage de points construit à partir d'observations décrites par deux variables et mise en relation sur un plan orthonormé. La droite créer aura pour équation Y = a.X + b, où « a » sera la pente et « b » l'ordonnée en origine. Une droite de régression est déterminée de façon à minimiser les distances au carré entre tous les points du nuage et la droite. Il s'agit alors de la « droite des moindres carrés » (**Figure D-1**).

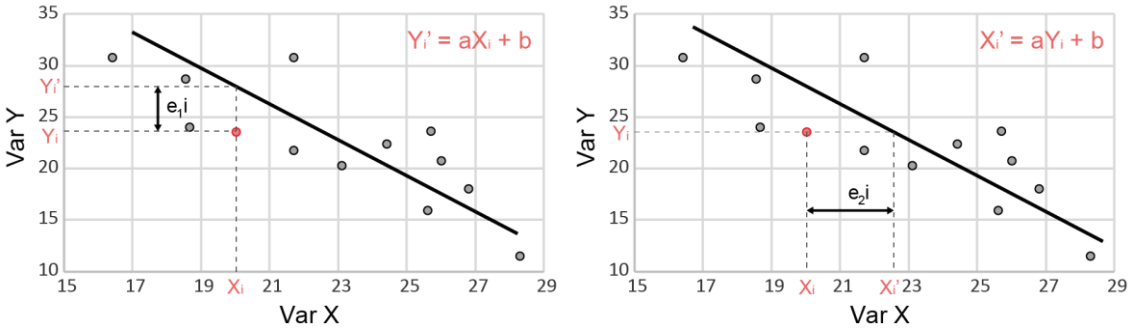


Auteur : A. Pavard, 2020

Figure D-1 – Régression linéaire : principe de la droite de régression

Lors de la mise en œuvre d'une régression linéaire, on détermine deux équations de droite (**Figure D-2**) :

- la première permet d'estimer Y en fonction de X ;
- la seconde permet d'estimer X en fonction de Y.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure D-2 – Régression linéaire : déterminer les droites de régression de Y et de X

Dans le premier cas, X est la variable dite « explicative » et Y la variable dite à « expliquer ». On note alors Y' l'estimation de Y par X. Pour cela, les projections des points sur la droite se font perpendiculaire à l'axe des X. La droite obtenue se présente alors par l'équation Y' = a1.X + b1. Une fois la droite construite, il est possible de calculer les écarts noté « e i » entre les Y observé et les Y' observé, soit e i = Y'i - Yi. Ces écarts sont appelés les « résidus ». La somme des résidus

indique au final la qualité de l'ajustement de la droite construite. Dans le deuxième cas, le processus est similaire mais inversé.

Dans le cas le plus classique, et c'est d'ailleurs ce que propose les outils de traitements statistiques, on calcule l'équation permettant d'estimer Y en X. Les valeurs de X étant connues, l'objectif est de calculer les paramètres a et b de l'équation de la droite Y' = aX + b.

La pente a1 est calculée selon l'**Équation D-1**, où COV(XY) correspond à la covariance entre X et Y, c'est-à-dire à leur tendance à varier ensemble, et où σ^2x correspond à la variance de X. Le signe de la pente exprime alors le sens de la relation entre X et Y.

Équation D-1 – Equation de la pente

$$a1 = \frac{COV(XY)}{\sigma^2 x}$$

L'origine de la droite b1 est calculée selon l'**Équation D-2**, où moy(Y) correspond à la moyenne des valeurs prises par les observations sur la variable Y, et où moy(X) correspond à la moyenne des valeurs prises par les observations sur la variable X.

Équation D-2 – Equation de l'origine de la droite

$$b1 = moy(Y) - a1 * moy(X)$$

Ainsi, pour construire la première droite de régression présentée en **Figure 7-10** (**p. 148**), nous appliquons cette méthode. Tel que nous pouvons l'observer sur le **Tableau D-1**, nous obtenons une pente a1 de 0,920 et une origine de droite b1 de 11,612. La droite de régression illustrée par la **Figure 7-10** (**p. 148**) a été construite automatiquement à l'aide du Tableur Excel. La valeur de la pente a1 est similaire à celle calculée manuellement. Nous observons une légère différence pour la valeur de l'origine de la pente b1 liée aux arrondies des valeurs utilisées.

Tableau D-1 – Exemple de construction de l'équation d'une droite de régression

Observation	id_troncon	X	Y
1	TRONROUT0000000248912843	0,00	88,85
2	TRONROUT0000000004423751	0,00	113,17
3	TRONROUT0000000300927109	4,51	4,89
4	TRONROUT0000000004422837	7,19	11,90
5	TRONROUT0000000240163202	7,72	9,52
i	**IDi**	**Xi**	**Yi**
	Covariance (X,Y)		**402525**
	Variance	**437427**	
	a1	**402 525 / 437 427 = 0,920**	
	Moyenne	**600**	**564**
	b1	**564 – 0,920 * 600 = 11,612**	

Auteur : A. Pavard, 2020

E. Annexe – Comparaison des emprises de voirie selon les différentes méthodes

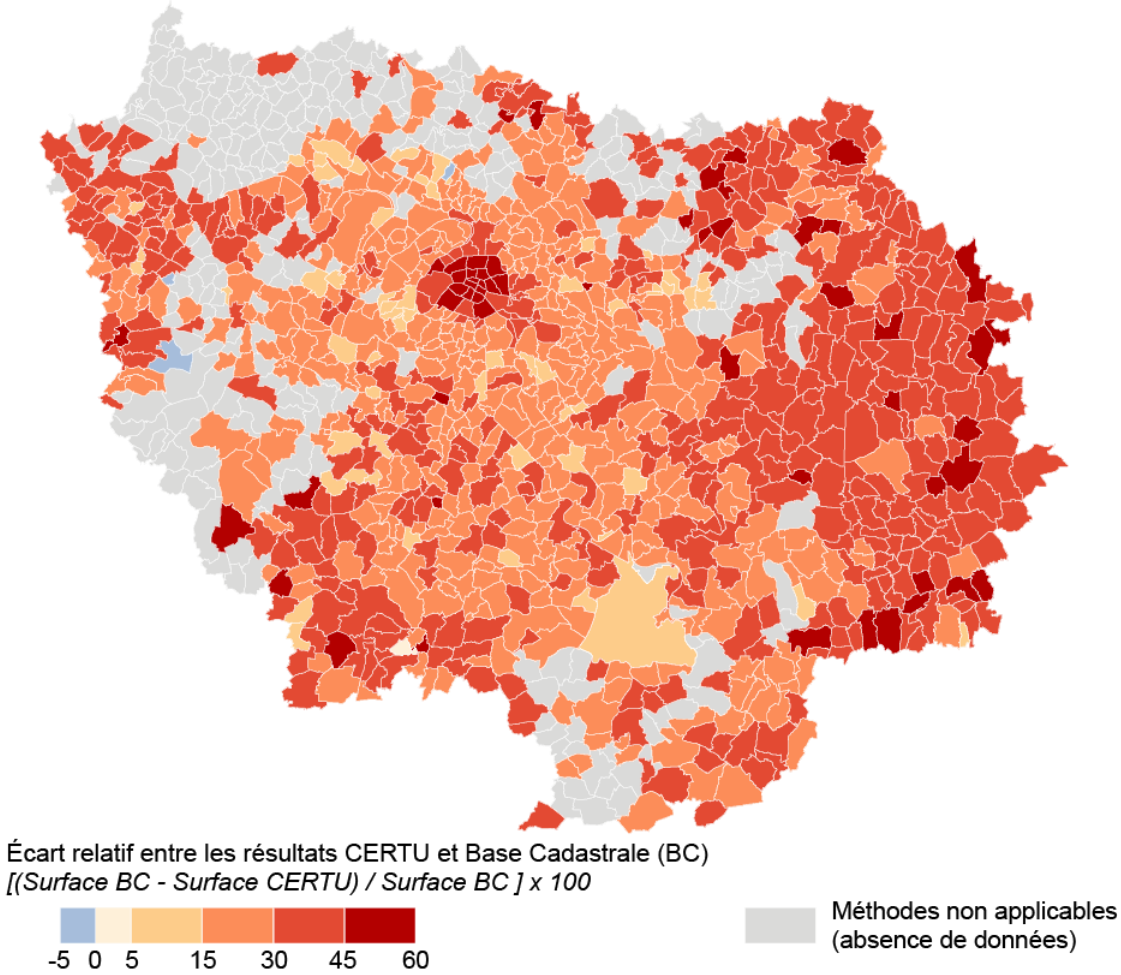
a. Analyse des résultats des méthodes Certu et Base Cadastrale

Les méthodes Certu et Base Cadastrale sont exploitables dès lors que le linéaire de voirie et le parcellaire cadastral existent pour un même territoire. À des fins de comparaison, nous avons mis en œuvre les deux méthodes sur les communes de la région francilienne couvertes par les deux bases de données de l'IGN, la BD TOPO et la BD PARCELLAIRE. Au total nous obtenons des résultats pour 1 014 communes.

À l'exception de rares cas, nous constatons que la méthode Certu aboutit à des estimations inférieures à ceux de la méthode à Base Cadastrale. Seules 4 communes de territoires périurbains à ruraux présentent des estimations similaires, c'est-à-dire avec un écart inférieur à 5%, entre les deux méthodes : Osmoy et Gambaiseuil dans les Yvelines, Montlignon dans le Val d'Oise et Marolles-en-Beauce en Essonne.

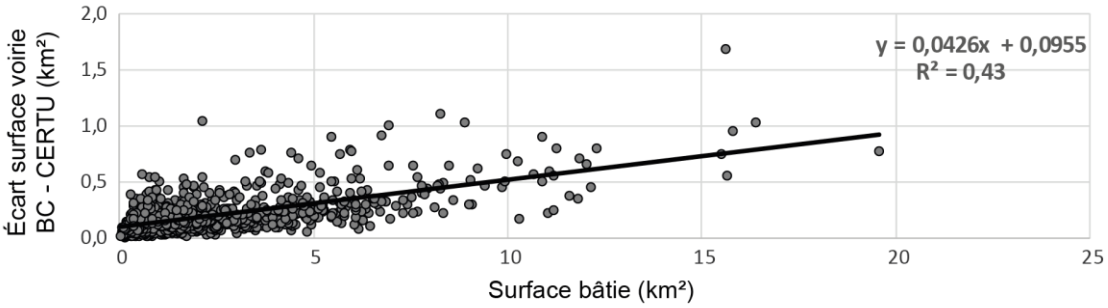
La DREAL de Pays de la Loire constatait une sous-estimation de l'emprise voirie par la méthode Certu pour les territoires urbains (DREAL 2014). Elle semblait par ailleurs satisfaite des estimations en milieu hors urbain. La cartographie des écarts entre les deux méthodes sur les communes franciliennes fait certes ressortir une sous-estimation de la voirie en milieu urbain, c'est d'ailleurs le cas à Paris, mais également en milieu rural, tel qu'on peut l'observer sur les communes de Seine et Marne (**Figure E-1**).

Afin d'apporter un éclairage nouveau sur l'hypothèse formulée par la DREAL, nous proposons une analyse statistique bivariée par mise en relation des écarts de surface voirie entre les deux méthodes, et la surface urbanisée des communes. Le nuage de points obtenu suggère une relation statistique d'ordre linéaire – relation confirmée par la construction de la droite de régression et le calcul du coefficient de détermination (**Figure E-2**). Le caractère urbain d'une commune, semble avoir un impact sur l'estimation de la voirie par la méthode Certu. Toutefois, ce seul paramètre n'explique par l'ensemble des écarts constatés entre les résultats Certu et Base Cadastrale (R^2 =43%).



Sources : © IGN, BD TOPO®, 2018
Auteur : A. Pavard, 2020

Figure E-1 – Comparaison des résultats Certu et Base Cadastrale en Ile-de-France



Auteur : A. Pavard, 2020

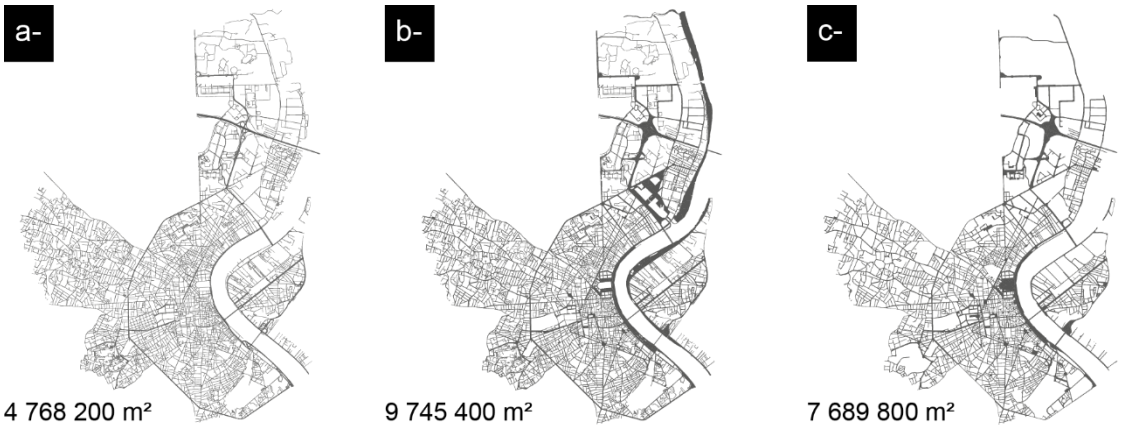
Figure E-2 – Relation statistique entre les écarts d'emprise voirie (Base Cadastrale – Certu) et la surface bâtie

b. Analyse des résultats des méthodes Certu, Base Cadastrale et données Référence

Les services voirie des communes de Bordeaux et Paris ont produit une base de données exhaustive de voirie à partir de méthodes alliant photo-interprétation par photogrammétrie et relevés topographiques. Nous proposons alors de mettre en regard les résultats issus des méthodes Certu et Base Cadastrale avec ces données locales que nous considérons comme Références, au même titre que les données que nous avons produites par photo-interprétation sur Cachan.

i. Analyse des résultats sur la commune de Bordeaux

Les résultats obtenus sur Bordeaux confirment les tendances observées jusque-là. La méthode Certu sous-estime toujours nettement l'emprise de la voirie. La surface obtenue représente respectivement 62% et 49% des surfaces obtenues par la méthode Base Cadastrale et Référence. Contrairement aux résultats observés à partir du cas d'étude, la méthode Base Cadastrale aboutie à une surface de voirie supérieure de 21% à la donnée Référence (**Figure E-3**). Spatialement, ces écarts semblent principalement liés à la non prise en compte de certaines catégories de voirie dans la constitution des données Référence. Ainsi, les tronçons de voirie du domaine privé, ou encore traversant les espaces verts sont exclus de cette base de données.



Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2020

Figure E-3 – Comparaison trois bases de données voirie surfacique (ex. Bordeaux)

La mise en œuvre de la méthode permettant de rendre cohérentes les données surfaciques et linéaires (**Cf. 8.2 p. 155**), nous permet de construire des tronçons surfaciques de voirie avec des identifiants communs entre les trois bases de données. La conservation des tronçons de voirie équivalents permet une comparaison plus pertinente. Nous constatons premièrement que l'élimination de tronçons de voirie impacte très peu les données Référence dont la surface voirie restreinte représente 7 681 800m², qui représente une perte inférieure à 0,5%, alors que les données Certu et Base Cadastrale perdent respectivement 13 et 16% de leur surface voirie. Des

tronçons linéaires de la BD TOPO n'ont pas d'équivalence dans les données de Référence. Notamment, la municipalité de Bordeaux a exclu de ces données la voirie privée ou celle traversant les espaces verts. Finalement, La surface Certu restreinte (4 140 300 m²) représente respectivement 50% et 54% des surfaces Base Cadastrale et Référence. Tandis que les surfaces Base Cadastrale et Référence présentent une différence faible de 6% en faveur de la Base Cadastrale (8 176 000 m²).

La mise en relation statistique par nuage de points ne permet pas de conclure à une relation étroite entre les surfaces des tronçons de voirie Base Cadastrale et Référence. La forme du nuage de point ne laisse supposer aucune corrélation nette entre les deux variables. Cela suggère qu'à emprise de voirie équivalente, la méthode Base Cadastrale ne permet pas d'obtenir de tronçons de voirie surfaciques similaires à ceux de la donnée Référence. Une analyse plus fine serait nécessaire afin de comprendre les mécanismes sous-jacents à ce constat. La donnée Référence ne permettant pas de distinguer les éléments constitutifs de la voirie, nous nous limitons ici à ces constats.

ii. Analyse des résultats sur la commune de Paris

Les résultats obtenus pour les arrondissements de Paris sont similaires à ceux observés pour Bordeaux (**Tableau E-1**). Tout d'abord, nous constatons que les surfaces voirie Certu représentent généralement autour de 50% des surfaces Base Cadastrale ou Référence. Les 12ème et 16ème arrondissement présentent des exceptions. En effet, les surfaces voirie Certu représentent respectivement 103 et 84% des surfaces Référence pour ces deux arrondissements. Ces valeurs s'expliquent par la présence des deux grands bois parisiens dont la voirie est peu prise en compte dans les données de référence. Ensuite, les surfaces voirie Base Cadastrale apparaissent comme similaires aux surfaces de Référence.

Tableau E-1 – Surface voirie et comparaison des trois bases de données

	Surface voirie			Rapport surf. Voirie		
	Certu	Base Cadastrale	Référence	Rap. Certu / BC	Rap. Certu / Ref	Rap. BC / Ref
1er Arrond	272 000	509 300	483 500	53	56	105
2è Arrond	157 700	303 700	296 300	52	53	102
3è Arrond	154 500	312 500	308 600	49	50	101
4è Arrond	227 400	474 800	487 900	48	47	97
5è Arrond	332 300	660 100	628 800	50	53	105
6è Arrond	296 600	564 900	521 200	53	57	108
7è Arrond	591 400	1 175 300	1 120 000	50	53	105
8è Arrond	5 578 000	1 346 200	1 297 700	41	43	104
9è Arrond	307 200	586 400	560 800	52	55	105
10è Arrond	366 800	748 300	698 800	49	52	107
11è Arrond	494 300	982 400	985 300	50	50	100
12è Arrond	2 157 600	3 176 700	2 103 100	68	103	151
13è Arrond	1 025 000	2 027 000	1 843 000	51	56	110
14è Arrond	912 300	1 638 100	1 401 600	56	65	117
15è Arrond	1 170 900	2 288 400	2 027 100	51	58	113
16è Arrond	2 463 700	4 147 200	2 928 000	59	84	142
17è Arrond	919 900	1 819 100	1 850 100	51	50	98
18è Arrond	847 800	1 614 600	1 479 700	53	57	109
19è Arrond	972 700	1 887 000	1 707 000	52	57	111
20è Arrond	920 000	1 704 500	1 508 500	54	61	113

Sources : A. Pavard, 2020

La comparaison à l'échelle des tronçons équivalents conforte, une nouvelle fois, une similitude entre les surfaces Certu et l'extrait correspondant aux surfaces des chaussées dans les données de Référence. Par ailleurs, les rapports entre surfaces voirie Base Cadastrale et Référence compris entre 90 et 110% confirment également une relativement bonne estimation des emprises des tronçons de voirie par la méthode à Base Cadastrale (**Tableau E-2**).

Afin de confirmer les relations identifiées, nous réalisons de la même façon que pour le cas d'étude une mise en relation des surfaces des tronçons Base Cadastrale et Référence pour chaque arrondissement parisien. Par ailleurs, puisque la donnée de référence de Paris permet une distinction des chaussées et des trottoirs, nous procédons de même entre les surfaces des tronçons Certu et chaussées Référence.

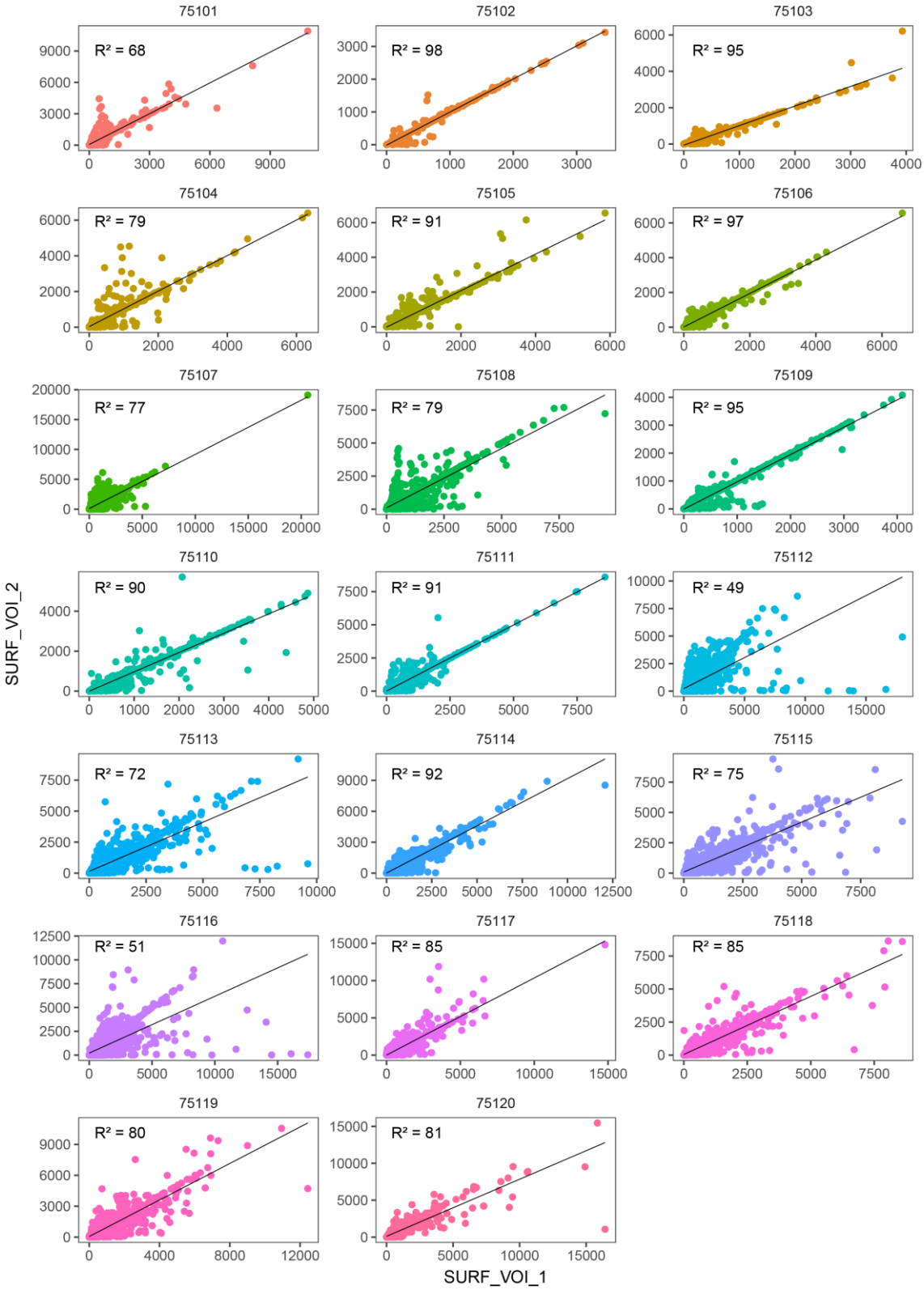
Tableau E-2 – Surface voirie et comparaison des trois BD à tronçons équivalents

	Surface voirie					Rapport surf. Voirie	
	Certu	BC	Référence	Réf. Trot.	Réf. Chaus.	Certu / Ref_Chaus ;	BC / Ref
1e Arr.	221 100	448 600	482 100	224 300	257 800	86	93
2è Arr.	155 000	300 500	296 400	136 700	159 700	97	101
3è Arr.	153 200	311 000	308 600	151 600	157 000	98	101
4è Arr.	221 600	467 200	485 900	244 700	241 200	92	96
5è Arr.	286 900	613 200	628 700	294 800	333 900	86	98
6è Arr.	264 200	532 300	521 400	224 000	297 400	89	102
7è Arr.	514 600	1 095 200	1 119 300	539 300	580 000	89	98
8è Arr.	538 600	1 305 200	1 298 500	563 800	734 700	73	101
9è Arr.	302 400	580 500	561 100	234 700	326 400	93	103
10è Arr.	347 500	723 900	698 600	318 500	380 100	91	104
11è Arr.	491 000	978 400	984 300	442 900	541 400	91	99
12è Arr.	1 394 000	2 391 200	2 098 700	852 300	1 246 400	112	114
13è Arr.	930 200	1 935 600	1 838 700	902 700	936 000	99	105
14è Arr.	775 200	1 515 200	1 401 400	624 400	777 000	100	108
15è Arr.	1 082 200	21 973 000	2 024 600	902 300	1 122 300	96	109
16è Arr.	1 821 400	3 376 100	2 928 300	958 300	1 970 000	92	115
17è Arr.	876 600	1 779 400	1 847 900	736 500	1 111 400	79	96
18è Arr.	793 800	1 570 100	1 475 400	634 900	840 500	94	106
19è Arr.	871 000	1 774 200	1 695 900	817 200	878 700	99	105
20è Arr.	837 900	1 671 800	1 506 900	692 200	814 700	103	111

Sources : A. Pavard, 2020

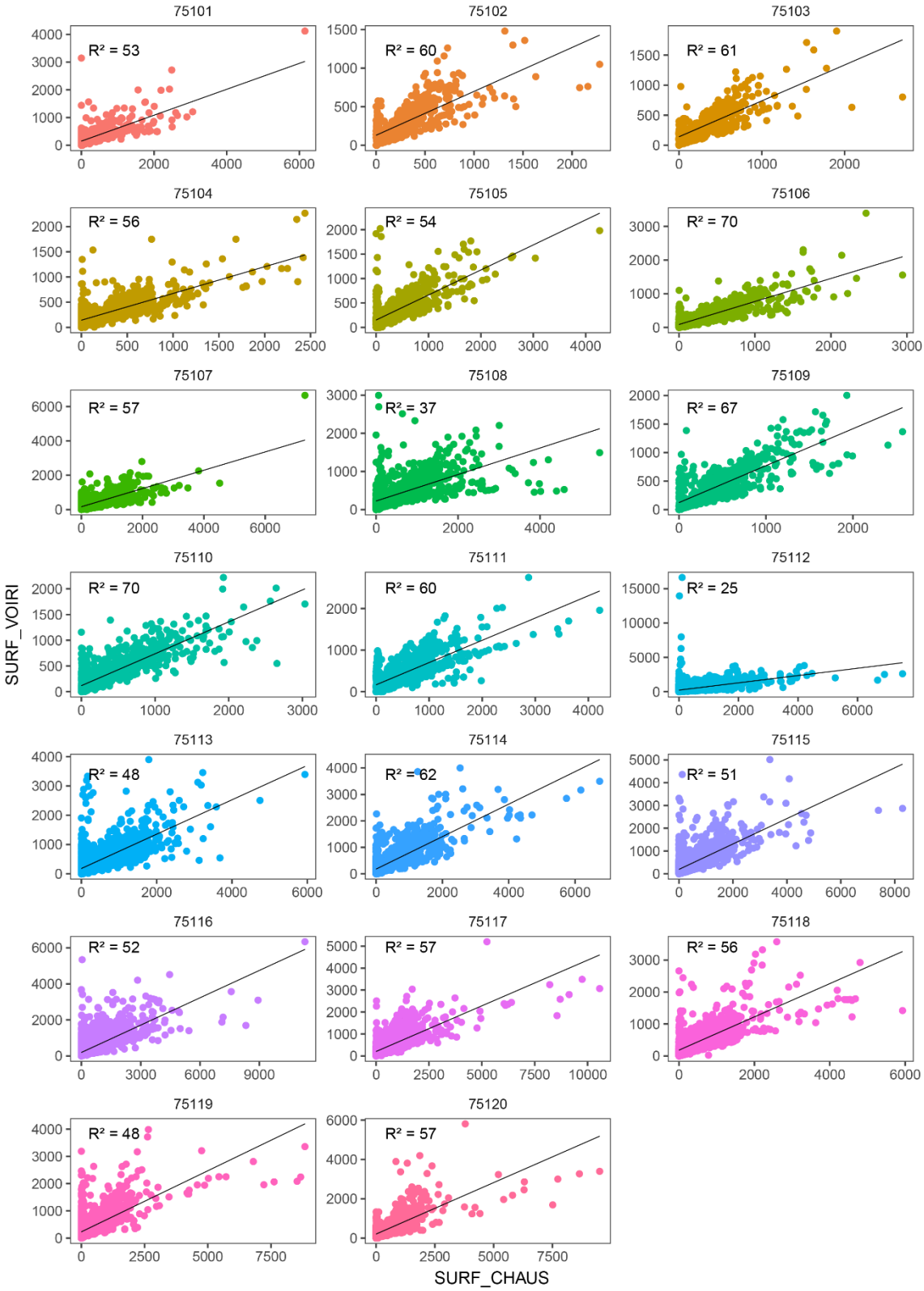
Premièrement, nous observons une relation significative entre les surfaces voirie Base Cadastrale et Référence (**Figure E-4**). Pour chaque arrondissement, les nuages de points supposent une corrélation linéaire entre les surfaces. Les régressions linéaires construites attestent finalement cette hypothèse avec des coefficients de détermination (R^2) compris majoritairement entre 80 et 100%. Les arrondissements pour lesquels la corrélation est la moins forte sont ceux ayant les surfaces d'espaces verts les plus importantes, tels que les 12ème et 16ème arrondissement avec les Bois de Vincennes et de Boulogne. Lors de l'intégration de la voirie privée et d'espace vert par la méthode Base Cadastrale, nous nous appuyons sur la voirie estimée par la méthode Certu. Or, la méthode Certu tend à intégrer au mieux l'emprise de la chaussée. Il est alors cohérent de trouver des sous-estimations pour ces tronçons de voirie.

Deuxièmement, la mise en relation des surfaces Certu et chaussées Référence traduisent aussi des corrélations significatives, bien que moins importantes. Ainsi, nous constatons des R^2 au-dessus de 50% et ne dépassant pas 70% (**Figure E-5**). L'analyse des écarts aux modèles confirme les hypothèses formulées à partir du cas d'étude (**Cf. 7.3.2 p. 145**). La justesse de l'estimation de l'emprise des chaussées par le Certu dépend du type de voirie, et de la morphologie des quartiers.



Sources : A. Pavard, 2020

Figure E-4 - Corrélation entre Surface voirie Référence et Surface voirie BC



Sources : A. Pavard, 2020

Figure E-5 - Corrélation entre Surface chaussée référence et Surface voirie Certu

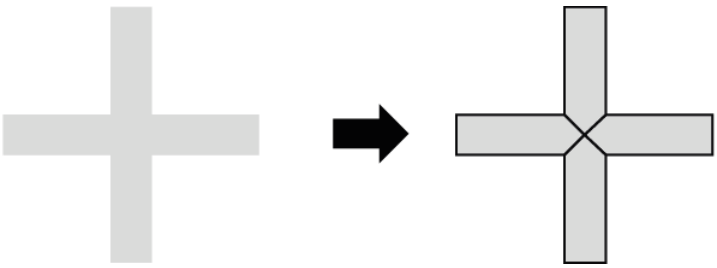
F. Annexe – Méthodologie détaillée permettant de rendre interopérable les données de voirie surfaciques et linéaires

Rappels : La méthodologie proposée repose sur le découpage des intersections de voirie à l'aide d'un maillage du plan en cellules construit à partir d'un ensemble discret de points que nous nommons : *point source*. Il s'agit d'un diagramme de Voronoï. Des confrontations régulières des produits de la méthode en cours de développement au résultat escompté, ont permis de corriger les défauts et de dépasser ses limites pour la faire évoluer selon un processus itératif.

a. Analyse des résultats et validation de la méthode

i. Première itération : découper les intersections

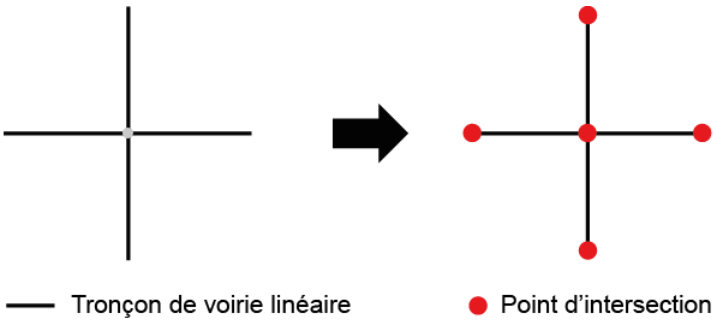
La première itération consiste à proposer un découpage des intersections de voirie, de façon à affecter à chaque tronçon de voirie une partie de l'intersection (**Figure F-1**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-1 – Découpage des intersections et, création des tronçons surfaciques

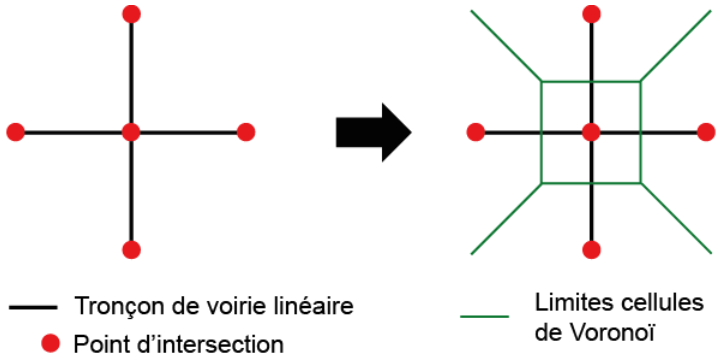
Ce résultat est produit en utilisant un diagramme de Voronoï construit autour de points modélisant les intersections. À partir du linéaire de voirie, nous créons les points à l'extrémité des lignes (**Figure F-2**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-2 – Création des points aux extrémités des tronçons linéaires

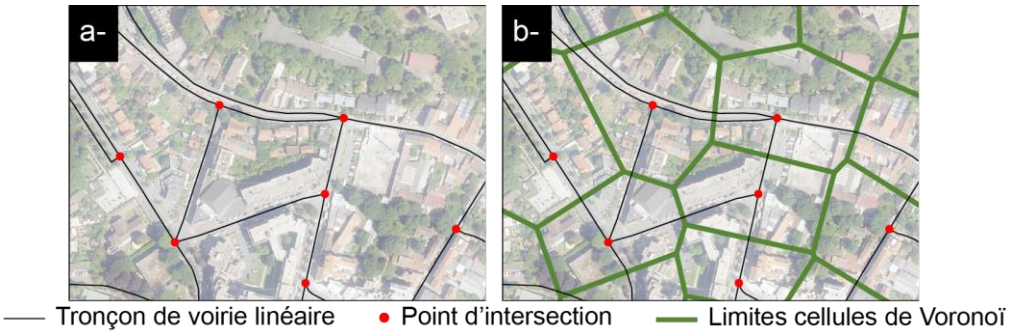
Les cellules composant un diagramme de Voronoï s'apparentent à des zones d'influences des points sources servant à sa construction. Les limites de chaque cellule sont conditionnées par la distance séparant les points sources. Lorsque les points d'intersection sont utilisés en tant que points sources, les limites des cellules sont posées aux barycentres de deux intersections (**Figure F-3**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-3 – Exemple de cellules de Voronoï à partir des points d'intersection

Ainsi, utiliser les points d'intersection en tant que points sources ne permet pas d'obtenir le résultat souhaité tel qu'il est présenté en **Figure F-1**. En effet, comme l'illustre le résultat d'une première mise en œuvre à partir de données du cas d'étude (**Figure F-4**), les cellules créées autour des points d'intersection englobent les intersections sans les découper.

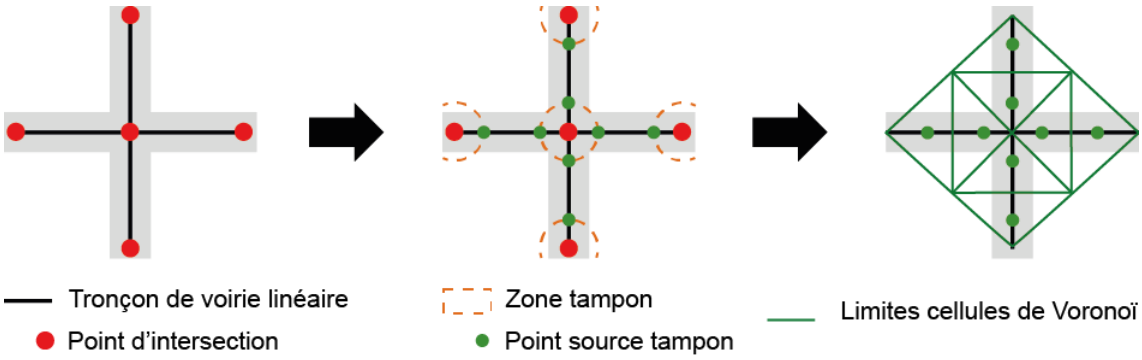


Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure F-4 – Diagramme de Voronoï à partir des points aux intersections

Afin d'éviter d'englober une intersection dans une cellule de Voronoï, il est essentiel pour chaque intersection de disposer d'autant de points que de tronçons de voirie débouchant sur l'intersection. Compte tenu du mode de construction des cellules du diagramme de Voronoï, ces points doivent se juxtaposer aux objets graphiques linéaires débouchant sur l'intersection, et se trouver à égale

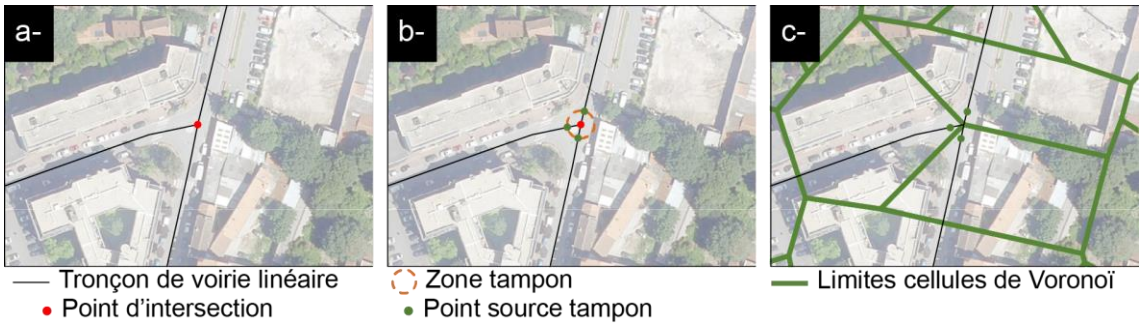
distance du centre de l'intersection. Ces points sont nommés *point source tampon*. Il est alors est possible de produire un découpage homogène de l'intersection (**Figure F-5**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-5 – Construction des points sources

À partir de données du cas d'étude, la construction de ces points sources tampons est réalisée à l'aide d'une zone tampon autour de chaque point d'intersection. La largeur d'une chaussée en milieu urbain est généralement comprise entre 5 et 7,5 mètres. Nous utilisons alors la largeur minimum d'une chaussée et fixons un rayon de 5 mètres pour ces zones tampons de façon à s'inscrire au maximum dans les périmètres des intersections (**Figure F-6 a**). Les points intersectant le linéaire de voirie et les zones tampons sont construits de façon à produire les points sources tampons. (**Figure F-6 b**). À partir des points sources tampons, le diagramme de Voronoï est calculé tel que visible sur la **Figure F-6 c**. L'intersection est alors découpée comme présenté en **Figure F-1**.



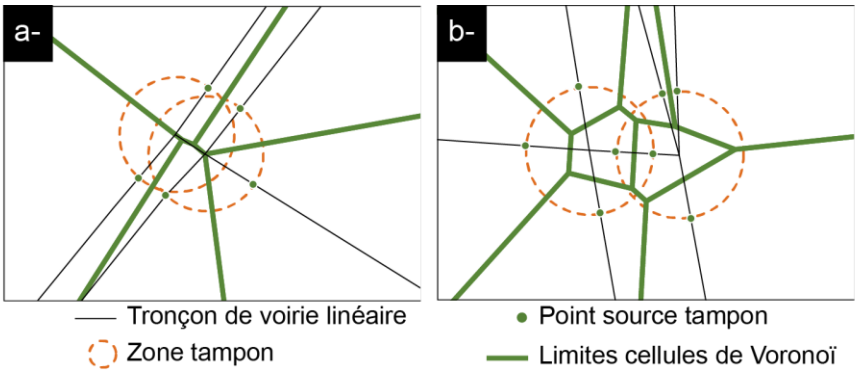
Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure F-6 – Diagramme de Voronoï à partir de points intermédiaires selon une distance uniforme aux intersections

La seconde mise en œuvre montre que le choix d'un rayon fixe pour la construction des zones tampons entraine un artéfact dans le cas d'objets graphiques linéaires de longueur inférieure à 10 mètres. En effet les tronçons de longueur :

- inférieure à 5m, sont entièrement inclus dans les zones tampons, et donc non intersectés par ces dernières. Aucun point ne peut alors être créé. Ceci entraine la non prise en compte de ces tronçons (**Figure F-7 a**) ;
- comprise entre 5 et 10 mètres présentent des zones tampons se chevauchant. Les points sources tampons les plus proches de chacune des intersections sur ces tronçons ne sont donc pas les points sources tampons liés à ces intersections (**Figure F-7 b**).

Les deux cas conduisent à un mauvais découpage des intersections.



Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

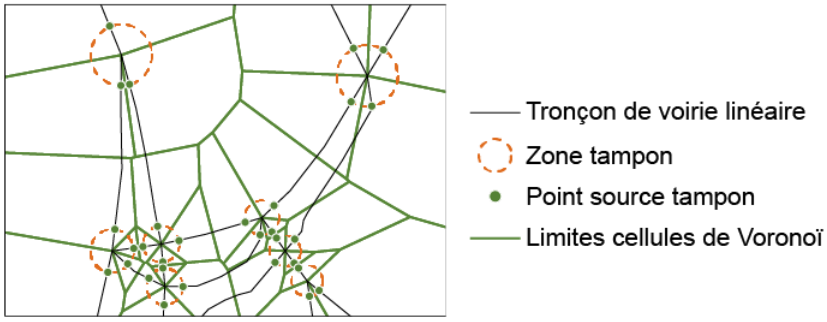
Figure F-7 – Cas des petits tronçons

Une première amélioration de la méthode consiste à introduire le principe d'un rayon variable dépendant de la longueur du tronçon le plus court débouchant sur l'intersection. Lorsqu'au moins un tronçon aboutissant à une intersection mesure moins de 10 mètres, le rayon de la zone tampon autour de l'intersection est déterminé proportionnellement à la longueur du tronçon en suivant l'**Équation F-1**:

Équation F-1 – Définition de R (Zt), correspondant au rayon de la zone tampon

$$R(Zt) = \left(\frac{Longueur\ tronçon}{2}\right) - 0.5$$

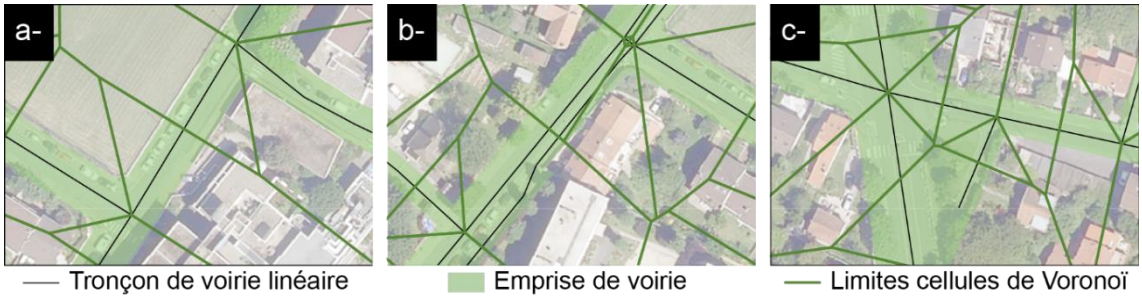
Dès que tous les tronçons aboutissant à une intersection mesurent plus de 10 mètres, le principe du rayon de 5 mètres est appliqué, ceci pour éviter de construire des zones tampons dépassant les limites de l'intersection. Lors d'une nouvelle mise en œuvre nous constatons que les modifications ont notablement amélioré les performances de la méthode et corrigé les défauts identifiés en **Figure F-7 a et b** comme illustré en **Figure F-8**.



Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure F-8 – Illustration du calcul du diagramme de Voronoï s'appuyant sur un rayon de zone tampon variable autour des intersections

Notons néanmoins que cette première itération se concentre sur les intersections (**Figure F-9 a**). Or, l'ensemble de la surface occupée par la voirie est à découper de façon à affecter à chaque objet graphique surfacique un unique objet graphique linéaire, et inversement. Suite à cette troisième mise en œuvre nous observons que si la méthode traite correctement les tronçons de voirie simples, des défauts perdurent dans le cas de doubles chaussées séparées par des terre-pleins ou par des espaces de stationnements (**Figure F-9 b**), ainsi que dans le cas de tronçons de voirie très proches voire collés (**Figure F-9 c**).



Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

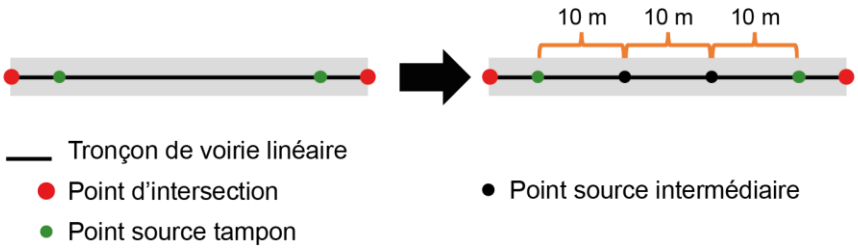
Figure F-9 – Limites de la méthode pour les espaces de voirie hors intersection

ii. Deuxième itération : Prise en compte des cas de tronçons de voirie parallèles proches

Les points sources tampons construits en première itération, et utilisés comme support au calcul du diagramme de Voronoï ne sont pas une solution satisfaisante pour les cas illustrés en **Figure F-9 b et c**. Pour pallier ces problèmes, nous proposons une évolution de la méthode en introduisant un diagramme de Voronoï au maillage plus fin. Sa construction requiert des points sources complémentaires disposés le long des tronçons linéaires. Ces points sources intermédiaires sont élaborés à l'aide de trois opérations.

- Première amélioration : densification des points sources

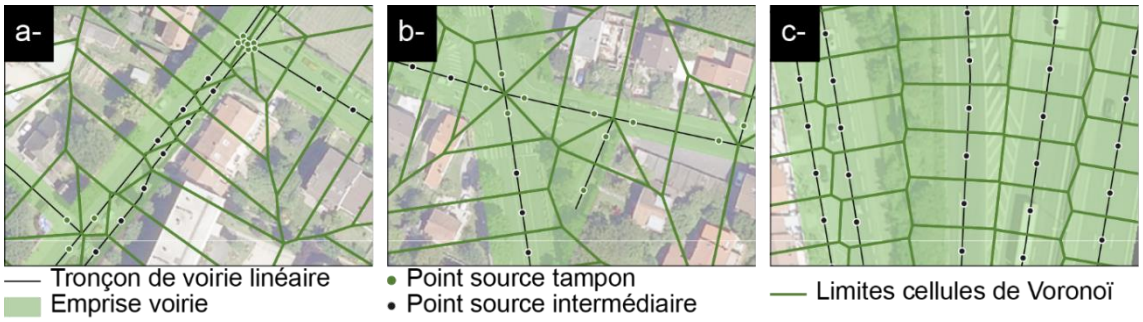
La première amélioration consiste en un ajout automatique de points sur les tronçons linéaires avec un pas de distance. Nous observons que les tronçons routiers ayant une longueur inférieure ou égale à 10 mètres ne présentent pas de problème à la suite de la première itération. Nous proposons alors de fixer un pas de distance 10 mètres entre les points sources tampons (**Figure F-10**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-10 – Ajout de points (pas de 10m)

La mise en œuvre sur les deux exemples précédents, les chaussées parallèles (**Figure F-9 a**), et le secteur dense (**Figure F-9 b**), montre qu'il s'agit bien d'un début de réponse mais qu'il est nécessaire de l'améliorer. En effet, si les cellules du diagramme de Voronoï ainsi crées permettent de découper les chaussées parallèles dans le sens de la longueur (**Figure F-11 a, b et c**), les formes constituées correspondent à des dents de scie. Les différences constatées entre les résultats obtenus sur les cas illustrés par les **Figure F-11 a et c** permettent d'expliquer ces résultats.



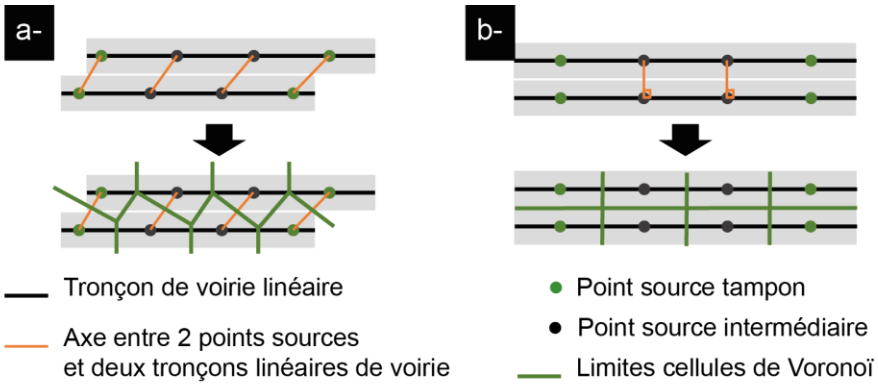
<u>Légende</u> : a) chaussée double, b) secteur dense, c) infrastructure autoroutière

Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure F-11 – Construction de points sur le linéaire à intervalle régulier

Ainsi, nous constatons, que lorsque deux points sources intermédiaires sur deux tronçons linéaires ne sont pas parfaitement placés sur une même perpendiculaire aux deux tronçons linéaires, alors les cellules du diagramme de Voronoï forment des dents de scie (**Figure F-12 a**), comme nous

l'observons sur les données voirie du cas d'étude **Figure F-11 a**. À l'inverse, plus les points se rapprochent des perpendiculaires aux tronçons linéaires, plus les cellules du diagramme de Voronoï forment des limites lisses entre les tronçons parallèles (**Figure F-12 b**). En témoigne le cas illustré par la **Figure F-11 c**.

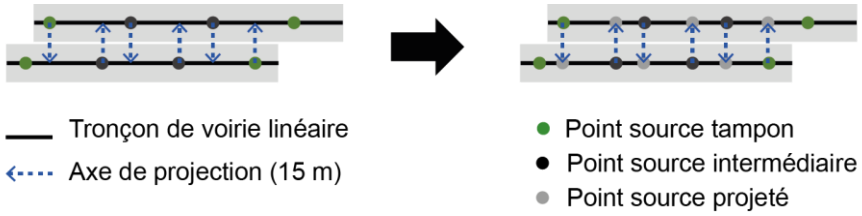


Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-12 – Diagramme de Voronoï selon la disposition des points sources

- Deuxième amélioration : ajustement des points sources intermédiaires

La deuxième amélioration consiste à densifier les points sources par projection de tous les points sources (tampons et intermédiaires) situés sur un tronçon linéaire A vers un tronçon linéaire B, en utilisant une portée limite. Les chaussées ayant généralement une largeur maximale de 7,5 mètres, nous proposons de fixer cette portée limite à 15 mètres de façon à englober les tronçons de voirie appartenant à une même emprise de voirie (**Figure F-13**). Nous observons que le décalage des points a une incidence moins importante à mesure que les tronçons linéaires sont éloignés.

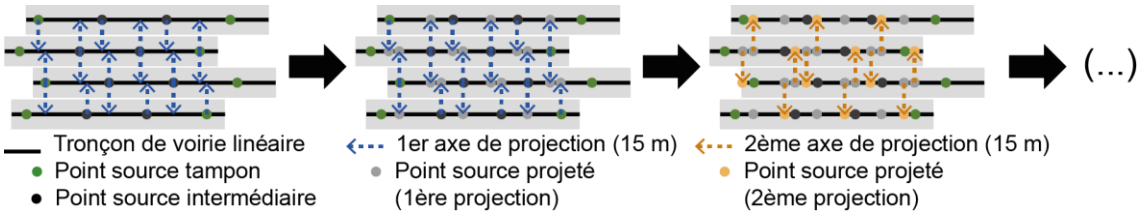


Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-13 – Projection des points sources (tampons et intermédiaires) entre un tronçon A et un tronçon B

Certaines voiries, notamment les grands complexes autoroutiers, présentent des emprises au sol très importantes. Une portée de 15 mètres est alors insuffisante pour prendre en compte

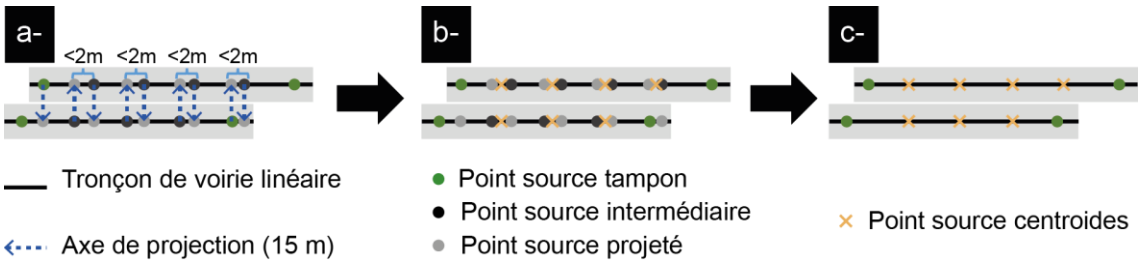
l'ensemble des chaussées parallèles. Afin de traiter ces secteurs, sans pour autant étendre la portée, nous proposons de répéter l'opération de projection plusieurs fois (**Figure F-14**). Trois itérations ont été suffisantes pour traiter les infrastructures ayant une emprise très large sur notre cas d'étude.



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-14 – Projection répétée

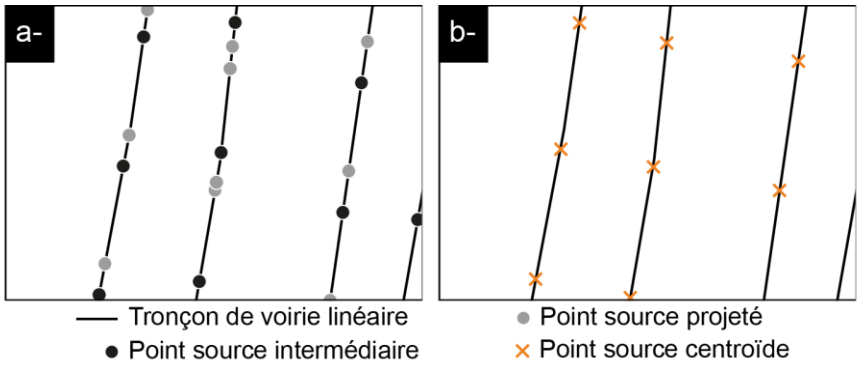
Cette opération de création de points projetés conduit à une densification parfois importante des points dans un petit périmètre (**Figure F-15 a**). Or, une densité importante des points sources a pour conséquence d'alourdir la construction du diagramme de Voronoï. Ainsi, nous choisissons d'agréger les points sources les plus proches. Pour cela, nous calculons le centroïde des points sources (tampons, intermédiaires et projetés) disposés sur un même tronçon linéaire dans un rayon de 2 mètres (**Figure F-15 b**). Nous éliminons ensuite les points ayant servi à la construction des centroïdes et ne conservons que ces derniers pour former les points sources centroïdes (**Figure F-15 c**).



Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-15 – Remplacement des points sources par calcul des centroïdes

L'opération de projection des points sources entraine également l'ajout de points dans la zone tampon située entre les points d'intersection et les points sources tampons. Ces points sont supprimés de façon à conserver les bénéfices de la première itération relative à la gestion des intersections. Une mise en œuvre sur notre cas d'étude nous permet de valider les bénéfices de cette itération de la méthode (**Figure F-16**).



Légende : a) Projection, b) Centroïde

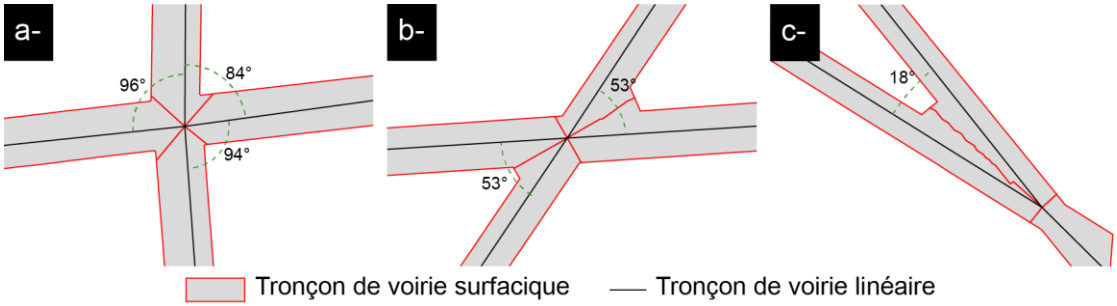
Sources : © IGN, BD TOPO®, ORTHO HR®, 2020

Figure F-16 – Mise en œuvre de la seconde itération

b. Analyse des limites et perspectives d'évolution

i. Résultats selon le type d'intersection entre linéaires de voirie

Nous observons que le type d'intersection, et plus spécifiquement les angles et les trajectoires pris par les tronçons linéaires de voirie, impactent directement la forme du découpage obtenu. En comparant les angles pris par les objets graphiques linéaires de voirie aux intersections, nous constatons que dès lors que les angles sont proches de 90° (**Figure F-17 a**), le découpage des objets graphiques surfaciques présente des limites régulières et droites. À mesure que les angles entre les tronçons linéaires deviennent aigus, les limites deviennent également irrégulières et prennent une forme de dents de scie (**Figure F-17 c**). Entre les deux, nous identifions un angle seuil (autour de 53°) à partir duquel les limites construites oscillent entre régularité et irrégularité (**Figure F-17 b**). La régularité des limites des objets graphiques construits s'améliore avec l'augmentation de la densité des points sources servant à construire le diagramme de Voronoï. Une façon d'améliorer le résultat sans augmenter significativement le temps de calcul consiste à faire varier la densité de points sources selon les angles formés par les objets graphiques linéaires.

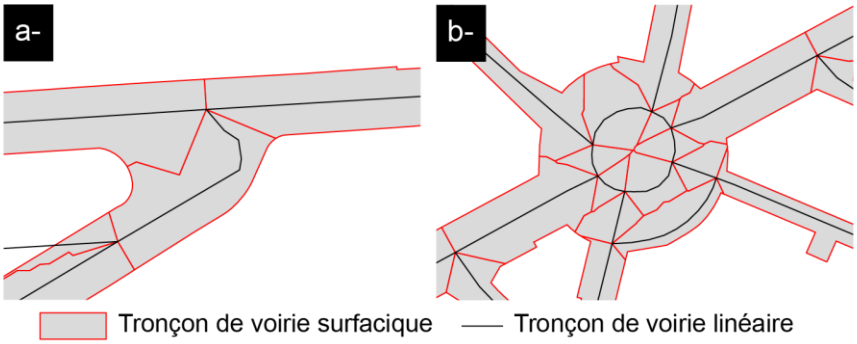


Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-17 – Exemples de résultats pour les intersections en croix et en T

Au-delà de l'angle, la trajectoire des objets graphiques tronçons linéaires affecte le résultat. La courbure des trajectoires des objets graphiques linéaires modifie la relation spatiale entre les linéaires débouchant sur une même intersection. Ainsi, alors qu'une jonction de plusieurs linéaires peut se rapprocher d'un cas de jonction à angle droit, une courbure d'un tronçon linéaire rapproche l'intersection d'une situation à angle aigue (**Figure F-18 a**). Dans tous les cas, dès lors que le tracé d'un tronçon est courbe, l'angle formé entre deux tronçons linéaires n'est plus fixe. Le cas des carrefours giratoires illustre parfaitement la situation (**Figure F-18 b**). Calibrer un découpage régulier devient alors plus difficile et nécessite probablement une intervention manuelle.



Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2020

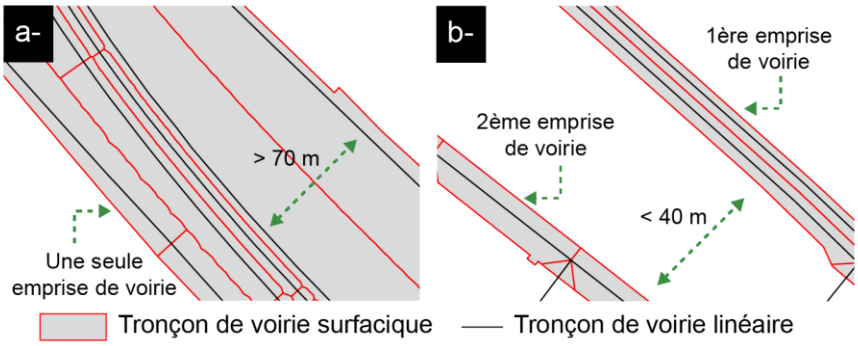
Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-18 – Découpage selon la forme ou morphologie de l'intersection

ii. La densité et la proximité des tronçons linéaires de voirie

En dehors des intersections routières, d'autres espaces présentent des défauts de construction des tronçons surfaciques. Il s'agit des chaussées parallèles.

Lors du développement de la méthode, une difficulté de traitement de ces cas a été observée. Une analyse du problème a conduit à proposer une deuxième itération (**ii p. 339**), qui consiste à densifier par projection dans une limite de 15 mètres les points sources utiles à la construction du diagramme de Voronoï. Pour rappel, la limite de 15 mètres est choisie au regard de la largeur standard des chaussées de voirie, et de façon à prendre en compte uniquement des tronçons linéaires de voirie appartenant à une même emprise de voirie (**Figure F-19 b**). Malgré tout, la distance entre deux tronçons linéaires appartenant à un même tronçon de voirie peut dépasser les 15 mètres. Ceci est le cas, soit pour les chaussées autoroutières à très large emprise (**Figure F-19 a**).



Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2019, SIG ; © IGN, BD TOPO® 2020

Auteur : A. Pavard, 2020

Figure F-19 – Densité du linéaire : les cas particuliers

Face à ces cas, nous proposons de remplacer le critère de distance limite de 15 mètres par un critère de continuité/discontinuité des tronçons routiers. Ainsi, les projections des points sources pourront être réalisées sur l'ensemble des tronçons linéaires situés dans une même emprise de voirie sans risque d'interférence avec des emprises de voirie voisines.

G. Annexe – Une brève histoire de la conception et fabrication des chaussées

Nous débutons notre récit non pas aux premiers développements des routes de l'Antiquité, mais à partir des progrès techniques du XVIIIème siècle ayant conditionné le développement du réseau routier que nous connaissons aujourd'hui (Barillot, Cabanes, et Carillo 2018).

La première méthode scientifique de construction d'une chaussée est datée de 1764 et attribuée à un ingénieur français, Pierre Marie Jérôme Trésaguet (1716 – 1796). Formé à l'École des Ponts et Chaussées, il avait identifié quatre points fondamentaux pour la construction routière : – premièrement, que les couches de structure permettaient de répartir les poids et charges roulantes sur l'ensemble de la route afin de limiter les déformations du sol support : – deuxièmement qu'un revêtement lisse permettait de protéger les dalles de pierre et faciliter la circulation des véhicules ; – troisièmement, qu'un bon système de drainage permettait de protéger la surface ainsi que la structure de la route ; – quatrièmement, qu'un entretien régulier et rigoureux de chaque tronçon routier était nécessaire.

Les systèmes de drainage et de conception de chaussée en plusieurs couches s'exportèrent en Europe. Des ingénieurs du nord de l'Europe et notamment d'Écosse constatèrent que ces techniques devaient être améliorées pour rendre les routes durables dans des conditions climatiques plus rudes. Ainsi, l'ingénieur écossais John Loundon McAdam (1756 – 1836) se consacra à l'amélioration du système de drainage afin de préserver le fond de forme de l'humidité. Pour cela, il proposa de creuser des fossés latéraux, ou de rehausser les chaussées en relevant le sol à l'aide de pierres de grosseurs uniformes dépourvues de matériaux alluvionnaires. Il préconisa de répandre plusieurs couches d'épaisseur équivalente, d'environ 25 cm. La technique développée par McAdam concernait alors essentiellement l'empierrement des chaussées. Nous remarquons toutefois que le terme macadam s'est démocratisé et tend à être associé aux revêtements de chaussée ou de trottoir. Il n'est en effet pas rare d'entendre et de lire que nous marchons sur du macadam, y compris dans des articles scientifiques. Ainsi, Agnès Levitte (2012, p. 69) spécialiste de la perception des objets quotidiens dans l'espace urbain écrit par exemple « *(Les) Pavés qu'elle oppose au béton, alors que, soit dit en passant, c'est plutôt de macadam que sont revêtus les trottoirs de Paris, lui-même recouvrant des matériaux divers et invisibles, sauf lors des travaux de réfection de la voirie* ».

Dans la continuité de McAdam, un ingénieur anglais a également repris les travaux de Trésaguet, il s'agit de Thomas Telford (1757 – 1834). Ce dernier apporta deux modifications majeures permettant premièrement d'optimiser la résistance au roulage, deuxièmement d'améliorer encore le drainage superficiel : – d'abord, il proposa de réaliser des couches à partir de matériaux granulaires de différentes tailles, afin que de petits granulats comblent les aspérités laissées par

les plus gros ; – ensuite, de réaliser une chaussée bombée en son centre en diminuant la taille des granulats à mesure de l'éloignement à l'axe de la chaussée.
Finalement, un ingénieur français, Antoine-Rémy Polonceau (1778 – 1847), proposa simultanément de compacter les cailloux de façon à limiter l'affaissement induit par la circulation des véhicules.
En conclusion, ces quatre ingénieurs ont permis le développement de la construction des chaussées telle que nous la connaissons aujourd'hui : – Trésaguet apporta le drainage ; McAdam développa la superposition de granulats de différentes tailles, ainsi que la couche de surface ; Telford introduisit les couches de granulométries différentes ; – enfin Polonceau initia le compactage.

Quelques décennies plus tard, l'émergence des véhicules motorisés impliqua à la fois de concevoir des structures de chaussée résistantes aux charges, mais également à penser leur revêtement. En effet, historiquement, les voies de circulation en surface étaient majoritairement de terre ou revêtues de pavés, notamment en milieu urbain. Lors du Congrès international de la route de 1908, les participants se sont intéressés aux problèmes engendrés par l'émergence des automobiles, et plus spécifiquement sur deux aspects : – le premier concernait la sécurité et le confort des automobilistes, les anciens pavés arrondis étaient à la fois instables et glissants ; – le deuxième était autant lié à la sécurité qu'à des nuisances pour les riverains, les véhicules circulant sur de la terre projetaient de la poussière ou de la boue.
Une réflexion, en particulier, sur les revêtements de voirie a alors été initiée : d'une part en modifiant les matériaux et techniques de pavage, d'autre part en développant des revêtements liés, notamment à l'aide de goudron (Barillot, Cabanes, et Carillo 2018). Le mélange de granulats avec un liant goudronneux a donné naissance au revêtement goudronneux appelé tarmac de la contraction « tar », signifiant goudron en anglais, et mac pour macadam.
Le tarmac était le revêtement routier le plus courant jusque dans les années 1950 (Harismendy 1999). Le goudron, produit à partir du charbon, avait l'avantage d'être fluide et stable. Il était alors aisé de le mélanger à des granulats et de produire un revêtement durable. Pour des questions sanitaires, et d'épuisement des ressources de charbons, le goudron a été proscrit et remplacé progressivement par le bitume, déjà employé localement pour des trottoirs. Les termes goudron et tarmac restent présents dans le langage courant. En effet, il n'est pas rare d'entendre parler de « goudronnage » lorsqu'un revêtement de chaussée est renouvelé. Tarmac est quant à lui aujourd'hui utilisé pour les espaces de stationnement des avions dans les aéroports.

Le bitume est un produit hydrocarboné constitué naturellement sur le temps long. Ainsi, il existe par exemple sous forme de gisement, et est appelé asphalte naturel. Il s'agit alors d'un mélange de bitume et de roche calcaire. L'asphalte naturel est connu et utilisé depuis plusieurs millénaires.

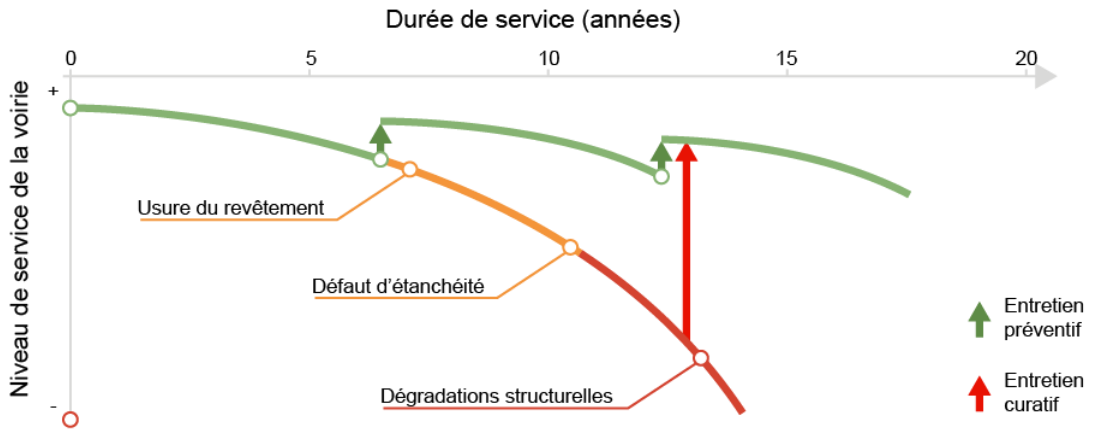
Dans l'Antiquité par exemple, il était exploité pour étanchéifier les coques de navires ou des toits. L'Asphalte naturel n'est pas exploité dans l'industrie routière. Le bitume utilisé est issu d'une transformation du pétrole par distillation. Selon les gisements de pétrole des bitumes de formulation et caractéristiques différentes sont produits.

H. Annexe – Les différentes maintenances de la voirie

Au cours de sa durée de service, la voirie subit des dégradations. Si aucun entretien n'est réalisé, en surface, l'usure du revêtement conduit à une diminution de la rugosité donc de la sécurité et à des défauts d'étanchéité. L'infiltration de l'eau provoque à terme des désordres structurels entrainant la voirie à un état de ruine. Des dégradations structurelles se développent également sans altération en surface, par exemple, par des contraintes exercées par le sol support ou des remontées hydriques. Afin d'éviter une dégradation totale de l'infrastructure, les gestionnaires entretiennent la voirie, en réalisant des opérations de maintenance. La maintenance est dite *préventive*, lorsqu'elle est réalisée avant l'apparition de défauts, et *curative* lorsque des dégradations sont déjà avérées (**Figure H-1**). La société Nextroad spécialisée en auscultation de chaussée distingue deux autres maintenances (George et al. 2019) :

- *prédictive*, lorsque programmée selon des probabilités d'occurrence des dégradations ;
- *proactive*, réalisée sur la base du maintien d'un niveau de service exigé.

Les maintenances préventive, prédictive ou proactive permettent de réduire les dépenses d'entretien sur le long terme. À l'inverse, la curative minimise les dépenses sur le court terme et les maximise sur le temps long. Limiter les interventions curatives est possible avec une bonne connaissance de l'état de la voirie. Cette connaissance s'acquière par auscultation.



Sources : interne IRC – Auteur : A. Pavard, 2020

Figure H-1 – Niveau de service de la voirie et stratégie d'entretien

La présence de canalisation sous la voirie peut avoir une incidence sur sa dégradation à deux niveaux. D'abord, un incident sur la canalisation endommagera la structure de la voirie, ensuite une intervention sur canalisation par tranchée ouverte réduira sa durée de service. Lorsque le remblayage de tranchée présente des défauts, des dégradations peuvent apparaitre au niveau de la tranchée remblayée et de son environnement.

I. Annexe – Exemples de fiches de matériau de revêtement de voirie

Les fiches de matériau proposées par les collectivités permettent d'identifier des différences d'intérêts et de priorités entre les collectivités locales. Ces différences peuvent être liées au contexte local, ainsi qu'aux sensibilités thématiques et techniques des gestionnaires (**Figure I-1, Figure I-2, Figure I-3, Figure I-4**).

Les domaines d'application, ou les usages privilégiés sont généralement toujours abordés. Nous constatons cependant un degré de développement plus ou moins important selon les collectivités. Ainsi, Lyon et Toulouse donnent davantage d'éléments pour cette question que Lille et Bordeaux. Les performances sont également traitées par les collectivités. Les performances sont les plus citées, par exemple, l'adhérence, la résistance et le confort. Lille et Bordeaux abordent également les critères de performances phonique ou de drainabilité. Les performances économiques sont exploitées par Lille, Lyon et Bordeaux. Bordeaux distingue par ailleurs les coûts d'investissement des coûts d'entretien.

La mise en œuvre est présentée par Lille sous la forme de précautions d'emploi, notamment par des indications sur les conditions climatiques lors de la mise en œuvre. Toulouse présente la démarche technique de mise en œuvre en indiquant les normes. Tandis que Bordeaux et Lyon ne traitent pas ce point.
La maintenance est présentée essentiellement par Lille et Lyon aussi bien pour les aspects de mise en œuvre que d'approvisionnement des matériaux. Lyon donne par ailleurs des indications sur l'entretien quotidien et saisonnier des revêtements. Bordeaux et Toulouse n'abordent pas cette question.

L'aspect, tel que la couleur, la teinte ou la granularité est quant à lui abordé selon deux angles. Lille et Bordeaux indiquent principalement des exemples de teintes ou de finition des revêtements, pour des questions de mise en valeur des espaces ou de partage de la voirie. Lyon, présente les couleurs et teintes selon les apports environnementaux et sécuritaires qu'ils peuvent avoir. Ainsi, il est indiqué que les couleurs claires permettent de réduire les effets d'îlots de chaleur ou l'intensité de l'éclairage public de nuit. Toulouse apporte peu d'éléments concernant l'aspect des revêtements.

Enfin, les modalités de seconde vie des matériaux sont uniquement présentées par Bordeaux et Lyon.

LES MATÉRIAUX NON MODULAIRES

LES ENROBÉS EN MILIEU URBAIN

Enrobé imprimé

Enrobé imprimé

Dénomination

Béton bitumineux noir éventuellement coloré, coulé à chaud ou à froid avec la possibilité d'une adaptation aux exigences urbaines (acoustique, drainage...).

Aspects

Couleur
l'ajout de pigments ou de granulats adaptés permet de nombreuses colorations (rouge, beige, bleu ...).
Aspect
- Le choix de la granulométrie varie suivant le trafic et la destination de l'enrobé.
- Possibilité d'impression de trames pour donner l'apparence de revêtement modulaire.

Intérêt / utilisation privilégiée

- Intérêt économique.
- Rapidité de mise en œuvre.
- Technique bien maîtrisée.
- Remise en circulation quasi immédiate.
- Bonne adhérence.
- Bonne résistance aux trafics lourds.
- Confort d'utilisation pour tout mode de déplacement.
- La coloration permet une différenciation visuelle des fonctions de la rue.
- Possibilité d'utiliser des enrobés peu bruyants, drainants, anti-ornièrants...

Précautions d'emploi

- Pose par temps sec.
- Température d'application homogène.
- Prêter attention à l'exécution des limites et des angles.
- Zones de raccord à compacter manuellement.
- Les teintes claires laissent apparaître rapidement les salissures.
- Pour les enrobés imprimés :
  - utiliser un bitume dur pour éviter la disparition de l'empreinte,
  - s'assurer de la continuité de l'appareillage,
  - problèmes de raccordement lors des interventions ultérieures.

Conditions d'approvisionnement

- Matériau courant et d'approvisionnement aisé pour les formulations standards.

Coût moyen constaté

(Valeur H.T. 2002)

Fourniture et pose :
15(noir) à 22(rouge) €/m²

Echelle de prix

(Valeur comparative de base pour les autres matériaux)

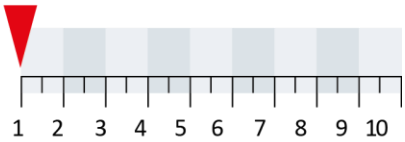


Figure I-1 – Exemple fiche matériau de Lille Métropole

Les Enrobés

Les Bétons bitumineux

(enrobés à liant bitumineux)

GRANDLYON communauté urbaine

Caractéristiques et mise en oeuvre principales du matériau

Les bétons bitumineux sont des matériaux imperméables. Leur formulation et leur aspect en font un matériau fermé ce qui signifie que leur surface est entièrement composée de granulats et de liant sans aucun espace entre les particules. Ils restent cependant des matériaux rugueux.

C'est le revêtement classique des chaussées et des trottoirs. Pour ces derniers et en milieu urbain, l'asphalte est aussi très utilisé. Constitué d'un liant bitumineux noir, il peut être clair avec un liant bitumineux sans asphaltène. Il sera privilégié pour l'utilisation sur des espaces modes doux. Aujourd'hui, environ 90% des enrobés sont réalisés avec des liants bitumineux noirs.

Lyon 7ème - Place des Docteurs Mérieux

La formulation des bétons bitumineux diffère selon le type d'usages qu'ils supportent. D'une part, le choix d'une structure adaptée est essentiel, d'autre part, la teneur en liant, la fraction des granulats, l'ajout d'adjuvant et l'épaisseur d'application permettent de répondre aux sollicitations attendues. Suivant ces caractéristiques, on parlera de structure légère, lourde ou super lourde.

Évaluation des coûts d'investissement (en euros)

0 € — 200 €

Entre 16€ TTC le m² pour le revêtement trottoir seul et 60€ TTC le m² avec sa structure lourde chaussée.
Base de prix : Direction de la Voirie, année 2008.

Usages et destination des espaces

- Capacité à supporter des usages courants

Très confortable pour l'ensemble des usagers. La couleur claire est souvent adaptée à des usages modes doux mais risque d'être éblouissante suivant la formulation choisie.

Revêtement tout à fait adapté aux circulations de véhicules légers et de poids lourds, il permet une très bonne adhérence. Il est toutefois proscrit, pour les formulations claires, pour des trafics importants.

- Capacité à supporter des usages spéci fiques et événementiels

Ce revêtement permet de supporter tous types de sollicitation. Toutefois, les formules claires sont à proscrire sous les étals des marchés alimentaires et de vendeurs ambulants.

Adéquation du matériau avec d'autres éléments du projet

Les formules sombres utilisées dans la plupart des cas, même modifiées avec l'oxyde de fer, ne permettent pas de diminuer les puissances d'éclairage des espaces concernés. Elles peuvent participer à l'augmentation des températures de l'espace.
Les formules claires, moins courantes, permettent de diminuer les puissances d'éclairage ainsi que les températures des espaces mais elles sont facteurs d'échaudures sur les troncs d'arbres.
Plus les granulats utilisés sont de petite taille, moins le revêtement entraîne de nuisances sonores pour les riverains. L'enrobé peut, suivant certaines formulations encore en test, diminuer les nuisances sonores de la circulation, même à faible allure.

3

Figure I-2 – Exemple fiche matériau du Grand Lyon

Direction de l'Eau · Direction de la Propreté · Direction de la Voirie

Gestion quotidienne et saisonnière

Nettoiement

Au quotidien, le nettoiement n'impose pas de contrainte spécifique. A l'usage, on risque de noter une dégradation de l'aspect du matériau en raison de :

- sa couleur, si elle est claire : elle accentue l'effet visuel des taches (traces de pneus, chewing-gum,...) et renforce la perte de l'éclat du matériau.
- sa rugosité : l'accumulation de particules fines de type poussières dans le relief lui faisant perdre son éclat.

Le béton bitumineux à liant clair est inadapté sous les étals des marchés alimentaires et ambulants en raison de sa couleur.
Le nettoiement mécanisé sera privilégié car il facilite l'évacuation des particules.

Désherbage

Il est possible de rencontrer des herbes dans les fissures des enrobés de trottoir. Le désherbage est généralement manuel.

Déneigement

Pas de contrainte particulière.

Gestion de l'événement et de l'accident

Événementiel

Pas de contrainte particulière.

Pollution accidentelle

Pas de contrainte particulière.

Maintenance

Maintenance des ouvrages

Pas de contrainte particulière.

Durée de vie

La durée de vie d'un béton bitumineux est liée à la structure mise en place au regard des usages qu'il supporte. Elle est diminuée par les nombreuses tranchées que le revêtement subit. Cependant, elle reste importante. La couche de roulement est à changer tous les 20 ans en moyenne.

Lyon 7ème - Rue Chevreuil

Remplacement du matériau

Le remplacement du matériau est aisé car ce dernier est utilisé de manière régulière sur l'ensemble des espaces. La mise en circulation est immédiate après la mise en œuvre, ce qui facilite la réparation. Le remplacement sera plus difficile pour les matériaux clairs car ils sont moins répandus sur le territoire du Grand Lyon.

Maintenance du matériau via les marchés à bon de commande

Sans contraintes spécifiques pour les bétons bitumineux à partir de bitume noir.
Impossible pour les bétons bitumineux clairs à l'heure actuelle.

Seconde vie du matériau

Les fraisas, résidus des décapages des bétons bitumineux, sont réemployés pour la confection des futurs enrobés.

4

Figure I-2 – Exemple fiche matériau du Grand Lyon (suite)

LES MATÉRIAUX NON MODULAIRES
LES BÉTONS BITUMINEUX

Les domaines d'emplois	Les finitions de surface
Tous les espaces	Sans objet

Les performances	
Confort	Confortable
Nuisances sonores	Peu bruyant sauf 0/14 (chaussée)
Adhérence	Satisfaisante
Nettoyabilité	Bonne
Pérennité	Bonne
Réparabilité	Bonne
Mise en œuvre	Peu pénalisante
Coût global	Investissement : faible Entretien : faible

Aspect environnemental	
Recyclabilité directe	Non
Recyclabilité indirecte	Oui
Perméabilité	Matériau imperméable ou perméable*

* Les bétons bitumineux drainants nécessitent, avant toute mise en oeuvre, la mise en place d'une structure permettant l'infiltration (sous-couche et sous-sol entièrement drainants). D'autres vérifications doivent être effectuées :

- vérifier la réglementation des eaux pluviales sur la zone d'aménagement ;
- vérifier les caractéristiques du sol : capacité d'infiltration, sol non pollué, absence de mâchefer, sensibilité des sols à l'eau ;
- présence de la nappe à un minimum de 2 m de la surface d'infiltration ;
- s'assurer que la voie destinée à être aménagée ne correspond pas à un axe de fort trafic ou à un axe de circulation de poids lourds pour éviter toute pollution accidentelle ;
- s'assurer qu'une zone agricole n'est pas présente à proximité.

Figure I-3 – Exemple fiche matériau de Bordeaux Métropole

Les teintes

Béton bitumineux noir

Cenon

Béton bitumineux rouge / brun

Cenon

Enrobé à liant végétal

* espaces « piétonniers », « deux roues »

Montauban, Place du Pigeonnier

Caractéristiques techniques

MEMO

Limites d'usage :

- Les drainants présentent l'inconvénient de se colmater dans le temps avec les poussières et les végétaux : remise en état coûteuse et le résultat n'est pas à la hauteur du matériau neuf : les drainants ne sont pas autorisés pour les surfaces circulé es;
- Teinte qui se patine sous l'effet des U.V. et des usages;
- Les bétons bitumineux minces ainsi que les bétons bitumineux drainants sont à éviter sur les lieux de giration pour véhicules lourds;
- Limiter l'enrobé à liant végétal aux zones hors circulations automobiles.

Figure I-3 – Exemple fiche matériau de Bordeaux Métropole (suite)

MATERIAUX DE REVETEMENT - CHAUSSEE

Titre particulier :
BETON BITUMINEUX SEMI GRENU (B.B.S.G)

NON RELEVE

Localisation géographique préconisée voies à fort trafic, agressif. Carrefours giratoires.

Topo n°

Règles d'implantation / Conseils d'utilisation : couche de roulement ou de liaison voie tout trafic, renforcement de structure.

Remarques : entretien ou chaussée neuve de 92 à 200 kg/m².

Caractéristiques	Conseils Pratiques / Références
Caractéristique : - Bon comportement en fatigue - Souplesse à basse température - Résistance à l'orniérage Matériaux de composition : - Bitume pur ou bitume dopé 20/30 (Norme NF T05-001) - Module de rigidité - Granulométrie 0/10, 0/4 (Norme NF P98-130) Epaisseur : de 4 à 9 cm Couleur : noir Mise en œuvre et atelier de compactage : Transport par camion bâché, couche d'accrochage, mise en œuvre au finisseur, compactage avec pneu et vibrant. Température de mise en œuvre 140° (Norme NF P98-150). Nota : compacteur à pneu inutile si le bitume pur est remplacé par un bitume au liant modifié.	Créateur : Fournisseur : -TPME - SMEG - Enrobé Toulouse, etc… Lieu d'implantation à Toulouse :

CAHIER DE L'ESPACE PUBLIC

Figure I-4 – Exemple fiche matériau de la Mairie de Toulouse

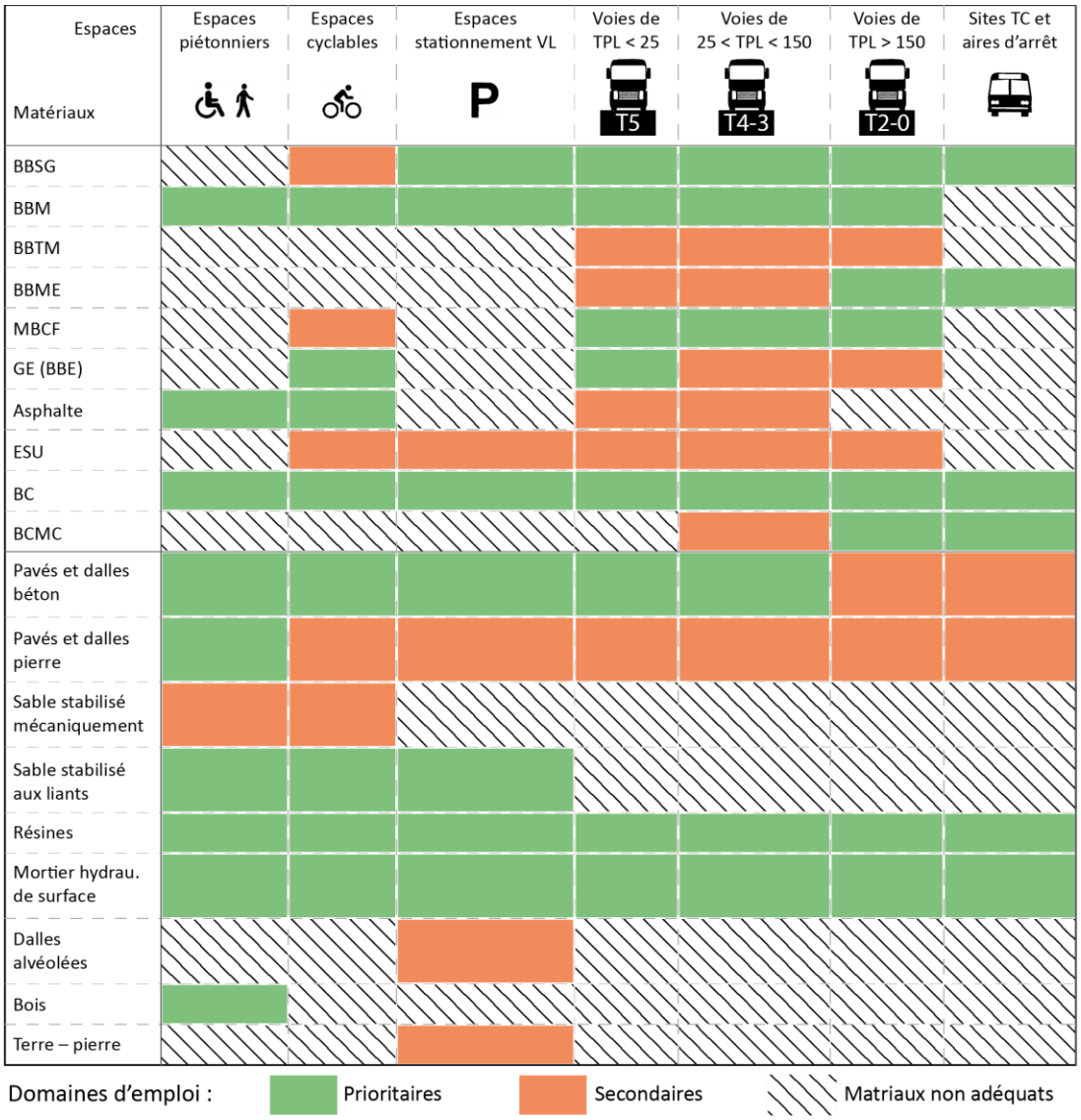
J. Annexe – Le choix des matériaux selon leurs caractéristiques et leurs domaines d'emploi

La synthèse du Cerema sur les domaines d'emploi des différents matériaux de revêtement permet de poser deux constats (**Tableau J-1**). D'abord, les matériaux non modulaires sont à privilégier pour les chaussées. Nous observons que certains de ces matériaux sont plus adaptés au trafic fort, c'est le cas du BBME et du BCMC, tandis que d'autres sont à utiliser pour les trafics faibles tel que le BBE. D'autres matériaux non modulaires, tel que l'Asphalte sont essentiellement utilisé pour les espaces piétonniers ou cyclables, ce qui en font des matériaux très présents en milieu urbain. Ensuite, les matériaux modulaires sont généralement plus adaptés aux espaces piétonniers et aux espaces cyclables.

Le tableau de synthèse sur les choix des matériaux pour chaque espace (**Tableau J-2**) permet ensuite de relever la pertinence des matériaux selon leur domaine d'application, les principales caractéristiques attendues (**Cf. 10.1.1 p. 183**), c'est-à-dire : – le confort ; – la sécurité ; – la résistance ; – la mise en œuvre ; –les aspects environnementaux. Ces caractéristiques sont ensuite déclinées en différentes performances attendues. Ainsi, nous observons qu'un matériau comme l'asphalte, bien que non recommandé pour les chaussées, présente des caractéristiques et performances importantes notamment en termes de niveau sonore, ou de réparabilité.

Enfin, la synthèse proposée par la Métropole de Bordeaux montre d'une part l'importance des matériaux modulaires pour le milieu urbain, d'autre part l'intérêt pour les gestionnaires de certains paramètres (**Tableau J-3**). Notamment, nous constatons que Bordeaux insiste sur des critères de mise en valeur des lieux et d'édifices, de continuité de l'espace, de différenciation des espaces. Ces éléments pointent l'importance de l'aménagement du territoire et du cadre de vie dans le choix des matériaux de revêtement. Enfin, une place importante est donnée au critère de coût, aussi bien d'investissement que d'entretien.

Tableau J-1 – Synthèse des domaines d'emploi



Source : Cerema, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Tableau J-2 – Synthèse choix des matériaux pour chaque espace

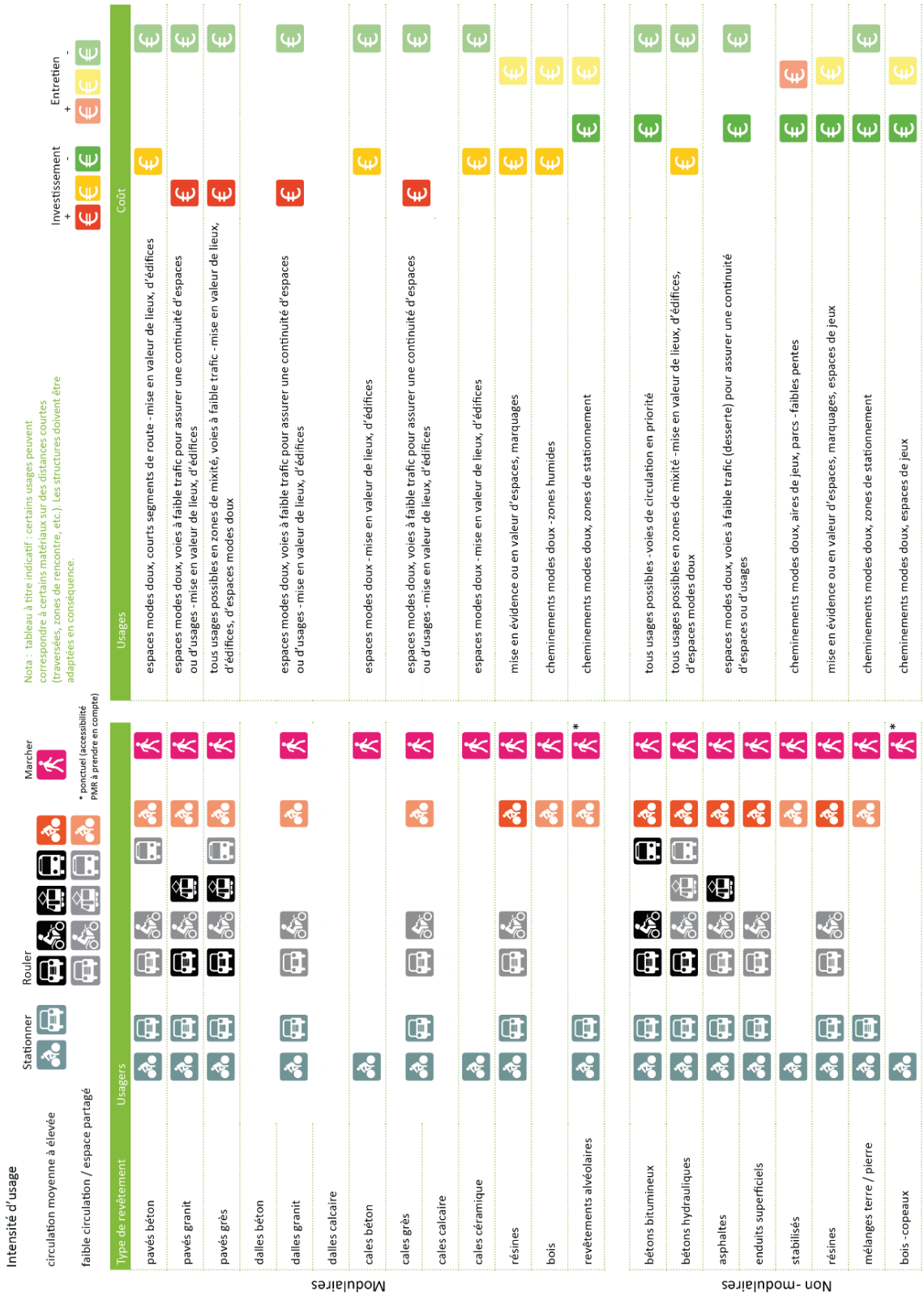
Espaces / Matériaux	Résistance	Ornierage	Cisaillement	Hydrocarbures	Aspects possibles	Mise en œuvre	Temps	Uni	Adhérence	Non-glissance	Bruit de roulement	Effusivité thermique	Confort de Marche ou circulation	Imperméabilisant	Durée de vie	Réparabilité	Nettoyabilité
BBSG	P TS	T4-0	T4-0	P TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
BBM	P TS	T4-0	T4-0	P TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P TS-0	P TS-0	P TS-0
BBTM	TS	T4-0	T4-0	TS-0			TS-0	TS-0	TS-0		TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	TS-0
BBME	TS	T4-0	T4-0	TS-0			TS-0	TS-0	TS-0		TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	TS-0
MBCF	TS	T4-0	T4-0	TS-0			TS-0	TS-0	TS-0		TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	TS-0
GE (BBE)	TS	T4-3	T4-3	TS-3			TS-3	TS-3	TS-3		TS-3			TS-3	TS-3	TS-3	TS-3
Asphalte	TS	T4-3	T4-3	TS-3			TS-3	TS-3	TS-3		TS-3			TS-3	TS-3	TS-3	TS-3
ESU	P TS	T4-0	T4-0	P TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
BC	P TS	T4-0	T4-0	P TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P		P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
BCMC	P TS	T4-0	T4-0	P TS-3			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P		P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
Pavés / dalles béton	P TS	T4-0	T4-0	P TS-3			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
Pavés / dalles pierre	P TS	T4-0	T4-0	P TS-3			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P	P TS-0	P TS-0
Sable stab. méca.																	
Sable stab. aux liants	P			P						P		P	P	P	P	P	P
Résines	P TS	T4-3	T4-3	P TS-3			TS-3	TS-3	TS-3	P	TS-3	P	P	P TS-3	P TS-3	P TS-3	P
Mortier hydr. de surface	P TS	T4-0	T4-0	P TS-0			TS-0	TS-0	TS-0	P	TS-0	P	P	P TS-0	P TS-0	P TS-0	P TS-0
Dalles alvéolées	P			P						P		P	P	P	P	P	P
Bois																	
Terre – pierre	P			P						P		P	P	P	P	P	P

Bonne adaptabilité — Adaptabilité moyenne — Faible adaptabilité — Assurée par les couches sous-jacentes

Source : Cerema, 2018

Auteur : A. Pavard, 2020

Tableau J-3 – Synthèse matériaux de surface et usages



Intensité d'usage	Stationner	Rouler	Marcher
circulation moyenne à élevée			
faible circulation / espace partagé			* ponctuel (accessibilité PMR à prendre en compte)

Nota : tableau à titre indicatif : certains usages peuvent correspondre à certains matériaux sur des distances courtes (traversées, zones de rencontre, etc.). Les structures doivent être adaptées en conséquence.

	Type de revêtement	Usagers	Usages	Coût: Investissement +	Coût: Investissement -	Coût: Entretien +	Coût: Entretien -
Modulaires	pavés béton		espaces modes doux, courts segments de route - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	pavés granit		espaces modes doux, voies à faible trafic pour assurer une continuité d'espaces ou d'usages - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	pavés grès		tous usages possibles en zones de mixité, voies à faible trafic - mise en valeur de lieux, d'édifices, d'espaces modes doux				
	dalles béton						
	dalles granit		espaces modes doux, voies à faible trafic pour assurer une continuité d'espaces ou d'usages - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	dalles calcaire						
	cales béton		espaces modes doux - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	cales grès		espaces modes doux, voies à faible trafic pour assurer une continuité d'espaces ou d'usages - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	cales calcaire						
	cales céramique		espaces modes doux - mise en valeur de lieux, d'édifices				
	résines		mise en évidence ou en valeur d'espaces, marquages				
	bois		cheminements modes doux - zones humides				
	revêtements alvéolaires	*	cheminements modes doux, zones de stationnement				
Non - modulaires	bétons bitumineux		tous usages possibles - voies de circulation en priorité				
	bétons hydrauliques		tous usages possibles en zones de mixité - mise en valeur de lieux, d'édifices, d'espaces modes doux				
	asphaltes		espaces modes doux, voies à faible trafic (desserte) pour assurer une continuité d'espaces ou d'usages				
	enduits superficiels						
	stabilisés		cheminements modes doux, aires de jeux, parcs - faibles pentes				
	résines		mise en évidence ou en valeur d'espaces, marquages, espaces de jeux				
	mélanges terre / pierre		cheminements modes doux, zones de stationnement				
	bois - copeaux	*	cheminements modes doux, espaces de jeux				

Source : Agence d'urbanisme Bordeaux Métropole Aquitaine, 2017

Auteur : A. Pavard, 2020

K. Annexe – Extrait de modes opératoires d'auscultation

Mode opératoire M6

1. Domaine d'application

Le présent mode opératoire est applicable aux études d'évaluation de l'état des chaussées, aux études de diagnostic, aux études d'entretien et aux études de renforcement d'un itinéraire ou d'une section d'itinéraire des voiries urbaines. Ce mode opératoire peut également être utilisé pour des études de programmation des travaux d'entretien des voies urbaines (voiries principales, par ex.).

En sont exclues les chaussées à fort trafic de transit ou de desserte extérieure du type VRU, périphérique, rocade, ..., pour lesquelles les méthodes précédentes s'appliquent. En sont également exclues les chaussées à revêtement modulaire de type pavés, et en asphalte, pour lesquelles on appliquera de préférence les méthodes décrites dans [5].

2. Bordereau de relevé

Rubrique	Sous-rubrique				
Nature de la dégradation	Code	Intitulé *Observations*		Extension *	Fiches Catalogue (niveaux de gravité)
Orniérage	1	significatif	*préciser, si possible* petit (35) *ou* grand rayon (01)	ml	**01** (1 et 2), **52** (1 et 2)
	2	grave		ml	**01** (3), **52** (3)
Affaissement	1	significatif		ml	**02** (1 et 2), **03** (1 et 2)
	2	grave		ml	**02** (3), **03** (3)
Glaçage - ressuage	1	localisé		ml	**34** (1 et 2), **61** (1 et 2)
	2	généralisé		mi	**51** (3), **61** (3)
Arrachement	1	plumage, désenrobage de surface		ml	**16** (1), **46** (1), **54** (1 et 2), **56** (1), **63** (1 et 2)
	2	pelade, désenrobage profond		mi	**16** (2), **46** (2), **54** (3), **55** (1 à 3), **56** (2)
Fissure transversale - joint transversal	0	réparé	*préciser, si possible,* fissure transversale *ou* joint transversal	nb	**06** (0), **41** (0), **53** (0)
	1	significatif		nb	**06** (1 et 2), **41** (1 et 2), **53** (1 et 2)
	2	grave		nb	**06** (3 et 4), **41** (3 et 4), **53** (3 et 4)
Fissure longitudinale - joint longitudinal - fissure diverse	0	réparé		ml	**07** (0), **08** (0), **42** (0)
	1	significatif, non spécifique aux bandes de roulement		ml	**07** (1 et 2), **09** (1 à 3), **10** (1 et 2) **44** (1 à 3), **67** (1 à 3)
	2	grave, non spécifique aux bandes de roulement		ml	**07** (3), **10** (3 et 4), **45** (1 à 3), **58** (1 à 3), **66** (1 et 2)
	3	spécifique aux bandes de roulement		ml	**08** (1 à 3), **42** (1 à 3)

Figure K-1 – Extrait de la méthode d'essai LPC N°38-2 – Mode opératoire M6

Rubrique	Sous-rubrique				
Nature de la dégradation	**Code**	**Intitulé** *Observations*		**Extension** *	**Fiches Catalogue (niveaux de gravité)**
Faïençage	1	significatif, non spécifique BdR		ml	12 (1), **43** (1 et 2), 57 (1 et 2)
	2	grave, non spécifique BdR		ml	**12** (2), **43** (3), **57** (3)
	3	spécifique BdR		ml	11 (1 à 3)
Tranchée, fissure ou déformation	1	saine	sans dégradation structurelle	nb	
	2	dégradée significative	FL, FAI ou FT de gravité < 3 Déformation ≥ 30 mm	nb	
	3	dégradée grave	FL, FAI ou FT de gravité ≥ 3 Déformation ≥ 60 mm	nb	
Bordure/caniveau	1	présence, bon état	latéralisé G et D	ml	
	2	cassé, déformé	latéralisé G et D	ml	
Émergence	1	présence, bon état		nb	
	2	dégradée		nb	
Réparation	1	< 1/2 voie		ml	
	2	> 1/2 voie		ml	

BdR : bande de roulement
** L'extension indiquée en mètre linéaire (ml) est la longueur de chaussée affectée par la dégradation ; il ne s'agit pas de la longueur développée de cette dégradation.*

3 Exécution du relevé

3.1. Relevé des déformations du profil en travers

Les déformations du profil en travers seront soit relevées visuellement (mêmes dispositions que le § 3.2), soit mesurées en application du mode opératoire T2 de la *Méthode* LPC n° 49.

3.2. Relevé des dégradations autres que les déformations du profil en travers

Appareillages

Pour procéder à la saisie des dégradations sur la chaussée, il faut un bordereau graphique ou un véhicule équipé : d'un système RAO, ou d'un système photographique ou d'un système vidéo, tels que définis au § 4.2 (partie A).

Conditions de relevé

Un relevé concerne normalement une voie de circulation. La saisie s'effectue en un ou deux passages.

Figure K-1 – Extrait de la méthode d'essai LPC N°38-2 – Mode opératoire M6 (suite)

Nota : *À la demande du gestionnaire, le relevé peut porter sur deux voies strictement adjacentes. La saisie s'effectue alors en un passage sur la voie la plus* a *droite des deux. Les dégradations étant saisies sans distinction de la voie sur laquelle elles se trouvent, ce relevé ne permet pas de revenir, ensuite,* à *une analyse voie par voie.*

Préparation du relevé

En phase préparatoire, il est pris contact avec le service gestionnaire pour :

– localiser le réseau ou l'itinéraire à relever,
– connaître les structures et le revêtement qui seront rencontrés lors du relevé (structure initiales et travaux d'entretien).

Le réseau ou l'itinéraire est découpé en tronçons ou segments identifiés suivant la base du service. Chaque tronçon est repéré par son numéro dans la base, son nom et le nom des rues « tenants » et « aboutissants ». Chaque tronçon est ensuite découpé en sous-sections de longueur déterminée (généralement 10 mètres).

Exécution de la saisie

La saisie est effectuée conformément aux modes opératoires des appareils utilisés. Le cas échéant, le véhicule spécialisé se rend sur l'aire de stationnement repérée en amont du point de départ de la section, les opérateurs initialisent les appareils de saisie et chargent, si besoin est, de nouveaux supports de saisie.

Le véhicule rejoint le début de la section où l'opérateur déclenche la saisie sans arrêter le véhicule. Au passage de chaque point de repère répertorié, l'opérateur déclenche le marquage d'une inscription type, soit directement sur le support de saisie, soit indirectement sur un autre support, lui-même synchronisé avec ce dernier.

À la fin de la section, l'opérateur arrête la saisie des différents appareils.

Exécution de la transcription

Les informations saisies sont transcrites, tronçon par tronçon, en temps réel ou différé, sur un fichier organisé en autant de rubriques que nécessaire *(cf.* tableau § 2).

4. Agrégation et présentation des résultats

Les résultats sont agrégés, tronçon par tronçon ; à chaque sous-rubrique est affecté un nombre entier correspondant au pourcentage de sous-sections où la dégradation est présente.

Les résultats sont présentés sur un fichier informatique dont chaque enregistrement représente un pas et comprend vingt-huit (28) valeurs entières qui sont :

– le numéro du tronçon,
– l'extension des vingt-sept sous-rubriques dans le tronçon.

Figure K-1 – Extrait de la méthode d'essai LPC N°38-2 – Mode opératoire M6 (suite)

5. Sécurité des équipes

Le véhicule spécialisé, le véhicule de protection éventuel et le personnel doivent être équipés des dispositifs réglementaires en vigueur, notamment :

➢ *Signalisation du véhicule*

Le véhicule est doté d'une signalisation par bandes biaises, par rampe lumineuse à cinq feux à éclats et deux gyrophares, ainsi que par un panneau AK5 à trois feux à éclats.

Cette signalisation répond aux prescriptions des documents **[3]** et [4].

➢ *Signalisation du personnel*

Lors de leur séjour à l'extérieur du véhicule de mesure, les agents portent un gilet ou vêtement conforme au moins à la classe 2 de la norme EN 471.

Ces équipements ne retirent en rien la responsabilité du gestionnaire de la route qui doit être informé des dates et itinéraires du relevé.

Figure K-1 – Extrait de la méthode d'essai LPC N°38-2 – Mode opératoire M6 (suite)

FICHE D'INSPECTION DES TROTTOIRS

Localisation	Caractéristiques	
	Type :	Matériaux :
Nom de la rue : **Rue Sainte-Anne**	**X** Trottoir	**X** Béton
Tronçon :	Bordure	Enrobé
Rue transversale : **De la Chapelle et Quai fédéral**	Trottoir boulevard	Granit
Longueur du tronçon : **100 mètres** Côté : **X Pair**	Monolithique	Autre
Largeur du trottoir : **1.20 mètres** Impair	Hauteur du cours d'eau adjacent au tronçon (mm) Début : **120** 1/3 : **150** 2/3 : **120** Fin : **150**	

Relevé de trottoir

Schéma du tronçon	**# civique** ou chaînage	**Code**	**Description**	**Cote**
De la chapelle		de dégradation **(ref. tableaux 4.1 et 4.2)**	des défauts **(ref. tableaux 4.1 et 4.3) et références aux photographies**	de sévérité **(ref. tableau 4.3)**
rue transversale				
	260		Photo 1	
		ED	Marque: superficie de 100 cm^2	
			Profondeur maximale de 40 mm	
	266		Photo 2 – bateau de	
		FA	Fissures à angles	Moyenne (3)
		ECA	Écaillage	Moyenne (3)
		EP	Épaufrure	Sévère (4)
	266		Photo 3	
		DV	Décalage vertical	Moyenne (3)
rue transversale				
Quai fédéral				

Besoins d'intervention/niveau de sécurité	Photo 1 : le décalage vertical représente un risque d'accident
	Photo 2 : réparations à envisager pour éviter une dégradation plus sévère
Commentaires **(réff. section 7.1)**	

Identification du personnel

Réalisé par : **Employé travaux publics** Date : **19 mars 2007**

Vérifié par : **Superviseur** Date : **20 mars 2007**

Évaluation globale du trottoir (réf. tableau 4.5)

Aucune	Faible	Moyenne	Sévère
90%	0%	5%	5%

Voir verso

Figure K-2 – Exemple de fiche d'auscultation de trottoir (CERIU)

L. Annexe – Extrait de fiche de levé remplie

14/10/2019

	Elément voirie						Revêtement		Degradations			Travaux		Arbre
ID	Chaus.	Cycl.	Bus	Trot.	Statio.	Prec. sup.	Type	Homog.	Def.	Fis.	Arr.	Tran.	Patch.	
1					1		BB	1						
2		1				Neuf	BB	1						
3				1		Neuf	BB	1						
4	1						BB	1						
5				1		Neuf	BB	1						
6				1			BB	1				1		
7					1		BB	1						
8	1						BB	1	AF	TR / LO / FA		1	1	
9				1			BB	1						
10				1			BB/BB	Dif. Coul.		TR / LO /	NI		1	
11	1						BB	Rust. BH	AF	TR / LO /	NI	1	1	
12					1		BB	1		TR / LO /	NI	1		
13				1			BB	1			NI			
14	1						BB	1	AF	TR / LO / FA		1	1	
15					1	empl. Velib	BB	1				1		
16				1			BB	1				1		
17				1			BB	Dif. Tons				1		
18	1						BB	1				1		
19	1						BB	1						
20					1		BB	Trait. Trav. BB						
21				1			BB	1				1	1	
22					1		BB	1		TR / LO / FA				
23	1						BB	1		TR / LO / FA				
24				1			BB	1		TR / LO / FA				
25				1			BB	1					1	
26	1						BB	Dif. Tons		TR / LO / FA		1	1	
27				1			BB	1		TR / LO		1		
28					1		BB	1		TR / LO /	NI / EC			
29	1						BB	1		TR / LO / FA		1	1	
30				1			BB	1	BO / GO	TR / LO / FA		1		
31				1			BB	1	BO / GO	TR / LO / FA		1		
32	1						BB	1		TR / LO / FA		1	1	
33					1		BB	1		TR / LO /	NI / EC			
34				1			BB	1		TR / LO				
35	1						BB	1	AF	TR / LO / FA		1		
36				1			Herbe	1						
37	1						Gravier	1						
38				1			BB	Trait. Ent. BB						
39					1		BB	1						
40	1						BB	1						
41					1		BB	1						
42				1			BB	1						1
43				1			BB	Dif. Tons		TR / LO / FA				
44	1						BB	1	AF	TR / LO / FA		1		
45				1			Herbe	1						
46				1			BB	Trait. Ent. BB						
47					1		BB	1			EC			
48	1						BB	1						

M. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous ou hors voirie

Les canalisations d'assainissement présentent des logiques similaires d'enfouissement sous ou hors voirie à Cachan et à Victoria. Comme nous le constatons sur le **Tableau M-1**, la majorité des canalisations sont enfouies sous la voirie. Selon le type de réseau d'assainissement, les proportions de canalisations enfouies sous voirie s'étendent de 88% (eaux pluviales à Victoria et eaux pluviales gérées par le département à Cachan) jusqu'à 100% (réseau unitaire départemental à Cachan).

Tableau M-1 – Répartition des conduites principales d'assainissement selon leur type

	Type réseau	Hors voirie (m)	Hors voirie (%)	Sous voirie (m)	Sous voirie (%)	Total (m)
Victoria	*EP Total*	**31 274**	**12**	**237 840**	**88**	**269 114**
	EU Total	**20 884**	**9**	**218 425**	**91**	**239 309**
	Total général	**52 158**	**10**	**456 265**	**90**	**508 423**
Cachan	*EP Municipal*	121	3	3 882	97	4 003
	EP Dep.	623	12	4 538	88	5 161
	EP Total	**744**	**8**	**8 420**	**92**	**9 164**
	EU Municipal	202	7	2 667	93	2 869
	EU Dep.	345	6	5 098	94	5 443
	EU Total	**547**	**7**	**7 764**	**93**	**8 312**
	UN Municipal	1 565	6	24 610	94	26 176
	UN Dep.	13	0	9 369	100	9 382
	UN Total	**1 578**	**4**	**33 979**	**96**	**35 558**
	N.D Total	**139**	**5**	**2 749**	**95**	**2 888**
	Total général	***3 008***	***5***	***52 913***	***95***	***55 921***

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019

La logique de répartition pour les réseaux d'électricité à Cachan (**Tableau M-2**) et les réseaux de gaz de Cachan et de Rouen centre-ville est similaire à celle du réseau d'assainissement. Nous observons toutefois que le réseau de gaz basse tension est légèrement moins enfoui sous la voirie (83%). La proportion des canalisations sous voirie est encore plus faible pour le réseau « inconnu » (60%). Le fait que ces canalisations soient hors voirie empêche probablement leur identification.

Tableau M-2 – Répartition des fourreaux principaux d'électricité selon leur type

	Type réseau	Hors voirie (m)	Hs voirie (%)	Sous voirie (m)	Ss voirie (%)	Total (m)
Cachan	*BT*	11 979	17	60 173	83	72 152
	HTA	3 837	6	60 217	94	64 054
	Inconnu	197	40	299	**60**	496
	Total gaz	***16 013***	***12***	***120 689***	***88***	***136 702***
	Tot. Elec.	***3 430***	***6***	***54 974***	***94***	***58 404***
Rouen rest.	***Tot. Elec.***	***5 780***	***4***	***132 120***	***96***	***137 899***

Sources : Enedis 2020 ; Grdf 2020

N. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous la voirie selon le type de voirie

À Victoria, nous constatons une répartition similaire des réseaux d'assainissement, selon la vocation de la voirie, et ce, quel que soit le type du réseau (EP ou EU). Ainsi environ 60% des canalisations sont enfouies sous la voirie locale contre environ 20 % sous la voirie artérielle et 15% sous la voirie collectrice (**Tableau N-1**).

Tableau N-1 – Répartition des conduites principales d'assainissement selon la vocation de voirie à Victoria (BC)

	Arterial (m)	Arterial (%)	Collector (m)	Collector (%)	Local (m)	Local (%)	Total (m)
EP	57 191	24	37 709	16	142 940	60	237 840
EU	45 267	21	33 140	15	140 018	64	218 425
Total	***102 459***	***22***	***70 849***	***16***	***282 958***	***62***	***456 265***

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

À Rouen centre-ville, la localisation du réseau de gaz suit la même logique qu'à Cachan (**Tableau N-2**). Toutefois, nous constatons une proportion plus importante des canalisations sous la voirie locale (87,5%)

Tableau N-2 – Répartition des conduites principales des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Rouen

		Nat. (m)	Nat. (%)	Dep. (m)	Dep. (%)	Autre (m)	Autre (%)	Total (m)
Gaz	***Total gaz***	***666***	***0,5***	***16 007***	***12***	***115 447***	***87,5***	***132 120***

Sources : Grdf 2020

À Cachan, la répartition des réseaux sous les voiries selon leur classe administrative dépend pour beaucoup du type de réseau étudié et de son gestionnaire (**Tableau N-3**) :

- Pour les réseaux d'assainissement nous constatons que globalement il est majoritairement enfoui sous la voirie de classe administrative inférieure (63%). En décomposant ces réseaux selon le mode de fonctionnement (EP, EU, UN) nous observons des logiques différentes. Ainsi, les réseaux d'eaux pluviales sont répartis équitablement entre les voiries départementales et locales tandis que les autres sont davantage enfouis sous les voiries locales. Finalement, la localisation des réseaux semble également dépendre du gestionnaire de ce réseau : les réseaux gérés par le département sont majoritairement enfouis sous la voirie départementale.

– Pour les réseaux d'électricité sans distinction de tension nous observons une localisation préférentielle sous la voirie locale (63%). La décomposition entre réseau basse tension et haute tension montre que si les premiers sont davantage enfouis sous la voirie locale, les seconds sont répartis équitablement entre voirie locale et départementale.
– Pour le réseau de gaz, une majorité est également enfouie sous la voirie locale (69%).

Tableau N-3 – Répartition des conduites principales des réseaux selon la classe administrative de la voirie : Cachan

		Dep. (m)	Dep. (%)	Autre (m)	Autre (%)	Total (m)
Assain.	*EP Municipal*	733	19	3 150	**81**	3 882
	EP Dep.	3 429	**76**	1 109	24	4 538
	EP Total	4 161	49	4 259	51	8 420
	EU Municipal	263	10	2 403	**90**	2 667
	EU Dep.	4 388	**86**	710	14	5 098
	EU Total	4 651	**60**	3 113	40	7 764
	UN Municipal	1 889	8	22 721	**92**	24 610
	UN Dep.	7 195	**77**	2174	23	9 369
	UN Total	9 084	27	24 895	**73**	33 979
	N.D Total	1 655	**60**	1 094	40	2 749
	Total assain.	***19 546***	***37***	***33 361***	***63***	***52 913***
Electricité	*BT*	13 205	22	46 968	**78**	60 173
	HTA	29 402	49	30 815	51	60 217
	Inconnu	32	11	267	**89**	299
	Total élect.	***42 640***	***35***	***78 050***	***65***	***120 689***
Gaz	***Total gaz***	***16 982***	***31***	***37 992***	***69***	***54 974***

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; Grdf 2020 ; Enedis 2020

O. Annexe – Localisation des réseaux techniques sous la voirie selon l'élément constitutif de la voirie

À Victoria, les réseaux d'assainissement sont majoritairement enfouis sous les chaussées (89%), et ce qu'il s'agisse du réseau des eaux pluviales (85%) ou des eaux usées (93%) (**Tableau O-1**).

Tableau O-1 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Victoria

	Chaussée		Piétonnier		Total
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)
EP	201 392	85	36 448	15	237 840
EU	203 794	93	14 631	7	218 425
Tot. Assain.	***405 186***	***89***	***51 079***	***11***	***456 265***

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019

À Rouen, le réseau de gaz est équitablement réparti entre les chaussées (45,7%) et les espaces piétonniers (45%) (**Tableau O-2**).

Tableau O-2 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Rouen centre-ville

	Chaussée		Piétonnier (chemin, trottoir)		Parking et statio. propre		Total
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)
Total gaz	***58 955***	***45,7***	***58 121***	***45,0***	***11 961***	***9,3***	***129 037***

Sources : Grdf 2020

À Cachan, la répartition des réseaux sous les éléments de voirie varie là aussi selon le type de réseau et son gestionnaire (**Tableau O-3**) :

- Les réseaux d'assainissement sont majoritairement enfouis sous les chaussées (65,5%). Cette proportion diffère d'abord selon le mode de fonctionnement (EP, EU, UN). Si les réseaux d'eaux usées et unitaires sont majoritairement enfouis sous la chaussée (65% et 69,2%), les réseaux d'eaux pluviales sont quant à eux répartis quasiment équitablement entre les chaussées et les espaces piétonniers (52,5% et 43,7%). Enfin, les réseaux gérés par la commune sont davantage enfouis sous les chaussées, tandis que les réseaux départementaux, et notamment les EP et les EU sont équitablement répartis entre chaussées et espaces piétonniers.
- Pour les réseaux d'électricité, la localisation préférentielle semble être celle des espaces piétonniers (73,9%), et ce, qu'il s'agisse du réseau BT (80,2%) comme du réseau HTA (67,6%).
- Le réseau de gaz est enfoui à 60,7% sous les espaces piétonniers.

Tableau O-3 – Répartition des conduites principales des réseaux selon l'élément de voirie : Cachan

	Chaussée		Piétonnier (chemin, trottoir)		Cyclable propre		Parking et statio. propre		Autre		Total
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)
EP Com.	2 259	58,2	1 410	36,3	0	0,0	213	5,5	0	0,0	3 882
EP Dep.	2 158	47,6	2 270	50,0	13	0,3	57	1,3	40	0,9	4 538
EP Total	4417	52,5	3681	43,7	13	0,1	270	3,2	40	0,5	8420
EU Com.	2 215	83,1	386	14,5	0	0,0	65	2,4	0	0,0	2 667
EU Dep.	2 829	55,5	2 222	43,6	7	0,1	9	0,2	31	0,6	5 098
EU Total	5044	65,0	2609	33,6	7	0,1	74	1,0	31	0,4	7764
UN Com.	17 566	71,4	6 510	26,5	7	0,0	450	1,8	78	0,3	24 610
UN Dep.	5 941	63,4	2 593	27,7	324	3,5	511	5,4	0	0,0	9 369
UN Total	23507	69,2	9103	26,8	331	1,0	960	2,8	78	0,2	33979
N.D.	1 712	62,3	965	35,1	2	0,1	71	2,6	0	0,0	2 749
Tot assain.	***34 679***	***65,5***	***16 357***	***30,9***	***353***	***0,7***	***1 375***	***2,6***	***149***	***0,3***	***52 913***
BT	9 804	16,3	48 268	80,2	139	0,2	1 336	2,2	626	1,0	60 173
HTA	16 045	26,6	40 706	67,6	839	1,4	2 299	3,8	329	0,5	60 217
Inconnu	66	22,1	210	70,1	0	0,0	23	7,8	0	0,0	299
Tot élec.	***25 915***	***21,5***	***89 183***	***73,9***	***978***	***0,8***	***3 658***	***3,0***	***954***	***0,8***	***120 689***
Total gaz	***17 541***	***31,9***	***33 374***	***60,7***	***1 402***	***2,6***	***2 611***	***4,7***	***46***	***0,1***	***54 974***

Sources : CityOfVictoriaBC, 2019 ; EPT Grand Orly Seine Bièvre, 2019 ; Grdf 2020 ; Enedis 2020

P. Annexe – Démarche d'analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) permet d'étudier et de mesurer une relation entre une variable quantitative continue Y (de stock ou de taux) et une variable discrète X (exprimée en classes ou catégories peu nombreuses). Il s'agit de ce fait d'une analyse statistique dite bivariée, permettant de répondre à la question : « *Jusqu'à quel degré les valeurs de Y s'ordonnent-elles en fonction des modalités de X ?* » (Dumolard et al. 2003, p. 157).

Dans notre cas, nous nous intéressons à la localisation des tronçons de réseaux techniques sous les voiries. Nous cherchons alors à savoir si un découpage des tronçons de réseaux par les objets graphiques représentant les éléments constitutifs de la voirie a un impact sur le morcellement des tronçons de réseaux. Autrement dit, les portions de tronçons de réseaux produites lors du croisement avec les éléments constitutifs, présentent-elles des longueurs variables selon les éléments constitutifs.

Pour répondre à cette question, nous prenons systématiquement comme variable discrète X, l'implantation sous la voirie décrite par des modalités telles que chaussée, trottoir, ou encore stationnement. Concernant la variable quantitative continue Y, nous testons successivement la longueur des portions produites par le découpage et dont les valeurs sont en mètres, ainsi que le rapport entre la longueur des portions et la longueur des tronçons d'origine (en pourcentage) (**Tableau P-1**).

Tableau P-1 – Exemple de tableau élémentaire d'origine, et des variables prises en compte pour les ANOVA

Id_portion	Id_tronçon	Implant. voirie	Long. Tronçon (m)	Long. Portion (m)	Rapport long. Portion / long. Tronçon (%)
1	1	Trottoir	510	120	23,5
2	1	Chaussée	510	250	49,0
3	1	Chaussée	510	140	27,5
4	2	Chaussée	180	130	72,2
5	2	Stationnement	180	50	27,8
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)	(…)

À partir du tableau élémentaire, nous produisons un tableau de recensement des valeurs prises par les individus sur la variable Y selon les modalités de la variable X (**Tableau P-2**)

Tableau P-2 – Exemple de tableau de recensement

Chaussée	Trottoir	Stationnement
250	120	50
140	(…)	(…)
130	(…)	(…)
(…)	(…)	(…)

À partir du tableau de recensement, nous produisons plusieurs indicateurs par modalité X permettant d'étudier la relation (**Tableau P-3**) : les effectifs, les moyennes, les variances, les écarts-types ainsi que les sommes des carrés des écarts aux moyennes (SCE). Bien que fournissant une première indication sur la relation, la taille moyenne par modalité peut cacher des variances intra-modalité importantes. Or, de fortes hétérogénéités des valeurs dans chaque modalité relèvent davantage d'une relation peu significative entre les variables.

Tableau P-3 – Exemple de résumé statistique

Modalité X	Effectif	Moyenne	Variance	Ecart-type	SCE
Chaussée	Nombre de portions de réseau sous les chaussées	Moyenne des longueurs des portions de réseaux sous les chaussées	variance des longueurs des portions de réseaux sous les chaussées	ET des longueurs des portions de réseaux sous les chaussées	SCE des longueurs des portions de réseaux sous les chaussées
Trottoir	(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Stationnement	(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Ensemble	Nombre de portions de réseau	Moyenne des longueurs de toutes les portions de réseau	Variance des longueurs de toutes les portions de réseau	ET des longueurs de toutes les portions de réseau	SCE des longueurs de toutes les portions de réseau

Le résumé statistique permet ensuite de mesurer l'intensité de la relation à condition que :

- la distribution des valeurs de Y soit à peu près gaussienne pour chaque modalité ;
- les variances intra-classes (intra-modalités) soient comparables ;
- les effectifs de chaque modalité soient comparables.

Une relation entre une variable quantitative et une variable catégorielle, est considérée forte si : pour l'ensemble des modalités de X, les moyennes de Y sont très éloignées et les variances autour de ces moyennes très petites. Mener une ANOVA nécessite alors de mesurer des écarts :

- inter-classes (SCE inter) : correspondant à la somme des écarts inter-classes ;

– intra-classes (SCE intra) : correspondant à la somme des écarts intra-classes.

La SCE inter est calculée selon l'Équation P-1, où « n_g » est l'effectif de la modalité g, « m_g » la moyenne de la modalité g, et « m » la moyenne générale. En d'autres termes, il s'agit de la somme pondérée des carrés des écarts entre les moyennes par modalité et la moyenne générale de Y.

Équation P-1 – Calcul de la SCE inter

$$SCE\ inter = \Sigma ng\ (mg - m)^2$$

La SCE intra est déterminée en calculant la SCE totale à l'aide de l'Équation P-2, et en sachant que la SCE totale est égale à l'addition de la SCE inter et de la SCE intra.

Équation P-2 – Calcul de la SCE totale

$$SCE\ totale = \Sigma ng\ (m - Yg)^2$$

Finalement, l'intensité de la relation notée « I » est calculée à l'aide du rapport entre la SCE inter et la SCE totale. Cette intensité varie entre :

– 0, lorsque les variables sont indépendantes, c'est-à-dire lorsque les moyennes sont confondues et les variations intra-classes importantes
– 1, lorsque les variables sont dépendantes, c'est-à-dire lorsque les moyennes sont très différentes et la variance intra très faible

Q. Annexe – Résultats des ANOVA

Les analyses ANOVA ont été menées sur les différents réseaux en prenant comme variable continue (**Tableau Q-1 à 26**) :

- soit la longueur des portions de tronçon de réseau ;
- soit la part de la longueur des portions de tronçon de réseau sur la longueur des tronçons de réseau.

Nous observons, et ce quel que soit le terrain d'analyse :

- des longueurs moyennes et des parts moyennes similaires de portions de tronçons de voirie entre les différents éléments constitutifs ;
- des variances comparables mais généralement élevées ;
- des écarts-types comparables.

Finalement, les analyses ANOVA traduisent une absence de relation entre la longueur des portions de tronçon de réseau et leur localisation sous la voirie. Cela signifie que l'on observe une diversité des longueurs des portions de tronçon de réseau sous tous les éléments de voirie.

Ainsi, même s'il existe de nombreuses petites portions de tronçon de réseau, le croisement des réseaux et des éléments de voirie n'a pas conduit à produire davantage de petites portions sous un type d'élément de voirie en particulier.

Tableau Q-1 – Résultat ANOVA sur le réseau d'assainissement de Victoria

	Effectif	long moy	Variance	ET	SCE	% moy	Variance	ET	SCE
chaussée	24623	16	876	30	21577623	28,5	1635	40	40268431
trottoir	5732	9	344	19	1971103	15,7	665	26	3809873
Ensemble	30355	15	784	28	23548727	26,1	1477	38	44078304
SCE totale					23548727				44078304
SCE inter classe					264644				761341
SCE intra classe					23284083				43316963
intensité de la relation					**0,01**				**0,02**
Nb degrés liberté inter-classes					1				1
Nb degrés liberté intra-classes					30354				30354
F de Fischer observé					345				534
F théorique (alpha 0,05)					3,84				3,84

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau Q-2 – Résultat ANOVA sur le réseau d'assainissement de Cachan

	Effectif	long moy	Variance	ET	SCE	% moy	Variance	ET	SCE
autre	26	6	83	9	2147	18	404	20	10496
chaussée	2903	12	194	14	562392	48	1521	39	4415479
chaus. cycle	43	8	89	9	3818	33	967	31	41597
zone. piéton	1768	9	140	12	246638	38	1335	36,5	2360353
statio.	255	5	45	7	11387	22	588	24	149894
Ensemble	4995	11	169	13	826382	43	1447	38	6977818
SCE totale					826382				6977818
SCE inter classe					16253				250912
SCE intra classe					810129				6726906
intensité de la relation					**0,02**				**0,04**
Nb degrés liberté inter-classes					4				4
Nb degrés liberté intra-classes					4991				4991
F de Fischer observé					100				186
F théorique (alpha 0,05)					2,38				2,38

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau Q-3 – Résultat ANOVA sur le réseau d'électricité de Cachan

	Effectif	long moy	Variance	ET	SCE	% moy	Variance	ET	SCE
autre	165	5,8	86	9	14252	56	1381	37	227886
chaussée	4848	5,3	82	9	397900	46	1410	38	6833675
chaus. cycle	161	6,1	140	12	22511	35	1195	35	192435
zone. piéton	12791	7,0	166	13	2118780	63	1573	40	20123610
statio.	960	3,8	50	7	48286	38	1359	37	1304296
Ensemble	18925	6,4	138	12	2601730	57	1589	40	28681901
SCE totale					2601730				28681901
SCE inter classe					16086				1391262
SCE intra classe					2585644				27290639
intensité de la relation					**0,01**				**0,05**
Nb degrés liberté inter-classes					4				4
Nb degrés liberté intra-classes					18921				18921
F de Fischer observé					118				965
F théorique (alpha 0,05)					2,38				2,38

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau Q-4 – Résultat ANOVA sur le réseau de gaz de Cachan

	Effectif	long moy	Variance	ET	SCE	% moy	Variance	ET	SCE
autre	12	4	3	1,8	39	21	426	21	5107
chaussée	1744	10	277	16,6	482504	34	1145	34	1996666
chaus. cycle	118	12	286	16,9	33772	26	824	29	97183
zone. piéton	2690	12	386	19,7	1039171	39	1407	38	3783806
statio.	380	7	97	9,8	36857	17	541	23	205643
Ensemble	4944	11	325	18,0	1592343	35	1266	36	6088404
SCE totale					1592343				6088404
SCE inter classe					13991				170217
SCE intra classe					1578352				5918188
intensité de la relation					**0,01**				**0,03**
Nb degrés liberté inter-classes					4				4
Nb degrés liberté intra-classes					4940				4940
F de Fischer observé					44				142
F théorique (alpha 0,05)					2,38				2,38

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau Q-5 – Résultat ANOVA sur le réseau de gaz de Rouen centre-ville

	Effectif	long moy	Variance	ET	SCE	% moy	Variance	ET	SCE
chaussée	9 013	6,5	99	9,9	890 559	62,5	1396	37,4	12 584 422
piétonnier	10 104	5,8	89	9,4	896 158	68,9	1372	37,0	13 860 313
Statio.	1 554	7,7	149	12,2	231 937	60,2	1411	37,6	2 191 959
Ensemble	20 671	6	98	9,9	2 018 653	65	1397	37,4	28 636 694
SCE totale					2 018 653				28 636 694
SCE inter classe					6 519				240 128
SCE intra classe					2 012 135				28 396 566
intensité de la relation					**0,00**				**0,01**
Nb degrés liberté inter-classes					2				2
Nb degrés liberté intra-classes					20 669				20 669
F de Fischer observé					67				175
F théorique (alpha 0,05)					3				3

Auteur : A. Pavard 2020

R. Annexe – Démarche d'analyse du Chi²

Le test du Chi2 est adapté aux relations de variables discrètes, c'est-à-dire aux variables qualitatives et aux variables ordinaux et quantitatifs discrétisés (dont les valeurs ont été regroupées en classes). Au même titre que l'ANOVA, il s'agit d'une analyse statistique dite « bivariée », par laquelle il est question de tester la forme et la significativité de la relation entre deux variables. Le Chi² s'applique sur un tableau de contingence établi à partir du croisement de deux variables issues d'un tableau élémentaire (**Tableau R-1**).

Tableau R-1 – Exemple de tableau élémentaire d'origine, et des variables prises en compte pour construire le tableau de contingence

Id_portion	Implant. Voirie (X)	Type voirie (Y)	Longueur
1	Chaussée	Départementale	100
2	Trottoir	Départementale	80
3	Trottoir	Autre	50
4	Stationnement	Autre	60
5	Chaussée	Autre	150
(…)	(…)	(…)	(…)

Auteur : A. Pavard 2020

Le tableau de contingence dénombre les éléments appartenant simultanément aux modalités de la variable X et de la variable Y (**Tableau R-2**). Le dénombrement peut se faire soit par unité d'observation, ici le nombre de portions de tronçon de réseau, ou par une autre valeur décrivant une quantité, telle que la longueur des portions de tronçon de réseau. X prendra k<n modalités et Y prendra p<n modalités. Le tableau de contingence aura alors p * k cases (nombre de croisements possibles).

Tableau R-2 – Exemple de tableau de contingence

	Dép.	Autre	(…)	Total
Chaussée	$N_{ChausDep}$	$N_{ChausAut}$	(…)	$N_{Chaus.}$
Stationnement	$N_{StatioDep}$	$N_{StatioAut}$	(…)	$N_{Statio.}$
Trottoir	$N_{TrotDep}$	$N_{TrotAut}$	(…)	$N_{Trot.}$
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Total	$N_{.Dep}$	$N_{.Aut}$	(…)	$N_{..}$

Auteur : A. Pavard 2020

Par ce croisement, nous étudions la répartition des portions de tronçon de réseau sous les voiries. Nous cherchons à savoir s'il existe une logique quant à l'enfouissement des réseaux selon le type de voirie (nationale, départementale ou autre) et l'élément constitutif de la voirie (chaussée,

stationnement ou encore trottoir). **Notre hypothèse est celle d'un lien entre le type de la voirie et l'élément constitutif sous lequel est enfoui un réseau technique**.

Un tableau de contingence n'indique que des effectifs bruts. De ce fait, il ne permet pas de comparer les proportions des champs de tel ou tel type. Il ne permet pas de répondre directement à des questions telles que "la proportion de réseaux passant sous les voiries de rangs administratifs supérieurs est-elle plus importante sous les dépendances que sous les chaussées ? ». Des tableaux complémentaires permettent d'identifier des premières tendances : les tableaux de profils en lignes et colonnes.

Le tableau de profils en lignes s'obtient en divisant l'effectif de chaque case par le total de la ligne correspondante (**Tableau R-3**). Le tableau de profils en colonnes s'obtient à l'inverse en divisant l'effectif de chaque case par le total de la colonne correspondante (**Tableau R-4**).

Tableau R-3 – Construction du tableau de profils en lignes

	Dép.	**Autre**	**(…)**	**Total**
Chaussée	$N_{ChausDep} / N_{Chaus.} \times 100$	$N_{ChausAut} / N_{Chaus.} \times 100$	(…)	$N_{Chaus.} / N_{Chaus.} \times 100$
Stationnement	$N_{StatioDep} / N_{Statio.} \times 100$	$N_{StatioAut} / N_{Statio.} \times 100$	(…)	$N_{Statio.} / N_{Statio.} \times 100$
Trottoir	$N_{TrotDep} / N_{Trot.} \times 100$	$N_{TrotAut} / N_{Trot.} \times 100$	(…)	$N_{Trot.} / N_{Trot.} \times 100$
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Total	$N_{.Dep} / N_{..} \times 100$	$N_{.Aut} / N_{..} \times 100$	(…)	$N_{..} / N_{..} \times 100$

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau R-4 – Construction du tableau de profils en colonnes

	Dép.	**Autre**	**(…)**	**Total**
Chaussée	$N_{ChausDep} / N_{Dep.} \times 100$	$N_{ChausAut} / N_{Aut.} \times 100$	(…)	$N_{Chaus.} / N_{..} \times 100$
Stationnement	$N_{StatioDep} / N_{Dep.} \times 100$	$N_{StatioAut} / N_{Aut.} \times 100$	(…)	$N_{Statio.} / N_{..} \times 100$
Trottoir	$N_{TrotDep} / N_{Dep.} \times 100$	$N_{TrotAut} / N_{Aut.} \times 100$	(…)	$N_{Trot.} / N_{..} \times 100$
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Total	$N_{.Dep} / N_{Dep.} \times 100$	$N_{.Aut} / N_{Aut.} \times 100$	(…)	$N_{..} / N_{..} \times 100$

Auteur : A. Pavard 2020

L'identification de tendances ne valide pas l'existence d'une relation. Le Chi² permet de tester une relation statistique en comparant des données observées (du tableau de contingence) à des données théoriques (un tableau d'effectifs théoriques), « comme si » les deux variables étaient indépendantes. Les effectifs théoriques notés « N'ij » sont les effectifs que l'on obtiendrait s'il n'y avait aucun lien entre les modalités des deux variables X et Y. En d'autres termes, il s'agit des effectifs obtenus si l'attribution de chaque modalité se faisait de façon aléatoire entre X et Y. La reconstitution des effectifs théoriques, est réalisée à l'aide des marges (les totaux en lignes et

colonnes) du tableau des effectifs observés (**Tableau R-5**). Ces marges définissent les probabilités conditionnelles qu'un individu reçoive une modalité de X ou de Y.

Tableau R-5 – Construction du tableau des effectifs théoriques

	Dép.	**Autre**	**(…)**	**Total**
Chaussée	$N_{Chaus.} \times N_{.Dep} / N_{..}$	$N_{Chaus.} \times N_{.Aut} / N_{..}$	(…)	$N_{Chaus.}$
Stationnement	$N_{Statio.} \times N_{.Dep} / N_{..}$	$N_{Statio.} \times N_{.Aut} / N_{..}$	(…)	$N_{Statio.}$
Trottoir	$N_{Trot.} \times N_{.Dep} / N_{..}$	$N_{Trot.} \times N_{.Aut} / N_{..}$	(…)	$N_{Trot.}$
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Total	$N_{.Dep}$	$N_{.Aut}$	(…)	$N_{..}$

Auteur : A. Pavard 2020

La comparaison des effectifs observés et théoriques se fait par la construction d'un tableau des écarts à l'indépendance (**Tableau R-6**). Ces écarts, notés « Dev ij » sont obtenus par la soustraction des effectifs théoriques « N'ij » aux effectifs observés « Nij ». De ce fait, le signe des écarts obtenus indique les sur ou sous-représentations des modalités.

Tableau R-6 – Construction du tableau des écarts à l'indépendance

	Dép.	**Autre**	**(…)**	**Total**
Chaussée	$N_{ChausDep} - N'_{ChausDep}$	$N_{ChausAut} - N'_{ChausAut}$	(…)	$N_{Chaus.} - N'_{Chaus.}$
Stationnement	$N_{StatioDep} - N'_{StatioDep}$	$N_{StatioAut} - N'_{StatioAut}$	(…)	$N_{Statio.} - N'_{Statio.}$
Trottoir	$N_{TrotDep} - N'_{TrotDep}$	$N_{TrotAut} - N'_{TrotAut}$	(…)	$N_{Trot.} - N'_{Trot.}$
(…)	(…)	(…)	(…)	(…)
Total	$N_{.Dep} - N'_{.Dep}$	$N_{.Aut} - N'_{.Aut}$	(…)	$N_{..} - N'_{..}$

Auteur : A. Pavard 2020

Le test du Chi2 permet ensuite de déterminer avec un seuil de significativité si les événements sont indépendants ou non. Pour cela, il vise, tout en tenant compte du volume des effectifs observés à :

- comparer les écarts entre effectifs observés et effectifs théoriques avec une mesure unique appelée « Chi2obs) » ;
- comparer cette valeur avec la valeur obtenue lors d'un tirage aléatoire, appelée le « Chi2 théorique » ;

Avant de pratiquer le test du Chi2 3 conditions doivent être préalablement validées :

- l'effectif total du tableau des effectifs observés doit être supérieur ou égal à 20 ($N_{..}>20$) ;
- l'effectif marginal du tableau des effectifs observés doit toujours être supérieur ou égal à 5 ($N_{i.}, N_{.j} >5$) ;

– les valeurs du tableau des effectifs théoriques (N'ij) doivent être supérieures à 5 dans 80% des cases du tableau.

Dès lors que les conditions sont validées, le test du Chi² peut être réalisé en suivant les étapes suivantes :

1) Poser l'hypothèse H0 à tester : « Il n'y a pas de relation entres les variables X et Y »
2) Calculer les écarts relatifs à l'indépendance, appelés Chi² locaux (**Équation R-1**). Plus un Chi² local est élevé, plus la déviation entre valeurs observées et valeurs théoriques est significative sur le plan statistique

Équation R-1 – Chi² locaux

$$Chi^2\ ij\ =\ (Nij - N'ij)^2\ /\ N'ij$$

3) Calculer la valeur du Chi² du tableau des observations (Chi2 obs). Le Chi² observé est égal à la somme des Chi² locaux et est calculé selon l'**Équation R-2**

Équation R-2 – Chi² observé

$$Chi^2\ obs\ =\ \Sigma i \Sigma j\ Chi^2\ ij$$

4) Déterminer le nombre de degrés de liberté « z » du tableau étudié. « z » dépend du nombre de lignes k et du nombre de colonnes p (**Équation R-3**). Il s'agit du nombre de cases pouvant produire des déviations indépendantes les unes des autres.

Équation R-3 – Degrés de liberté « z »

$$z\ =\ (k-1) * (p-1)$$

5) Fixer un risque d'erreur (α). Le risque d'erreur est le pourcentage de chance de se tromper en rejetant l'hypothèse H0. Les seuils de significativités les plus utilisés sont 0.05, 0.01 et 0.001, soit respectivement 5%, 1% et 0,1% d'erreur possible.
6) Consulter la valeur du Chi² théorique en fonction et z et de α, noté « Chié(z,α) », à partir de la table du test du Chi2.
7) Comparer le Chi²obs et le Chi²(z,α). Si Chi2 obs < Chi2 (z,α), alors H0 est vraie. Il y a indépendance entre les deux caractères. À l'inverse, H0 est fausse, il y a une relation de dépendance entre les deux variables avec un risque d'erreur de α %.

Le test du Chi² peut être complété par une analyse de l'intensité de la relation à l'aide par exemple du test de Tschuprow. Ce dernier est calculé à l'aide de l'**Équation R-4.**

Équation R-4 – Formule de Tschuprow

$$T\ de\ Tschuprow = racine\left(\left(\frac{Chi^2 observé}{Eff.total}\right)/\ \text{racine(degré de liberté)}\right)$$

Le résultat du test de Tschuprow est compris entre 0 et 1 et s'apparente à un coefficient de corrélation.

S. Annexe – Résultats des Chi²

Tous les tests de Chi² réalisés attestent d'une relation entre la localisation des réseaux selon le type de voirie et l'élément constitutif. Malgré tout, une analyse de l'intensité des relations indique que les relations sont de faible intensité.

Tableau S-1 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'assainissement à Victoria

		Chaussée	Trottoir	Total
Effectifs observés	Artères	89 985	12 474	102 459
	Collectrices	64 479	6 370	70 849
	Autres	250 722	32 236	282 958
	Total	405 186	51 079	456 265
Profils lignes				
	Artères	88	12	100
	Collectrices	91	9	100
	Autres	89	11	100
	Total	89	11	100
Profils colonnes				
	Artères	22	24	22
	Collectrices	16	12	16
	Autres	62	63	62
	Total	100	100	100
Effectifs théoriques				
	Artères	90 988	11470	102 459
	Collectrices	62 917	7932	70 849
	Autres	251 281	31677	282 958
	Total	405 186	51079	456 265
Ecarts indép.				
	Artères	-1 003	1 003	
	Collectrices	1 562	-1 562	
	Autres	-558	558	
Chi² locaux				
	Artères	11	88	
	Collectrices	39	308	
	Autres	1	10	
Validité test				
	Eff. Tot >20	456 265	☑	
	Min Eff. Marginaux >5	51 079	☑	
	% cases < 5	0,0	☑	
Vérification de la relation				
	Chi² observé	456		
	Degré liberté	2		
	Chi² théorique(P = 0,05)	**5,9915**		
	Tschuprow's T	0,03		
	Observation	**Khi² obs > Khi² Théo** : On peut affirmer avec un risque d'erreur de 5% qu'il existe une relation entre la localisation d'un tronçon d'assainissement sous un élément de la voirie et le type de voirie		
	Conclusion	**T < 0,20** : La relation est faible		

Tableau S-2 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'assainissement à Cachan

		Autre	Chaussée	Chaus. Cycl.	Esp. Piéton	Statio.	Total
Eff. Obs.	Autre	69	22 446	25	10 052	768	33 361
	Dep.	79	12 233	328	6 304	607	19 552
	Total	149	34 679	353	16 357	1375	52 913
Profils lignes	Autre	0,2	67,3	0,1	30,1	2,3	100,0
	Dep.	0,4	62,6	1,7	32,2	3,1	100,0
	Total	0,3	65,5	0,7	30,9	2,6	100,0
Profils colonnes	Autre	46,6	64,7	7,1	61,5	55,9	63,0
	Dep.	53,4	35,3	92,9	38,5	44,1	37,0
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Eff. Théo.	Autre	94	21 865	223	10 313	867	33 361
	Dep.	55	12 814	131	6 044	508	19 552
	Total	149	34 679	353	16 357	1375	52 913
Ecarts indép.	Autre	-25	581	-198	-260	-99	0
	Dep.	25	-581	198	260	99	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Chi² locaux	Autre	6	15	175	7	11	0
	Dep.	11	26	299	11	19	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Validité test	Eff. Tot >20	52913			☑		
	Eff. Marginaux >5	149			☑		
	% cases < 5	0,0			☑		
Vérification de la relation	Chi² observé				581		
	Degré liberté				4		
	Chi² théorique(P = 0,05)				**9,4877**		
	Tschuprow's T				0,07		
	Observation	**Khi² obs > Khi² Théo** : On peut affirmer avec un risque d'erreur de 5% qu'il existe une relation entre la localisation d'un tronçon d'assainissement sous un élément de la voirie et le type de voirie					
	Conclusion	**T < 0,20** : La relation est faible					

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau S-3 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon d'électricité à Cachan

		Autre	Chaussée	Chaus. Cycl.	Esp. Piéton	Statio.	Total
Eff. Obs.	Autre	865	17 413	498	56 953	2 321	78 050
	Dep.	90	8 502	481	32 230	1 337	42 640
	Total	954	25 915	978	89 183	3 658	120 689
Profils lignes	Autre	1,1	22,3	0,6	73,0	3,0	100,0
	Dep.	0,2	19,9	1,1	75,6	3,1	100,0
	Total	0,8	21,5	0,8	73,9	3,0	100,0
Profils colonnes	Autre	90,6	67,2	50,9	63,9	63,4	64,7
	Dep.	9,4	32,8	49,1	36,1	36,6	35,3
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Eff. Théo.	Autre	617	16 760	633	57 674	2 366	78 050
	Dep.	337	9 156	346	31 508	1 292	42 640
	Total	954	25 915	978	89 183	3 658	120 689
Ecarts indép.	Autre	248	654	-135	-721	-45	0
	Dep.	-248	-654	135	721	45	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Chi² locaux	Autre	99	26	29	9	1	0
	Dep.	182	47	53	17	2	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Validité test	Eff. Tot >20	120 689			☑		
	Eff. Marginaux >5	954			☑		
	% cases < 5	0,0			☑		
Vérification de la relation	Chi² observé			463			
	Degré liberté			4			
	Chi² théorique(P = 0,05)			**9,4877**			
	Tschuprow's T			0,04			
	Observation	**Khi² obs > Khi² Théo** : On peut affirmer avec un risque d'erreur de 5% qu'il existe une relation entre la localisation d'un tronçon d'électricité sous un élément de la voirie et le type de voirie					
	Conclusion	**T < 0,20** : La relation est faible					

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau S-4 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon de gaz à Cachan

		Autre	Chaussée	Chaus. Cycl.	Esp. Piéton	Statio.	Total
Eff. Obs.	Autre	33	11 970	895	23 842	1 252	37 992
	Dep.	13	5 571	507	9 532	1 359	16 982
	Total	46	17 541	1 402	33 374	2 611	54 974
Profils lignes	Autre	0,1	31,5	2,4	62,8	3,3	100,0
	Dep.	0,1	32,8	3,0	56,1	8,0	100,0
	Total	0,1	31,9	2,6	60,7	4,7	100,0
Profils colonnes	Autre	71,5	68,2	63,8	71,4	47,9	69,1
	Dep.	28,5	31,8	36,2	28,6	52,1	30,9
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Eff. Théo.	Autre	32	12 122	969	23 065	1 804	37 992
	Dep.	14	5 419	433	10 310	806	16 982
	Total	46	17 541	1 402	33 374	2 611	54 974
Ecarts indép.	Autre	1	-152	-74	778	-553	0
	Dep.	-1	152	74	-778	553	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Chi² locaux	Autre	0	2	6	26	169	0
	Dep.	0	4	13	59	379	0
	Total	0	0	0	0	0	0
Validité test	Eff. Tot >20	5 497			☑		
	Eff. Marginaux >5	46			☑		
	% cases < 5	0,0			☑		
Vérification de la relation	Chi² observé			657			
	Degré liberté			4			
	Chi² théorique(P = 0,05)			**9,4877**			
	Tschuprow's T			0,08			
	Observation	**Khi² obs > Khi² Théo** : On peut affirmer avec un risque d'erreur de 5% qu'il existe une relation entre la localisation d'un tronçon de gaz sous un élément de la voirie et le type de voirie					
	Conclusion	**T < 0,20** : La relation est faible					

Auteur : A. Pavard 2020

Tableau S-5 – Synthèse analyse du Chi² : Tronçon de gaz à Rouen centre-ville

		Chaussée	Piétonnier	Stationnement	Total
Eff. Obs.	Autre	52 610	52 895	10 862	116 368
	Dép.	5 807	5 140	1 099	12 047
	Nat.	537	86	0	623
	Total	58 955	58 121	11 961	129 037
Prof. lignes					
	Autre	45	45	9	100
	Dép.	48	43	9	100
	Nat.	86	14	0	100
	Total	46	45	9	100
Prof. Col.					
	Autre	89	91	91	90
	Dép.	10	9	9	9
	Nat.	1	0	0	0
	Total	100	100	100	100
Eff. Théo.					
	Autre	53 166	52 415	10 787	116 368
	Dép.	5 504	5 426	1 117	12 047
	Nat.	285	280	58	623
	Total	58 955	58 121	11 961	129 037
Ecarts indép.					
	Autre	-556	481	75	0
	Dép.	304	-286	-18	0
	Nat.	252	-195	-58	0
	Total	0	0	0	0
Chi² locaux					
	Autre	6	4	1	0
	Dép.	17	15	0	0
	Nat.	224	135	58	0
	Total	0	0	0	0
Validité test					
	Eff. Tot >20	129037	☑		
	Eff. Marginaux >5	623	☑		
	% cases < 5	0	☑		
Vérification de la relation					
	Chi² observé		459		
	Degré liberté		4		
	Chi² théorique(P = 0,05)		**9,4877**		
	Tschuprow's T		0,04		
	Observation	**Khi² obs > Khi² Théo** : On peut affirmer avec un risque d'erreur de 5% qu'il existe une relation entre la localisation d'un tronçon de gaz sous un élément de la voirie et le type de voirie			
	Conclusion	**T < 0,20** : La relation est faible			

Auteur : A. Pavard 2020

T. Annexe – Analyse des revêtements de voirie à Cachan

À partir de la répartition des matériaux de revêtement de voirie à Cachan, nous retrouvons les principaux matériaux identifiés en Partie III. Nous constatons que ces matériaux sont soit utilisés individuellement pour couvrir tout un élément de voirie (revêtement à matériau unique), ou au contraire être combinés (revêtement à matériau composé). Plusieurs constats peuvent être faits sur Cachan (**Tableau T-1**) :

- Les revêtements à matériau unique sont majoritaires (environ 95%) ;
- Les bétons bitumineux sont les matériaux les plus utilisés : 71,2% de BB noir et 8,8% de BB rouge ;
- Il existe des logiques préférentielles de matériaux selon la nature des éléments constitutifs :
  - Les chaussées sont généralement revêtues de bétons bitumineux noirs ;
  - Les asphaltes, bétons bitumineux rouges, sols stabilisés et les matériaux modulaires sont principalement utilisés pour les dépendances et notamment les espaces piétonniers.

Tableau T-1 – Revêtement de voirie à Cachan selon les éléments constitutifs

		Chaussée	**Piétonnier**			**Cyclable**	**Stationnement**		**Autre**		**Total**	
	Matériaux	chaussée	chemin	esp. piét.	trottoir	propre	parking	propre	giratoire	esp. vert	(m²)	(%)
revêtement matériau unique	Asphalte	0	0	0	375	0	0	0	0	0	375	0,0
	BB noir	400042	17631	157	114830	5239	66496	9138	0	0	613531	**71,2**
	BB noir grenaillé	105	0	0	90	0	0	0	0	0	195	0,0
	BB Rouge	16249	11110	2121	42089	821	3607	0	0	0	75997	**8,8**
	BH	704	8777	3827	4901	0	2312	0	0	0	20521	2,4
	Sol Stab.	528	4312	9995	115	0	266	0	0	0	15216	1,8
	Gravier	239	461	0	0	0	0	0	0	0	699	0,1
	Terre	169	56	0	218	0	203	0	0	0	646	0,1
	Végétalisé	4238	26858	0	8717	1	10721	884	101	32609	84129	**9,8**
	Alv. BH	0	0	0	0	0	1491	0	0	0	1491	0,2
	Briques	0	0	0	609	0	0	0	0	0	609	0,1
	Briques BB Rouge	0	0	370	0	0	0	0	0	0	370	0,0
	Dalles BH	0	117	748	500	0	373	0	0	0	1738	0,2
	Dalles nat.	0	0	4358	0	0	0	0	0	0	4358	0,5
	Pavés nat.	4362	1663	0	3202	0	0	459	0	0	9686	1,1
revêtement	**Revêt. Majorité BB noir**	**8176**	**919**	**0**	**10504**	**0**	**496**	**64**	**0**	**0**	**20159**	**2,3**
	BB noir / BB Rouge	*1679*	*112*	*0*	*3030*	*0*	*316*	*0*	*0*	*0*	*5137*	*0,6*
	BB noir / BB Rouge / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*246*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*246*	*0,0*

	BB noir / BH	*879*	*807*	*0*	*4469*	*0*	*180*	*0*	*0*	*0*	*6335*	*0,7*
	BB noir / BH / Pavés BH	*2834*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*2834*	*0,3*
	BB noir / BH / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*822*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*822*	*0,1*
	BB noir / Dalles	*0*	*0*	*0*	*366*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*366*	*0,0*
	BB noir / Pavés BH	*422*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*422*	*0,0*
	BB noir / Pavés nat.	*2362*	*0*		*1572*			*64*			*3998*	*0,5*
	Revêt. Majorité BB rouge	**1719**	**52**	**0**	**2208**	**0**	**1212**	**0**	**0**	**0**	**5192**	**0,6**
	BB Rouge / BB noir grenaillé	*0*	*0*	*0*	*48*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*48*	*0,0*
	BB Rouge / BH	*0*	*0*	*0*	*681*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*681*	*0,1*
	BB Rouge / Dalles BH	*1719*	*0*	*0*	*244*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1964*	*0,2*
	BB Rouge / Dalles BH / Dalle marbre	*0*	*0*	*0*	*734*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*734*	*0,1*
	BB Rouge / Pavés nat.	*0*	*52*	*0*	*500*	*0*	*1212*	*0*	*0*	*0*	*1765*	*0,2*
	Revêt. Majorité BH	**34**	**0**	**0**	**1922**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1957**	**0,2**
	BH / BB noir	*34*	*0*	*0*	*222*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*256*	*0,0*
	BH / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*1700*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1700*	*0,2*
	Revêt. Majorité Graviers	**0**	**269**	**0**	**0**	**0**	**1532**	**0**	**0**	**0**	**1801**	**0,2**
	Gravier + BH	*0*	*269*	*0*	*0*	*0*	*1532*	*0*	*0*	*0*	*1801*	*0,2*
	Revêt. Majorité Pavés	**1746**	**548**	**0**	**870**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**3164**	**0,4**
	Pavés nat. / BH	*380*	*548*	*0*	*810*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1739*	*0,2*
	Pavés nat. / BB noir	*1366*	*0*	*0*	*59*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*1426*	*0,2*
	N.R	0	0	0	0	0	0	0	315	5	320	0,0
	Total	**438311**	**72774**	**21577**	**191149**	**6061**	**88708**	**10545**	**416**	**32614**	**862155**	**100,0**

Auteur : A. Pavard 2020

Le croisement entre les revêtements et la localisation des réseaux techniques enfouis apporte peu d'éléments supplémentaires (**Tableau T-2**). Compte tenu de la forte proportion d'éléments de voirie revêtus de béton bitumineux, il est logique de trouver une majorité de réseaux enfouis sous les éléments revêtus de ces matériaux. Nous constatons toutefois un enfouissement à hauteur de 72,2% sous les éléments revêtus de BB noir et à hauteur de 15,2% sous les éléments revêtus de BB rouge. Le fait que les BB rouge soient ici davantage représenté est lié à la logique préférentielle d'implanter les réseaux sous les trottoirs, lesquels sont souvent revêtus de BB rouge à Cachan.

Tableau T-2 – Synthèse de localisation des réseaux technique selon l'élément constitutif de la voirie et le revêtement de voirie

		Chaussée	**Piétonnier**			**Cyclable**	**Stationnement**		**Autre**		**Total**	
	Matériaux	chaussée	chemin	esp. piét.	trottoir	propre	parking	propre	giratoire	esp. vert	(m²)	(%)
rev.	Asphalte	0	0	0	99	0	0	0	0	0	99	0,0

	BB noir	72217	1350	94	83110	2091	2225	4045	0		165132	**72,2**
	BB noir grenaillé	32	0	0	57	0	0	0	0	00	90	0,0
	BB Rouge	1873	758	1283	30195	641	32	0	0	0	34782	**15,2**
	BH	217	791	137	2030	0	140	0	0	0	3316	1,5
	Sol Stab.	115	93	411	12	0	46	0	0	0	677	0,3
	Gravier	185	0	0	0	0	0	0	0	0	185	0,1
	Terre	45	60	0	316	0	4	0	0	0	424	0,2
	Végétalisé	101	0	1716	2376	1	490	263	5	1089	6042	2,6
	Alv. BH	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0,0
	Briques	0	0	0	210	0	0	0	0	0	210	0,1
	Briques BB Rouge	0	0	123	0	0	0	0	0	0	123	0,1
	Dalles BH	0	13	20	0	0	14	0	0	0	47	0,0
	Dalles nat.	0	0	392	0	0	0	0	0	0	392	0,2
	Pavés nat.	658	265	56	2149	0	0	161	0	0	3290	1,4
revêtement matériau composé	**Revêt. Majorité BB noir**	**1215**	**141**	**0**	**7956**	**0**	**62**	**32**	**0**	**0**	**9407**	**4,1**
	BB noir / BB Rouge	*60*	*141*	*0*	*2223*	*0*	*10*	*0*	*0*	*0*	*2434*	*1,1*
	BB noir / BB Rouge / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*396*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*396*	*0,2*
	BB noir / BH	*229*	*0*	*0*	*2564*	*0*	*52*	*0*	*0*	*0*	*2845*	*1,2*
	BB noir / BH / Pavés BH	*411*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*411*	*0,2*
	BB noir / BH / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*970*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*970*	*0,4*
	BB noir / Dalles	*0*	*0*	*0*	*560*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*560*	*0,2*
	BB noir / Pavés BH	*94*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*94*	*0,0*
	BB noir / Pavés nat.	*422*	*0*	*0*	*1244*	*0*	*0*	*32*	*0*	*0*	*1698*	*0,7*
	Revêt. Majorité BB rouge	**610**	**41**	**0**	**1304**	**0**	**109**	**0**	**0**	**0**	**2064**	**0,9**
	BB Rouge / BB noir grenaillé	*0*	*0*	*0*	*6*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*6*	*0,0*
	BB Rouge / BH	*0*	*0*	*0*	*543*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*543*	*0,2*
	BB Rouge / Dalles BH	*610*	*0*	*0*	*5*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*615*	*0,3*
	BB Rouge / Dalles BH / Dalle marbre	*0*	*0*	*0*	*110*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*110*	*0,0*
	BB Rouge / Pavés nat.	*0*	*41*	*0*	*641*	*0*	*109*	*0*	*0*	*0*	*790*	*0,3*
	Revêt. Majorité BH	**1**	**0**	**0**	**857**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**858**	**0,4**
	BH / BB noir	*1*	*0*	*0*	*47*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*48*	*0,0*
	BH / Pavés nat.	*0*	*0*	*0*	*810*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*810*	*0,4*
	Revêt. Majorité Graviers	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**15**	**0**	**0**	**0**	**15**	**0,0**
	Gravier + BH	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*15*	*0*	*0*	*0*	*15*	*0,0*
	Revêt. Majorité Pavés	**866**	**410**	**0**	**89**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1364**	**0,6**
	Pavés nat. / BH	*274*	*410*	*0*	*13*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*697*	*0,3*
	Pavés nat. / BB noir	*592*	*0*	*0*	*76*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*668*	*0,3*
	N.R	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*55*	*0*	*55*	*0,0*
	Total (m²)	78136	3922	4232	130761	2734	3142	4501	60	1089	228577	100,0

Auteur : A. Pavard 2020

U. Annexe – Analyse des dégradations de voirie à Cachan

Compte tenu de la précision limitée des informations collectées sur les dégradations de voirie, et de la non exhaustivité de ces informations, nous limitons nos analyses aux éléments de voirie pour lesquels nous avons réalisé des levés. Par ailleurs, pour ces mêmes raisons, nous ne jugeons pas pertinents de réaliser un croisement entre les informations de dégradation de voirie et la localisation des réseaux.

Le **Tableau U-1** indique la proportion des éléments de voirie auscultés présentant des traces d'un remblayage de tranchées ou de réparations ponctuelles telles que le rebouchage de nids-de-poule. Ainsi, 47% des éléments de voirie ont fait l'objet d'une ouverture de tranchée, tandis que seulement 25,6% des éléments de voirie ont subi une réparation ponctuelle.

Tableau U-1 – Synthèse état de la voirie de Cachan : tranchée remblayée et réparation patch

	Tranchées Total (nb)	Tranchées Total (%)	Rép. Patch Total (nb)	Rép. Patch Total (%)
Absence	893	**53,0**	1255	**74,4**
Présence	793	47,0	431	25,6

Auteur : A. Pavard 2020

Le **Tableau U-2** synthétise le croisement entre la présence d'une trace de tranchée et les différentes dégradations observées sur les éléments de voirie. Ainsi, nous constatons :

- concernant les déformations, que 84% des éléments de voirie ne présentent aucune déformation. Dès lors qu'une tranchée a été réalisée, la probabilité d'y trouver une déformation, notamment de type affaissement est plus importante ;
- concernant les fissurations, que 54% des éléments de voirie présentent au moins une fissuration. Là aussi, la réalisation d'une tranchée semble augmenter la probabilité qu'une fissuration se produise par la suite (faïençage ou toutes fissurations confondues) ;
- concernant les arrachements, que 84% des éléments de voirie ne présentent aucun arrachement. La réalisation d'une tranchée tend également là encore à accroitre la probabilité d'observer un arrachement, notamment de type nids-de-poule.

Tableau U-2 – Synthèse état de la voirie de Cachan : Dégradations

		Abs tranch (nb)	Abs tranch (%)	Prés tranch (nb)	Prés tranch (%)	Tot (nb)	Tot (%)
Déformations	**Aucune**	**809**	**48,0**	**612**	**36,3**	**1421**	84,3
	Prés. déformation	**84**	**5,0**	**181**	**10,7**	**265**	**15,7**
	AF	*64*	*3,8*	*161*	*9,5*	*225*	*13,3*
	AF / BO	*2*	*0,1*		*0,0*	*2*	*0,1*
	AF / GO / BO	*1*	*0,1*	*1*	*0,1*	*2*	*0,1*
	BO	*3*	*0,2*	*2*	*0,1*	*5*	*0,3*

	BO / AF	*1*	*0,1*		*0,0*	*1*	*0,1*
	BO / GO	*10*	*0,6*	*14*	*0,8*	*24*	*1,4*
	GO	*3*	*0,2*	*2*	*0,1*	*5*	*0,3*
	OR	*0*	*0,0*	*1*	*0,1*	*1*	*0,1*
Fissurations	**Aucune**	**629**	**34,1**	**246**	**11,9**	**875**	**46,0**
	Prés. Fissure	**264**	**17,5**	**547**	**36,5**	**811**	**54,0**
	FA	*51*	*3,0*	*101*	*6,0*	*152*	*9,0*
	FA / TR		*0,0*	*1*	*0,1*	*1*	*0,1*
	LO	*30*	*1,7*	*12*	*0,5*	*42*	*2,2*
	LO / FA	*6*	*0,4*	*13*	*1,1*	*19*	*1,5*
	LO / TR	*4*	*0,7*	*1*	*0,0*	*5*	*0,7*
	LO / TR / FA	*1*	*0,0*		*0,0*	*1*	*0,0*
	TR	*39*	*2,0*	*46*	*2,0*	*85*	*4,0*
	TR / FA	*10*	*0,6*	*58*	*3,5*	*68*	*4,1*
	TR / LO	*40*	*2,7*	*46*	*3,7*	*86*	*6,4*
	TR / LO / FA	*83*	*6,4*	*269*	*19,6*	*352*	*26,0*
Arrachements	**Aucune**	**819**	**46,6**	**617**	**37,3**	**1436**	**83,9**
	Prés. Arrach	**74**	**5,1**	**176**	**11,1**	**250**	**16,1**
	EC	*6*	*0,2*	*14*	*0,9*	*20*	*1,1*
	JOINT	*3*	*0,2*	*1*	*0,0*	*4*	*0,2*
	NI	*48*	*3,2*	*140*	*8,7*	*188*	*11,8*
	NI / EC	*13*	*1,1*	*21*	*1,4*	*34*	*2,5*
	NI / Pav. Déch.	*1*	*0,2*		*0,0*	*1*	*0,2*
	Pav. Déch.	*3*	*0,3*		*0,0*	*3*	*0,3*
	Total					1 686	100

Auteur : A. Pavard 2020