



HAL
open science

Modéliser la voirie urbaine pour une gestion de l'infrastructure routière : étude comparée de deux conceptions de données surfaciques de voirie

Antonin Pavard, Patricia Bordin, Anne Dony

► To cite this version:

Antonin Pavard, Patricia Bordin, Anne Dony. Modéliser la voirie urbaine pour une gestion de l'infrastructure routière : étude comparée de deux conceptions de données surfaciques de voirie. *Belgeo: Revue Belge de Géographie*, 2021, 10.4000/belgeo.51958 . hal-03547965

HAL Id: hal-03547965

<https://hal.science/hal-03547965v1>

Submitted on 29 Jan 2022

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.



Belgeo

Revue belge de géographie

3 | 2021

Miscellaneous

Modéliser la voirie urbaine pour une gestion de l'infrastructure routière : étude comparée de deux conceptions de données surfaciques de voirie

Modeling urban roads for road infrastructure management: a comparative study of two designs of road surface data

Antonin Pavard, Patricia Bordin et Anne Dony



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/belgeo/51958>

DOI : 10.4000/belgeo.51958

ISSN : 2294-9135

Éditeur :

National Committee of Geography of Belgium, Société Royale Belge de Géographie

Référence électronique

Antonin Pavard, Patricia Bordin et Anne Dony, « Modéliser la voirie urbaine pour une gestion de l'infrastructure routière : étude comparée de deux conceptions de données surfaciques de voirie », *Belgeo* [En ligne], 3 | 2021, mis en ligne le 25 janvier 2022, consulté le 27 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/51958> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/belgeo.51958>

Ce document a été généré automatiquement le 27 janvier 2022.



Belgeo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

Modéliser la voirie urbaine pour une gestion de l'infrastructure routière : étude comparée de deux conceptions de données surfaciques de voirie

Modeling urban roads for road infrastructure management: a comparative study of two designs of road surface data

Antonin Pavard, Patricia Bordin et Anne Dony

Introduction

- 1 La voirie routière révèle une complexité qui amène à appréhender plusieurs dimensions simultanément. Sans être exhaustif, nous citons la dimension politique à travers la gestion du patrimoine de voirie, la dimension technique par la gestion mécanique de l'infrastructure ainsi que l'organisation de la circulation des usagers, la dimension foncière par la gestion de l'espace public, ou encore la dimension urbanistique par l'inscription de la voirie dans le paysage urbain. 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 (tramways) – a d'ailleurs conduit à repenser la voirie notamment urbaine alors que son développement s'est longtemps articulé autour de l'automobile (Héran, 2015 ; Papon, 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 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 (aménagement, 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) :

- le premier est d'accroître la connaissance sur les infrastructures de transport, pour mieux maîtriser 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) ;
- le second est d'améliorer la communication entre les différents intervenants sur ces infrastructures de transport.

- 2 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).
- 3 Pour répondre à ces enjeux, George *et al.* (2019) indiquent que les gestionnaires de voirie ont besoin d'informations sur l'emprise surfacique des infrastructures routières. Ils relèvent notamment que « *l'entretien d'un réseau routier consiste à réparer des mètres carrés, unité de facturation la plus souvent utilisée par les entreprises réalisant les travaux* ». Malgré ce constat, les bases de données surfaciques de voirie restent marginales et sont principalement produites au sein de grandes collectivités. Cette situation semble liée à plusieurs facteurs.
- 4 D'abord, intervient la perception de la voirie. Celle-ci est majoritairement rapprochée de sa fonction de support aux mobilités. Il en résulte que les premières données géographiques routières ont été produites pour répondre aux questions de mobilités à l'aide des outils de la théorie des graphes (Fournier, Pomerol, 2010). Ainsi, les gestionnaires de voirie et plus généralement les acteurs s'intéressant à l'infrastructure routière dans son organisation spatiale (Lagesse *et al.*, 2016 ; Barthélemy, 2011 ; Bretagnolle *et al.*, 2010) ou ses usages (Ticha, 2017 ; Guérois *et al.*, 2016 ; Goldberg, Harrelson, 2005) travaillent généralement sur une voirie vue comme une infrastructure linéaire.
- 5 Ensuite se pose une question de compétences techniques et de moyens financiers des gestionnaires de voirie. Il existe des données linéaires de voirie dont la production a été prise en charge par des organismes nationaux comme l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) en France. Une production plus globale de ce type de données est aussi réalisée, notamment dans le cadre du projet participatif OpenStreetMap. Les collectivités ont alors un accès libre, simple et à moindre coût, aux données linéaires de voirie. La production de données surfaciques relève en revanche d'initiatives locales et reste plus confidentielle et limitée.
- 6 Aujourd'hui, les méthodes les plus utilisées pour produire une base de données spatiales surfaciques de voirie de qualité, c'est-à-dire suffisamment précises pour estimer les emprises de la voirie, sont basées sur trois approches.
- 7 1. La première approche regroupe des méthodes permettant la production de données par intervention manuelle d'un spécialiste de l'information géographique :
 - la photo-interprétation¹ par technique photogrammétrique², qui s'appuie sur des images aériennes à haute résolution et vise à une identification humaine assistée par ordinateur ;

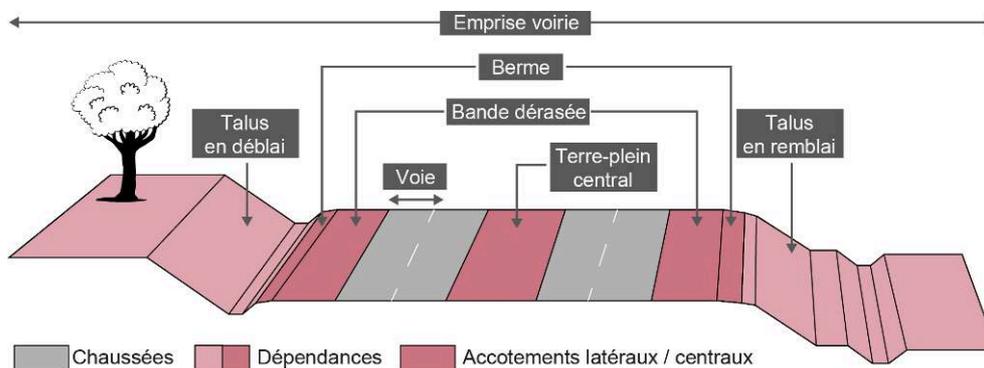
- les levés topographiques réalisés soit à l'aide des outils et méthodes classiques de la topographie, soit à l'aide de nouveaux outils tels que le Mobil Mapping Lidar.
- 8 Ces deux méthodes sont coûteuses (environ 35 000 euros/km² de voiries pour de la photo-interprétation, et plus de 100 000 euros/km² pour les technologies Lidar). Les levés topographiques représentent un coût intermédiaire entre ces deux extrêmes (Jean-Bart, 2019). Au-delà du coût engendré, ces méthodes peuvent être chronophages.
- 9 2. La deuxième approche consiste à s'appuyer sur la reconnaissance automatisée des formes à l'aide d'algorithmes, à partir d'images aériennes à haute résolution. Cette approche présente de nombreuses limites pour le milieu urbain où la voirie serpente, entre les bâtiments et les espaces verts par exemple. En effet, des infrastructures ou encore la végétation cachent une partie de la voirie, rendant difficile sa reconnaissance automatisée (Péteri *et al.*, 2003 ; Airault, Jamet, 1995). Ainsi, les méthodes développées en suivant cette approche tendent à une bonne extraction des surfaces de voiries 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 ne permet la production de résultats satisfaisants. À cela s'ajoute aussi leur complexité technique qui les rend difficilement déployables au sein des collectivités territoriales gestionnaires de voirie.
- 10 3. La troisième approche est moins chronophage, moins complexe et moins onéreuse que les précédentes. Celle-ci s'appuie sur l'usage de données géographiques existantes, représentées par des objets graphiques vectoriels, telles que les données de linéaire routier ou de parcelles cadastrales :
- l'usage des données linéaires routières a par exemple été étudié par le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU – aujourd'hui CEREMA). Il a alors proposé une méthode s'appuyant sur la base de données topographiques de l'IGN (BD TOPO) (CERTU, 2013) ;
 - l'usage des données cadastrales pour l'identification de la voirie est plus récent. L'institut Paris Region s'intéresse par exemple à cette possibilité dans le cadre de son nouveau Mode d'Occupation des Sols (MOS Plus) (Cromier *et al.*, 2020). Pavard *et al.* (2018) présentent un processus pour produire de telles données surfaciques de voirie.
- 11 L'objectif de cet article est d'analyser cette troisième approche en particulier d'étudier la pertinence et fiabilité d'une automatisation de ces deux méthodologies. Plus précisément, nous nous proposons de comparer les résultats obtenus par ces deux méthodes à des données considérées comme de référence. Pour cela, notre travail repose sur l'analyse de données surfaciques de voirie sur quatre terrains d'études : Paris, Bordeaux (Gironde), Rouen (Seine-Maritime) et Cachan (Val-de-Marne). Dans une première partie, nous présentons le corpus de données et les méthodologies mises en œuvre pour le construire. La deuxième partie expose la démarche suivie pour analyser les données, ainsi que les résultats obtenus. Enfin, la troisième partie discute les résultats pour aboutir à des préconisations pour la production de données surfaciques de voirie à plus grande échelle.

La collecte et la construction du corpus de données

Définitions

- 12 En introduction nous avons fait le lien entre les termes *infrastructures routières* et *voirie routière*. Avant même de discuter de la collecte et de la construction du corpus de données permettant de décrire la voirie, nous proposons de définir plus précisément ce qu'est la voirie et les principaux éléments qui la composent.
- 13 Nous définissons la voirie routière comme une infrastructure permettant les circulations terrestres hors circulation ferroviaire. Celle-ci appartient soit au domaine public ou privé d'une collectivité territoriale, soit à un individu ou groupement d'individus. Comme l'illustre la figure 1, 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 (Pavard, 2021).

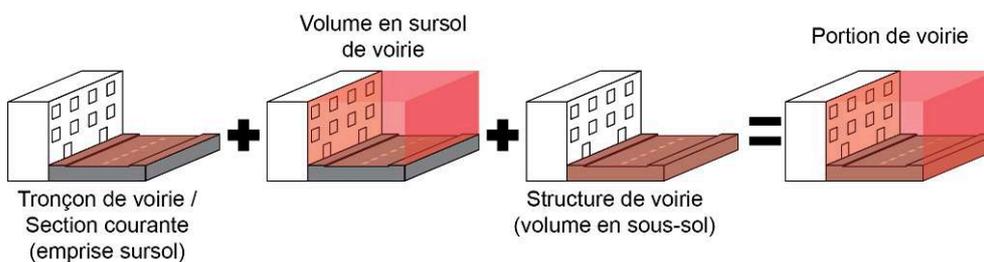
Figure 1. Schéma organisationnel de la voirie routière (ou profil en travers).



Auteur : Pavard, 2021

- 14 Au-delà, la voirie est une infrastructure multidimensionnelle (figure 2). La chaussée et ses dépendances sont regroupées en tronçon de voirie ou en section courante dès lors que le tronçon étudié s'étend d'une intersection routière à une autre. L'ensemble est caractérisé par une emprise en sursol. Au-dessus, des équipements (panneaux de signalisation, lampadaires, arbres, etc.) sont implantés et composent le volume en sursol de la voirie. Enfin, les éléments constitutifs de la voirie disposent d'une structure qui occupe un volume en sous-sol. Ces trois dimensions de la voirie forment ce que nous appelons une portion de voirie (Pavard, 2021).

Figure 2. La voirie, une infrastructure multidimensionnelle.



Auteur : Pavard, 2021

- 15 La suite de cet article porte sur la conception et la construction de données surfaciques décrivant l'emprise en sursol de la voirie (géométrie 2D), à travers la comparaison des deux méthodes. À terme cette construction de données permettra d'intégrer une description de la structure des éléments de voirie (3D). Cet aspect fait l'objet d'un autre travail (Pavard, 2021).

Des données de référence

- 16 L'objectif étant de comparer deux méthodes de construction de données surfaciques de voirie à partir de leurs résultats, il est essentiel de disposer de données de référence prises comme terrain nominal. 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 un processus de construction de données, un terrain nominal est utilisé afin de vérifier la conformité de données produites relativement à des données considérées exactes et faisant dès lors l'objet de référent. Ces données sont supposées suffisamment exactes pour mesurer et représenter les objets géographiques étudiés. Dans le cas présent, « donnée de référence », renvoie à une donnée construite soit par le biais de mesures sur le terrain, soit par photo-interprétation humaine. La deuxième technique est reconnue comme l'une des plus précises pour l'identification des éléments constitutifs du tissu urbain (Foulard, Zeiger, 2013).
- 17 Pour nos cas d'études, des données ont été sélectionnées ou construites afin de suivre au mieux cette définition de *données de référence*. Ainsi, le corpus de données de référence est constitué de données produites soit par un service technique de ville (Paris et Bordeaux) à l'aide de levés terrain et de corrections par photo-interprétation, soit dans le cadre de travaux de recherche antérieurs (Rouen et Cachan) à l'aide de photo-interprétation à partir d'images aériennes haute résolution (BD Ortho HR, IGN). La zone d'études de Cachan a par ailleurs fait l'objet d'un travail de terrain poussé afin de comparer systématiquement les données produites à des observations in situ. Ces observations ont permis de réaliser plusieurs améliorations que nous ne détaillons pas dans cet article (Pavard, 2021).
- 18 Par la suite ces bases de données sont nommées « *Référence* ».

Des données surfaciques de voirie à partir d'une base linéaire (méthode CERTU/CEREMA)

- 19 Les premiers résultats analysés sont ceux produits par des méthodes dites à base linéaire. Initialement, le CEREMA a produit en 2013 un recueil constitué de fiches méthodologiques permettant de construire des indicateurs pour mesurer la consommation de l'espace par l'urbanisation et ainsi d'étudier le phénomène d'artificialisation. La voirie routière étant une des infrastructures occupant de l'espace, le CEREMA a développé une méthodologie pour déterminer sa surface en s'appuyant sur deux éléments (CERTU, CETE Normandie-Centre, 2013 ; CERTU, 2009) :
- le profil en travers de la voirie présente l'inscription de l'infrastructure dans sa largeur, par des chaussées et leurs dépendances. Parmi ces dépendances, le CEREMA relève les accotements utiles aux manœuvres d'évitement ou aux arrêts d'urgence ;
 - la base de données topographiques produite par l'IGN et des données attributaires qu'elle contient (BD TOPO®, IGN).

- 20 À partir de ces deux éléments, le CEREMA a identifié trois critères pour caractériser la largeur totale d'une section courante de voirie, laquelle est symbolisée dans les données linéaires par un tronçon linéaire reliant une intersection routière à une autre :
- la classe administrative : autoroute, route nationale ou départementale et autre ;
 - la nature des voies qui conduit à fixer la largeur des tronçons, à partir des standards observés dans la littérature technique : autoroute, bretelle, route à 1 ou 2 chaussées, route empierrée, sentier et chemin, piste cyclable et escalier ;
 - la largeur des bandes dérasées de droite (BDD)³ et de berme⁴ estimée à partir de la nature des tronçons linéaires et du type de franchissement (pont, tunnel, radier, gué).
- 21 Finalement la largeur finale de voirie est déterminée en factorisant les largeurs de voie selon le nombre de voies de circulation. Ce qui conduit à une équation permettant de calculer la largeur théorique par tronçon linéaire⁵ :
- $$\text{largeur de la voirie (calculée)} = (\text{largeur de l'ensemble des voies/nb de voies}) + \text{largeur BDD} + \text{largeur berme}$$
- 22 Dès lors, l'attribution des largeurs à chaque tronçon linéaire permet de construire des tronçons surfaciques en réalisant des zones tampons autour du linéaire (buffers). Ces bases de données sont par la suite nommées « *Base Linéaire* » ou *BL*.

Des données surfaciques de voirie à partir de la base cadastrale

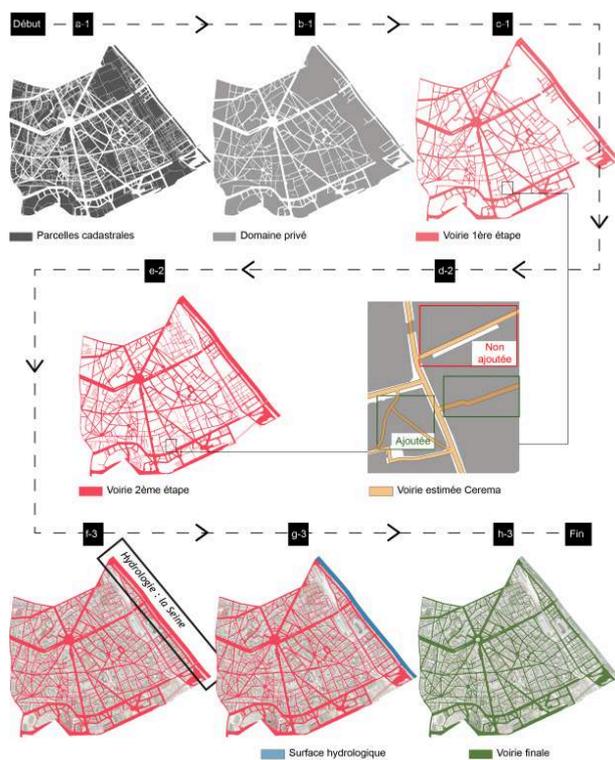
- 23 Les deuxièmes résultats analysés sont produits à l'aide d'une méthode à base cadastrale que nous avons développée (Pavard, 2021). En France, une loi de 1807, puis un règlement impérial de 1808, ont officialisé la mise en œuvre d'un cadastre parcellaire du territoire métropolitain qui a été achevé en 1850. Par la suite, une loi de 1930 a favorisé la réorganisation des plans cadastraux et leur suivi dans le temps avant que, finalement, à partir des années 1970, la technique de photo-interprétation par photogrammétrie soit introduite en plus des levés topographiques pour la construction des nouveaux plans. Aujourd'hui, ces informations sont utilisées pour produire des données surfaciques de voirie par diverses institutions. À titre d'exemple, l'Institut Paris Region développe une méthodologie articulée autour de ces données pour produire son nouveau référentiel d'occupation du sol (MOS – Mode d'Occupation du Sol), auquel il souhaite ajouter des données fines de voirie.
- 24 Par des échanges avec l'Institut Paris Region, nous constatons que ces méthodes sont en cours de validation à grande échelle et ne sont pas disponibles actuellement. Pour cette raison il n'était pas possible d'utiliser leurs données. Afin de tester l'approche par base cadastrale, nous avons utilisé un processus développé dans le cadre de travaux antérieurs (Pavard *et al.*, 2018). Ce processus a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, et facile à automatiser pour une application sur des territoires plus vastes ou sur plusieurs métropoles.
- 25 Notre méthode repose sur l'utilisation de la BD PARCELLAIRE qui regroupe des informations cadastrales mises à disposition par l'IGN en partenariat avec la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP). Il se construit en trois étapes (figure 3) :
1. Une première étape consiste à identifier et à extraire la totalité de l'espace public dans la BD parcellaire disponible au moment de l'étude. En revanche, elle ne permet pas de saisir les voiries nouvelles par rapport à la date d'édition des données parcellaires, les voiries

cadastrées ou privées. Nous obtenons pour le 13^{ème} arrondissement de Paris une surface de voirie de 1,98 km².

2. Une deuxième étape permet d'ajouter les voiries manquantes. Pour cela, il est possible soit d'identifier visuellement à l'aide d'images aériennes la voirie manquante et de la digitaliser, soit d'utiliser d'autres données de voirie construites sur le même territoire. Pour des questions de simplicité, le choix a été fait ici de s'appuyer sur les surfaces de voiries estimées par la méthode du CEREMA construite sur les données de la BD TOPO plus fréquemment mise à jour et contenant les voiries privées. Toutefois, il est noté que l'utilisation de ces données peut introduire un biais au résultat de notre méthode. En effet, la méthode utilisée par le CEREMA et notamment les paramètres utilisés sont peu discriminants au vu des différentes configurations de la voirie urbaine (Aubart, Tourjansky-Cabart, 2000). Comme observé, les largeurs de voirie sont définies selon de grandes classes administratives ou de nature des voies. Malgré tout, nous faisons l'hypothèse que les ajouts de ces voiries sont minoritaires par rapport aux restes des surfaces de voiries identifiées. À la fin de cette deuxième étape, tous les espaces de voirie sont identifiés. Pour le 13^{ème} arrondissement de Paris, nous obtenons une surface de voirie de 2,24 km², soit une superficie 13 % supérieure à celle obtenue en première étape.
3. Une troisième étape met en œuvre une méthode qui permet d'éliminer dans l'espace public ce qui ne relève pas de la voirie routière à partir de données décrivant les espaces hydrographiques et espaces verts. En effet, en milieu urbain, le domaine public est aussi constitué d'espaces verts et d'espaces hydrographiques qu'il faut éliminer de l'analyse. 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. Pour le 13^{ème} arrondissement de Paris, nous obtenons une surface de voirie finale de 2,03km².

26 Ces bases de données sont par la suite nommées « *Base Cadastrale* » ou BC.

Figure 3. Processus de production des données surfaciques de voirie (Base Cadastrale).



Sources : © IGN, BD TOPO®, BD PARCELLAIRE®, 2018
Auteur : Pavard, 2021

Encart méthodologique (illustré par la figure 3) :*Etapas de production des données de voirie BC*

Etape 1 : À partir des parcelles cadastrales (figure 3 a - 1), nous reconstruisons le domaine privé des communes afin de découper les territoires communaux (figure 3 b - 1). Ainsi, à la fin, nous conservons les espaces non intersectés par les parcelles cadastrales (figure 3 c).

Etape 2 : Nous superposons au domaine privé les espaces de voirie estimés par la méthode du CEREMA (figure 3 d - 2) afin de relever la voirie non prise en compte en étape 1. Nous choisissons de ne conserver que les apports concrets des données issues de la méthode du CEREMA. Par apports concrets, nous entendons les chevauchements importants entre l'espace privé et la voirie CEREMA (figure 3 d - 2 encadrés verts). De ce fait nous excluons les faibles chevauchements (figure 3 d - 2 encadrés rouges). Pour cela, nous déterminons un seuil par le calcul de la part de la surface intersectée entre les tronçons de voirie CEREMA et le domaine privé sur la surface totale de chaque tronçon CEREMA. Nous conservons les tronçons surfaciques de voirie ayant un chevauchement d'au moins 45 % de leur surface. Le seuil de 45 % a été retenu à l'aide d'une analyse de la distribution statistique des parts de chevauchement, et d'une vérification réalisée sur les terrains d'études et notamment le terrain nominal (Cachan). Nous obtenons le résultat de la 2^{ème} étape (figure 3 e - 2).

Etape 3 : Nous relevons les espaces publics hydrologiques et espaces verts identifiés comme voirie routière en étape 2 (figure 3 f - 3). Par exemple, dans le cas du 13^{ème} arrondissement de Paris, seul l'espace hydrologique de la Seine est identifié (figure 3 g - 3). Nous supprimons ces espaces afin de ne conserver que la voirie routière (figure 3 h - 3). La voirie traversant les espaces verts et les surfaces hydrologiques est conservée.

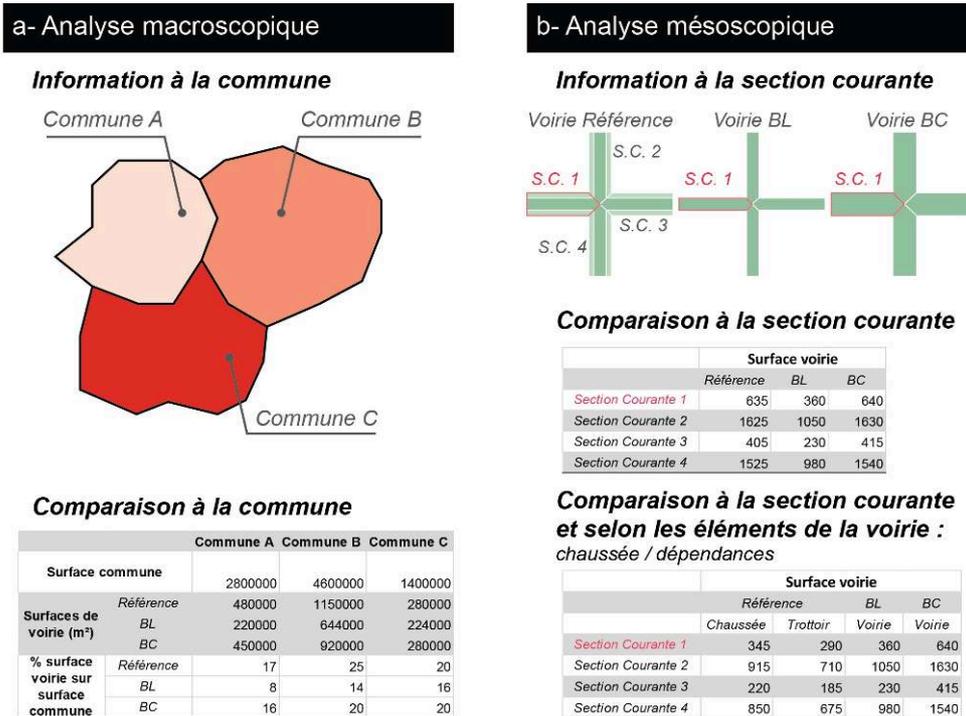
La démarche analytique et les résultats

Comment réaliser notre analyse comparative ?

- 27 Nous constatons que les surfaces de voiries calculées sont données dans la littérature technique et scientifique à l'échelle des périmètres communaux ou de territoires plus larges (Breteau, 2016 ; DREAL, 2014 ; Merlin, 1985 ; Gelsomino, 1979). Cela entraîne une comparaison macroscopique (figure 4 - a) des données de voirie. Cette comparaison est utile à deux niveaux. Elle permet, d'une part, de saisir l'empreinte globale de la voirie et de mesurer sa part dans l'espace communal et, d'autre part, d'avoir un indicateur simple de comparaison. Cette première comparaison est réalisée en calculant les surfaces estimées de la voirie au niveau communal et ce, à partir de trois bases de données : *Référence*, *Base Linéaire* (BL), *Base Cadastre* (BC). Bien qu'intéressante, la comparaison macroscopique n'est pas suffisante pour comprendre les différences des emprises de voirie estimées par les deux méthodes et une analyse à une échelle plus locale peut permettre de saisir la pertinence des résultats issus des deux méthodes étudiées ici. Une analyse à l'échelle des sections courantes de voirie est alors réalisée en complément, c'est-à-dire une analyse mésoscopique (figure 4 - b). Cette approche nécessite de disposer de données de voirie non agrégées et permettant de distinguer à la fois les sections courantes, et les éléments constitutifs de la voirie, c'est-à-dire les chaussées et leurs dépendances telles que les trottoirs.

28 Pour la comparaison mésoscopique, et l'identification des sections courantes par des objets graphiques comparables entre les trois bases de données, nous avons mis en œuvre une méthode développée lors de travaux antérieurs (Pavard, 2021), et permettant de rendre interopérables les données de voirie. L'encart méthodologique ci-dessous présente les données nécessaires en entrée pour la mise en œuvre de cette méthode, ainsi que les données obtenues en sortie. La figure 5 – a illustre l'application de cette méthode sur les différentes bases de données de voirie à travers l'exemple du 13^{ème} arrondissement de Paris en figure 5 – b.

Figure 4. Echelles d'analyse des résultats.



Auteur : Pavard, 2020

Encart méthodologique :**La production des tronçons surfaciques de voirie***Les données en entrée :*

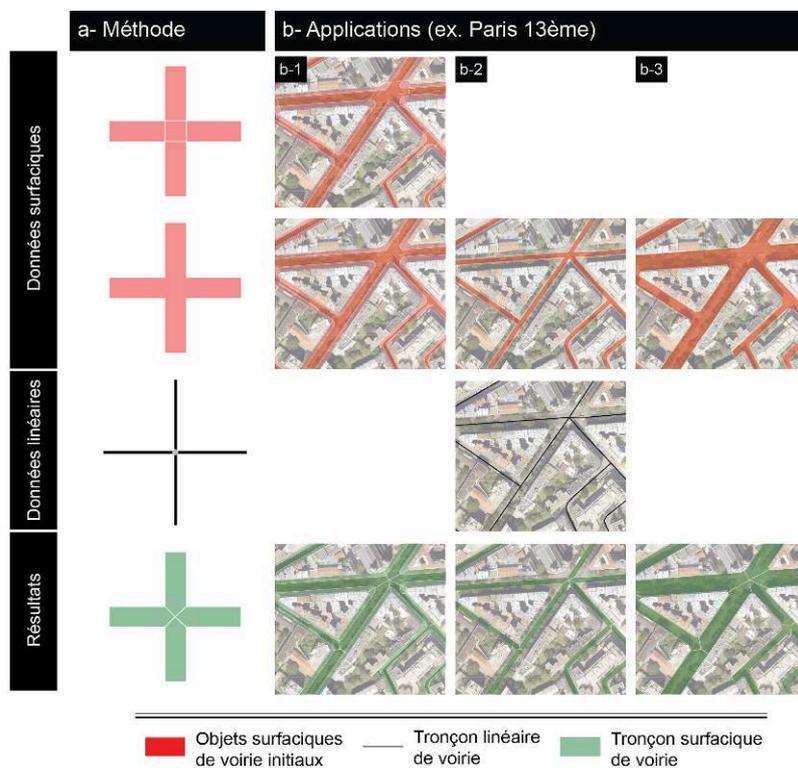
- les données surfaciques doivent être d'un seul bloc (un seul multi-polygone). En d'autres termes, les intersections ne doivent pas être modélisées et représentées par des objets indépendants. Lorsque c'est le cas comme pour les données *Références* de Paris (figure 5 - b - 1), une agrégation est réalisée ;

- les données linéaires en entrée doivent être modélisées sous forme de graphes connexes. C'est-à-dire que les sections courantes représentées par un linéaire doivent se rejoindre au centre des intersections routières.

Les données en sortie :

- pour chaque base de données surfaciques de voirie, les objets sont découpés de sorte que chaque objet surfacique d'une base soit associé à un unique objet linéaire.

Figure 5. Modélisation des objets surfaciques représentant les sections courantes de voirie.



a) méthodologie, b) application sur les données *Références* de Paris 13^{ème} (1), sur les données BL (2), sur les données BC (3)

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

Auteur : Pavard, 2020

- 29 Concernant les éléments constitutifs de la voirie, certaines des données *Références* permettent de les distinguer. La ville de Paris propose des données présentant un tel

découpage. Dans des travaux précédents (Pavard, 2021), des données de ce type ont été produites pour Cachan et pour Rouen (tableau 1).

Tableau 1. Composition des objets surfaciques de voirie pour les données *Références*.

	Voirie ensemble	Chaussée	Dépendance
Paris	☑	☑	☑
Bordeaux	☑	☒	☒
Rouen	☑	☑	☑
Cachan	☑	☑	☑

Auteur : Pavard, 2020

Quelles couvertures spatiales pour le corpus de données ?

- 30 Toutes les données n'ont pas été collectées ou produites dans les mêmes emprises spatiales. Des choix ont été réalisés selon les besoins de notre démarche.
- 31 Les données *Références* de Rouen et de Cachan ont été produites dans le cadre de travaux antérieurs (Pavard, 2021). Ainsi, les données *Références* sont limitées au centre-ville pour Rouen, tandis que celles de Cachan couvrent tout le territoire communal, comme pour Paris et Bordeaux (tableau 2).

Tableau 2. Mode de production et couverture des données de référence.

Terrain d'étude	Production des données		Couverture	
	Producteur	Méthode	Commune	Centre-ville
Paris	Ville de Paris	Levés terrains	☑	
Bordeaux	Ville de Bordeaux	+ Photo-interprétation	☑	
Rouen	Production auteur	Photo-interprétation	☒	☑
Cachan			☑	

Auteur : Pavard, 2020

- 32 La conception de données surfaciques de voirie à l'aide des méthodes BL et BC est envisageable dès lors que le linéaire de voirie et le parcellaire cadastral existent pour un même territoire. Afin de disposer d'un échantillon plus large, les deux méthodes ont été appliquées sur les communes de la région francilienne lorsque les données linéaires et cadastrales de l'IGN existaient. Les résultats couvrent 1012 communes d'Île-de-France en plus des données sur Paris, Bordeaux, Rouen et Cachan.

Synthèse des données produites

- 33 Les voiries des terrains d'études sont décrites par trois bases de données surfaciques de voirie distinctes :
- les données *Références* construites par photo-interprétation ou par levés terrain ;
 - les données Base Linéaire (CEREMA) ;
 - les données Base Cadastre (Pavard *et al.*, 2018).
- 34 La donnée *Référence* est disponible pour Paris, Bordeaux, Rouen Centre-ville et Cachan avec la possibilité de distinguer les chaussées des dépendances à l'exception de Bordeaux. Cette décomposition de la voirie permet par la suite de mener une analyse

mésoscopique plus poussée, notamment en comparant les emprises des chaussées *Références* et les emprises des voiries estimées. Les deux bases de données suivantes (BL et BC) sont disponibles pour les quatre terrains d'études ainsi que pour 1012 communes d'Île-de-France (tableau 3).

Tableau 3. Synthèse du corpus de données.

	Références		À Base Linéaire	À Base Cadastreale
	Décomposées	Agrégées		
Paris	☑		☑	☑
Bordeaux		☑	☑	☑
Rouen centre-ville	☑		☑	☑
Cachan	☑		☑	☑
1012 communes IDF		☒	☑	☑

Auteur : Pavard, 2020

- 35 Les surfaces de voiries sont données et analysées pour les quatre terrains d'études. Les données brutes obtenues sont les surfaces en mètre carré converties ensuite en pourcentages de surface totale occupée par les voiries tels que présentés dans le tableau 4. Ces données sont disponibles de façon exhaustive pour les quatre terrains d'études avec une décomposition en arrondissements pour Paris. Les données des 1 012 autres communes d'Île-de-France ne sont utilisées que pour valider les résultats des quatre terrains d'études.

Analyses croisées des résultats

Comparaison macroscopique

- 36 Les résultats présentés en tableau 4 pointent des différences importantes entre les estimations des surfaces voiries par la méthode BL (autour 15 % des surfaces communales) et les estimations obtenues par la méthode BC et les données *Références* (autour de 25 à 30 % des surfaces communales).
- 37 L'analyse des écarts des surfaces de voiries estimées permet de constater :
- un écart de -10 % à 10 % entre les surfaces de voiries estimées par la méthode BC et les données *Références* ;
 - un écart systématiquement positif, de 40 à 50 %, entre les surfaces de voiries estimées par la méthode BL et les données *Références* ;
 - un écart du même ordre de grandeur entre les surfaces de voiries estimées par la méthode BL et par la méthode BC.

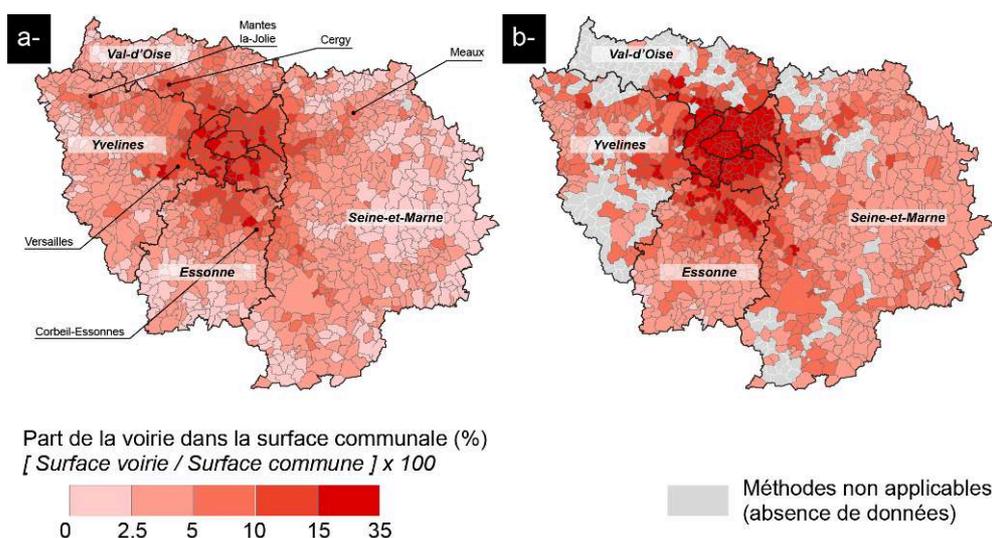
Tableau 4. Résultats des données produites sur les cas d'études.

	SURFACE VOIRIE (M ²) / LA PART DE LA VOIRIE DANS L'ESPACE COMMUNAL (%)					ECARTS RELATIFS DES SURFACES VOIRIE			
	Référence Stock / %	Base Linéaire (BL) Stock / %	Base Cadre (BC) Stock / %	(BC-BL) / (BC) (%)	(Ref-BL) / (Ref) (%)	(Ref-BC) / (Ref) (%)			
PARIS	24 237 000	23	15 168 100	14	27 966 500	27	46	37	-15
1 ^{er} Arrond	483 500	26	272 000	15	509 300	28	47	44	-5
2 ^e Arrond	296 300	30	157 700	16	303 700	31	48	47	-2
3 ^e Arrond	308 600	26	154 500	13	312 500	27	51	50	-1
4 ^e Arrond	487 900	31	227 400	14	474 800	30	52	53	3
5 ^e Arrond	628 800	25	332 300	13	660 100	26	50	47	-5
6 ^e Arrond	521 200	24	296 600	14	564 900	26	47	43	-8
7 ^e Arrond	1 120 000	27	591 400	14	1 175 300	29	50	47	-5
8 ^e Arrond	1 297 700	33	578 000	15	1 346 200	35	57	55	-4
9 ^e Arrond	560 800	26	307 200	14	586 400	27	48	45	-5
10 ^e Arrond	698 800	24	366 800	13	748 300	26	51	48	-7
11 ^e Arrond	985 300	27	494 300	14	982 400	27	50	50	0
12 ^e Arrond	2 103 100	13	2 157 600	13	3 176 700	19	32	-3	-51
13 ^e Arrond	1 843 000	26	1 025 000	14	2 027 000	28	49	44	-10
14 ^e Arrond	1 401 600	25	912 300	16	1 638 100	29	44	35	-17
15 ^e Arrond	2 027 100	24	1 170 900	14	2 288 400	27	49	42	-13
16 ^e Arrond	2 928 000	18	2 463 700	15	4 147 200	25	41	16	-42
17 ^e Arrond	1 850 100	33	919 900	16	1 819 100	32	49	50	2
18 ^e Arrond	1 479 700	25	847 800	14	1 614 600	27	47	43	-9
19 ^e Arrond	1 707 000	25	972 700	14	1 887 000	28	48	43	-11
20 ^e Arrond	1 508 500	25	920 000	15	1 704 500	28	46	39	-13
BORDEAUX	7 689 800	15	4 768 200	9	9 745 400	19	51	38	-27
ROUEN	-	-	2 399 900	11	5 144 100	24	54	-	-
Centre-ville	1 276 500	34,5	605 200	16	1 182 500	32	49	55	11
CACHAN	863 200	31	461 200	17	619 300	22	26	47	28

Auteur : Pavard, 2020

- 38 Les cartographies en figure 6 synthétisant les résultats sur les 1012 communes franciliennes font apparaître des tendances similaires à celles observées sur les quatre cas d'études. En effet, les parts de voiries dans les espaces communaux, estimées par la méthode BL (figure 6 - a) sont inférieures de 10 à 15 % à celles estimées par la méthode BC (figure 6 - b).

Figure 6. Occupation des espaces communaux par la voirie : résultats des méthodes BL (a) et BC (b) sur les communes d'Île-de-France.

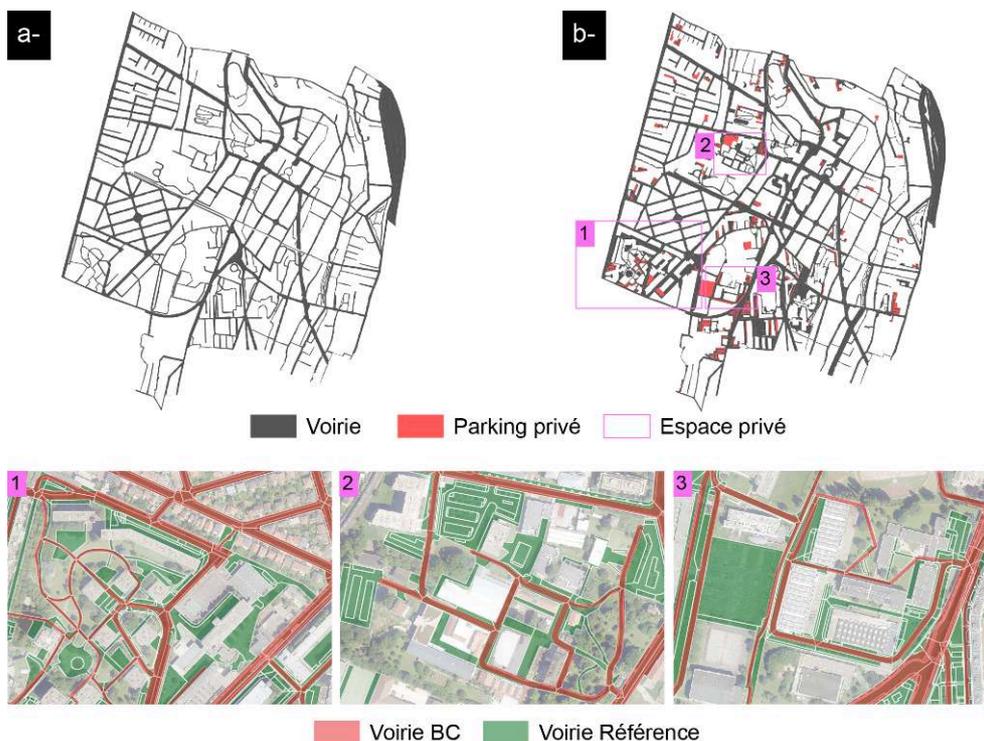


Sources : © IGN, BD TOPO®, 2018

Auteur : Pavard, 2021

- 39 Ainsi, ces premiers constats indiquent que la méthode BL sous-estime, et de façon significative, les surfaces de voiries puisque près de la moitié de la voirie n'est pas identifiée. De plus, ils mettent en évidence une bonne estimation globale des surfaces voiries par la méthode BC lorsque l'on compare ses résultats à ceux des données *Références*.
- 40 Des écarts positifs ou négatifs sont également observables entre les surfaces de voiries BC et *Référence*. Dans les deux cas, les différences constatées sont directement liées à la définition de la voirie utilisée pour produire les données *Références*. Les cas de Rouen et de Cachan illustrent la sous-représentation des surfaces voirie issues de la méthode BC par rapport aux surfaces de voiries présentes dans les données *Références*. Bordeaux et Paris illustrent au contraire le cas de surestimation des surfaces voiries par la méthode BC :
- 41 Les données *Références* de Rouen centre-ville et de Cachan ont été produites à des fins de recherche en modélisation de la voirie dans son ensemble, c'est-à-dire publique et privée mais aussi tous les éléments liés à la voirie, des sections courantes aux grands espaces de stationnement, ou encore aux places privées (Pavard, 2021). En prenant l'exemple de Cachan (figure 7), nous observons que les espaces voiries non pris en compte par la méthode BC correspondent effectivement à de grands ensembles de stationnement (50 000m²), et plus largement à des espaces privés tels que des campus d'école ou encore des zones commerciales (45 000 m²).

Figure 7. Comparaison des surfaces voiries BC (a) et Référence (b) (ex. de Cachan).

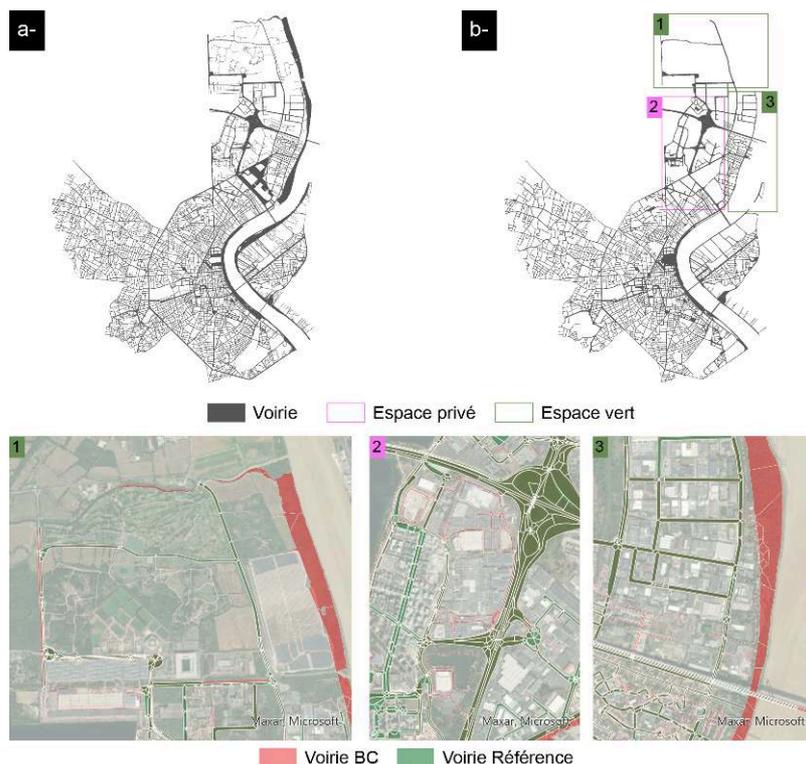


Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018
Auteur : Pavard, 2021

- 42 Les données *Références* de Bordeaux et Paris sont produites par et pour les gestionnaires de voiries publiques pour mieux comprendre et mieux gérer leur patrimoine de voirie.

De ce fait, leurs données n'incluent pas certains espaces tels que des voiries privées, ou encore les voiries des espaces verts. En prenant l'exemple de Bordeaux (figure 8), nous observons que les données *Références* ne tiennent pas compte des voiries présentes dans des grands espaces verts du nord (Bordeaux las), les voiries de halage, les voiries des secteurs commerciaux du nord ou encore de la base sous-marine.

Figure 8. Comparaison des surfaces voiries BC (a) et Référence (b) (ex. de Bordeaux).



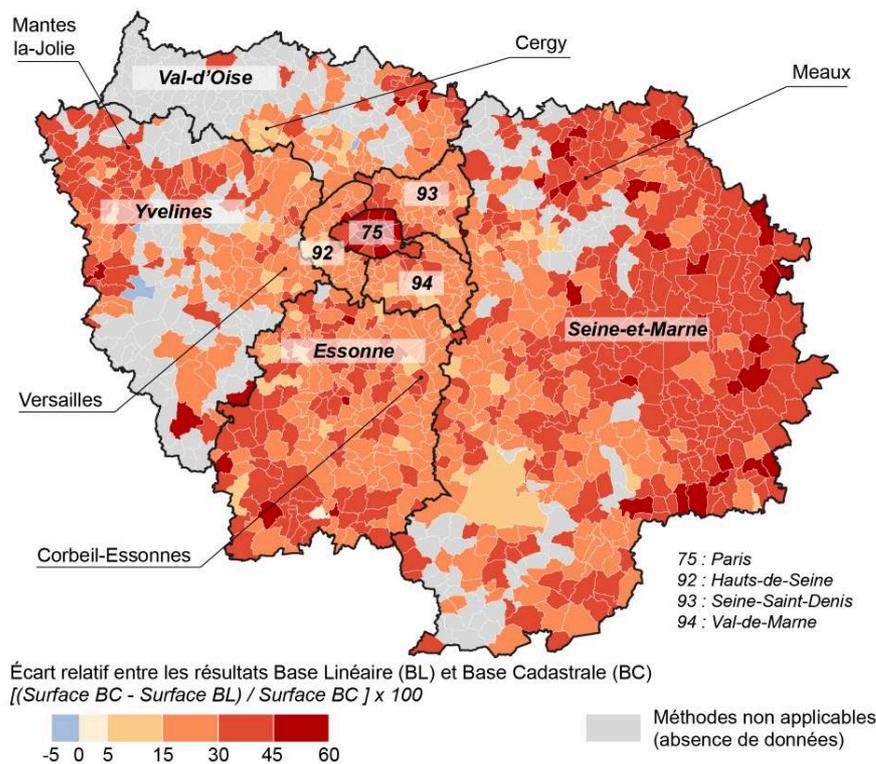
Sources : SIG – Bordeaux Métropole 2020

Auteur : Pavard, 2021

- 43 Concernant les écarts entre les surfaces de voiries BL et les deux autres estimations (BC et Référence), des différences sont observables selon les territoires traités :
- des écarts plus faibles entre les surfaces de voiries estimées par les méthodes BL et BC dans Paris 12^{ème} et à Cachan ;
 - des écarts plus faibles, voire négatifs, entre les surfaces de voiries estimées par les méthodes BL ou BC et les données *Références* dans Paris 12, 14, 15, 16, 19 et 20^{ème}, à Bordeaux et à Cachan.
- 44 Ces résultats semblent corrélés, soit à la présence de grands espaces verts en milieu urbain dense, soit à la plus faible densité urbaine des territoires analysés.
- 45 L'hypothèse des espaces verts se vérifie en examinant les cas des arrondissements parisiens et de Bordeaux. En effet, les territoires cités ci-dessus contiennent de grands espaces verts, tels que le Parc de Bercy pour le 12^{ème} arrondissement, les Parcs Montsouris ou de la Cité Universitaire pour le 14^{ème} arrondissement, les Parcs de La Villette ou des Buttes-Chaumont pour le 19^{ème} arrondissement, les Bois de Boulogne et de Vincennes pour les 16^{ème} et 20^{ème} arrondissements, ou encore le nord de Bordeaux occupé par un parc et un golf.

- 46 L'hypothèse d'une relation entre les résultats observés et la densité urbaine se vérifie à l'aide des résultats obtenus pour les méthodes BL et BC sur l'ensemble des communes de l'Île-de-France. La carte présentant les écarts des surfaces de voiries estimées par les deux méthodes montre une sous-estimation des surfaces voiries pour les grands espaces urbains par la méthode BL comme on peut le voir sur Paris et sa petite couronne (figure 9). La DREAL des Pays de la Loire a également constaté par le passé la sous-estimation de l'emprise voirie induite par la méthode développée par le CEREMA pour les territoires urbains (DREAL, 2014). En revanche, la DREAL indiquait une bonne estimation des surfaces de voiries, hors milieu urbain. Dans notre cas, la simple observation de la figure 9 fait ressortir une sous-estimation des surfaces voirie par la méthode BL tant en milieu urbain qu'en milieu rural, tel qu'on peut l'observer sur les communes de Seine-et-Marne ou en marge des Yvelines.

Figure 9. Comparaison des résultats BL et BC en Ile-de-France.



Sources : © IGN, BD TOPO®, 2018

Auteur : Pavard, 2020

- 47 Nous proposons une analyse statistique bivariée afin de comprendre et chiffrer l'interprétation de la DREAL sur la relation entre densité urbaine et la morphologie de voirie, d'autre part d'éprouver nos constats réalisés à partir de la cartographie précédente. Pour cela, nous commençons par mettre en relation les écarts de surface voirie entre les deux méthodes avec la part de la surface bâtie communale, en d'autres termes, la densité du bâti (qui traduit ainsi le caractère urbain ou rural de la commune). Le nuage de points obtenu suggère une absence de relation statistique (figure 10 - a), et nous conduit à formuler que :

- contrairement à ce que suggère la DREAL, ce caractère plus ou moins urbain d'un territoire ne semble pas avoir d'incidence sur l'estimation de la voirie par la méthode BL ;

- conformément à nos observations cartographiques, des écarts d'estimation entre les méthodes BL et BC sont importants pour les communes très urbanisées, mais également pour des communes peu urbanisées.
- 48 Au-delà de ce constat, l'indicateur « densité de bâti » entraîne selon nous un biais modéré. En nous appuyant sur ce simple indicateur nous supposons qu'un territoire communal vaste et disposant d'un petit centre urbain dense est équivalent à un territoire communal plus petit disposant d'un centre urbain moins dense. Or, comme le suggère le tableau 5, ces deux situations vont entraîner des configurations urbaines et de voiries très différentes :
- Fontainebleau présente un cœur d'agglomération d'environ 10 km² composé de bâtis mixtes contigus (immeubles, maisons de ville, pavillons) et d'espaces de voirie aménagés de façon similaire à ce que l'on observe dans des espaces urbains plus denses ;
 - Soisy-Bouy présente un cœur d'agglomération d'environ 0,7 km² composé de pavillons individuels espacés et d'espaces de voirie aménagés de façon similaire à ce que l'on observe dans des espaces périurbains ou rural.

Tableau 5. Place de la voirie dans deux communes ayant la même densité bâtie.

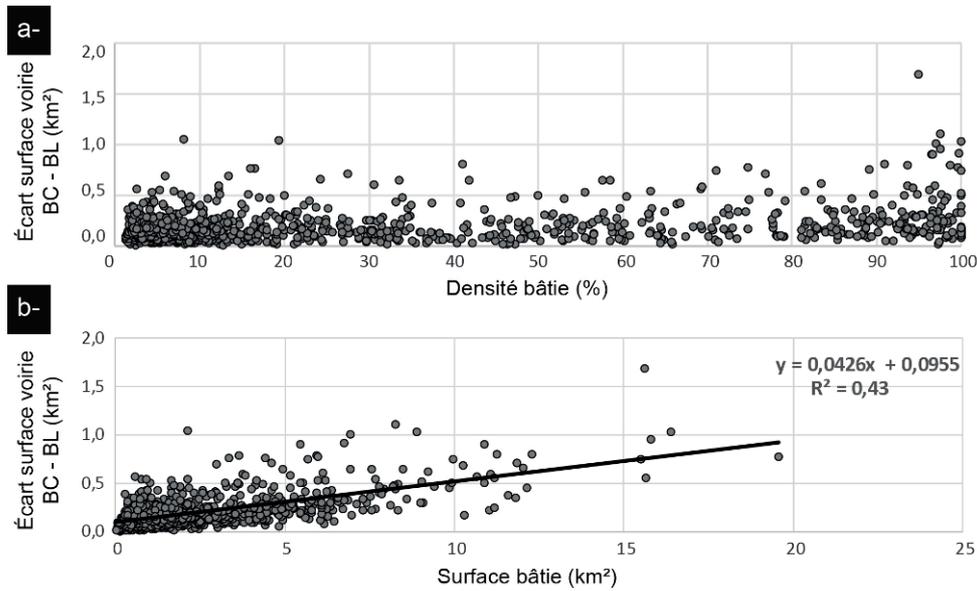
	Fontainebleau (Seine-et-Marne)	Soisy-Bouy (Seine-et-Marne)
Superficie communale	172 km ²	11 km ²
Superficie de voirie BL	8,38 km ²	0,35 km ²
Superficie de voirie BC	9,05 km ²	0,56 km ²
% voirie agglomération	12 %	22 %
% voirie hors agglo.	88 %	78 %
% des différences observés sur la voirie agglo *	40 %	5 %

* calcul : écarts entre les surfaces BL et BC sur la voirie en agglomération / la somme des écarts BL et BC voirie agglo et hors agglo

Auteur : Pavard, 2020

- 49 Tout en restant sur des indicateurs simples, nous proposons d'utiliser la surface bâtie des communes plutôt que la densité bâtie afin de moduler au moins en partie ce biais. Le nuage de points et l'analyse en régression linéaire réalisés confirment cette fois-ci un lien statistique (figure 10 – b). Le caractère urbain d'une commune, semble avoir un impact sur l'estimation de la voirie par la méthode BL. Toutefois, ce seul paramètre n'explique pas l'ensemble des écarts constatés entre les résultats BL et BC. Cet aspect est d'ailleurs confirmé par au moins trois aspects de notre analyse :
- la cartographie montrant visuellement les écarts importants d'estimation pour des communes très urbanisées (Paris et sa proche couronne) et pour de petites communes rurales (les franges des Yvelines, de l'Essonne et de la Seine-et-Marne),
 - le nuage de points ne mettant pas en relation les écarts d'estimation de la voirie des méthodes BL et BC et la densité du bâti des communes,
 - l'analyse en régression linéaire entre les écarts d'estimation de la voirie des méthodes BL et BC et la surface bâtie qui présente un R² de 43 %.

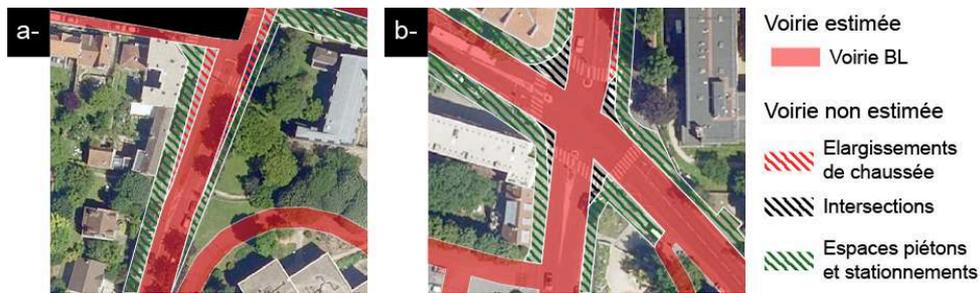
Figure 10. Relation statistique entre les écarts d'emprise voirie (Base Cadastrale – Base linéaire) et la surface bâtie.



Auteur : Pavard, 2020

- 50 Le constat effectué par la DREAL peut s'expliquer par la nature différente de la voirie en milieu urbain ou rural (que la méthode BL va estimer inégalement), plus que par le caractère urbain ou rural de l'espace. Ainsi, la méthode BL prend en compte la quasi-totalité des voiries interurbaines présentant des profils en travers composés de chaussées régulières et de dépendances étroites. À l'inverse, elle semble estimer de façon beaucoup plus approximative les voiries traversant les agglomérations, et présentant des tracés variables, principalement des aménagements de dépendances très différents, parfois très larges, tels que des trottoirs, ou des pistes cyclables. La superposition des résultats issus de la méthode BL à des images aériennes confirme la non prise en compte des dépendances en agglomération, et donc une estimation unique de la chaussée, comme l'illustre la figure 11. Rappelons que les auteurs de la méthode BL l'ont présentée comme permettant de calculer les surfaces occupées par les infrastructures routières à des fins d'analyse de l'occupation des sols et de mesure de la consommation d'espace. Autrement dit, il n'était pas intentionnel de la part des auteurs de proposer une méthode visant à identifier exclusivement les chaussées en milieu urbain. D'ailleurs, si dans certains cas seules les chaussées sont couvertes par l'estimation, dans d'autres cas l'estimation couvre toute la voirie.

Figure 11. Ecart entre la voirie estimée BL et la réalité : exemple de Cachan.



Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018
Auteur : Pavard, 2020

- 51 En conclusion, l'analyse des résultats à cette échelle macroscopique permet de formuler deux explications à ces écarts :
- les différences notables observées entre les résultats BL et BC sont surtout liées à une différence d'estimation de largeur des sections courantes de voirie. La méthode BC estime les surfaces de voiries complètes (chaussées et dépendances) tandis que la méthode BL semble estimer dans certains cas la chaussée sans ses dépendances en agglomération ;
 - les quelques différences observées entre les résultats BC et Référence tiennent davantage à la nature des éléments de voirie (espaces de stationnements, places, etc.) saisis dans les deux méthodes. Par exemple, les grands ensembles de stationnement privés sont inclus dans la donnée Référence du cas d'étude.

Comparaison mésoscopique

- 52 La comparaison à l'échelle des tronçons équivalents (des objets décrivant les mêmes sections courantes) conforte les hypothèses émises à partir de la comparaison macroscopique. Les résultats bruts présentés dans le tableau 6 montrent :
- des écarts relatifs de l'ordre de -10 à +20 % entre les surfaces voirie BL et les surfaces de chaussées *Références* ;
 - un écart relatif de -15 à +10 % entre les surfaces de voiries BC et *Références*.

Tableau 6. Surface voirie et comparaison des trois BD à tronçons équivalents.

	SURFACE VOIRIE (m ²)				ECARTS RELATIFS SURF. VOIRIE	
	BL (1)	BC (2)	Référence (3)	Réf. Chaussée (5)	(5-1) / 5 (%)	(3-2) / 3 (%) Rap. (2) / (3)
PARIS	12 878 400	25 342 600	24 202 700	13 706 600	6	-5
1 ^{ER}	221 100	448 600	482 100	257 800	14	7
2 ^E	155 000	300 500	296 400	159 700	3	-1
3 ^E	153 200	311 000	308 600	157 000	2	-1
4 ^E	221 600	467 200	485 900	241 200	8	4
5 ^E	286 900	613 200	628 700	333 900	14	2
6 ^E	264 200	532 300	521 400	297 400	11	-2
7 ^E	514 600	1 095 200	1 119 300	580 000	11	2
8 ^E	538 600	1 305 200	1 298 500	734 700	27	-1
9 ^E	302 400	580 500	561 100	326 400	7	-3
10 ^E	347 500	723 900	698 600	380 100	9	-4
11 ^E	491 000	978 400	984 300	541 400	9	1
12 ^E	1 394 000	2 391 200	2 098 700	1 246 400	-12	-14
13 ^E	930 200	1 935 600	1 838 700	936 000	1	-5
14 ^E	775 200	1 515 200	1 401 400	777 000	0	-8
15 ^E	1 082 200	2 197 300	2 024 600	1 122 300	4	-9
16 ^E	1 821 400	3 376 100	2 928 300	1 970 000	8	-15
17 ^E	876 600	1 779 400	1 847 900	1 111 400	21	4
18 ^E	793 800	1 570 100	1 475 400	840 500	6	-6
19 ^E	871 000	1 774 200	1 695 900	878 700	1	-5
20 ^E	837 900	1 671 800	1 506 900	814 700	-3	-11
BORDEAUX	4 140 300	8 176 000	7 681 800	-		-6
ROUEN	2 351 100	5 098 600	-	-		
Centre-ville	569 300	1 122 500	1 214 100	682 500	17	8
CACHAN	460 400	617 300	671 200	452 500	-2	8

Auteur : Pavard, 2020

- 53 Afin de confirmer les relations identifiées, deux analyses bivariées sont réalisées :
- les surfaces des tronçons BL sont mises en relation avec les surfaces des chaussées *Références* ;
 - les surfaces des tronçons BC sont mises en relation avec les surfaces des tronçons *Références*.
- 54 Les résultats de ces analyses présentés dans le tableau 7 permettent de conclure qu'il existe une corrélation significative entre les surfaces de voiries BL et les surfaces de chaussées *Références*, ainsi qu'entre les surfaces tronçons BC et *Références*.

Tableau 7. Résultats des analyses par régression linéaire.

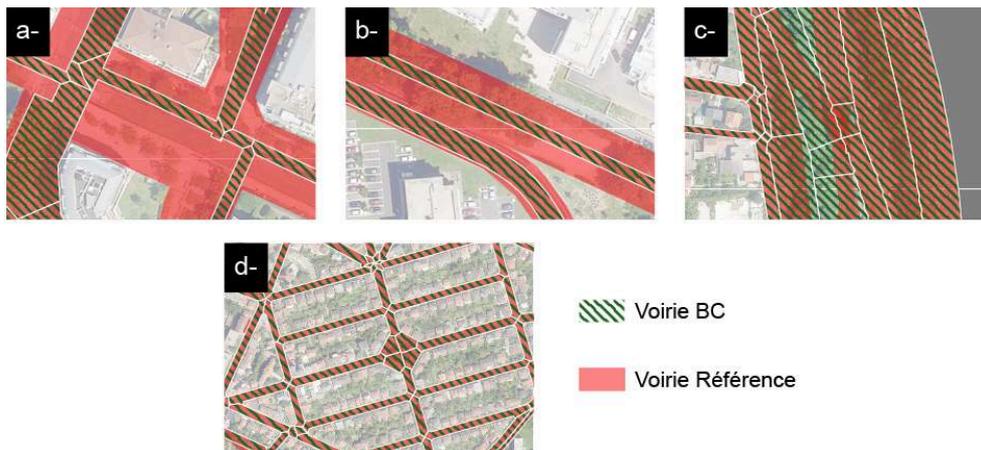
	Régression BL et Chaussées Ref		Régression BC et Référence	
	Pente (a)	R ² (%)	Pente (a)	R ² (%)
PARIS	0,92	47	0,80	72
1 ^{ER}	1,11	53	0,98	84
2 ^E	0,99	60	1,00	98
3 ^E	0,96	61	1,07	95
4 ^E	1,05	56	1,00	79
5 ^E	1,04	54	1,05	91
6 ^E	1,00	70	0,97	97
7 ^E	1,06	57	0,91	77
8 ^E	1,05	37	0,90	79
9 ^E	1,02	67	0,98	95
10 ^E	1,11	70	0,97	90
11 ^E	1,09	60	1,00	91
12 ^E	0,46	25	0,56	49
13 ^E	0,82	48	0,79	72
14 ^E	1,00	62	0,92	92
15 ^E	0,91	51	0,82	75
16 ^E	1,03	52	0,60	51
17 ^E	1,36	57	1,05	85
18 ^E	1,07	56	0,88	85
19 ^E	1,07	48	0,89	80
20 ^E	1,08	57	0,77	81
BORDEAUX	-	-	-	-
ROUEN	-	-	-	-
Centre-ville	1,15	60	0,90	82
CACHAN	0,88	79	0,92	78

Auteur : Pavard, 2020

- 55 D'abord, pour les corrélations entre voirie BL et chaussées *Références*, les coefficients de détermination (R²) sont compris entre 50 % et 70 % à l'exception de trois cas, ceux des 8^{ème} et 12^{ème} arrondissements de Paris (37 %), et de Cachan (79 %). Au-delà des R², les pentes des droites de régression sont proches de 1, ce qui traduit un bon ajustement des droites aux données.
- 56 Ensuite, pour les corrélations entre les surfaces de voiries BC et *Référence*, les R² sont compris entre 80 et 100 % avec des pentes proches de 1. Ces résultats attestent de la bonne estimation des surfaces voiries par la méthode BC. Concernant les corrélations les moins fortes, celles-ci correspondent aux 12^{ème} et 16^{ème} arrondissements, lesquels contiennent les Bois de Vincennes et de Boulogne. Ce résultat est en partie lié au biais introduit dans notre méthode BC. En effet, rappelons que la méthode utilisée s'appuie sur la voirie estimée par la méthode BL pour les voiries non identifiables à partir de l'information cadastrale, telles que la voirie traversant les grands espaces verts. Or, la méthode BL tend à intégrer l'emprise de la chaussée plutôt que de la voirie dans son ensemble. Une analyse des écarts aux modèles, c'est-à-dire des résidus, permet de mieux saisir les raisons des différences entre les surfaces de voiries estimées par les méthodes BL, BC et les données *Références*.
- 57 Les résidus du modèle linéaire BC/*Référence* sont les plus simples à analyser puisqu'ils sont moins nombreux et présentent des configurations claires. Ceux-ci sont présentés à travers l'exemple de Cachan qui dispose de toutes les configurations identifiées (figure 12) :
- la sous-estimation des surfaces voiries BC est présente lors d'aménagements spécifiques de dépendances, tels que de grands espaces piétonniers (a), ou des espaces végétalisés (b) ;

- la surestimation des surfaces voiries BC se retrouve à l'inverse lors d'aménagements complexes de chaussées et notamment d'axes routiers majeurs ou des ouvrages d'art (c) ;
- les écarts au modèle les plus faibles se trouvent sur les voiries respectant des profils en travers standards, c'est-à-dire lorsque des largeurs de chaussées de 5,5 à 6 m et des largeurs de trottoirs de 1,5 à 2,5 m (d).

Figure 12. Résidus du modèle de régression BC-Référence : exemple de Cachan.



Sources : © IGN, ORTHO HR®, 2018
Auteur : Pavard, 2020

- 58 Les résidus du modèle linéaire BL/*Référence chaussées* sont plus complexes de par la variété des configurations observées. Les tentatives de cartographie des résidus et l'approche par superposition des résultats ne permettent pas d'observer des tendances généralisables. Cependant, deux constats sont faits :
- la méthode CERTU surévalue les emprises de chaussée pour la voirie structurante de nos cas d'étude ;
 - il semble exister une relation avec la morphologie des quartiers (pavillonnaires ou de grands ensembles), et donc avec la morphologie de la voirie inhérente à ces quartiers.
- 59 Ces constats, et notamment ceux liés à la relation entre la morphologie des quartiers et la configuration des voiries, suggèrent que la méthode BL peut être améliorée voire affinée pour une meilleure prise en compte des différentes configurations des emprises des chaussées. Ainsi, en alliant les méthodes BL et BC, il deviendrait possible de construire de façon simple et rapide des données surfaciques de voirie fines permettant de distinguer les chaussées des dépendances. La combinaison des deux approches permettrait ainsi aux collectivités, gestionnaires de voirie, de produire par elles-mêmes des données fiables et à moindre coût sur leur patrimoine voirie.

Conclusion et discussion

- 60 Nous sommes partis du constat qu'il existe aujourd'hui peu de méthodes permettant de construire à bas coût des données surfaciques de voirie, fiables et exploitables. Or, les gestionnaires de voirie ont besoin de données de ce type pour comprendre et mieux gérer leur patrimoine de voirie. Par ailleurs, ces gestionnaires ne disposent pas tous des mêmes moyens (humains, techniques et financiers) pour produire ces données à l'aide

des méthodes chronophages ou onéreuses (utilisées principalement par les plus grandes collectivités).

- 61 Pour répondre à cet enjeu, nous avons proposé d'analyser deux méthodes de construction de données surfaciques de voirie s'appuyant sur d'autres données vectorielles déjà produites et accessibles à moindre coût par les collectivités :
- une méthode basée sur l'exploitation du linéaire routier (méthode Base Linéaire) proposée initialement par le CEREMA (anciennement CERTU) ;
 - une méthode basée sur l'exploitation de l'information cadastrale (méthode Base Cadastre) que nous avons développée antérieurement.
- 62 Nous avons confronté des résultats obtenus à partir de ces deux méthodes sur quatre terrains d'études (Paris, Bordeaux, Rouen et Cachan) à des données *Références* produites par levés topographiques et photo-interprétation. Cette confrontation a permis de mettre en évidence que la meilleure estimation de l'emprise de voirie se fait par la méthode à Base Cadastre. Par ailleurs, une analyse à une échelle mésoscopique a permis de décrire plus finement les écarts constatés entre les différentes méthodes :
- la méthode à Base Cadastre présente des résultats bien ajustés aux données *Références* dans une majorité des cas. 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. Les voiries traversant les grands espaces verts ou hydrographiques sont également aujourd'hui difficiles à prendre en compte automatiquement et dans leur intégralité ;
 - la méthode Base Linéaire 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 dans certains cas.
- 63 Ces différents constats nous conduisent à identifier des perspectives à ce travail de recherche méthodologique. D'abord, les méthodes Base Cadastre et Base Linéaire sont aujourd'hui limitées à quatre cas d'étude. Un travail systématique à plus grande échelle permettrait de valider les hypothèses émises et de proposer une amélioration, d'une part de la méthode Base Cadastre, d'autre part de la méthode Base Linéaire.
- 64 Ensuite, les résultats de la méthode Base Cadastre pourront être affinés de plusieurs façons :
- en complétant les sections ou éléments de voirie non pris en compte par le cadastre à l'aide d'informations levées sur le terrain ou par photo-interprétation. La solution à mettre en œuvre dépend du terrain environnant la voirie. Par exemple, pour l'ajout des voiries traversant les espaces verts (ex. Bois de Vincennes ou de Boulogne), les levés terrains sont plus appropriés dans la mesure où la végétation peut faire obstacle à une photo-interprétation exhaustive. À l'inverse, l'ajout des voiries traversant les espaces hydrographiques comme la Seine peut se faire sans difficulté par photo-interprétation manuelle ou automatique ;
 - en prenant mieux en compte certains espaces composant les voiries, tels que les espaces verts en bordure de voirie ou les espaces de stationnement privés. À notre connaissance, ces données existent aujourd'hui uniquement lorsque les collectivités ont choisi de produire des données spatiales complètes d'occupation de leurs espaces communaux. En d'autres termes, ces collectivités n'auraient a priori pas besoin de notre méthode de production de données de voirie dans la mesure où elles disposent déjà de données spatiales complètes décrivant

leurs territoires. Pour les autres, un processus de production de ces données devrait être conçu en alliant toujours les levés terrains et la photo-interprétation manuelle ou automatique selon le type d'aménagement et de végétation.

- 65 Enfin, la méthode Base Linéaire pourrait être améliorée de façon à être plus opérationnelle pour estimer les emprises occupées par les chaussées en agglomération :
- en menant une analyse approfondie permettant d'identifier des règles d'organisation des voiries selon les morphologies urbaines. Cette recherche devra s'appuyer sur des territoires diversifiés par leur histoire et leur géographie. Elle devra aussi tenir compte de différents types urbains, en suivant une approche inter-agglomération en comparant les résultats sur différentes formes d'agglomérations (ex. conurbations littorales et industrielles, ou encore agglomérations anciennes et récentes) et infra-agglomération en analysant les résultats au niveau des quartiers selon leurs spécialisations (ex. quartiers d'habitation, quartiers industriels, ou mixtes), ou selon les modes d'occupation (ex. quartiers pavillonnaires, à habitats collectifs, à habitats mixtes ou encore centres historiques).
- 66 Pour finir, nous supposons qu'une amélioration de la méthode Base Linéaire 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 Cadastre, la distinction entre chaussées et dépendances deviendrait possible. Cette perspective revêt un enjeu important pour les nombreuses collectivités ne disposant pas de moyens humains, techniques et financiers permettant de réaliser des campagnes de levés sur l'ensemble de leur territoire. Apporter une solution fiable conduisant à distinguer les chaussées du reste de la voirie permettrait d'apporter des éléments essentiels à l'optimisation des interventions sur ces infrastructures.

BIBLIOGRAPHIE

- AIRAULT S., JAMET O. (1995), « Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes », *Traitement du Signal*, 12, Saint Martin d'Hères (France), GRETSI, pp. 189-200.
- AUBERT J.-M., TOURJANSKY-CABART L. (2000), « L'allocation de la voirie dans les centres-villes », *Revue française d'économie*, 15, Paris (France), Association Française d'Économie, pp. 157-194.
- AUGELLO D. (2001), « La machine qui a changé la machine », *Les cahiers de médiologie*, 2, Paris (France), Gallimard, pp. 216-223.
- BARTHELEMY M. (2011), "Spatial networks", *Physics Reports*, 499, Baltimore (USA), Elsevier Science, pp. 1-101.
- BAUMGARTNER A., STEGER C., MAYER H., ECKSTEIN W. & EBNER H. (1999), "Automatic road extraction based on multi-scale, grouping and context", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, Bethesda (USA), American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 777-786.

- BRETIGNOLLE A., GIRAUD T. & VERDIER N. (2010), « Modéliser l'efficacité d'un réseau : Le cas de la poste aux chevaux dans la France pré-industrielle (1632-1833) », *L'Espace géographique*, 39, Paris (France), Belin, pp. 117-131.
- BRETEAU P. (2016), « À Paris, la moitié de l'espace public est réservée à l'automobile », *Le Monde*, 30 novembre 2016, Paris (France).
- CERTU, CETE Normandie-Centre (2013), *Mesure de la consommation d'espace à partir des fichiers fonciers*, Lyon (France), Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, CERTU, CETE Nord Picardie.
- CERTU (2009), *Le profil en travers, outil du partage des voiries urbaines*, Lyon (France), CERTU, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.
- COSTE M., RONCAYOLO M. (1980), « La photo-interprétation des formes urbaines », *L'Espace géographique*, 9, Paris (France), Belin, pp. 57-69.
- CORMIER T., DELAVILLE D., MARZILLI G. & DUGUE R. (2020), « Le MOS+ , un premier pas vers une observation moins binaire du ZAN », *Note rapide de l'Institut Paris Region*, Paris (France), Institut Paris Region, p. 6.
- DAVID B., FASQUEL P. (1997), « Qualité d'une base de données géographique : concepts et terminologie », *Rapport de Recherche*, Saint-Mande (France), Institut Géographique National, p. 57.
- DREAL (2014), « Consommation d'espace. Emprise des infrastructures routières », *Observation et statistiques*, Nantes (France), DREAL, p. 11.
- DUPUY G. (1987), « Les réseaux techniques sont-ils des réseaux ? », *L'Espace géographique*, 16, Paris (France), Belin, pp. 175-184.
- FAIVRE D'ARCIER B., CHRISTORY J.-P. & MIGNOT D. (1993), « Approche patrimoniale et gestion de la voirie urbaine », *Rapport pour le secrétariat permanent du plan urbain*, Paris (France), INRETS, LROP, LET, p. 155.
- FOULARD S., ZEIGER P. (2013), « Comment fabrique-t-on le Mos ? Mos 1982-2012 - Du ciel à la carte », *Les cahiers*, 1, Paris (France), IAU, pp. 10-13.
- FOURNIER J.-C., POMEROL J.-C. (2010), *Théorie des graphes et applications : avec exercices et problèmes*, Paris (France), Hermes Science publications : Lavoisier.
- GELSOMINO M. (1979), « Transports et consommation d'espace en Provence-Alpes-Côte d'Azur », *Hommes et Terres du Nord*, 2, 1, Lille (France), Société de géographie de Lille, pp. 135-142.
- GEORGE L.-A., GILLET J.-M., MAIGNOL J. & TOURRET M. (2019), « Méthodes et outils pour une gestion plus rationnelle des réseaux routiers », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 966, Paris (France), Les éditions RGRA, pp. 20-29.
- GOLBERG A.V., HARRESLSON C. (2005), "Computing the shortest path : A search meets graph theory", in *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, New York, NY (USA), Association for Computing Machinery, pp. 156-165.
- GUEROIS M., PAVARD A., BRETIGNOLLE A. & MATHIAN H. (2016), « Les temps de transport pour délimiter des aires urbaines fonctionnelles ? Une investigation critique à partir de trois métropoles européennes », *Belgeo*, 2, Bruxelles, Société Royale Belge de Géographie, pp. 1-20.
- HERAN F. (2015), *Le retour de la bicyclette – Une histoire des déplacements urbains en Europe, de 1817 à 2050*, Paris (France), Editis.

- HERAN F. (2017), « Vers des politiques de déplacements urbains plus cohérentes », *Norois*, 4, Rennes (France), Presses universitaires de Rennes, pp. 89-100.
- HUTCHISON D., KANADE T., KITTLER J., KLEINBERG J.M., MATTERN F., MITCHELL J.C., NAOR M., NIERSTRASZ O., PANDU RANGAN C., STEFFEN B. *et al.* (2010), “Learning to Detect Roads in High-Resolution Aerial Images”, in *Computer Vision – ECCV 2010*, Berlin (Allemagne), Springer Berlin Heidelberg, pp. 210-223.
- JEAN-BART G. (2019), « L'importance de modifier ses pratiques liées au PCRS (témoignage d'une collectivité) », *Les rencontres du Sigeif – Optimiser la gestion et la sécurité des travaux de voirie, un enjeu collectif*, Paris (France), Sigeif.
- LAGESSE C., BONNIN P., BORDIN P. & DOUADY S. (2016), « Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris », *Flux*, 3, Marne-la-Vallée (France), Université Gustave Eiffel, pp. 33-49.
- LAPTEV I., MAYER H., LINDEBERG T., ECKSTEIN W., STEGER C. & BAUMGARTNER A. (2000), “Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes”, *Machine Vision and Applications*, 12, Berlin (Allemagne), Springer Science, pp. 23-31.
- LASSERRE G. (1962), « Colloque national de Géographie appliquée. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 15, Bordeaux (France), Presses universitaires de Bordeaux, p. 196.
- LILLESAND T., KIEFER R.W. & CHIPMAN J. (2015), *Remote Sensing and Image Interpretation*, Hoboken (USA), John Wiley & Sons.
- MERLIN P. (1985), « Les politiques de transport urbain », *Notes et études documentaires*, n° 4797, Paris (France), La Documentation française, p. 88.
- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE. (2017), « Assises nationales de la mobilité », *Assises Nationales de la mobilité – Plateforme participative*, <https://www.assisesdelamobilite.gouv.fr/accueil.html> (accessed 2018, Oct. 5).
- PAPON F., DE SOLERE R. (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*, Paris (France), CGDD, pp. 65-82.
- PAVARD A. (2021), *Optimiser la gestion conjointe de la voirie et des réseaux enterrés à l'aide de la géomatique : conception d'un référentiel spatial de voirie*, Marne-la-Vallée (France), Université Paris-Est Marne-la-Vallée.
- PAVARD A., BORDIN P. & DONY A. (2018), « Modélisation SIG de la voirie », *24^{ème} congrès INFRA*, Québec (Canada), Le CERIU.
- PETERY R., CELLE J. & RANCHIN T. (2003). “Detection and extraction of road networks from high resolution satellite images”, *Image Processing, 2003 ICIP 2003 Proceedings 2003 International Conference on*, 1, Sophia Antipolis (France), IEEE, pp. 1-301.
- TICHA H.B. (2017), *Vehicle Routing Problems with road-network information*, Saint-Étienne (France), École des Mines de Saint-Étienne.

NOTES

1. Méthode répandue pour la construction de données et l'analyse des tissus urbains (Coste, Roncayolo, 1980).

2. Méthode reposant 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 *et al.*, 2015).
 3. La BDD est une 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).
 4. La berme est une 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).
 5. 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.
-

RÉSUMÉS

Pour assurer la gestion et la maintenance des emprises de voiries, il est utile de disposer d'une représentation surfacique de cette infrastructure. Une méthode couramment mise en œuvre (développée par le CEREMA ex-CERTU) consiste à s'appuyer sur des données routières organisées sous forme de graphe, donc composées de lignes (arcs) auxquelles sont affectées des largeurs selon des paramètres estimés a priori à partir des caractéristiques de la voirie. En partant de données cadastrales, nous avons conçu, dans nos précédents travaux, une autre approche, permettant de produire des données surfaciques de voirie sans s'appuyer sur des paramètres prédéfinis liés aux caractéristiques de l'infrastructure. Cet article est une contribution méthodologique visant à étudier et comparer les résultats obtenus par les deux méthodes. Pour cela, ces deux méthodes sont mises en œuvre sur 4 terrains : Paris, Bordeaux, Rouen et Cachan, afin de confronter et de comparer les résultats obtenus à des données de référence. Ces travaux valident l'intérêt de la méthode à base cadastrale en démontrant qu'elle permet de produire des données surfaciques plus précises des emprises de voirie. Ils permettent également de conclure sur la complémentarité des deux approches pour produire des données surfaciques distinguant les chaussées de leurs dépendances.

To ensure the management and maintenance of road rights-of-way, it is useful to have a surface representation of this infrastructure. A method commonly implemented (developed by CEREMA ex-CERTU) the linear-based method consists of relying on road data organized in the form of a graph, therefore composed of lines (arcs) to which widths are assigned according to parameters, estimated a priori from the road characteristics. On the basis of cadastral data, we designed another approach, in our previous works, making it possible to produce surface area data for roads without relying on predefined parameters linked to the characteristics of the infrastructure. This article is a methodological contribution aimed at studying and comparing the results obtained by these two methods. For this, the two methods are implemented on 4 case studies: Paris, Bordeaux, Rouen and Cachan. The results are then compared to benchmark data. This work confirms the interest of the cadastral-based method by demonstrating that it allows the production of more precise surface data of road rights-of-way. They also make it possible to

conclude on the complementarity of the two approaches, to produce surface data distinguishing the pavements from their dependencies.

INDEX

Keywords : road, urban road, geographic database, cadastral data, surface data, linear data

Mots-clés : voirie, voirie urbaine, base de données géographiques, données cadastrales, données linéaires, données surfaciques

AUTEURS

ANTONIN PAVARD

Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, Ecole Spéciale des Travaux Publics, 28 avenue du Président Wilson, 94234 Cachan, France, apavard@estp-paris.eu

PATRICIA BORDIN

GeoSpective, 16 B rue Charles Silvestri, 94300 Vincennes, France, patricia.bordin@geospective.fr

ANNE DONY

Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, Ecole Spéciale des Travaux Publics, 28 avenue du Président Wilson, 94234 Cachan, France, adony@estp-paris.eu