



HAL
open science

Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines

Julien Perret

► **To cite this version:**

Julien Perret. Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines. Géographie. Université Paris Est, 2016. tel-03262902

HAL Id: tel-03262902

<https://hal.science/tel-03262902v1>

Submitted on 16 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.

Synthèse de travaux présentée en vue d'obtenir
l'Habilitation à Diriger des Recherches délivrée par l'Université de Paris-Est,
spécialité «Sciences et Technologies de l'Information Géographique»

Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines

Julien Perret

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN)
Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG)
Équipe «Cartographie et Géomatique» (COGIT)

Présentée le 12 décembre 2016

Composition du jury :

Anne Bretagnolle	Professeur, Université Paris 1	Rapporteur
Christophe Claramunt	Professeur, École Navale	Examinateur
Thomas Devogele	Professeur, Université François-Rabelais de Tours	Rapporteur
Maurizio Gribaudo	Directeur d'Études	Examinateur
Sébastien Mustière	Ingénieur des Travaux Géographiques et Cartographiques de l'État (HDR), IGN	Examinateur
Jean-Pierre Nadal	Directeur de Recherches, CNRS & Directeur d'Études, EHESS	Rapporteur
Nicolas Paparoditis	Directeur de Recherches, IGN	Examinateur
Christiane Weber	Directrice de Recherches, CNRS	Examinatrice

Introduction générale au mémoire

Ce mémoire d’habilitation à diriger des recherches a pour objectif de synthétiser mes travaux de recherche depuis mon recrutement en tant que Chargé de Recherches au laboratoire de Cartographie et Géomatique (COGIT) de l’Institut National de l’Information Géographique et Forestière (IGN) en 2007. Le but étant de faire une synthèse, ce document n’a pas pour objectif de retracer dix ans de recherche de manière exhaustive mais d’articuler et regrouper une partie de mes travaux autour d’une réflexion plus générale. Ce manuscrit offre une piste de lecture, que le lecteur pourra approfondir s’il le souhaite en se rapportant aux articles scientifiques présents en annexe du document. Un rapport d’activité contenant un *curriculum vitae* est également fourni en annexe. Enfin, l’ensemble des thèses de doctorat encadrées et soutenues sont disponibles sur le site “compagnon”¹.

En tant que chercheur en sciences de l’information géographique travaillant dans l’interdisciplinarité, mes contributions aux domaines d’application sont principalement méthodologiques. Je travaille en collaboration avec des spécialistes du transport, des géographes, des urbanistes, des historiens, des démographes, des physiciens, sans prétendre devenir moi-même un spécialiste de ces disciplines. La ville est un système complexe [Pum97, Bat08, PSC⁺15] façonné par des dynamiques opérant à des échelles différentes. Je présente mes contribution dans un ordre correspondant à l’échelle spatiale, de la plus large à la plus fine : la très grande échelle pour les questions liées à la mobilité, la grande échelle pour celles liées à l’urbanisme et la petite échelle pour les questions liées à l’évolution du territoire dans le temps long. J’articule au sein de chacune de ces parties les applications réalisées. Pour chaque partie, je vais m’attacher à proposer un cheminement commun : tout d’abord la question des sources d’information, des connaissances manipulées, leur représentation, leur stockage ; ensuite, la question de l’analyse de ces données, de leur enrichissement, de leur croisement ; enfin, l’interaction avec ces données, leur visualisation, leur interprétation, leur validation, leur correction par des utilisateurs².

¹<http://juju.perret.free.fr/habilitation/>

²Cette grille de lecture n’est pas sans rappeler celle du groupe de recherche MADICS : <http://www.madics.fr/presentationmadics/>

La première partie de ce document traite ainsi de la modélisation, c'est à dire de la représentation, de l'environnement urbain à partir de sources hétérogènes à grande voire très grande échelle. Les modèles reconstruits peuvent servir à simuler les déplacements de piétons et de véhicules et, plus généralement, à mieux comprendre les mobilités. La compréhension des dynamiques en jeu nous permet de mieux anticiper les évolutions (possibles) d'un système, notamment pour mieux les réguler et éviter ou mitiger d'éventuels impacts négatifs. La seconde partie de ce document aborde ainsi la simulation des évolutions territoriales et, en particulier, la simulation des droits à bâtir. La dernière partie de ce document traite de l'étude des évolutions territoriales dans le temps long en s'appuyant sur les sources (géo) historiques à notre disposition. Ce document se termine par une conclusion et des perspectives de recherche sur l'ensemble des sujets abordés.

Table des matières

Introduction générale au mémoire	3
1 Modélisation urbaine	7
1.1 Modélisation procédurale de rues	8
1.2 Modélisation procédurale inverse	8
1.3 Édition interactive	10
2 Simulation urbaine pour l'aide à la décision	13
2.1 Modélisation des connaissances et des données	14
2.2 Simulation des droits à bâtir	16
2.3 Expérimentation	17
3 Modélisation des évolutions territoriales à partir de données géohistoriques	21
3.1 Sources géohistoriques	23
3.2 Référentiels géohistoriques	26
3.3 Interaction avec les données géohistoriques	27
Conclusion et perspectives	31
Bibliographie	34
Publications	43

1 Modélisation urbaine

Introduction

Dans le cadre de ma thèse [Per06], je me suis intéressé à la modélisation des environnements urbains à l'aide de techniques procédurales. Je m'étais alors principalement focalisé sur l'environnement bâti. La modélisation et la reconstruction des bâtiments est un sujet actif comme le montre un état de l'art récent [MWA⁺12] et a notamment donné lieu, à l'IGN, à la mise en place d'une chaîne de production (Bati3D) fondée sur des travaux de recherche menés dans les laboratoires de l'établissement [Tai05, DT06, Bré10]. Toutefois, l'environnement urbain ne se résume pas aux bâtiments. En effet, la rue est un élément central et structurant des villes qui mérite une place importante dans un modèle 3D de ville. La complexité des relations spatiales qui lient les rues entre elles et au reste de l'environnement urbain (en particulier au bâti) en fait un objet particulièrement intéressant pour la modélisation 3D. Enfin, la diversité des pratiques dont elle est le support ouvre de nombreuses questions et opportunités de recherche dans le contexte d'une prise de conscience de l'importance d'une meilleure maîtrise de la consommation énergétique liée aux déplacements motorisés (en particulier à la circulation automobile) et de leurs conséquences sur l'environnement (congestion, pollution atmosphérique et sonore, effet de serre, etc.) [BMTAL12, CCNL10, SJW12]. Les outils de simulation capables d'évaluer ces impacts nécessitent des données adaptées [LLC07]. À l'IGN, ces questions ont été abordées dans le cadre de plusieurs projets, en particulier *iSpace&Time*¹, *TerraMobilita*² et *TrafiPollu*³. Ces travaux ont notamment montré l'intérêt de la modélisation fine de routes pour la génération de graphes [YBPP13, Yir16] pouvant être utilisés dans le cadre de la simulation (comportementale) de piétons ou l'animation de foules [Lam09, JL13, PLT05] ainsi que pour la simulation de trafic [SA16].

C'est donc dans ce contexte que la thèse de Rémi Cura [Cur16], soutenue en septembre 2016, s'est déroulée. Elle a porté sur la modélisation procédurale des rues à partir d'observations d'éléments urbains acquis par télédétection. Je ne vais pas m'attarder ici sur les aspects de ce travail concernant la gestion des nuages de points. Le lecteur intéressé pourra consulter la thèse de

¹<https://sites.google.com/site/ispaceandtime>

²<https://sites.google.com/site/terramobilita2012/>

³<https://sites.google.com/site/trafipollu/home>

Rémi Cura [Cur16] mais aussi les articles détaillant ces divers aspects, en particulier le stockage et la gestion en base des données de nuages de points massifs [CPP15a, CPP16]. La suite de ce chapitre se concentre sur les trois verrous restant pour une telle modélisation. Tout d’abord, la section 1.1 présente les principes du modèle procédural proposé : *StreetGen*. La section 1.2 décrit ensuite l’optimisation du modèle afin de le recalibrer sur des observations. Enfin, l’édition interactive et collaborative du modèle est présentée dans la section 1.3.

1.1 Modélisation procédurale de rues

La modélisation procédurale est une technique particulièrement pertinente lorsque la quantité d’information disponible *a priori* est faible par rapport à l’information à générer [Per06]. Ici, l’idée est de s’appuyer sur les tronçons de route de la BDTopo[®], disponible sur l’ensemble du territoire français. Cette base de données représente l’axe des routes ainsi que leur largeur approximative, le nombre de voies estimé et l’orientation de la circulation routière sur le tronçon. La proposition de Rémi Cura, illustrée par la figure 1.1, consiste à s’appuyer sur ce modèle initial et à l’enrichir pour construire des surfaces de route (et de carrefour), générer des axes des voies pour la simulation de trafic et gérer des objets urbains (passages piétons, feux, etc.). Une hypothèse de départ, l’hypothèse cinématique, permet de proposer des rayons de courbure aux carrefours en fonction de la vitesse potentielle estimée des véhicules et d’initialiser le modèle avant toute intervention par un utilisateur. Afin de construire la géométrie des carrefours, les rayons de courbure sont en effet nécessaires. Cette hypothèse a été appliquée sur l’ensemble de la ville de Paris pour générer un modèle de rue et montrer la robustesse du modèle et son utilisabilité pour la visualisation et la simulation de trafic avec SimuVia [SA16].

L’ensemble du modèle *StreetGen* est stocké en base de données, ce qui permet l’automatisation de traitements et l’indépendance du modèle par rapport à l’outil utilisé pour le visualiser [CPP15b].

1.2 Modélisation procédurale inverse

Les données d’entrée de *StreetGen* (tronçon de rue) ne sont néanmoins pas adaptées à l’échelle et à l’utilisation souhaitée. Le modèle de route est alors affiné par recalage sur des observations d’objets urbains (passages piétons, panneaux de circulation, feux, bords de trottoirs, etc.) extraites automatiquement à partir de sources diverses (images et points Lidar notamment) [SPB10, SM14, SPV13, HSB15]. Nous parlons alors de modélisation procédurale inverse [TLL⁺11]. L’approche proposée par Rémi Cura consiste à modéliser les propriétés attendues entre le modèle généré et les observations : les observa-

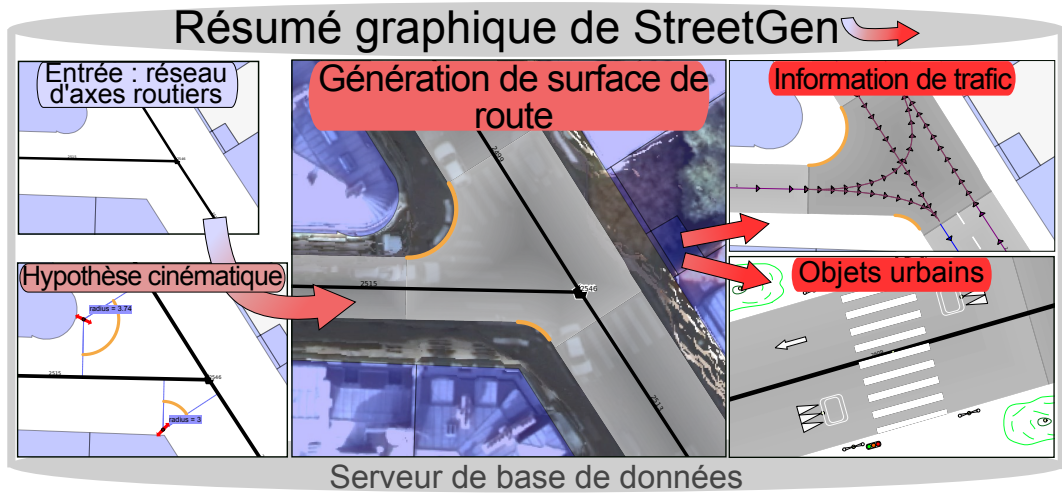


Figure 1.1: La modélisation procédurale de rue avec StreetGen d'après Rémi Cura [Cur16].

tions de trottoirs doivent se situer sur le bord du modèle de route, les passages piétons sur la voirie, etc. Il s'agit alors de résoudre un problème d'optimisation pour minimiser une énergie représentant le non respect des propriétés attendues et les déformations du modèle initial (la résistance du modèle représentant la confiance dans le modèle initial). Afin de simplifier la résolution du problème d'optimisation, une simplification est faite au modèle et la géométrie des carrefours n'est pas utilisée pour calculer l'écart entre le modèle et les observations. La figure 1.2 illustre le processus proposé. Appliqué sur une partie de

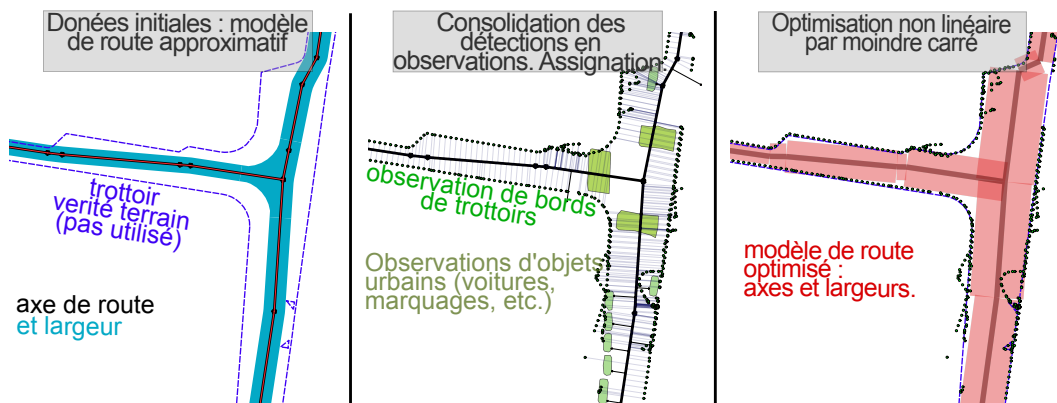


Figure 1.2: Étapes pour l'optimisation d'un modèle de route à partir de données existantes d'après Rémi Cura [Cur16].

Paris, il montre une nette amélioration de la qualité du modèle et la robustesse

de l'approche.

1.3 Édition interactive

Néanmoins, s'il s'agit de produire un modèle fiable et validé, l'interaction avec les utilisateurs est primordiale et inévitable. En effet, la validation, la correction et l'enrichissement d'un tel modèle à l'échelle de Paris représentent des tâches complexes et chronophages. Afin de pouvoir passer à l'échelle (pour envisager, par exemple, l'utilisation du modèle sur la France entière), *StreetGen* a donc été conçu pour être manipulé collaborativement par plusieurs opérateurs simultanément. La complexité, ici, réside dans la nature des interactions nécessaires à l'édition d'un tel modèle. L'édition du rayon de courbure à l'intersection entre deux rues est complexe car cette donnée porte sur la relation entre ces deux rues. Rémi Cura a ainsi proposé un ensemble de mécanismes d'interaction pour résoudre ce type de problèmes (voir figure 1.3). Pour l'exemple du rayon de courbure, il s'agit de manipuler un objet "proxy", le centre du rayon de courbure, pour changer la valeur du rayon (le centre étant repositionné automatiquement). Enfin, pour rendre ces interactions accessibles depuis toute interface utilisée par les opérateurs, elles sont implémentées dans la base de données.

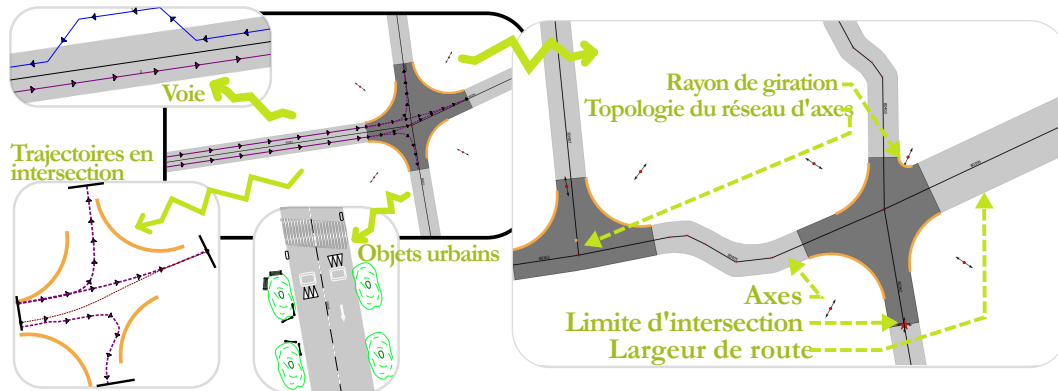


Figure 1.3: Gestion de l'interaction directement dans la base de données d'après Rémi Cura [Cur16].

Conclusion et perspectives

Les travaux de Rémi Cura ont ainsi montré les capacités d'un modèle procédural tel que *StreetGen* à générer un modèle de rue à partir de données disponibles

sur l'ensemble du territoire français (la BDTopo®). Ce modèle peut être automatiquement recalé sur des observations hétérogènes, de provenances diverses, et à très grande échelle, indépendamment de leur moyen d'acquisition. Enfin, des solutions originales ont été proposées afin de permettre aux utilisateurs d'interagir avec le modèle, et ce de façon collaborative. De plus, différents outils de qualification des résultats de la reconstruction permettent de focaliser l'attention des opérateurs sur les zones qui nécessitent le plus d'attention (où l'écart avec les observations est le plus important par exemple).

Ces travaux ouvrent de nombreuses pistes de recherche. Tout d'abord, l'expressivité de *StreetGen* pourra être enrichie par l'ajout de différents types de tronçon. En effet, *StreetGen* utilise pour l'instant la même hypothèse simplificatrice que la BDTopo® concernant la largeur de tronçons de route et une partie importante des écarts entre le modèle et les observations vient de cette hypothèse (cf. figure 1.2). En ce qui concerne la modélisation procédurale inverse, l'utilisation de techniques d'optimisation permettant de faire varier le nombre de paramètres permettra de découper automatiquement les tronçons. Il s'agira aussi de chercher à optimiser le modèle complet et non une version simplifiée (il faudra en particulier gérer les rayons de courbure pour les intersections). Néanmoins, ces extensions se feront probablement à un coût en temps de calcul significatif, ce qui pose la question du passage à l'échelle. On pourra, par exemple, envisager une méthode multi-échelle qui utilise différents mécanismes d'optimisation en fonction de l'échelle, de l'écart entre le modèle et les observations et des spécifications de l'utilisateur. Enfin, les mécanismes d'interaction proposés devront être enrichis, notamment pour une édition topologique plus simple. On pourra aussi chercher à appliquer ces modes d'interaction à d'autres contextes de saisie, correction et enrichissement collaboratifs d'information géographique.

Plus généralement, deux pistes me paraissent importantes pour l'élargissement de l'application de ces travaux. En effet, la réforme «anti-endommagement des réseaux» ou «DT-DICT», entrée en application en 2012, présente un volet cartographique visant à améliorer la précision du repérage des réseaux et à faciliter l'échange d'information entre les différents acteurs. En 2015 est ainsi signé un accord pour la constitution et la diffusion du Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS), fond de plan commun à très grande échelle représentant principalement les bordures de trottoirs sur la voie publique, la verticale des façades des bâtiments et les affleurants de réseaux. Ce fond de plan permettra ainsi de disposer du socle nécessaire pour le positionnement des données «métier» sur les réseaux. La production d'un tel référentiel à l'aide d'outils tels que *StreetGen*, permettant notamment de préserver le lien entre les données très grande échelle et les données grande échelle (en particulier la BDTopo®) me paraît une opportunité intéressante pour la valorisation de résultats de recherche. Enfin, le dernier domaine d'application, celui du véhicule autonome, donne lieu

à une collaboration avec, entre autres, l'institut *VEDECOM* (institut français de recherche partenariale publique-privée et de formation dédié à la mobilité individuelle décarbonée et durable)⁴.

Codes

Une partie des codes de la thèse de Rémi Cura est disponible sur les dépôts suivants :

- https://github.com/Remi-C/PPPP_utilities : différentes fonctions utilisées dans la thèse autour de PostgreSQL, PostGIS, PostGIS Topology et PointCloud,
- https://github.com/Remi-C/Network_snapping : recalage automatique du réseau sur les observations.

Le dépôt en *open source* des codes de StreetGen et des interactions en base est en cours de discussion.

⁴<http://www.vedecom.fr/>

2 Simulation urbaine pour l'aide à la décision

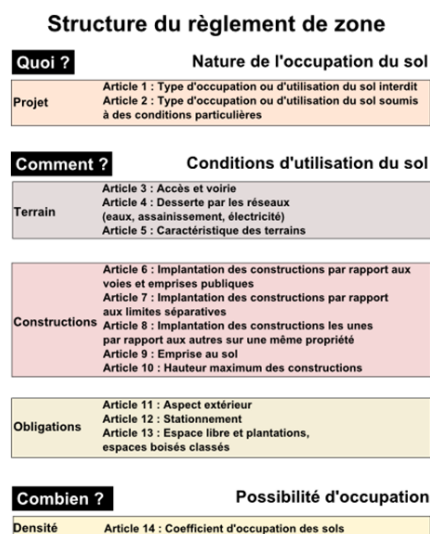


Figure 2.1: Structure du règlement de zone du PLU d'après Mickaël Brasebin [Bra14].

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés à la modélisation urbaine à très grande échelle permettant, notamment, l'étude de phénomènes liés à des temporalités courtes : simulation de trafic, piétons, etc. La simulation est un outil de plus en plus utilisé pour l'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire, de planification et de prospective territoriale. L'IGN a ainsi commencé, en 2008, une activité de recherche visant à mieux comprendre les besoins de ces domaines du point de vue des sciences de l'information géographique. Le projet ANR *GeOpenSim* (2008-2011) concernait ainsi la création et la modélisation de bases de données spatio-temporelles pour l'étude des dynamiques territoriales, notamment de la densification urbaine [PBMR09, CPR10, PCGR10, PLS⁺11, RPC⁺11, LLB⁺12]. Le projet

TerraMagna (2008-2010) visait quant à lui au développement d'un système d'information géographique 3D intégrant différents outils de simulation et la modélisation de phénomènes physiques environnementaux. Dans ce cadre, des travaux ont été menés en collaboration avec le service Conseil de l'IGN sur la formalisation des éléments réglementaires des Plans locaux d'urbanisme (PLU) [BPH10, BPH11b, BPH11a] (cf. figure 2.1). La thèse de Mickaël Brasebin [Bra14], soutenue en 2014, s'est ainsi inscrite dans la continuité de ces travaux préalables. Ce travail a ainsi montré l'utilisation des données géographiques 3D pour l'exploitation de tels éléments réglementaires à travers deux usages : la vérification du respect des règles d'urbanisme (pour l'aide à l'instruction des permis de construire par exemple) et la proposition de configuration bâties par la simulation.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons tout d'abord le modèle de données proposé par Mickaël Brasebin pour représenter les connaissances nécessaires à la simulation des droits à bâtir (section 2.1). L'approche de simulation est alors décrite (section 2.2). Enfin, les expérimentations menées autour des résultats de ces travaux sont brièvement exposées en section 2.3.

2.1 Modélisation des connaissances et des données

Dans la zone CEN UB 44, en bordure de la rue Georges Wodli et du boulevard du Président Wilson, la hauteur maximum mesurée à l'égout principal des toitures sera de 20 mètres sur une profondeur de 30 mètres à compter de l'alignement de ces voies.

Figure 2.2: Exemple de règle extraite du POS de Strasbourg [CUS11] en colorant les **objets** géographiques, les **propriétés** et les **relations** mentionnées ou leurs valeurs, d'après Mickaël Brasebin [Bra14].

Les règles d'un PLU décrivent des contraintes sur les éléments de construction (cf. figure 2.2). Mickaël Brasebin a proposé de formaliser ces contraintes par des expressions de règles en *OCL* (Object Constraint Language). Ces règles s'appuient sur un ensemble d'objets géographiques, de propriétés et de relations qui sont formalisés.

Pour représenter l'espace sur lequel sont évaluées les contraintes, un modèle pour les objets géographiques décrits dans le PLU a été proposé (cf. figure 2.3) en s'appuyant sur des standards de l'information géographique (*CityGML*, *Inspire*, *COVADIS*). Pour la mise en place de ce modèle, un certain nombre de concepts a été introduit afin de prendre en compte les complexités, parfois

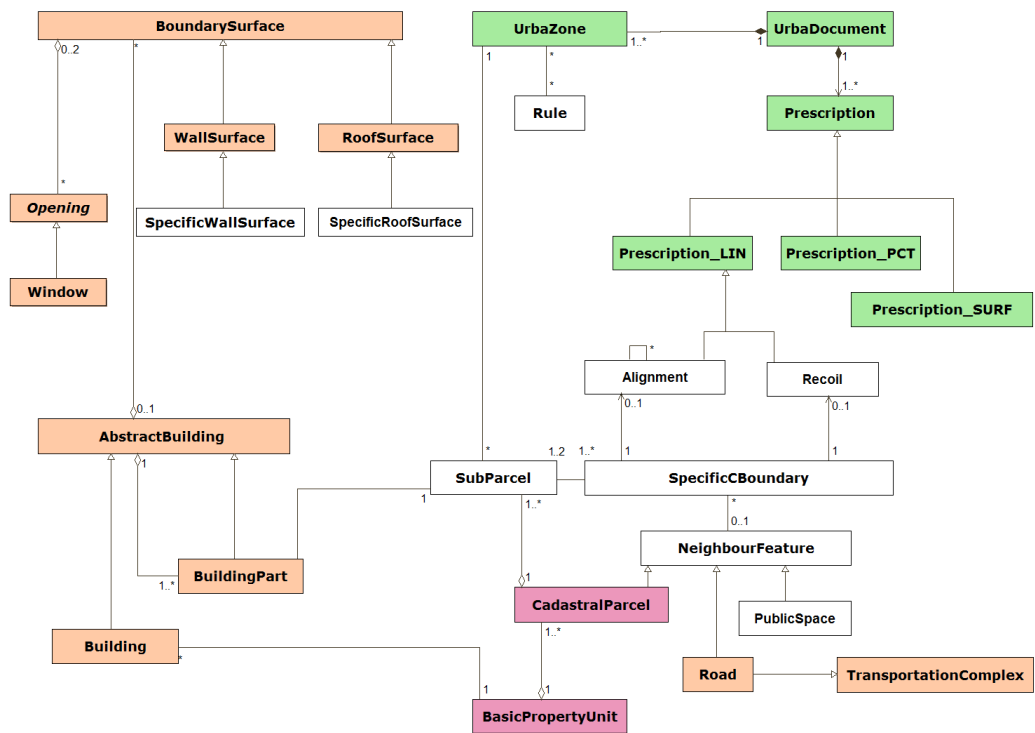


Figure 2.3: Schéma global représentant les principales classes du modèle pour la simulation des droits à bâtir d'après Mickaël Brasebin [Bra14].

implicites, des règles de PLU. Par exemple, la notion de sous-parcelle est liée à la possibilité, pour une parcelle, d'être régulée par plusieurs zones du PLU, formant ainsi des sous-parcelles, chacune d'entre elles étant régulée par une seule zone. Des processus d'intégration des données géographiques de référence ont enfin été proposés afin de les enrichir par des informations nécessaires à la vérification des règles d'urbanisme (annotation des limites séparatives par exemple), c'est à dire au respect des contraintes formalisées. En effet, une fois les règles d'une zone du PLU formalisées et les données géographiques intégrées dans le modèle proposé, nous pouvons alors vérifier, pour une parcelle et un projet de construction donnés, le respect des contraintes exprimées par les règles.

2.2 Simulation des droits à bâtir

Afin de simuler des dynamiques, nous avons aussi besoin de connaissances sur ces dernières. Dans le cadre de la simulation des droits à bâtir, ces dynamiques concernent en particulier les règles d'urbanisme qui contraignent ces droits, mais aussi les objectifs de la simulation. Différentes méthodes existent pour la simulation urbaine. L'une des techniques les plus utilisées est la simulation multi-agents que nous avons notamment utilisée dans le cadre du projet *GeOpenSim* [PBMR09, CPR10, PCGR10]. Dans ce contexte, on peut assimiler les objectifs de la simulation aux objectifs des agents simulés. Pour la simulation des droits à bâtir, une autre approche est exploitée : l'optimisation stochastique sous contraintes. L'idée est ici de modéliser les bâtiments à construire par une configuration bâtie faite d'un ensemble d'objets paramétriques simples, à savoir des parallélépipèdes rectangles (cf. figure 2.4).

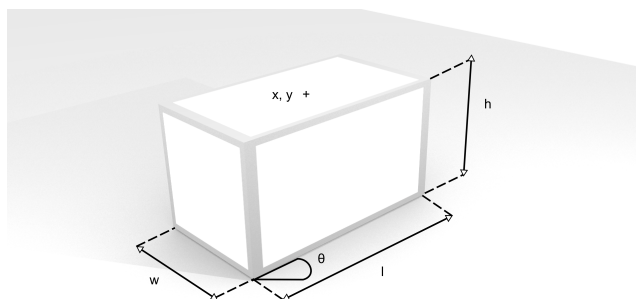


Figure 2.4: Forme paramétrique utilisée pour la simulation des droits à bâtir : un parallélépipède rectangle d'après Mickaël Brasbin [Bra14].

Une simulation est ensuite effectuée en optimisant une fonction objectif

(maximisation du volume construit par exemple) à l’aide d’un algorithme d’optimisation stochastique combinant un recuit simulé et un échantillonneur RJMCMC [BT12]. Les contraintes du PLU sont alors utilisées pour rejeter les solutions proposées par l’échantillonneur qui ne les respectent pas [Bra14] ou intégrées à la fonction objectif pour pénaliser ces solutions [HPBB15]. L’intérêt de cette dernière approche est de permettre une prise en compte de l’imprécision des données utilisées et des configurations générées.

2.3 Expérimentation

Les résultats, illustrés par la table 2.1, ont été appliqués sur plusieurs collectivités dans le cadre de la thèse de Mickaël Brasebin, notamment sur la communauté urbaine de Strasbourg (CUS) [BPMW12, Bra14, BPMW16], mais aussi sur la Plaine Commune (Grand Paris) dans le cadre du projet FEDER *e-PLU*¹ [HPBB15].

Plusieurs pistes sont aujourd’hui explorées pour l’exploitation de tels résultats de recherche pour la concertation (PEPS *PLU++*²), pour la constitution d’une base de données sur la constructibilité en Île-de-France avec l’IAU-IdF ou l’exploration des résultats de simulation à l’aide du calcul distribué [RLRC13, BPR15].

Conclusion et perspectives

Les travaux de recherche de Mickaël Brasebin ont ainsi permis de formaliser une partie importante des aspects morphologiques des règlements d’urbanisme. Cette formalisation peut être utilisée d’une part pour la vérification du respect de telles règles, mais aussi pour la simulation de configurations bâties respectant ces règles et optimisant une fonction objectif donnée. Enfin, des processus sont proposés afin d’intégrer les données de référence dans le modèle.

Ces travaux de recherche arrivent à maturité dans un contexte opportun, celui de la mise en place du Géoportail de l’Urbanisme (GPU)³ par le Ministère du Logement et de l’Habitat Durable (MLHD) et l’IGN. Le GPU vise à fournir un portail unique pour la mise à disposition des informations urbanistiques pour les citoyens, les professionnels et les administrations. Une première expérimentation est d’ailleurs en cours entre les données issues du GPU et les outils développés pour l’aide à l’instruction des permis de construire.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives de recherche. Tout d’abord, concernant la modélisation des règles et leur utilisation pour la vérification et la

¹<http://www.e-plu.fr/>

²<https://ignf.github.io/PLU2PLUS/>

³<http://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr/>

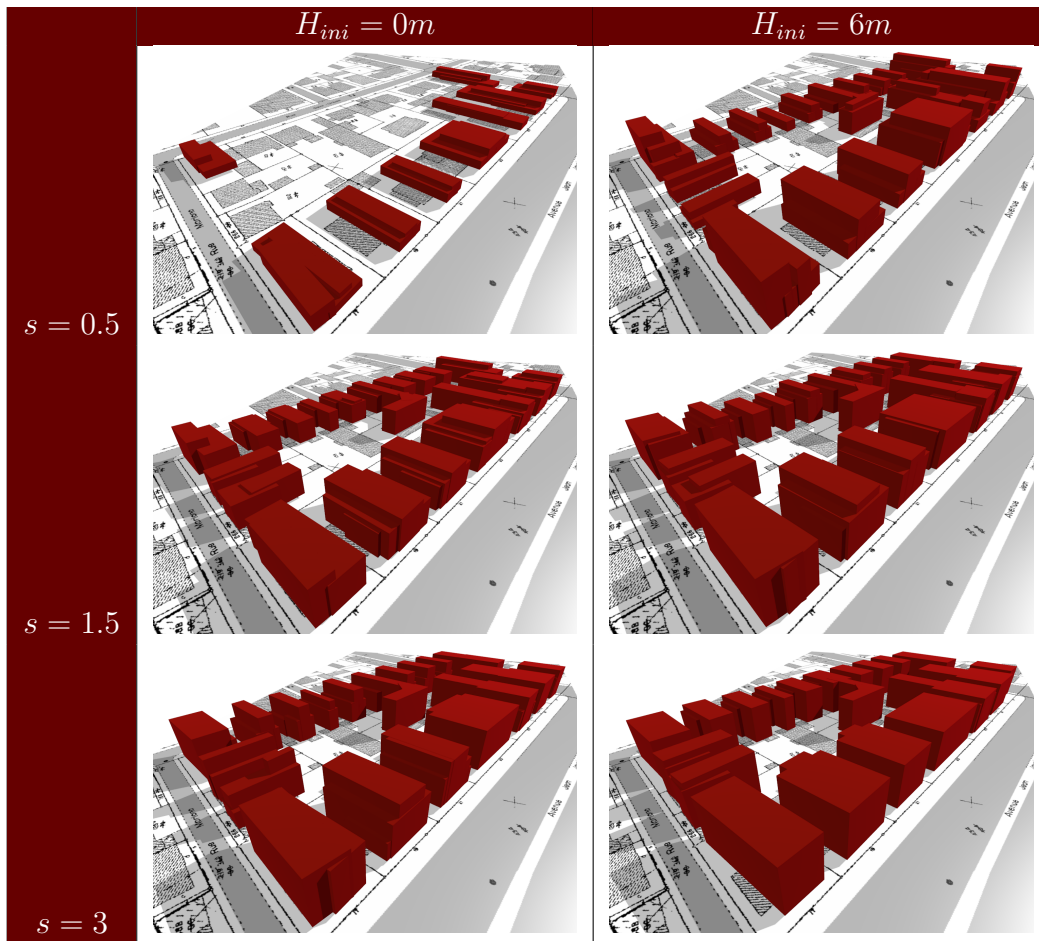


Table 2.1: Différentes configurations bâties générées pour différents paramètres de prospect d'après Mickaël Brasebin [Bra14].

simulation, il s'agit notamment de prendre en compte une plus grande variété d'objets. En particulier, l'aspect le plus significatif concerne la possibilité de gérer les extensions du bâti existant. En effet, les outils actuels ne sont pas capables de proposer l'ajout d'un étage à un bâtiment par exemple. La prise en compte des places de stationnement semble par ailleurs importante et remet partiellement en question l'utilisation des parallélépipèdes dans l'optimisation.

La prise en compte des imperfections des données géographiques est par ailleurs un enjeu majeur que nous n'avons fait qu'effleurer dans le cadre de ces travaux, notamment avec le travail post-doctoral de Shuang He [HPBB15]. Enfin, la thèse de Maxime Colomb (commencée fin 2015), co-dirigée par Cécile Tannier et encadrée par Mickaël Brasbin, intervient sur la question du couplage de modèles de simulation. En effet, les outils de simulation des droits à bâtir travaillent à grande échelle et modélisent l'influence du règlement local

sur l'évolution du territoire. Par ailleurs, les outils de simulation de scénarios de développement résidentiel tels que *MU-City* [TFG12] sont plus à même de prendre en compte l'influence du Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT). Le couplage de tels modèles devrait donc, à terme, permettre de mieux appréhender l'interaction entre ces documents.

Codes

Les codes de la thèse de Mickaël Brasebin et des travaux de recherche effectués dans sa continuité sont disponibles sur les dépôts suivants :

- <https://github.com/IGNF/librjmc4j> : bibliothèque générique d'optimisation stochastique basée sur RJMCMC, portage de la bibliothèque <https://github.com/IGNF/librjmc>,
- <https://github.com/IGNF/simplu3D> : bibliothèque de génération de formes bâties respectant les règles du PLU,
- <https://github.com/IGNF/simplu3D-rules> : bibliothèque pour la gestion et la vérification des règles d'urbanisme du PLU,
- <https://github.com/IGNF/simplu3D-openmole> : workflow pour l'exploration de simplu3D avec *OpenMole*⁴.

⁴<http://openmole.org/>

3 Modélisation des évolutions territoriales à partir de données géohistoriques

Introduction

L'application des nouvelles technologies aux sciences humaines et sociales questionne notre rapport à la connaissance et à la culture et révèle un besoin croissant pour de meilleures interactions entre ces sciences au sein d'une discipline parfois appelée "humanités numériques". Ce domaine de recherche est particulièrement stimulé par la dématérialisation des bibliothèques et archives pour la préservation, la diffusion et la valorisation des documents, des connaissances et plus généralement du patrimoine culturel.

Depuis les années 2000, un investissement national et local important a été consenti afin de numériser les dépôts des archives départementales, municipales et nationales¹. Un nombre important de cartes et plans ont ainsi été numérisés, en particulier par l'IGN, la Bibliothèque nationale de France (BnF) et les Archives Nationales. Néanmoins, la grande majorité de ces sources ne sont pas géoréférencées, en partie du fait de l'absence d'outils (collaboratifs) adaptés et d'une plate-forme (commune et libre) dédiée ou du moins adaptée à la recherche.

Si des plate-formes nationales telles que le *Géoportail*² existent, elles ne sont pas dédiées aux données géohistoriques ni aux données de recherche. En effet, la plupart de ces plate-formes vise la production des données de référence (validées), ce qui n'est pas compatible avec les données issues de la recherche qui peuvent être mises à jour régulièrement et doivent pouvoir être modifiées, enrichies et spécialisées (en fonction d'hypothèses propres) par les chercheurs, mais aussi par d'autres utilisateurs. Néanmoins, nous pourrions imaginer qu'un jeu de données issu de la recherche et ayant atteint une maturité suffisante, que ce soit en termes de qualité et de réflexion commune, puisse être diffusé sur ce type de plate forme (c'est par exemple le cas de la Carte de Cassini dont la numérisation et le géoréférencement sont le fruit d'une collaboration

¹<http://www.numerique.culture.fr>

²<http://geoportail.gouv.fr/>

entre l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS), la BnF et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et qui est disponible sur le *Géoportail* de l'IGN³). D'autre part, les plate-formes collaboratives telles qu'*OpenStreetMap*⁴ visent la production de données le plus à jour possible, ce qui n'est pas directement compatible avec les données géohistoriques. Cette question de la relation entre les données et l'état de la connaissance interrogent plus généralement le rapport entre les données de la recherche et les citoyens. De nos jours, le *crowdsourcing* et la science citoyenne font partie intégrante de notre culture avec des projets emblématiques tel que *Wikipedia*⁵.

Ces questions sont importantes pour des raisons internes et externes. Dans un premier temps, la numérisation des documents n'est pas suffisante et nous avons besoin d'une plus grande transparence entre les sources primaires (les documents numérisés), les données qui en sont extraites (leur dématérialisation), et l'ensemble des traitements intermédiaires entre ces étapes, mais aussi entre les données et leurs utilisations ultérieures. En effet, la traçabilité étant au cœur de la démarche des chercheurs en sciences humaines et sociales (en particulier des historiens), nous devrions toujours être capables de retracer les données à leur source primaire afin de suivre les biais potentiellement introduits et de prendre en compte l'incertitude des données produites dans l'ensemble de leurs traitements. Dans un second temps, le besoin de données plus fiables, de méthodes et outils plus performants et adaptés pour l'analyse dans le temps long des évolutions territoriales devrait être une priorité dans le contexte d'une prise de conscience grandissante pour le changement climatique et les objectifs de développement durable, en particulier vis à vis du développement urbain et de sa planification.

L'étude de l'évolution des territoires et de la co-évolution des structures spatiales et sociales dans le temps long nécessitent la numérisation et l'appariement, voire la fusion d'une quantité importante de sources géohistoriques. Dans l'ensemble des travaux présentés dans ce chapitre, nous avons proposé des données, des méthodes et des modèles pour étudier les évolutions des structures spatiales (réseaux de rues, parcelles, bâtiments, etc.) et leurs transformations, mais aussi les structures sociales (adresses, activités, etc.) et leurs relations.

Plusieurs approches impliquent déjà des communautés d'utilisateurs pour résoudre des tâches complexes. Une étude récente [Hak13] propose une typologie des niveaux de participation et d'implication dans les sciences citoyennes et l'information géographique participative. Les quatre niveaux proposés couvrent le *crowdsourcing* (niveau 1) où les citoyens agissent comme des capteurs jusqu'à la science citoyenne extrême (niveau 4) où la science elle-même de-

³[https://www.geoportail.gouv.fr/10=GEOGRAPHICALGRIDSYSTEMS.CASSINI::GEOPORTAIL:OGC:WMTS\(1\)&permalink=yes](https://www.geoportail.gouv.fr/10=GEOGRAPHICALGRIDSYSTEMS.CASSINI::GEOPORTAIL:OGC:WMTS(1)&permalink=yes)

⁴<http://openstreetmap.org/>

⁵<https://fr.wikipedia.org/>

vient collaborative : les participants peuvent s’impliquer dans la définition des problèmes, l’acquisition des données, mais aussi leur analyse.

Les sources géohistoriques peuvent être ambiguës et les approches collaboratives usuelles pourraient échouer dans les cas où les collaborateurs ne parviennent pas à trouver un consensus. Une solution couramment utilisée pour résoudre ce type de conflit consiste à définir plusieurs niveaux d’utilisateurs où les utilisateurs de chaque niveau interviennent pour résoudre les conflits du niveau inférieur (modérateurs de *Wikipedia*). Dans le cadre des approches semi-automatiques, ce sont les contributions de processus automatiques qui doivent être validées par les utilisateurs. Enfin, dans la production de bases de données pour la recherche, les chercheurs ont parfois besoin de spécifier leurs propres hypothèses qui peuvent varier d’un chercheur à l’autre. Pour éviter la duplication des données et résoudre une partie de ces questions, les outils de versionnement distribués fournissent une solution élégante.

La production de données géohistoriques est plus généralement sujette à de nombreuses sources d’imperfections [Dum15]. Il est nécessaire de prendre en compte ces imperfections de la production des données jusqu’à leur analyse. Au moment de la production, il s’agit d’identifier et de qualifier les imperfections des sources (lacunes, précision géométrique, etc.). Pendant la production des bases de données, ces informations peuvent être utilisées pour l’appariement et la fusion des sources. Enfin, pendant l’analyse, le défi consiste à intégrer l’ensemble de ces incertitudes.

Le dernier défi, le plus important, consiste à utiliser l’ensemble des informations collectées afin de mieux comprendre les liens entre évolutions morphologiques et sociales.

Sur l’ensemble de ces questions, j’ai encadré deux thèses et mis en place un projet collaboratif. Le reste de ce chapitre présente brièvement ces travaux avant de conclure sur les diverses contributions apportées au domaine et les perspectives qui nous semblent les plus pertinentes.

3.1 Sources géohistoriques

Bertrand Duménieu a proposé dans sa thèse de doctorat la mise en place d’un “système d’information géographique pour le suivi d’objets historiques urbains à travers l’espace et le temps” [Dum15]. Dans sa thèse, soutenue en 2015, Bertrand Duménieu a en effet proposé une approche globale pour la production de bases de données spatio-temporelles à partir de sources géohistoriques telles que des cartes et plans. Le cadre applicatif de cette thèse est la ville de Paris aux *XVIII^e* et *XIX^e* siècles (cf. figure 3.1).

Cette approche peut être décomposée en trois étapes (cf. figure 3.2) :

1. l’intégration des sources géohistoriques,

Verniquet (1784-1791) Vasserot (1808-1836) Jacoubet (1827-1836) A. Municipal (ed. 1888)
© ALPAGE

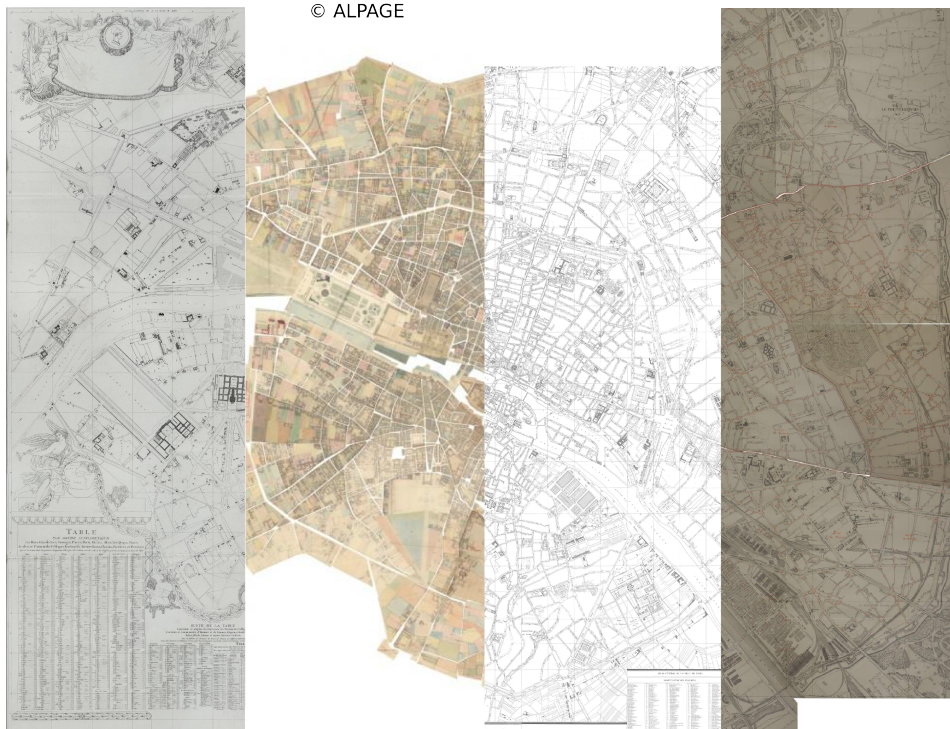


Figure 3.1: Plans de Paris utilisés dans le cadre de la thèse de Bertrand Duméniou [Dum15].

2. l'intégration des données géohistoriques,
3. l'intégration des données spatio-temporelles.

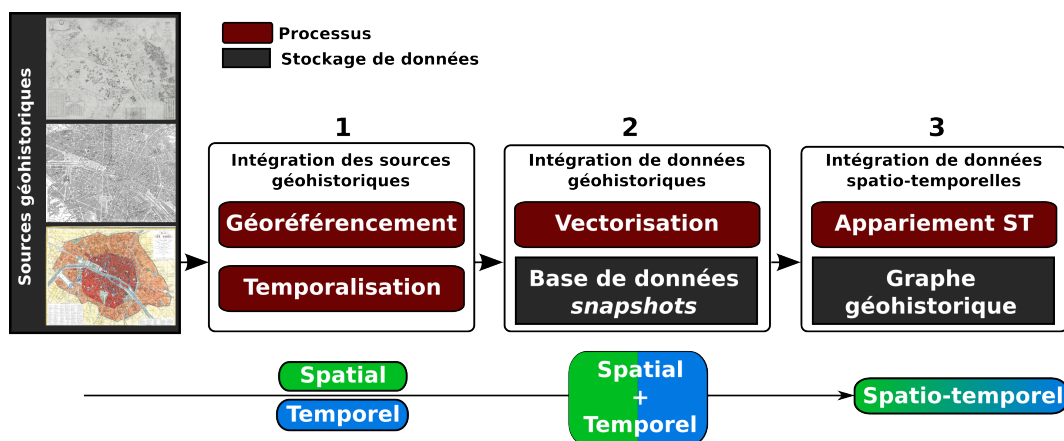


Figure 3.2: Schéma général de la proposition de Bertrand Duménieu [Dum15].

L'intégration des sources géohistoriques consiste à placer chaque source dans l'espace géographique (géoréférencement) et dans le temps (temporalisation). Pour chacune de ces phases, il faut prendre en compte les spécificités des sources utilisées et réduire les erreurs de géoréférencement et de temporalisation.

L'intégration des données géohistoriques consiste à extraire de données vectorielles depuis les sources et à les stocker dans une base de données géohistorique. Les concepts de trace d'entité géohistorique et d'observation géohistorique permettent de représenter la double interprétation de l'entité géohistorique faite dans le cadre des données géohistoriques par les auteurs du plan et ceux de sa vectorisation respectivement.

Enfin, l'intégration des données spatio-temporelles permet de relier les observations géohistoriques entre elles par l'identification des processus spatio-temporels. Le graphe géohistorique, une adaptation du graphe spatio-temporel de Géraldine Del Mondo [DMSCmT10, SDMTC11, DM11], est obtenu par appariement spatio-temporel. Ce processus consiste à chercher, par optimisation stochastique, l'hypergraphe de filiation le plus vraisemblable en s'appuyant sur la théorie de Dempster-Shafer.

Dans sa thèse, Bertrand Duménieu a formalisé un cadre méthodologique complet pour passer de plans à des données vecteur spatio-temporelles. Il a proposé des méthodes quantitatives et qualitatives originales pour une analyse fine des plans et une prise en compte leur complexité. Il a enfin proposé une méthode originale pour l'appariement spatio-temporel.

3.2 Référentiels géohistoriques

Dans le même contexte général, Benoît Costes a proposé, dans le cadre de sa thèse de doctorat, une approche pour l'intégration, la qualification et l'analyse de réseaux géohistoriques. Cette thèse, intitulée "Vers la construction d'un référentiel géographique ancien : Un modèle de graphe agrégé pour intégrer, qualifier et analyser des réseaux géohistoriques" sera soutenue le 4 novembre 2016.

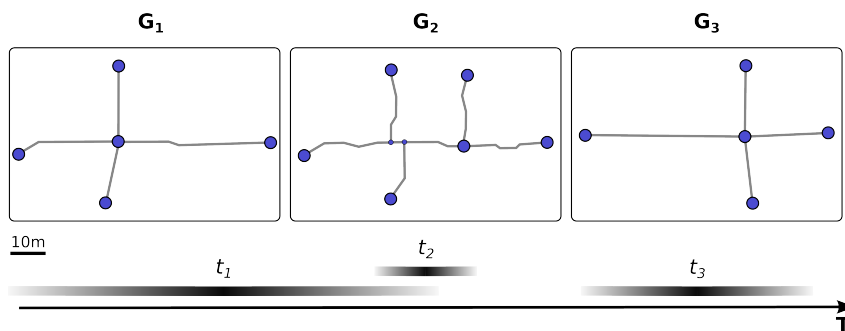


Figure 3.3: Trois *snapshots* arbitraires à trois temporalités différentes (d'après Benoît Costes [Cos16]).

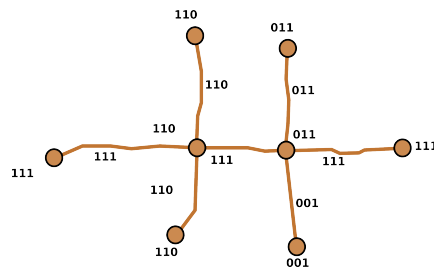


Figure 3.4: STAG associé aux trois *snapshots* de la figure 3.3, dont les ST-entités sont étiquetées par leur signature temporelle (d'après Benoît Costes [Cos16]).

Les contributions du travail de Benoît Costes sont multiples. Tout d'abord, il a proposé un modèle original de graphe spatio-temporel agrégé (STAG) multi-représentations pour manipuler les réseaux géohistoriques. Les entités de ce graphe (ses sommets et ses arcs) sont construites sur la base d'observations (géohistoriques) homologues dans le temps indépendamment d' (ou des) algorithme(s) d'appariement utilisé(s) pour identifier les entités homologues (cf. figures 3.3). Les entités formées (ST-sommets et ST-arcs) sont des entités

agrégées (cf. figure 3.4) et plusieurs méthodes originales de fusion géométrique de N polygones ont été proposées.

Une fois le STAG construit, il permet de qualifier et donc potentiellement de corriger et de documenter les imperfections des données initiales et des sources primaires afin de constituer un référentiel géohistorique par dérivation (par exemple, de nouveaux *snapshots* enrichis).

Le STAG montre tout son intérêt pour l'analyse et la détection de motifs temporels (cf. figure 3.5) mais aussi pour le géocodage multi-temporel de données sociales.



Figure 3.5: Exemple de requête temporelle sur un STAG de Paris (d'après Benoît Costes [Cos16]) : en vert les créations, en rouge les disparitions et en gris les entités stables.

3.3 Interaction avec les données géohistoriques

Je participe depuis sa création en 2013 au groupe de recherche collaboratif *GeoHistoricalData*⁶ qui vise à proposer des approches globales et collaboratives pour la constitution et l'analyse de données géohistoriques. Ce projet se situe dans la continuité de nombreux projets de vectorisation de cartes anciennes de plans de New-York [NYP15] ou du réseau de des routes d'une partie de la région de Milan [SNL⁺12]. En France, divers travaux similaires existent. Par exemple, le projet *Forêts Anciennes*⁷ mène un programme de vectorisa-

⁶geohistoricaldata.org

⁷<http://www.foretsanciennes.fr/>

tion France entière des forêts à partir de cartes anciennes afin de produire des bases de données aidant à mieux connaître et préserver les massifs forestiers français [DBC⁺07, DAEJ12]. Le projet *Alpage* (ANR 2006-2011)⁸ s'est focalisé sur le géoréférencement et la vectorisation de cartes cadastrales de Paris et sur l'analyse de propriétés morphologiques en relation avec des phénomènes sociaux. Le projet *Géopeuple* (ANR 2010-2013)⁹ a étudié les relations entre l'évolution de la topographie et de la population à une échelle communale depuis la Révolution jusqu'à nos jours.

Nous nous sommes inspirés de ces approches en essayant de construire ensemble une plate-forme, des outils et des données afin de fournir aux chercheurs une meilleure maîtrise du processus de production des données, de leurs transformations et de leur analyse. En effet, il est pour nous primordial de pouvoir documenter les choix effectués lors des opérations successives sur les sources primaires telles que la numérisation, le géoréférencement et la vectorisation afin de mieux prendre en compte les différentes sources d'imperfection des données et de toujours garder le lien entre les données finales et les sources primaires dont elles sont issues. Il est nécessaire que les outils et les données soient libres de manière à fournir à la communauté scientifique mais aussi au grand public la capacité de vérifier, suivre, participer et reproduire les résultats à chaque étape du processus.

C'est donc pour répondre à l'ensemble de ces questions que nous avons démarré le projet par la vectorisation de la carte de Cassini du *XVIII^e* siècle (la figure 3.6 illustre une petite partie de la carte et sa vectorisation). Les données produites sont publiées en *open data* et les outils de traitement de ces données afin de produire, notamment, l'export topologique sont déposés en *open source* [PGB15]. Dans le cadre de ce projet, il s'agit donc principalement de contributions méthodologiques.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés et en cours sur les données géohistoriques constituent un ensemble de contributions méthodologiques, scientifiques et techniques.

Dans l'ensemble des travaux présentés, nous avons cherché à mieux prendre en compte les imperfections des sources géohistoriques utilisées pour construire des référentiels géohistoriques, mais aussi à préserver le lien entre ces sources et les données qui en sont extraites et l'ensemble des transformations et hypothèses effectuées pour produire ces données. L'idée est de rendre ainsi le processus de production mais aussi d'analyse le plus reproductible et traçable possible et de pouvoir revenir à tout moment sur les hypothèses faites. Ces travaux

⁸<http://alpage.huma-num.fr/fr>

⁹<http://geopeuple.ign.fr>

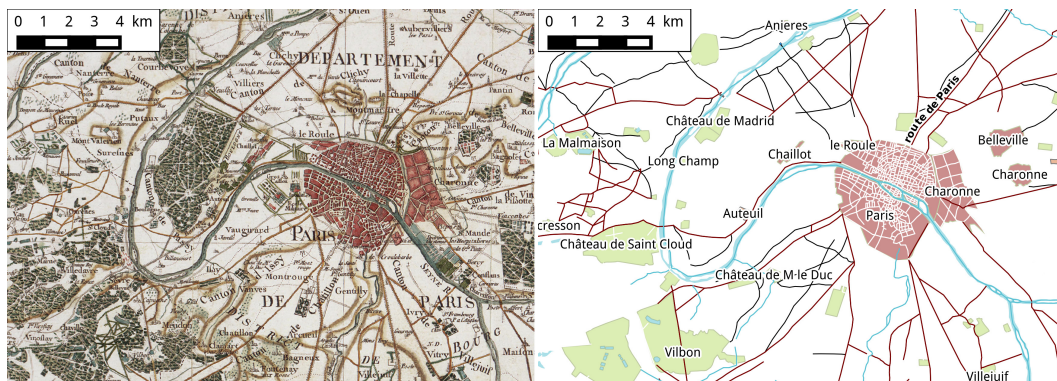


Figure 3.6: Une partie de la carte de Cassini de Paris (feuille 1) et sa vectorisation. La carte géoréférencée a été produite par l'EHESS, le CNRS et la BnF [ECB99] et est accessible par service web [IGN15].

visent ainsi à fournir des approches, outils et données les plus adaptés possibles aux travaux des chercheurs s'appuyant sur des données géohistoriques. Si l'approche globale proposée est solide, de nombreuses étapes doivent encore être améliorées, complétées ou développées.

En ce qui concerne la production des référentiels géohistoriques, les aspects collaboratifs sont essentiels, que ce soit pour la saisie, la validation, la correction et l'enrichissement, notamment si l'on envisage l'utilisation de méthodes semi-automatiques. En effet, l'expérience de l'IGN a montré que l'intégration des opérateurs dans une chaîne de production de données doit être pensée dès sa conception. Ainsi, si des travaux récents [Art13] nous encouragent à envisager l'extraction automatique d'objets dans des cartes ou, plus généralement, des documents historiques, il est important d'envisager au plus tôt les étapes de production de référentiels à partir de tels algorithmes et d'utiliser au mieux l'expertise des opérateurs. Nous en revenons donc à des questions d'interaction avec les utilisateurs (les producteurs de la donnée sont des utilisateurs du système de production de la donnée). L'importance de cet aspect de la production de données géohistoriques a probablement été sous-estimée et nous pensons qu'il est temps de lui donner la place qu'il mérite.

Codes

Les codes déjà déposés sont disponibles sur l'organisation virtuelle <https://github.com/GeoHistoricaldata>. Les codes des thèses de Bertrand Duménieu et Benoît Costes seront mis à disposition dès que possible.

Conclusion et perspectives

Dans ce document, nous avons retracé dix ans de recherche à travers trois domaines applicatifs se distinguant notamment par les échelles spatiales et temporelles auxquelles se déroulent les phénomènes étudiés. En travaillant en collaboration avec des chercheurs des domaines concernés, nous avons cherché à contribuer à une meilleure représentation numérique du territoire et de ses évolutions. Nous avons ainsi proposé des approches, méthodes, modèles, algorithmes, outils et données pour l'étude des dynamiques urbaines. Une partie de ces travaux a déjà donné lieu à une exploitation opérationnelle pour la construction de données géohistoriques de référence, mais aussi pour la construction de données sur la constructibilité en Île-de-France.

La première conclusion que nous tirons de cette expérience est que, quelque soit l'échelle spatiale ou temporelle considérée, bien connaître la ou les sources (primaires) des données que l'on manipule est essentiel. Nous avons contribué à mettre en place des approches et des outils pour qualifier les sources (en particulier géohistoriques), gérer et prendre en compte une partie de leurs imperfections. Mais il faut aller beaucoup plus loin dans ce domaine afin de pouvoir prendre en compte l'ensemble des imperfections des données manipulées dans leur analyse. Un tel travail devra commencer par la formalisation rigoureuse de ces imperfections et la mise en place d'outils pour les mesurer. Mieux comprendre, modéliser et gérer les imperfections des données nous permettra aussi de proposer de nouvelles approches pour l'appariement des données, plus fiables, mais aussi plus interactives afin d'accélérer et de simplifier le processus entre la constitution des données, leur appariement, leur recalage, leur visualisation et leur analyse.

En ce qui concerne la question des sources d'information, c'est en particulier la collaboration avec le Laboratoire de Recherche et Développement de l'EPITA (LRDE) qui nous ouvre des perspectives stimulantes. En effet, dans le cadre du projet *Belle Epoque*¹⁰, nous travaillons à l'utilisation de techniques de traitement d'image pour extraire des informations d'annuaires professionnels sur Paris. Une utilisation plus générale de ce type de méthodes, conjointement au développement d'outils de géocodage adaptés, permet d'envisager la construction de bases de données spatio-temporelles sur les pratiques so-

¹⁰<http://www.parisschoolofeconomics.eu/en/grand-emprunt/equipex-d-fih-donnees-financieres-historiques/scientific-activities/psl-projet-belle-epoque/>

ciales à plus grande échelle. C'est aussi en s'appuyant sur les techniques de traitement d'image que l'on peut envisager une nouvelle façon de vectoriser des cartes et plans anciens par extraction semi-automatique des informations qu'ils contiennent. Le développement récent de techniques de géoréférencement semi-automatique [XT11] s'appuie sur des techniques de mise en correspondance d'images [ZF03, CR03, ZIT13]. Il s'agit en effet d'un processus qu'il serait intéressant de développer afin de faciliter le géoréférencement de nouvelles sources, qui est toujours chronophage, et de focaliser l'attention de l'utilisateur sur les cas les plus complexes. Un tel processus pourrait aussi permettre d'automatiser une partie de la qualification de la source et le calcul de ses déformations.

La convergence des questionnements entre les différentes échelles et les différents domaines d'application nous encouragent à maintenant chercher à compléter les travaux présentés. Par exemple, des premiers tests ont été effectués par Rémi Cura pour extraire des informations des plans de Paris (en l'occurrence la largeur des routes) en utilisant *StreetGen*. Les techniques d'interaction proposés par Rémi Cura seraient intéressantes à appliquer pour la saisie, la correction et la validation des données géohistoriques afin de compléter les approches déjà explorées, par exemple, avec l'*Arpenteur Topographe*¹¹. À l'inverse, les techniques d'appariement développées par Bertrand Duménieu et Benoît Costes pourraient servir à une meilleure mise en correspondance des observations et du modèle dans *StreetGen*, mais aussi à reconstruire, à grande échelle, les évolutions morphologiques des parcelles et bâtiments de Paris afin de mieux comprendre les impacts des règles d'urbanisme passées. Plusieurs travaux de recherche ont déjà été menés sur la visualisation des évolutions territoriales à partir des données spatio-temporelles construites dans le cadre du projet *GeOpenSim*. J'ai, en l'occurrence, co-encadré les stages de Master 2 d'Inna Sukhooeva avec Julien Gaffuri (sur le sujet «sémiologie du changement appliquée à la cartographie des évolutions du bâti») et de Cécile Rémy avec Sidonie Christophe («Sémiologie graphique pour la représentation des dynamiques urbaines : identification et modélisation de connaissances pour la conception de cartes diachroniques efficaces en superposition. Application à l'évolution du bâti en milieu urbain»). Si des propositions ont déjà été faites dans ces travaux, mais aussi dans les travaux de Bertrand Duménieu et Benoît Costes, concernant la visualisation de telles dynamiques, un important programme de recherche reste à élaborer sur cette question en collaboration, en particulier, avec l'équipe de recherche «Visualisation, cartographie et interactions» de l'IGN et le projet *GeoHistoricalData*. Ce type de croisement nécessite une adaptation des approches et des outils mais ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

¹¹<http://geohistoricaldata.herokuapp.com/>

Nous avons finalement assez peu mis en avant les apports de l'informatique distribuée dans ces travaux. Ils sont pourtant essentiels pour leur avenir. En effet, nous utilisons déjà, pour le versionnement de nos logiciels, des outils tels que *Git*¹² qui permettent une gestion distribuée des versions. Un tel outil permet de conserver l'ensemble de l'historique d'un projet de développement, mais aussi de gérer plusieurs branches de développement. Chacun peut ainsi faire des modifications sur sa (ou ses) branche(s) et décider ensuite de les partager avec un collègue ou l'ensemble du projet. De tels outils sont incontournables pour le développement de logiciels et commencent à se développer pour la gestion de données géographiques avec, par exemple, *GeoGig*¹³. Ces outils ont en effet un intérêt particulier pour nous parcequ'ils proposent aux chercheurs en sciences humaines et sociales des outils leur permettant de faire leurs propres hypothèses et de choisir d'en faire part à la communauté quand ils le souhaitent sans avoir besoin de faire valider ces hypothèses *a priori*. Il s'agit donc d'une perspective pertinente de recherche pour l'utilisabilité des outils développés et pour une réutilisation plus efficace des données produites. Les outils issus de calcul distribué sont également important pour le passage à l'échelle des outils de simulation, mais aussi pour l'exploration des modèles et des résultats de simulation. C'est en particulier dans le cadre du projet du Réseau National des Systèmes Complexes (RNSC) *Simtools*¹⁴ et d'une collaboration étroite avec l'Institut des Systèmes Complexes de Paris (ISCPiF)¹⁵ que nous allons développer ces questions.

Une meilleure compréhension des évolutions territoriales et du territoire pour les chercheurs, les décideurs, les citoyens passe très probablement par la construction de bases de données spatio-temporelles permettant de retracer ces évolutions. De telles données nous permettent, notamment, une évaluation *a posteriori* des politiques publiques dans ces domaines et de mettre en place de meilleurs outils d'aide à la décision publique en matière d'aménagement du territoire. Pour aborder ces questions, une approche interdisciplinaire est nécessaire et nous nous sommes efforcés à mettre en œuvre une telle approche qui s'est montrée très féconde. En effet, nous avons pu proposer des approches nouvelles pour aborder des questions dans différents domaines (transport, urbanisme et histoire en particulier) grâce à l'interaction avec des chercheurs de ces disciplines qui ont remis systématiquement en question les approches et outils des sciences de l'information géographique et, plus généralement, avec qui nous avons confronté des idées, concepts et méthodes complémentaires. Nous continuons cette approche notamment à travers une collaboration avec Cécile Tannier dans le cadre de la thèse de Maxime Colomb et plusieurs projets

¹²<https://git-scm.com/>

¹³<http://geogig.org/>

¹⁴<https://sites.google.com/site/simtoolsnetwork/>

¹⁵<http://iscpif.fr/>

de recherche comme *GeoHistoricalData*, et le projet du réseau RNSC *Eighties*¹⁶.

Enfin, nous avons contribué à la reproductibilité de la recherche scientifique en cherchant à mettre, le plus systématiquement possible, nos codes en *open source*, et nos données en *open data*, mais un effort important est encore nécessaire afin de mettre en place un environnement complet de recherche reproductible [FC09, ABH⁺12, WBC⁺16]. Là encore, c'est probablement en collaboration avec des domaines de recherche qui abordent ces mêmes questions [Hak13, Mar16] que nous pourrions proposer des solutions plus pertinentes, mais aussi par l'implication plus globale des citoyens pour une science plus citoyenne où les données mais aussi les méthodes et les questions sont coconstruits entre scientifiques et citoyens.

¹⁶<http://eighties-cities.github.io/>

Bibliographie

- [ABH⁺12] Dhavide A. Aruliah, C. Titus Brown, Neil P. Chue Hong, Matt Davis, Richard T. Guy, Steven H. D. Haddock, Katy Huff, Ian Mitchell, Mark D. Plumbley, Ben Waugh, Ethan P. White, Greg Wilson, and Paul Wilson. Best practices for scientific computing. *CoRR*, abs/1210.0530, 2012.
- [Art13] Mauricio Giraldo Arteaga. Historical map polygon and feature extractor. In *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on MapInteraction*, MapInteract '13, pages 66–71, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [Bat08] Michael Batty. Cities as complex systems: Scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies, 2008.
- [BMTAL12] Eugénie Brutti-Mairesse, Sonia Teillac, Michel André, and Ludovic Leclercq. Estimation of pollutant emissions from the road traffic at a city scale, and its sensitivity as regards the calibration of the static traffic assignment models. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48:2091 – 2100, 2012.
- [BPH10] Mickaël Brasebin, Julien Perret, and Cécile Haëck. Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme. In *SAGEO 2010*, November 2010.
- [BPH11a] Mickaël Brasebin, Julien Perret, and Cécile Haëck. Towards a 3D geographic information system for the exploration of urban rules: application to the French local urban planning schemes. In *28th urban data management symposium (UDMS 2011)*, September 2011.
- [BPH11b] Mickaël Brasebin, Julien Perret, and Cécile Haëck. Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme : Application à la constructibilité des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(4):533–556, October 2011.

- [BPMW12] Mickaël Brasebin, Julien Perret, Sébastien Mustière, and Christiane Weber. Simuler les évolutions urbaines à l'aide de données géographiques urbaines 3D. In *SAGEO 2012*, November 2012.
- [BPMW16] Mickaël Brasebin, Julien Perret, Sébastien Mustière, and Christiane Weber. A generic model to exploit urban regulation knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2):14, 2016.
- [BPR15] Mickaël Brasebin, Julien Perret, and Romain Reuillon. Stochastic buildings generation to assist in the design of right to build plans. In *Joint International Geoinformation Conference 2015 - 3D GeoInfo*, oct 2015.
- [Bra14] Mickaël Brasebin. *Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti*. PhD thesis, Université Paris-Est, Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), laboratoire COGIT, 94165 Saint Mandé, France, April 2014.
- [Bré10] Mathieu Brédif. *3D Building Modeling: Automatic Roof Superstructure Reconstruction and Kinetic Topology-Aware Polyhedral Roof Fitting*. PhD thesis, Telecom ParisTech/EDITE, 2010.
- [BT12] Mathieu Brédif and Olivier Tournaire. libjmc: An open-source generic C++ library for stochastic optimization. In *The XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, August 2012.
- [CCNL10] A. Can, E. Chevallier, M. Nadji, and L. Leclercq. Dynamic Traffic Modeling for Noise Impact Assessment of Traffic Strategies. *Acta Acustica United With Acustica*, 96:482–493, 2010.
- [Cos16] Benoît Costes. *Vers la construction d'un référentiel géographique ancien. Un modèle de graphe agrégé pour intégrer, qualifier et analyser des réseaux géohistoriques*. PhD thesis, Université Paris-Est, November 2016.
- [CPP15a] R. Cura, Julien Perret, and N. Papanoditis. Point cloud server (pcs) : Point clouds in-base management and processing. In *ISPRS Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume II-3/W5, pages 531–539, 2015.

- [CPP15b] R. Cura, Julien Perret, and N. Paparoditis. Streetgen: in-base procedural-based road generation. In *ISPRS Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume II-3/W5, pages 409–416, 2015.
- [CPP16] R. Cura, Julien Perret, and N. Paparoditis. A scalable and multi-purpose point cloud server (pcs) for easier and faster point cloud data management and processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, In Press, Available online 12 July 2016 2016.
- [CPR10] Florence Curie, Julien Perret, and Anne Ruas. Simulation of urban blocks densification. In *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, May 2010.
- [CR03] Haili Chui and Anand Rangarajan. A new point matching algorithm for non-rigid registration. *Computer Vision and Image Understanding*, 89(2-3):114 – 141, 2003. Nonrigid Image Registration.
- [Cur16] Rémi Cura. *Modélisation et synthèse 3D procédurale à partir de données urbaines*. PhD thesis, Université Paris-Est, sep 2016.
- [CUS11] CUS. Plan d’occupation des sols - règlement (communauté urbaine de strasbourg). Technical report, Communauté Urbaine de Strasbourg, June 2011.
- [DAEJ12] Vallauri D., Grel A., Granier E., and Dupouey J.L. Les forêts de cassini. analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. Technical report, WWF/INRA, Marseille, 2012.
- [DBC⁺07] J.L. Dupouey, J. Bachacou, R. Cosserat, S. Aberdam, D. Vallauri, G. Chappart, and M.A. Corvisier de Villèle. Vers la réalisation d’une carte géoréférencée des forêts anciennes de france. *Le Monde des Cartes*, 191:85–98, 2007.
- [DM11] Géraldine Del Mondo. *Un modèle de graphe spatio-temporel pour représenter l’évolution d’entités géographiques*. PhD thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest, oct 2011.
- [DMSCmT10] Géraldine Del Mondo, John G Stell, Christophe Claramunt, and Remy Thibaud. A graph model for spatio-temporal evolution. *Journal of Universal Computer Science*, 16(11):1452–1477, 2010.

- [DT06] M. Durupt and F. Taillandier. Automatic building reconstruction from a digital elevation model and cadastral data: an operational approach. In *Proc. of the ISPRS Symposium on Photogrammetric Computer Vision (PCV)*, Bonn, Germany, 2006. ISPRS.
- [Dum15] Bertrand Duméniéu. *Un système d'information géographique pour le suivi d'objets historiques urbains à travers l'espace et le temps*. PhD thesis, EHESS, 2015.
- [ECB99] EHESS, CNRS, and BnF. Carte de cassini en couleur (feuilles gravées et aquarellées), issue de l'exemplaire dit de «marie-antoinette» du xviii^e siècle, 1999.
- [FC09] S. Fomel and J. F. Claerbout. Guest editors' introduction: Reproducible research. *Computing in Science Engineering*, 11(1):5–7, Jan 2009.
- [Hak13] Muki Haklay. *Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation*, pages 105–122. Springer Netherlands, Dordrecht, 2013.
- [HPBB15] Shuang He, Julien Perret, Mickaël Brasebin, and Mathieu Brédif. *A Stochastic Method for the Generation of Optimized Building Layouts Respecting Urban Regulations*, pages 265–288. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [HSB15] A. Hervieu, B. Soheilian, and M. Brédif. Road Marking Extraction Using a model&data driven Rj-Mcmc. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(3):47, 2015.
- [IGN15] IGN. Cassini map on the géoportail. online, 2015. <http://geoportail.fr/url/7F7dsq>.
- [JL13] Carl-Johan Jørgensen and Fabrice Lamarche. Combining activity scheduling and path planning to populate virtual cities. In Maria L. Gini, Onn Shehory, Takayuki Ito, and Catholijn M. Jonker, editors, *International conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, AAMAS '13, Saint Paul, MN, USA, May 6-10, 2013*, pages 1129–1130. IFAAMAS, 2013.
- [Lam09] Fabrice Lamarche. TopoPlan: a topological path planner for real time human navigation under floor and ceiling constraints. *Computer Graphics Forum*, 28:649–658, 2009.

- [LLB⁺12] Julien Lesbegueries, Nicolas Lachiche, Agnes Braud, Anne Puissant, Grzegorz Skupinski, and Julien Perret. A platform for spatial data labelling in an urban context. In E. Bocher and M. Neteler, editors, *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 49–61. Springer, Dec 2012.
- [LLC07] Ludovic Leclercq, Jorge Andres Laval, and Estelle Chevallier. The Lagrangian Coordinates and What it Means for First Order Traffic Flow Models. 2007.
- [Mar16] Ben Marwick. Computational reproducibility in archaeological research: Basic principles and a case study of their implementation. *Journal of Archaeological Method and Theory*, pages 1–27, 2016.
- [MWA⁺12] Przemyslaw Musialski, Peter Wonka, Daniel G. Aliaga, Michael Wimmer, Luc van Gool, and Werner Purgathofer. A Survey of Urban Reconstruction. In *EUROGRAPHICS 2012 State of the Art Reports*, EG STARS, pages 1–28. Eurographics Association, May 2012.
- [NYP15] NYPL. Nypl labs home page, 2015. <http://www.nypl.org/collections/labs>.
- [PBMR09] Julien Perret, Annabelle Boffet Mas, and Anne Ruas. Understanding Urban Dynamics: the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases. In *24th International Cartography Conference (ICC'09)*, November 2009.
- [PCGR10] Julien Perret, Florence Curie, Julien Gaffuri, and Anne Ruas. A Multi-Agent system for the simulation of urban dynamics. In *10th European Conference on Complex Systems (ECCS'2010)*, September 2010.
- [Per06] Julien Perret. *Modélisation d'environnements urbains virtuels*. PhD thesis, Université de Rennes 1, December 2006.
- [PGB15] Julien Perret, Maurizio Gribaudo, and Marc Barthelemy. Roads and cities of 18th century france. *Scientific Data*, 2(150048), sep 2015. 10.1038/sdata.2015.48.

- [PLS⁺11] Anne Puissant, Nicolas Lachiche, Grzegorz Skupinski, Agnès Braud, Julien Perret, and Annabelle Mas. Classification et évolution des tissus urbains à partir de données vectorielles. *Revue internationale de géomatique*, 21(4):513–532, 2011.
- [PLT05] J. Pettre, J. Laumond, and D. Thalmann. A Navigation Graph for Real-Time Crowd Animation on Multilayered and Uneven Terrain. 2005.
- [PSC⁺15] Denise Pumain, Elfie Swerts, Clémentine Cottineau, Céline Vacchiani-Marcuzzo, Cosmo Antonio Ignazzi, Anne Bretagne, François Delisle, Robin Cura, Liliane Lizzi, and Solène Baffi. Multilevel comparison of large urban systems. *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, (document 706), 2015. mis en ligne le 17 janvier 2015, consulté le 20 octobre 2016, URL : <http://cybergeo.revues.org/26730> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26730.
- [Pum97] Denise Pumain. Villes et système de villes. *Urbanisme*, (296):61–63, 1997.
- [RLRC13] Romain Reuillon, Mathieu Leclaire, and Sebastien Rey-Coyrehourcq. Openmole, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, 29(8):1981 – 1990, 2013.
- [RPC⁺11] Anne Ruas, Julien Perret, Florence Curie, Annabelle Mas, Anne Puissant, Grzegorz Skupinski, Dominique Badariotti, Christiane Weber, Pierre Gancarski, Nicolas Lachiche, et al. Conception of a gis-platform to simulate urban densification based on the analysis of topographic data. In *Advances in Cartography and GIScience. Volume 2*, pages 413–430. Springer, 2011.
- [SA16] Bahman Soheilian and Lionel Atty. Rapport sur la modelisation fine de route, 2016.
- [SDMTC11] John Stell, Géraldine Del Mondo, Rémy Thibaud, and Christophe Claramunt. Spatio-temporal Evolution as Bigraph Dynamics. In *Spatial Information Theory. Conference on Spatial Information Theory, COSIT2011*, Lecture Notes in Computer Science, pages 148–167. Springer, 2011.

- [SJW12] W. Y. Szeto, Xiaoqing Jaber, and S. C. Wong. Road Network Equilibrium Approaches to Environmental Sustainability. *Transport Reviews*, ahead-of-p:1–28, 2012.
- [SM14] Andres Serna and Beatriz Marcotegui. Detection, segmentation and classification of 3D urban objects using mathematical morphology and supervised learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, page 34, 2014.
- [SNL⁺12] Emanuele Strano, Vincenzo Nicosia, Vito Latora, Sergio Porta, and Marc Barthélemy. Elementary processes governing the evolution of road networks. *Scientific Reports*, 2, 3 2012.
- [SPB10] Bahman Soheilian, Nicolas Paparoditis, and Didier Boldo. 3D road marking reconstruction from street-level calibrated stereo pairs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(4):347–359, April 2010.
- [SPV13] Bahman Soheilian, Nicolas Paparoditis, and Bruno Vallet. Detection and 3D reconstruction of traffic signs from multiple view color images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77:1–20, March 2013.
- [Tai05] Franck Taillandier. Automatic building reconstruction from cadastral maps and aerial images. in: U.stilla, f.rottensteiner and s.hinz (eds. In *Proceedings of the ISPRS Workshop CMRT 2005: Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms and Evaluation*, 2005.
- [TFG12] Cécile Tannier, Jean-Christophe Foltête, and Xavier Girardet. Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2):128 – 139, 2012.
- [TLL⁺11] Jerry O. Talton, Yu Lou, Steve Lesser, Jared Duke, Radomír Měch, and Vladlen Koltun. Metropolis procedural modeling. *ACM Trans. Graph.*, 30(2):11:1–11:14, April 2011.
- [WBC⁺16] G. Wilson, J. Bryan, K. Cranston, J. Kitzes, L. Nederbragt, and T. K. Teal. Good Enough Practices in Scientific Computing. *ArXiv e-prints*, August 2016.
- [XT11] Haitao Xiang and Lei Tian. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (rs) images from an unmanned aerial

- vehicle (uav) platform. *Biosystems Engineering*, 108(2):104 – 113, 2011.
- [YBPP13] M. Yirci, M. Brédif, Julien Perret, and N. Papanoditis. 2d arrangement-based hierarchical spatial partitioning: An application to pedestrian network generation. In *Sixth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science*, ISBN: 978-1-4503-2527-1, New York, USA, 2013.
- [Yir16] Murat Yirci. *Semi-automatic image-based modeling, applied to street-view panoramic images and lidar point clouds*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2016.
- [ZF03] Barbara Zitová and Jan Flusser. Image registration methods: a survey. *IMAGE AND VISION COMPUTING*, 21:977–1000, 2003.
- [ZIT13] Feng Zhou and Fernando De la Torre. Deformable graph matching, 2013.

Publications

- [1] S. Baciocchi and J. Perret. Des anciens numérotages urbains. sources historiques & modèles de données géomatiques (grenoble et sa banlieue,1790-1864). In *des sources aux systèmes d'information géographique : des outils pour la cartographie dans les humanités numériques*, 12 2020. soumis.
- [2] M. Barthelemy, B. Costes, B. Duménieu, M. Gribaoudi, and J. Perret. Geohistoricaldata, 2015. Journées de la recherche IGN, 20 mars.
- [3] R. Billen, A.-F. Cutting-Decelle, O. Marina, J.-P. de Almeida, M. Cagliani, G. Falquet, T. Leduc, C. Métral, G. Moreau, J. Perret, G. Rabino, R. San José, I. Yatskiv, and S. Zlatanova. *3D City Models and urban information: Current issues and perspectives*. edpsciences, 2014.
- [4] E. Bocher and M. Neteler, editors. *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century - Proceedings of the first Open Source Geospatial Research Symposium, OGRS 2009, Nantes, France, 8-10 July, 2009*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, 2012.
- [5] M. Brasebin, P. Chapron, G. Chérel, M. Leclaire, I. Lokhat, J. Perret, and R. Reuillon. Apports des méthodes d'exploration et de distribution appliquées à la simulation des droits à bâtir. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2017)*, 11 2017.
- [6] M. Brasebin, J. Perret, and C. Haëck. Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2010)*, 11 2010.
- [7] M. Brasebin, J. Perret, and C. Haëck. Towards a 3D geographic information system for the exploration of urban rules: application to the French local urban planning schemes. In *Urban and Regional Data Management - UDMS Annual 2011*, chapter 4, pages 37–50. London: CRC Press, 2011. [Indexed by Scopus.](#)
- [8] M. Brasebin, J. Perret, and C. Haëck. Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme : Application à

- la constructibilité des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(4):533–556, 10 2011. **Indexed by DBLP - Impact Factor 2.99.**
- [9] M. Brasebin, J. Perret, S. Mustière, and C. Weber. Measuring the impact of 3D data geometric modelisation on spatial analysis : illustration with Skyview factor. In *3u3D2012 : Usage, Usability, and Utility of 3D City models*, 10 2012.
- [10] M. Brasebin, J. Perret, S. Mustière, and C. Weber. Simuler les évolutions urbaines à l’aide de données géographiques urbaines 3D. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d’Analyse Spatiale (SAGEO 2012)*, 11 2012.
- [11] M. Brasebin, J. Perret, S. Mustière, and C. Weber. Simuler les évolutions urbaines à l’aide de données géographiques urbaines 3d. *Revue Internationale de Géomatique*, 24(2):159–180, 2014. **Indexed by DBLP - Impact Factor 2.99.**
- [12] M. Brasebin, J. Perret, S. Mustière, and C. Weber. A generic model to exploit urban regulation knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2):14, 2016. **Indexed by DBLP, JCR & Scopus - Impact Factor: 1.723 (2017) ; 5-Year Impact Factor: 1.960 (2017).**
- [13] M. Brasebin, J. Perret, S. Mustière, and C. Weber. 3d urban data to assess local urban regulation influence. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017. **Indexed by JCR, Scopus - Impact Factor 2.659.**
- [14] M. Brasebin, J. Perret, and R. Reuillon. Stochastic buildings generation to assist in the design of right to build plans. In *Joint International Geoinformation Conference 2015 - 3D GeoInfo*, 10 2015. **Indexed by Scopus.**
- [15] M. Brasebin, J. Perret, and R. Reuillon. Stochastic buildings generation to assist in the design of right to build plans. In A. Abdul-Rahman, editor, *Advances in 3D Geoinformation*, pages 373–384. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [16] B. Bucher, M. Brasebin, E. Buard, E. Grosso, S. Mustière, and J. Perret. Geoxygene: Built on top of the expertise of the french NMA to host and share advanced GI science research results. In *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century - Proceedings of the first Open Source Geospatial Research Symposium, OGRS 2009, Nantes, France, 8-10 July, 2009*, pages 21–33, 2009. **Indexed by DBLP.**

- [17] B. Bucher, M. Brasebin, E. Buard, E. Grosso, S. Mustière, and J. Perret. Geoxygene: Built on top of the expertise of the french nma to host and share advanced gi science research results. In E. Bocher and M. Neteler, editors, *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, chapter 2, pages 21–33. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [18] C. Calvet, V. Delbar, P. Chapron, M. Brasebin, J. Perret, and S. Moulherat. La biodiversité à l’épreuve des choix d’aménagement: une approche par la modélisation appliquée à la région occitanie. *Sciences Eaux Territoires*, (1):24–31, 2020.
- [19] P. Chapron, M. Brasebin, J. Perret, and R. Reuillon. Diversité des morphologies bâties à partir d’un plan local d’urbanisme, 2017. Journées de la recherche IGN, 23 mars.
- [20] P. Chapron, M. Brasebin, J. Perret, and R. Reuillon. Exploration de l’influence de la réglementation urbaine locale sur la morphologie des formes bâties par simulation distribuée. In *13e Rencontres de Théo Quant*. ThéMA, Université de Franche-Comté, 2017.
- [21] Y. Chen, J. Chazalon, J. Perret, C. Mallet, E. Carlinet, T. Géraud, and B. Duménieu. Proposal for icdar2021 competition on historical map segmentation(mapseg), 2021. compétition acceptée.
- [22] S. Christophe, J. Perret, and C. Hoarau. Extraction de palettes de couleurs pour l’aide à la conception cartographique. *Revue des Sciences et Technologies de l’Information (RSTI) série Technique et science informatiques (TSI), Art et Informatique*, 32(3-4):145–152, 6 2013. **Indexed by DBLP**.
- [23] M. Colomb, M. Brasebin, J. Perret, and C. Tannier. Couplage de deux modèles de simulation (mup-city et simplu) pour évaluer l’articulation entre différentes échelles de documents d’urbanisme. In *13e Rencontres de Théo Quant*, page 5. ThéMA, Université de Franche-Comté, 2017.
- [24] M. Colomb, M. Brasebin, J. Perret, and C. Tannier. Simulation of a realistic residential development with the integration of two existing models. In *ECTQG 2017*, 9 2017.
- [25] B. Costes and J. Perret. A hidden markov model for matching spatial networks. *Journal of Spatial Information Science*, (18):57–89, 2019. **Indexed by DBLP, DOAJ, Web of Science & Scopus**.

- [26] B. Costes, J. Perret, B. Bucher, and M. Gribaudi. An aggregated graph to qualify historical spatial networks using temporal patterns detection. In *18th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 2015.
- [27] C. Cottineau, J. Perret, R. Reuillon, S. Rey-Coyrehourcq, and J. Vallée. An agent-based model to investigate the effects of social segregation around the clock on social disparities in dietary behaviour. In *CIST'18, Representing territories*, Rouen, 3 2018. to appear.
- [28] C. Cottineau, J. Perret, R. Reuillon, S. Rey-Coyrehourcq, and J. Vallée. H24 : un modèle multi-agents pour explorer les effets de la ségrégation au cours de la journée sur les inégalités de comportements alimentaires en ile-de-france. In *14e Rencontres de Théo Quant*. ThéMA, Université de Franche-Comté, 2019.
- [29] R. Cura, B. Dumenieu, N. Abadie, B. Costes, J. Perret, and M. Gribaudi. Historical collaborative geocoding. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7):262, 2018. Indexed by DBLP, JCR & Scopus - Impact Factor: 1.723 (2017) ; 5-Year Impact Factor: 1.960 (2017).
- [30] R. Cura, B. Dumenieu, J. Perret, and M. Gribaudi. Historical collaborative geocoding. *CoRR*, abs/1703.07138, 2017.
- [31] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. Point cloud server (pcs): Point clouds in-base management and processing. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, II-3/W5:531–539, 2015. Indexed by Scopus.
- [32] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. Streetgen: in-base procedural-based road generation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, II-3/W5:409–416, 2015. Indexed by Scopus.
- [33] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. A scalable and multi-purpose point cloud server (pcs) for easier and faster point cloud data management and processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, In Press, 2016. Indexed by JCR & Scopus - Impact Factor 6.387.
- [34] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. A state of the art of urban reconstruction: street, street network, vegetation, urban feature. *CoRR*, abs/1803.04332, 2018.
- [35] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. Interactive in-base street model edit: how common GIS software and a database can serve as a custom graphical user interface. *CoRR*, abs/1801.05800, 2018.

- [36] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. StreetGen : In base city scale procedural generation of streets: road network, road surface and street objects. *CoRR*, abs/1801.05741, 2018.
- [37] R. Cura, J. Perret, and N. Paparoditis. User assisted and automatic inverse procedural road modelling at the city scale. *CoRR*, abs/1801.07102, 2018.
- [38] F. Curie, A. Mas, J. Perret, A. Puissant, and A. Ruas. Simuler la densification du tissu urbain au moyen d’un processus de peuplement. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d’Analyse Spatiale (SAGEO 2010)*, Toulouse (France), 11 2010.
- [39] F. Curie, A. Mas, J. Perret, A. Puissant, and A. Ruas. Simulation d’un processus de densification du tissu urbain à base d’agents. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(4):489–513, 10 2011. **Indexed by DBLP - Impact Factor 2.99.**
- [40] F. Curie, J. Perret, and A. Ruas. Simulation of urban blocks densification. In *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 5 2010.
- [41] B. Dumenieu. Automatic reconstruction of spatio-temporal data from historical maps. In *Workshop on integrating 4D, GIS and cultural heritage*. AGILE, 5 2013.
- [42] B. Dumenieu, N. Abadie, and J. Perret. Assessing the planimetric accuracy of paris atlases from the late 18th and 19th centuries. In *Knowledge Extraction from Geographical Data (KEGeoD)*, Symposium on Applied Computing, SAC 2018. ACM, ACM Press, 2018.
- [43] B. Dumenieu, J. Chadeyron, P. Cristofoli, J. Perret, L. Jolivet, S. Bacciocchi, S. Gomis, M. Gribaudo, I. Langlois, C. Motte, and M.-C. Vouloir. Engraved footprints from the past. retrieving cartographic geohistorical data from the cassini carte de france, 1750-1789. July 2019. Poster.
- [44] B. Dumenieu, J. Perret, and A. Ruas. Une méthode de construction de données spatio-temporelles pour l’étude de l’espace urbain ancien. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d’Analyse Spatiale (SAGEO 2013)*, 9 2013.
- [45] S. Fritelli, J. Perret, and O. Courtin. e-plu, plateforme du développement urbain durable et système d’informations, 2013. Journées de la recherche IGN, 24 avril.

- [46] M. Gribaoudi, B. Duménieu, B. Costes, and J. Perret. Projet geohistori-caldata, 2017. Journées de la recherche IGN, 23 mars.
- [47] E. Grosso, J. Perret, and M. Brasebin. Geoxygene : une plate-forme interopérable pour le développement d'applications géographiques. In B. B. . F. L. Ber, editor, *Développements logiciels en géomatique : innovations et mutualisation*, chapter 3. Hermès - Lavoisier, 5 2012.
- [48] E. Grosso, J. Perret, and M. Brasebin. Geoxygene: an interoperable platform for geographical application development. In *Innovative Software Development in Gis*, chapter 3, pages 67–90. John Wiley & Sons, 4 2012.
- [49] S. He, J. Perret, M. Brasebin, and M. Brédif. A stochastic method for the generation of optimized building layouts respecting urban regulations. In F. Harvey and Y. Leung, editors, *Advances in Spatial Data Handling and Analysis: Select Papers from the 16th IGU Spatial Data Handling Symposium*, pages 265–288. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [50] G. Le Guernic and J. Perret. Fl-system's intelligent cache. In A. Vautier and S. Saget, editors, *Proceedings of Majecstic 2005*, pages 79–88, 11 2005.
- [51] M. Leclair, S. Rey-Coyrehourcq, B. Charton, H. Arduin, P. Chapron, G. Chérel, E. Delay, B. Gaston, F. Lavallée, J. Passerat-Palmbach, P. Peigne, J. Perret, J. Raimbault, and R. Reuillon. Retour d'expérience de l'école openmole" exmodelo", organisée en partenariat avec le méso-centre du criann. In *Journées Calcul et Données 2019*, 2019.
- [52] G. Leguernic and J. Perret. FLIC: Application to Caching of a Dynamic Dependency Analysis for a 3D Oriented CRS. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 219:3–18, 11 2008. [Indexed by Scopus](#).
- [53] J. Lesbegueries, N. Lachiche, A. Braud, G. Skupinski, A. Puissant, and J. Perret. A platform for spatial data labeling in an urban context. In *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century - Proceedings of the first Open Source Geospatial Research Symposium, OGRS 2009, Nantes, France, 8-10 July, 2009*, pages 49–61, 2009. [Indexed by DBLP](#).
- [54] J. Lesbegueries, N. Lachiche, A. Braud, G. Skupinski, A. Puissant, and J. Perret. A platform for spatial data labeling in an urban context. In E. Bocher and M. Neteler, editors, *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, chapter 4, pages 49–61. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.

- [55] J.-E. Marvie, J. Perret, and K. Bouatouch. Remote interactive walk-through of city models. In *Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 389–393, 10 2003. **Indexed by DBLP.**
- [56] J.-E. Marvie, J. Perret, and K. Bouatouch. Remote interactive walk-through of city models using procedural geometry. Technical report, INRIA, 2003.
- [57] J.-E. Marvie, J. Perret, and K. Bouatouch. The FL-system: a functional L-system for procedural geometric modeling. *The Visual Computer*, 21(5):329–339, 6 2005. **Indexed by JCR, DBLP & Scopus - Impact Factor 1.468.**
- [58] A. Mas-Boffet and J. Perret. Analyse de scénarios d'évolution. Rapport technique du projet geopensim, IGN, 2008.
- [59] A. Nabavi-Larijani, A.-M. Olteanu-Raimond, J. Perret, M. Brédif, and C. Ziemlicki. Investigating the mobile phone data to estimate the origin destination flow and analysis; a case study: Paris region. In *Proceedings of International Symposium of Transport Simulation 2014*, 2014. **Indexed by Scopus.**
- [60] A. Paget, J. Perret, and J.-F. Gleyze. La géomatique au service de la caractérisation automatique des réseaux hydrographiques. *Physio-géo, Géographie Physique et Environnement*, 2:147–160, 11 2008.
- [61] A. Paget, J. Perret, and J.-F. Gleyze. L'analyse des graphes hydrographiques pour la caractérisation du relief. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2008)*, 2008.
- [62] J. Perret. *Modélisation d'environnements urbains virtuels*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 12 2006.
- [63] J. Perret. Modélisation d'environnements urbains virtuels, 2007. Séminaire invité du laboratoire de Mathématiques Appliquées aux Systèmes (MAS) de l'École Centrale de Paris.
- [64] J. Perret. Création de bases de données temporelles pour le projet geopensim. Rapport technique du projet geopensim, IGN, 2008.
- [65] J. Perret. Modélisation des agents dans geopensim. Rapport technique du projet geopensim, IGN, 2008.
- [66] J. Perret. Modélisation fonctionnelle du système geopensim. Technical report, IGN, Rapport technique du projet GeOpenSim, 2008.

- [67] J. Perret. *Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines*. Habilitation à diriger des recherches, spécialité "sciences et technologies de l'information géographique", Université Paris-Est, 12 2016.
- [68] J. Perret. Simplu3d : un modèle de simulation des droits à bâtir, 2017. Séminaire « Systèmes complexes en sciences sociales », Centre d'analyse et de mathématique sociales (CAMS), EHESS.
- [69] J. Perret, A. Boffet Mas, and A. Ruas. Understanding Urban Dynamics: the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases. In *24th International Cartography Conference (ICC'09)*, 11 2009.
- [70] J. Perret, M. Brasebin, and B. Dumenieu. Usages des données urbaines multi-dimensionnelles. SIG urbains, Sageo 2012, 11 2012.
- [71] J. Perret, F. Curie, J. Gaffuri, and A. Ruas. A Multi-Agent System for the simulation of urban dynamics. In *10th European Conference on Complex Systems (ECCS'2010)*, 9 2010.
- [72] J. Perret, F. Curie, J. Gaffuri, and A. Ruas. Un système multi-agents pour la simulation des dynamiques urbaines. In *18èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'10)*, Mahdia (Tunisie), 10 2010. [Indexed by DBLP](#).
- [73] J. Perret, C. De Runz, X. Rodier, A. Varet-Vitu, B. Dumenieu, L. Saligny, P. Cristofoli, B. Lefebvre, and É. Desjardin. Études des dynamiques de l'occupation du sol. Questionnements, simplifications et limites. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(3/2015):301–330, 2015. [Indexed by DBLP](#) - [Impact Factor 2.99](#).
- [74] J. Perret, M. Gribaudi, and M. Barthelemy. Roads and cities of 18th century france. *Scientific Data*, 2(150048), 9 2015. [Indexed by JCR](#) - [Impact Factor 4.836](#).
- [75] J. Perret, M. Gribaudi, M. Barthelemy, N. Abadie, S. Baciocchi, C. Bertelli, O. Bonin, P. Bordin, B. Costes, P. Cristofoli, B. Dumenieu, J. Gravier, J.-P. Hubert, P.-A. Le Ny, E. Mermet, C. Motte, M. Pardoën, A.-M. Raimond, S. Robert, and M.-C. Vouloir. The 18th century cassini roads and cities dataset, 2015.
- [76] J. Perret, J. Marty, and L. Aboueljinane. Posamu, les défis de la géomatique pour répondre aux besoins de l'urgence, 2013. Journées de la recherche IGN, 25 avril.

- [77] A. Puissant, N. Lachiche, A. Braud, G. Skupinski, and J. Perret. Classification des tissus urbains à partir de données vectorielles - application à strasbourg. In *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2010)*, Toulouse (France), 11 2010.
- [78] A. Puissant, N. Lachiche, G. Skupinski, A. Braud, J. Perret, and A. Mas. Classification et évolution des tissus urbains à partir de données vectorielles. *Revue Internationale de Géomatique*, 21(4):513–532, 10 2011. [Indexed by DBLP - Impact Factor 2.99](#).
- [79] A. Puissant, A. Mas, G. Skupinski, A.-M. Olteanu-Raimond, J. Perret, and C. Weber. Méthodes de constitution de bases de données historiques pour le suivi des tissus urbains. *Géomatique Expert*, (75):46–52, 2009.
- [80] J. Raimbault and J. Perret. Generating urban morphologies at large scales. In *Artificial Life Conference Proceedings*, number 31, pages 179–186. MIT Press, 2019.
- [81] J. Raimbault and J. Perret. Generating urban morphologies at large scales. *arXiv e-prints*, page arXiv:1903.06807, 3 2019.
- [82] J. Raimbault, J. Perret, and R. Reuillon. A scala library for spatial sensitivity analysis. *arXiv preprint arXiv:2007.10667*, 2020.
- [83] J. Raimbault, J. Perret, and R. Reuillon. A scala library for spatial sensitivity analysis. In *GISRUK 2020*, London, UK, 7 2020.
- [84] R. Reuillon, M. Leclaire, J. Raimbault, H. Arduin, P. Chapron, G. Chérel, E. Delay, P.-F. Lavallée, J. Passerat-Palmbach, P. Peigne, J. Perret, and S. Rey-Coyrehourcq. Fostering the use of methods for geosimulation models sensitivity analysis and validation. In *ECTQG 2019*, Mondorf, Luxembourg, 9 2019.
- [85] A. Ruas, A. Mas-Boffet, and J. Perret. Geopensim, un module de simulation des évolutions urbaines, 2009. Journées de la recherche IGN, 12 mars.
- [86] A. Ruas, J. Perret, and M. Brasebin. Saisies et représentations de l'espace urbain. *RéférenceS : revue du commissariat général au développement durable*, pages 65–74, 9 2012.
- [87] A. Ruas, J. Perret, F. Curie, A. Mas, A. Puissant, G. Skupinski, D. Badar-iotti, C. Weber, P. Gancarski, N. Lachiche, J. Lesbegueries, and A. Braud. Conception of a gis-platform to simulate urban densification based on the

analysis of topographic data. In A. Ruas, editor, *Advances in Cartography and GIScience. Volume 2: Selection from ICC 2011, Paris*, pages 413–430. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [88] M. Yirci, M. Brédif, J. Perret, and N. Papanoditis. 2d arrangement-based hierarchical spatial partitioning: An application to pedestrian network generation. In *CTS@SIGSPATIAL 2013, Sixth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science*, New York, USA, 2013. [Indexed by DBLP](#).

Des données spatio-temporelles aux dynamiques urbaines

La ville est un système complexe façonné par des dynamiques opérant à des échelles différentes. En tant que chercheur en sciences de l'information géographique travaillant dans l'interdisciplinarité, je travaille en collaboration avec des spécialistes du transport, des géographes, des urbanistes, des historiens, des démographes, et des physiciens, afin de proposer de meilleurs outils, modèles et données pour l'étude multi-échelle des dynamiques urbaines.

Je présente mes contributions dans un ordre correspondant à l'échelle spatiale, de la plus large à la plus fine : la très grande échelle pour les questions liées à la mobilité, la grande échelle pour celles liées à l'urbanisme et la petite échelle pour les questions liées à l'évolution du territoire dans le temps long. Pour chaque partie, je propose un cheminement commun : tout d'abord la question des sources d'information, des connaissances manipulées, leur représentation, leur stockage ; ensuite, la question de l'analyse de ces données, de leur enrichissement, de leur croisement ; enfin, l'interaction avec ces données, leur visualisation, leur interprétation, leur validation, leur correction par des utilisateurs.

Mots clés Modélisation procédurale, Modélisation procédurale inverse, Optimisation, Simulation urbaine 3D, Données géohistoriques, Imperfections des données, Hétérogénéités, Référentiel géohistorique, Intégration, Appariement.

From spatio-temporal data to urban dynamics

Cities are complex systems shaped by dynamics operating at different scales. As an interdisciplinary researcher in geographical information sciences, I work together with transport, geography, urban planning, history, demography and physics specialists, in order to propose better tools, models and data for the multi-scale study of urban dynamics.

I present my contributions by order of scale, from the largest to the smallest: the very large scale for questions relating to mobility, the large scale for those relating to urban planning and the small scale for questions about territorial evolutions. For each part, I propose a common progress: first, questions about information sources, knowledge representation and manipulation, their storage; then, data analysis, their enrichment and matching ; finally, the interaction with these data, their visualisation, their interpretation, their validation and their correction by users.

Key words Procedural modeling, Inverse procedural modeling, Optimisation, 3D urban simulation, Geohistorical data, Data imperfections, Heterogeneities, Geohistorical referential, Data integration, Data matching.