

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES  
DE  
L'UNIVERSITÉ PARIS-EST

Spécialité : Sciences et Techniques de l'Information Géographique

présentée par

Bruno Vallet

---

**Analyse et reconstruction de scènes urbaines**

---

Soutenue le **05/12/2016** devant le jury composé de

Mme.	Nicole	<b>VINCENT</b>	Université Paris Descartes - LIPADE	Rapporteur
M.	Christian	<b>HEIPKE</b>	Leibniz Universität Hannover	Rapporteur
M.	Laurent	<b>TRASSOUDAINE</b>	Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand	Rapporteur
Mme.	Florence	<b>TUPIN</b>	Télécom ParisTech	Examinateur
Mme.	Valérie	<b>GOUET-BRUNET</b>	Univ. Paris-Est, LASTIG MATIS, IGN, ENSG	Examinateur
M.	Patrick	<b>RIVES</b>	INRIA Sophia Antipolis - LAGADIC	Examinateur
M.	Pierre	<b>GRUSSENMEYER</b>	INSA Strasbourg	Examinateur
M.	Nicolas	<b>PAPARODITIS</b>	Univ. Paris-Est, IGN, ENSG	Garant



# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>8</b>
<b>I Synthèse Scientifique</b>	<b>11</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>13</b>
1.1 Analyse et reconstruction de scènes urbaines . . . . .	13
1.2 Données d'étude . . . . .	14
1.2.1 Données brutes . . . . .	14
1.2.2 Cartographie mobile . . . . .	15
1.2.3 Données structurées . . . . .	18
1.3 Périmètre méthodologique . . . . .	21
1.3.1 Remise en géométrie . . . . .	21
1.3.2 Analyse . . . . .	22
1.3.3 Reconstruction . . . . .	23
1.3.4 Texturation . . . . .	26
1.4 Enjeux . . . . .	27
1.4.1 Enjeux scientifiques . . . . .	27
1.4.2 Enjeux sociétaux . . . . .	27
<b>2 Synthèse des travaux</b>	<b>29</b>
2.1 Thématisques . . . . .	29
2.1.1 Fidélité . . . . .	30
2.1.2 Vraie 3D . . . . .	34
2.1.3 Intégration de la dimension temporelle . . . . .	34
2.1.4 Complémentarité des points de vue . . . . .	35
2.1.5 Complémentarité laser/image . . . . .	37
2.1.6 Couplage segmentation/classification . . . . .	38
2.1.7 Couplage analyse/reconstruction . . . . .	39
2.1.8 Optimisation . . . . .	41
2.1.9 Passage à l'échelle . . . . .	41
2.2 Synthèse des travaux . . . . .	43
2.2.1 Remise en géométrie . . . . .	43
2.2.2 Analyse . . . . .	44
2.2.3 Reconstruction . . . . .	52
2.2.4 Texturation . . . . .	57
<b>3 Perspectives et conclusion</b>	<b>61</b>

---

3.1	Remise en géométrie en ligne . . . . .	61
3.2	Passage à l'échelle . . . . .	61
3.3	Incertitudes . . . . .	62
3.4	Mise à jour . . . . .	62
3.5	La 3D . . . . .	63
3.6	La 4D . . . . .	64
3.7	Conclusion . . . . .	64
<b>II</b>	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>Parcours scolaire et professionnel</b>	<b>69</b>
4.1	Parcours scolaire . . . . .	69
4.2	Stages . . . . .	69
4.3	Thèse . . . . .	70
4.3.1	Champs de directions . . . . .	70
4.3.2	Fonctions propres du Laplacien . . . . .	71
4.3.3	Conclusion . . . . .	71
4.4	Parcours à l'IGN . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Encadrement et enseignement</b>	<b>75</b>
5.1	Stages encadrés . . . . .	75
5.2	Thèses encadrées . . . . .	75
5.2.1	Reconstruction de modèles 3D photoréalistes de façades à partir de données image et laser terrestre . . . . .	75
5.2.2	Recalage automatique de nuages de points laser terrestres sur un modèle 3D de ville . . . . .	76
5.2.3	Détection de changements à partir de scans de cartographie mobile . . . . .	76
5.2.4	Trajectography registration by combined data-model deformation for geometric enriching of existing city models . . . . .	77
5.2.5	Hybrid urban scene analysis from mobile mapping images and laser scan . . . . .	77
5.2.6	Reconstruction de complexes simpliciaux à partir de scans de cartographie mobile . . . . .	77
5.3	Encadrements d'ingénieurs . . . . .	78
5.4	Encadrements de post doctorants . . . . .	78
5.4.1	Détection de façades aveugles . . . . .	78
5.4.2	Reconstruction de maillages étanches . . . . .	79
5.5	Enseignement . . . . .	79
5.6	Projets d'étudiants . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Projets</b>	<b>81</b>
6.1	TerraNumerica . . . . .	81
6.2	ePLU . . . . .	81
6.3	iSpace&Time . . . . .	81
6.4	eFusion . . . . .	82
6.5	TerraMobilita . . . . .	82
6.6	iQmulus . . . . .	82
6.7	Li3DS . . . . .	82

---

6.8	Platinum . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Diffusion</b>	<b>85</b>
7.1	Animation scientifique . . . . .	85
7.2	Open data et benchmarks . . . . .	86
7.3	Transfert . . . . .	86
7.4	Expérimentations . . . . .	87
7.5	Conclusion . . . . .	89
<b>8</b>	<b>Liste des Publications</b>	<b>91</b>
8.1	Chapitres de livres . . . . .	91
8.2	Articles de revues avec comité de lecture . . . . .	91
8.3	Articles de conférences avec comité de lecture . . . . .	92
8.4	Articles de conférences sans comité de lecture . . . . .	94
	<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>



## Résumé

La population des pays développés habite maintenant majoritairement le milieu urbain et sa densification pose de nombreux problèmes. Les réponses apportées à ces problèmes doivent reposer sur une information fiable, précise, détaillée et actuelle de ces scènes urbaines. Ce besoin explique l'essor de nouvelles plate-formes d'acquisition (cartographie mobile, drones) s'ajoutant aux plate-formes plus anciennes (aérien, satellite) pour améliorer la description de ces scènes. Ainsi, le travail de ce mémoire s'intéresse à l'ensemble des méthodes qui permettent de passer des données brutes d'acquisition (image et Lidar) à partir de ces plates-formes à une représentation structurée et sémantique utile de la scène, et en particulier aux quatre grandes thématiques de la remise en géométrie, de l'analyse, de la reconstruction et de la texturation dont les périmètres seront définis précisément. Les spécificités de ce travail de recherche seront ensuite détaillées : l'exploitation optimale de l'information, la fidélité, le travail en "vraie" 3D, la prise en compte de la dimension temporelle et l'exploitation des complémentarités entre données et entre méthodologies. Le manuscrit aborde enfin deux thèmes transversaux aux précédents : l'optimisation et le passage à l'échelle.



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Didier Boldo à plusieurs égards : c'est lui qui a présenté le MATIS qu'il dirigeait alors et ses thématiques avec tellement de passion aux étudiants du DEA IARFA dont je faisais partie en 2004 que j'ai immédiatement eu envie de le rejoindre pour mon stage de fin d'étude, et c'est aussi lui qui m'a proposé d'intégrer son équipe en tant que chercheur permanent à la fin de ma thèse en 2008. Ma carrière de recherche a donc été profondément façonnée par cette rencontre. Je suis aussi très reconnaissant à Franck Taillandier qui m'a encadré au cours de ce stage et avec qui j'ai eu les discussions parmi les plus profondes et enrichissantes de ma carrière scientifique. Mon seul regret en arrivant au MATIS après ma thèse était qu'il en était déjà parti. J'ai une gratitude particulière envers Marc Pierrot-Deseilligny qui a non seulement encadré ma première année au MATIS en forme de post-doc, mais qui est surtout pour moi un modèle de scientifique moderne qui sait concilier l'excellence scientifique et la valorisation de cette excellence au travers d'un outil ouvert (MicMac pour ne pas le citer) utilisé par une communauté de plus en plus large et diverse. Cette immense énergie et compétence qu'il met au service de l'intérêt général dénote avec la montée de l'individualisme qui trouve hélas même parfois sa place dans le milieu de la recherche. Je tiens évidemment à remercier Nicolas Paparoditis qui m'a fait confiance pour encadrer quatre thèses qu'il a dirigées, et pour reprendre la coordination du projet TerraMobilita lorsqu'il n'a plus pu l'assurer, expérience difficile mais formatrice. Je remercie aussi Valérie Gouet-Brunet qui en me poussant à plus d'autonomie a favorisé mon évolution vers un rôle de chercheur senior définissant la stratégie scientifique du MATIS sur l'ensemble des thématiques présentées dans ce document.

Nous avons la grande chance au MATIS d'avoir un large groupe qui travaille sur des thématiques toutes liées, ce qui ouvre de nombreuses possibilités de discussions et de collaborations scientifiques. Je remercie ainsi Mathieu Brédif, Clément Mallet, Bahman Soheilian, Olivier Tournaire, Alexandre Devaux, Erwan Houzay, Nicolas David, Jean-Pierre Papelard, Emmanuel Habets, Arnaud Le Bris, Sébastien Giordano, Martin Weinmann, Quoc Dinh Nguyen, David Vandergucht, Mélanie Durupt, Lâmân Lelégard, Fabien Coubard, Jean-Pascal Burochin, Alexandre Hervieu, Lionel Atty, et j'en oublie sûrement d'autres pour tous ces échanges et collaborations si enrichissants que j'ai eus avec eux.

Je remercie particulièrement Loïc Landrieu et Laurent Caraffa, chercheurs permanents qui ont choisi de rejoindre mon axe structurant, et grâce à qui, j'en suis sûr, nous allons pouvoir attaquer le programme ambitieux et passionnant que je décris en perspective de ce document.

Cette Habilitation à Diriger des recherches doit beaucoup à mes doctorants Jérôme Demantké, Fabrice Monnier, Wen Xiao et Miloud Mézian, et stagiaires Houssem Nouira, Mourad Miled, Wang Xin et Stéphane Guinard dont la qualité et la motivation nous ont

---

permis d'avancer de façon significative sur des sujets très nouveaux.

Je ne voudrais surtout pas oublier de remercier tous les autres personnels de l'IGN qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à ma vie professionnelle : les membres des autres équipes de recherche et notre chef de service Bénédicte Bucher, mais aussi Marie-Claude Foubert, David Correia, François Boyero, l'équipe enseignante de l'ENSG et du DIAS en particulier, du Valilab et de son responsable Didier Richard, du service des développements et de Grégoire Maillet pour lequel j'ai une gratitude particulière, sa bienveillance et ses qualités humaines ayant souvent permis d'adoucir les relations parfois tendues entre recherche et développement.

Je remercie aussi, et ils sont trop nombreux pour que je les cite tous sans en oublier, toutes les personnes avec qui j'ai monté des projets de recherche, l'harmonisation des visions et des envies de chacun vers un programme de recherche cohérent étant un travail intellectuel, à la fois humain et scientifique, particulièrement passionnant. Je remercie bien sûr tous mes collaborateurs sur les différents projets auxquels j'ai eu la chance de participer.

Le chercheur que je suis aujourd'hui doit aussi beaucoup à Jean-Claude Paul dont les précieux conseils m'ont aiguillé vers un statut qui me donne aujourd'hui une grande autonomie scientifique, Bruno Lévy qui a non seulement dirigé ma thèse mais surtout orienté ma vision de la recherche et Nicolas Ray avec lequel j'ai touché à ce que la recherche a de plus exaltant.

Je remercie bien évidemment les membres de mon jury et en particulier les rapporteurs pour le temps et l'intérêt qu'ils ont bien voulu consacrer à mon travail de recherche.

Enfin je remercie ma mère pour son soutien sans faille dans les périodes difficiles et par dessus tout mes enfants Robin et Romane dont le sourire, la vitalité, l'enthousiasme, l'innocence, la malice et surtout l'amour forment mon plus formidable soutien.

# Préambule

“La science a-t-elle promis le bonheur ?  
Je ne le crois pas. Elle a promis la  
vérité, et la question est de savoir si  
l'on fera jamais du bonheur avec de la  
vérité.”

---

Emile Zola

Cette Habilitation à Diriger des Recherches est volontairement courte, c'est à dire qu'elle ne rentre pas dans le détail technique des travaux de recherche que j'ai menés au cours de ma carrière mais cherche plutôt à montrer leur cohérence et leur inscription dans ma démarche scientifique. La cohérence de ces travaux a été facilitée par le fait que j'ai dirigé durant 5 ans une action de recherche du laboratoire MATIS dont l'intitulé "Analyse et reconstruction de scènes urbaines" est logiquement le même que celui de ce document, et que j'ai été responsable pour l'IGN du projet FUI TerraMobilita qui traite principalement du problème de l'analyse et de la reconstruction de scènes urbaines à partir de données de cartographie mobile.

Ce document est structuré en deux parties :

1. Dans la première partie, je m'attacherai en introduction à définir de façon précise le périmètre méthodologique de mes recherches et les enjeux associés (Chapitre 1). Je proposerai ensuite une synthèse de mes travaux sur ces thèmes expliquant leur logique et leur inscription dans mon projet de recherche (Chapitre 2). Je conclurais enfin cette partie sur mes perspectives de recherche (Chapitre 3).
  2. Dans la seconde partie, je reviendrais sur mon parcours scolaire et professionnel (Chapitre 4), sur mes activités d'enseignement (Chapitre 5) sur mes expériences de participation à des projets de recherche collaborative (Chapitre 6) et sur les activités de diffusion scientifique (Chapitre 7) qui ont structuré ma carrière dans le domaine de la recherche scientifique.
-



Première partie

Synthèse Scientifique



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Analyse et reconstruction de scènes urbaines

Dans ce document, le terme de "scènes urbaines" sera utilisé au sens large pour décrire tous les habitats dans lesquels les structures anthropiques (routes, bâtiments, superstructures) sont prépondérants. La population des pays développés habite maintenant majoritairement de tels habitats, et leur densification pose de nombreux problèmes d'aménagement :

- Habitat : l'importante demande de logement dans les cœurs urbains conduit à une densification importante des habitations qui nécessite d'être coordonnée et financée.
- Transport : la densification induit des contraintes toujours plus importantes sur des moyens de transport déjà saturés depuis plusieurs décennies dans les zones les plus denses.
- Réseaux : les réseaux d'énergie (électricité, gaz), d'information (téléphonique, fibre) et d'eau se complexifient proportionnellement à la densité.
- Écologie : l'anthropisation impacte très fortement la nature et conduit à de nombreux problèmes écologiques comme le réchauffement climatique, la pollution sous toutes ses formes, ...

Les moyens d'action des gestionnaires de ces espaces dépendent fortement de la pertinence de l'information dont ils disposent pour prendre des décisions, ce qui conduit la plupart des collectivités à avoir des services spécialisés en Systèmes d'Information Géographiques afin de tenir à jour et enrichir cette information sur leurs territoires. Ces collectivités travaillent ainsi naturellement avec l'IGN dont la mission première est d'assurer une description du territoire suffisamment pertinente pour répondre au maximum d'enjeux. On touche ici à un premier enjeu majeur de la description des scènes urbaines : faut-il produire une description unique suffisamment générique pour répondre à une majeure partie des applications, avec potentiellement un coût important, ou produire une description adaptée à chaque application, moins chère mais moins mutualisable ? La mission de l'IGN le pousse clairement dans la première direction, et c'est donc aussi cette direction que j'ai choisie pour mes recherches : s'appliquer à produire une description du monde la plus fidèle et précise possible étant données les informations disponibles sur les scènes décrites. Cet objectif très général mérite d'être détaillé, ce qui sera fait dans les sections suivantes : la section 1.2 listera les données utilisables pour décrire des scènes réelles, et celles que j'ai utilisées

---

pour mes travaux, et la section 1.3 définira le périmètre méthodologique auquel je me suis intéressé au cours de mes travaux de recherche.

## 1.2 Données d'étude

L'ensemble de mes travaux consistent en des traitements de différents types de données. Je détaille ici ces données en les regroupant en deux catégories : données brutes (section 1.2.1) et données structurées (section 1.2.3). Je détaillerai en section 1.2.2 les données brutes issues de la cartographie mobile sur lesquelles je me suis particulièrement focalisé au cours de mes recherches.

### 1.2.1 Données brutes

Les données utilisables pour produire une représentation numérique de scènes réelles sont nombreuses :

- Capteurs actifs (lidar, radar, sonar,...) qui émettent des ondes vers la scène et tirent de l'information sur celle-ci par la façon dont elle a renvoyé ces ondes.
- Capteurs passifs (imagerie visible, infra-rouge, hyper-spectrale) qui ne fait que capter des ondes émises ou réfléchies par la scène.

Ces données présentent un certain nombre de qualités différentes qu'il est important de récapituler :

- Résolution : Il s'agit de la taille du plus petit objet perceptible dans la donnée. Pour de l'imagerie, celle-ci est donnée par la taille du pixel. Pour le lidar, celle-ci est définie par la géométrie d'acquisition.
- Précision absolue et relative : la description de scènes réelles doit se faire dans un référentiel cartographique permettant de localiser précisément cette description dans le monde. La précision absolue est la précision de la localisation de toute entité géométrique de cette description dans un tel référentiel géographique. La précision relative se rapporte à la qualité de localisation de différentes sources de données sur une même scène.
- Structuration : les données peuvent être structurées soit sur une grille régulière (image) soit par une description explicite de leurs coordonnées (nuages de points, données vecteur)
- Physique : les données se rapportent à des propriétés physiques différentes des scènes : les ondes électromagnétiques qu'elle émettent pour l'image, leur réponse à différentes ondes physiques pour les autres.
- Plate-forme : les différentes plate-formes d'acquisition permettent une multitude de points de vue : aérien pour les satellites, avions, hélicoptères, drones,... terrestre pour les capteurs portés, stations fixes, véhicules roulants, mais aussi marins (non abordés dans ce document).

Dans mes travaux, je me suis principalement intéressé aux nuages de points laser issus de scans lidar et aux images, donc la suite de ce document s'intéressera principalement à ces données. Mes travaux se sont focalisés essentiellement sur les données issues de véhicules de cartographie mobile dont je détaillerai donc les spécificités (section 1.2.2), mais aussi à

---

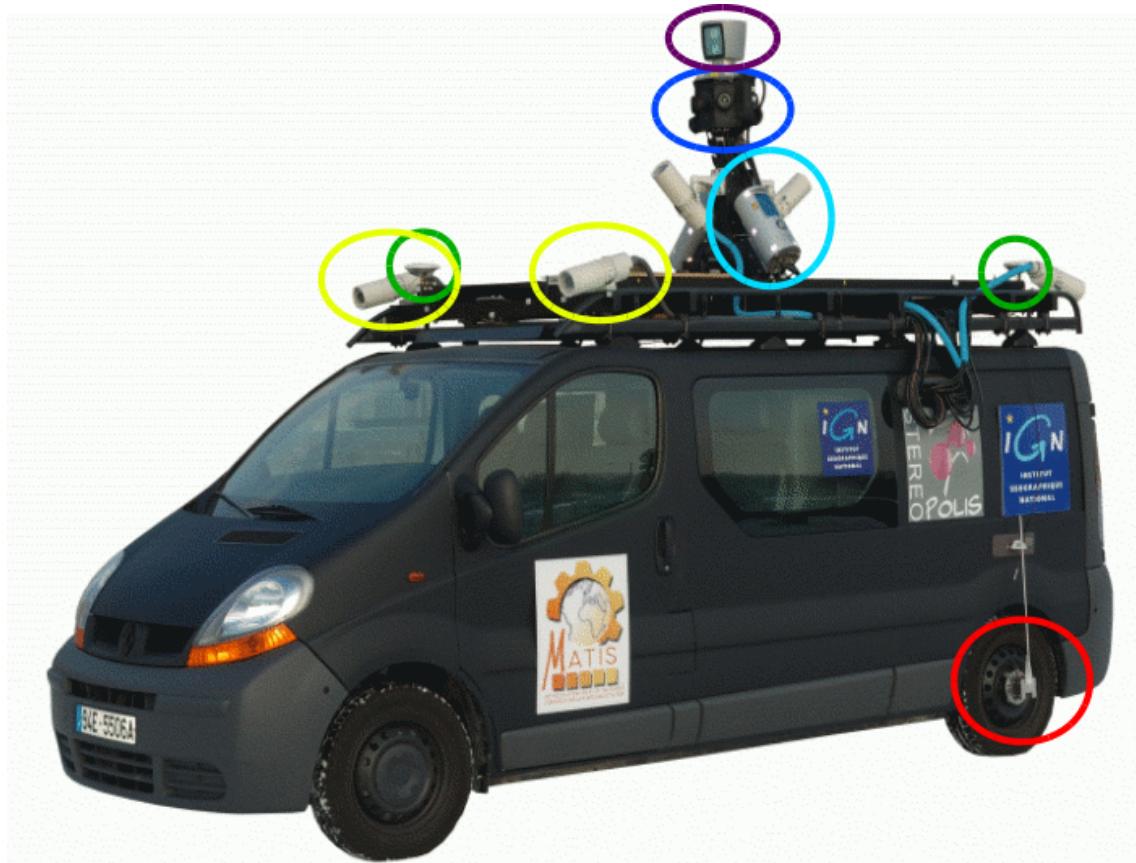


FIGURE 1.1 – Véhicule Stéréopolis de l'IGN (Paparoditis et al., 2012). Capteurs image : Bleu : tête panoramique, Jaune : Paire Stéréoscopique avant. Capteurs laser : Cyan : laser métrologique plan, Violet : laser robotique. Capteurs de géo-référencement : Vert : GPS, Rouge : odomètre. Note : la centrale inertielle située au pied du mat n'est pas visible.

des données aériennes, satellitaires et de stations fixes, en particulier pour les coupler avec la cartographie mobile.

### 1.2.2 Cartographie mobile

Mon arrivée à l'IGN s'est faite simultanément au développement de la cartographie mobile au laboratoire MATIS (cf Figure 1.1). Ce nouveau moyen d'acquisition ouvrait de nombreuses perspectives dont mes recherches se sont alimentées, et cette technologie mérite donc un descriptif un peu plus détaillé, précisant en particulier ses spécificités. Cette section est tirée d'un chapitre de livre sur la cartographie mobile (Vallet and Mallet, 2016a) que j'ai récemment rédigé (avec l'aide de mon collègue Clément Mallet) et qui a été l'occasion de faire le point sur cette technologie.

La cartographie mobile (communément nommée “mobile mapping” en anglais) consiste en la numérisation dynamique à très haute résolution spatiale d'environnements complexes (principalement les milieux urbains) à partir d'une plate-forme terrestre en déplacement. L'objectif est à la fois d'acquérir des informations très précises et très bien géo-référencées

sur les objets d'intérêt et in fine pour des applications requérant cette finesse géométrique (modélisation 3D de villes, piétons et véhicules pour la navigation autonome, numérisation du patrimoine routier, fouilles archéologiques, etc.). Ce chapitre se focalise sur la cartographie mobile routière mais des méthodes similaires ont été développées, par exemple, pour numériser le réseau ferroviaire à partir de capteurs embarqués sur un train. Depuis une dizaine d'années, la Cartographie Mobile a connu un essor important dans les communautés de télédétection, photogrammétrie, vision par ordinateur et robotique, en bonne partie dû aux raisons suivantes :

- limites antérieures en résolution spatiale des capteurs aéroportés et donc nécessité de se rapprocher des objets d'étude pour améliorer la résolution de leur acquisition ;
- augmentation des capacités de stockage et de traitement : l'accroissement de la résolution spatiale implique en particulier un volume de données en forte hausse.

Cet essor s'est traduit, en particulier, par l'apparition de capteurs et d'instruments dédiés à la numérisation mobile terrestre :

- systèmes permettant un géo-référencement très fin de véhicules terrestres ; capteurs image panoramiques de qualité professionnelle ;
- capteurs laser spécialisés dans la cartographie mobile.

Il est aussi à noter que le service Web Google StreetView a fortement popularisé la cartographie mobile et l'a faite connaître du grand public ([Anguelov et al., 2010](#)). Il existe désormais plusieurs sociétés effectuant de la cartographie mobile opérationnelle pour des besoins de métrologie, de modélisation ou de visualisation des environnements urbains (Here, Cyclomedia, StreetMapper de 3DLaserMapping, TopCon, Apple) souvent équipés de systèmes que l'on peut acheter clés en main (Optech, RIEGL VMX-450, Trimble MX8, Siteco). Parallèlement, des initiatives de recherche existent depuis une vingtaine d'années et ont vu l'émergence de systèmes innovants de plus en plus complets et précis au fil des années : VISAT ([El-Sheemy, 1996](#)), GPSVan ([Grejner-Brzezinska, 1996](#)), Lara3D ([Goulette et al., 2006](#)), Roamer ([Kukko et al., 2007](#)), Photobus ([Gontran et al., 2007](#)), RoadScanner ([Gandolfi et al., 2008](#)), Stéréopolis ([Paparoditis et al., 2012](#)), ou encore l'initiative Kitti ([Geiger et al., 2012](#)).

Les données de cartographie mobile ont de nombreuses particularités par rapport aux données aéroportées :

- Complexité de la scène : En imagerie aérienne, la scène peut être approchée par un plan ou un Modèle Numérique de Terrain grossier dont le capteur est éloigné. Cette particularité est souvent utilisée pour ramener les traitements de données à des problèmes en 2D ou 2,5D : l'altitude n'est qu'un attribut défini sur une géométrie de grille régulière 2D (pixels). En cartographie mobile, le capteur se situe au cœur de la scène imagée qui doit donc être analysée en 3D (cf section [2.1.2](#)). Cette complexité induit aussi une anisotropie et des variations de résolutions beaucoup plus fortes qu'en aérien comme le montre la Figure [1.2](#). L'échantillonnage des surfaces avec un capteur lidar de cartographie mobile est ainsi beaucoup plus hétérogène que dans le cas aéroporté.
- Volume de données : Il est variable en fonction des capteurs et de la compression de données. On peut estimer que le volume des données acquises est de l'ordre du Téraoctet par demi-journée pour un système équipé d'une tête panoramique, de deux paires stéréo (avec 3 m entre les poses) et d'un laser rotatif récent, l'image (non compressée) comptant pour 80% de ce volume.

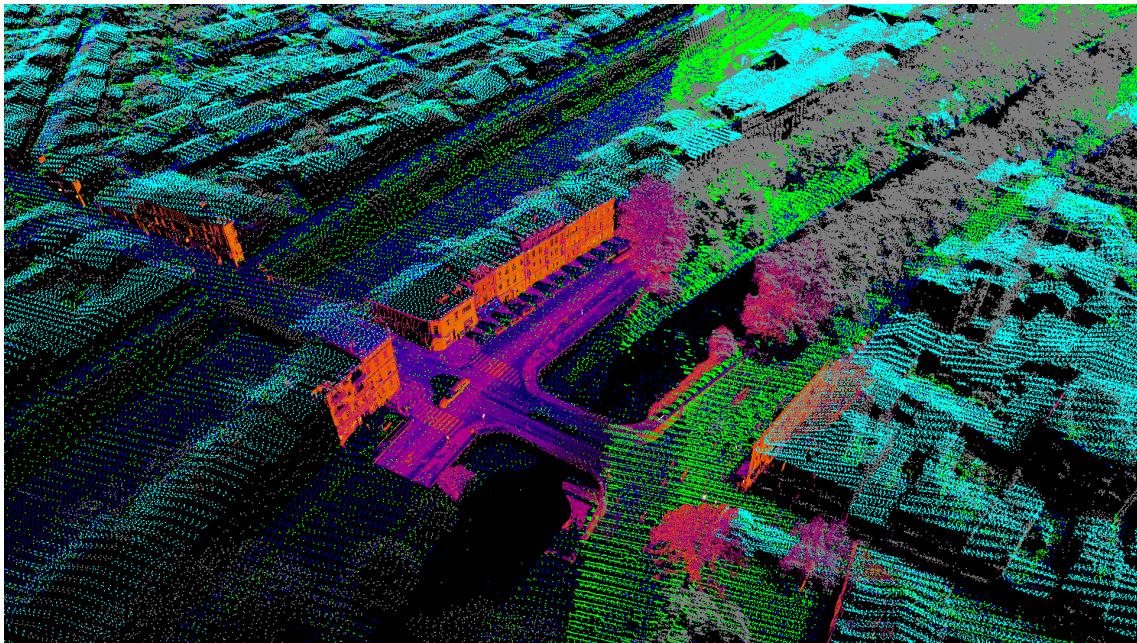


FIGURE 1.2 – Nuage laser terrestre (orange/violet) et aéroporté (bleu/vert) sur la même zone

- Géométrie d'acquisition : Contrairement à un avion qui acquiert les données le long de trajectoires rectilignes parallèles, un VCM est contraint par la géométrie du réseau routier. Pour acquérir une zone donnée, le véhicule doit en parcourir toutes les routes, et donc repasser plusieurs fois aux mêmes intersections, et souvent dans les mêmes rues, avec une cartographie qui est donc propre à chaque acquisition. De plus, contrairement à un avion, le véhicule est souvent à l'arrêt, ce qui complique encore sa trajectoire par rapport à une trajectoire d'avion de vitesse très régulière, et génère de nombreux points sur la même tranche (donc superflus) dans le cas d'un scan laser.
- Dynamique : les scènes urbaines sont en général très dynamiques, avec des nombreux véhicules et piétons, du mobilier urbain (chaises, poubelles,...) qui peut être déplacé entre deux passages dans la même rue, y compris à quelques minutes d'intervalle. Cette dynamique nécessite de prendre en compte la dimension temporelle de l'acquisition dans les chaînes de recalage (ne pas mettre en correspondance des objets mobile) et d'interprétation des données.

Ces caractéristiques induisent des contraintes fortes sur la chaîne de traitement de données qui doit à la fois être très efficace pour gérer la volumétrie et prendre en compte la complexité de la scène. De plus, pour les acquisitions laser, les nuages générés sont très anisotropes car leur densité dépend de la vitesse du véhicule, de la distance de l'objet acquis au véhicule et de l'orientation des surfaces par rapport au faisceau laser. En conclusion, si la chaîne d'acquisition de données de cartographie mobile partage des points communs avec la chaîne plus classique de traitement de données aériennes, comme la complémentarité image/laser et le système d'acquisition, ses spécificités (complexité, volumétrie) posent de nombreux défis à relever pour la mise en place d'une chaîne de traitement et d'exploitation de ces données et qui seront abordés dans ce document. Cette complexité explique aussi que les objets d'intérêt de la cartographie mobile sont principalement les villes denses où les enjeux sont les plus forts et justifient une masse et donc un coût d'acquisition des



FIGURE 1.3 – Bati3D : Modèle de ville 3D texturé de LoD 2 produit par l'IGN

données plus importants.

### 1.2.3 Données structurées

J'utilise dans ce document le terme "données structurées" pour désigner toutes les données qui visent à une représentation géométrique et sémantique de la réalité et qui ne sont pas issues directement de capteurs. Dans le domaine de l'information géographique, ces données sont principalement constituées de points, lignes brisées et polygones en 2D et qui portent en général des informations auxiliaires et en particulier sémantiques. Dans ce cas, la troisième dimension est souvent vue simplement par l'intermédiaire d'une altitude ou élévation stockée comme l'un de ces attributs. Dans ce document, j'utiliserai le terme "Bases de données vecteur" (BDV) pour désigner ce type de description structurée de scènes réelles. Ces BDV peuvent être produites complètement manuellement par des mesures sur le terrain, ou de façon plus ou moins automatisée à partir de données des types mentionnée en section 1.2.1). L'existence de ces bases de données produites par l'IGN sur l'ensemble du territoire français est un élément de contexte important dans mon travail de recherche. Ces données sont en général produites manuellement par photo-interprétation ou mesures sur le terrain comme par exemple des réseaux de points d'appui ou d'amers visuels, représentés par leurs coordonnées dans un référentiel terrain ainsi que par un élément descriptif (souvent une imagette) permettant de les reconnaître. Ils sont indispensables pour recaler des données de façon absolue.

L'approche traditionnelle de représentation de l'information géographique en 2D commence seulement à être remise en cause avec l'apparition de Systèmes d'Information Géographique (SIG) 3D. Ceux-ci ont vocation non seulement à exploiter l'attribut d'élévation pour permettre une visualisation en 3D des données, mais surtout à intégrer des modèles 3D de l'environnement, et des villes en particulier. Ces modèles 3D de villes peuvent présenter différents niveaux de structuration :

- 2.5D : la surface des villes visible depuis la verticale est modélisée par une élévation ou altitude en chaque point d'une grille régulière définie dans une géométrie terrain. Ces cartes appelées Modèles Numériques d'Élévation (MNE) ou de Surface (MNS) sont réalisées par corrélation dense ou à partir de nuages de points laser. C'est la représentation de plus bas niveau et elle est encore très brute, au sens où sa structure de grille régulière n'est pas liée à la structure de la scène.
- Maillage triangulé : les surfaces de la ville sont représentées par un ensemble de triangles partageant des arêtes. C'est une représentation de bas niveau, et elle permet une représentation de la géométrie des scènes en vraie 3D, c'est à dire en particulier avec des surplombs.
- Surfaces polyédriques : ce sont des surfaces dont les faces sont des polygones plans. Elles sont très utilisées pour représenter les bâtiments qui ont souvent cette propriété. Bien que plus structurées que les surfaces triangulées, elles sont en général limitées aux géométries sans surplomb (2.5D)
- Modèles fortement structurés : j'utilise ce terme pour désigner les modèles présentant une structure sémantique très forte, comme par exemple le CityGML. Cette norme propose un schéma de données très général pour décrire l'organisation de la structure des villes en définissant des classes d'objet ainsi que leurs relations, et des descriptions géométriques pour tous les objets. Le CityGML définit aussi des niveaux de détails (Level of Detail=LoD) pour la représentation des villes :
  - LoD0 : Seulement le terrain, sans bâtiments
  - LoD1 : Les bâtiments sont ajoutés sur le terrain, extrudés à partir de leur empreinte 2D (toits plats)
  - LoD2 : La structure des toits (en générale polyédrique) est représentée. J'ai beaucoup travaillé avec des modèles de ce niveau de détail car c'est celui du produit Bati3D de l'IGN (cf Figure 1.3).
  - LoD3 : les superstructures de toits (cheminées, chiens assis, etc.) et les éléments de façades (fenêtres, portes, balcons, etc.) sont ajoutés.
  - LoD4 : L'intérieur des bâtiments est modélisé. La norme supporte des représentations très fines pouvant aller jusqu'au positionnement des prises électriques.

Cette nomenclature des niveaux de détails est très utile et structurante pour la recherche qui va s'employer à imaginer les meilleures méthodes de production pour chaque niveau de détail. En général, les agences cartographiques nationales des pays développés disposent des niveaux LoD0 et LoD1 sur l'intégralité de leur territoire et certaines collectivités font réaliser des modélisations LoD2 ou LoD3 sur leurs territoires, avec une production souvent fortement manuelle. L'IGN a développé de 2005 à 2008 une chaîne fortement automatisée de production de modèles LoD2 et la recherche s'est alors focalisée sur le LoD3. Le LoD4 n'est pas faisable à l'échelle d'une ville car il nécessite une acquisition de données à l'intérieur des bâtiments modélisés.

---

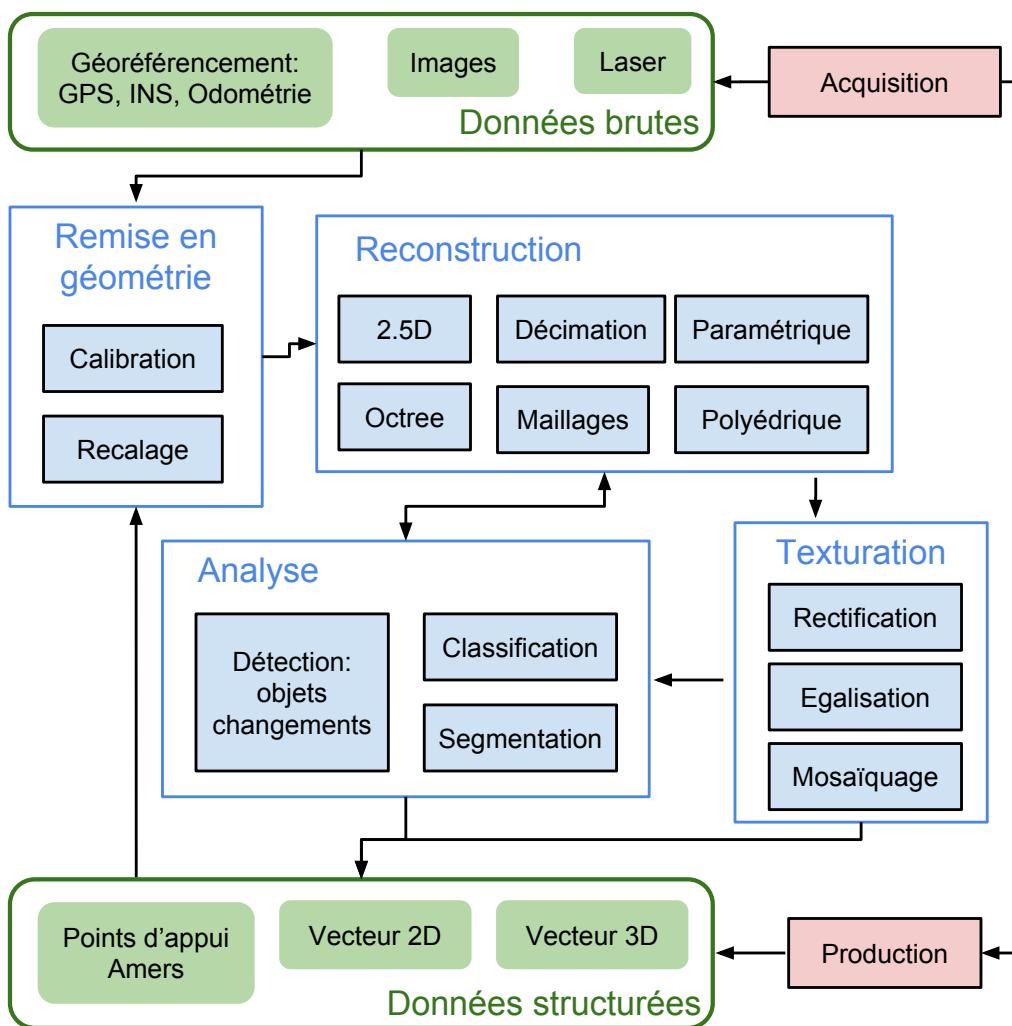


FIGURE 1.4 – Présentation générale de la chaîne de traitement de l'information géographique sur laquelle se concentre ce document. Les briques méthodologiques sont en bleu, les données en vert et la production de données en rouge

## 1.3 Périmètre méthodologique

Cette section définit et détaille l'ensemble des domaines méthodologiques auxquels je me suis intéressés, et qui s'inscrivent tous dans la chaîne de traitement de l'information géographique (cf Figure 1.4) qui consiste à partir de données brutes d'acquisition (1.2.1) pour produire des données structurées (1.2.3) décrivant les scènes acquises. Dans mes travaux, et plus généralement en information géographique, la description des scènes réelles a deux composantes :

- Description géométrique : en 2D, on définira des objets ponctuels, linéaires ou surfaciques décrits par des points, des lignes brisées et des polygones (et plus rarement par des primitives non linéaires comme des quadriques ou des splines). En 3D, on rajoutera les objets volumiques décrits généralement par une surface triangulée (et plus rarement par des primitives structurées comme des parallélogrammes, des surfaces polyédriques ou des primitives non-linéaires).
- Description sémantique : ce sont des attributs rattachés à ces géométries comme des types d'objets, de surfaces, ... donnant une information sur ce que sont ces géométries et à quoi elles servent.

Une définition très générale de l'analyse et de la reconstruction pourrait consister à dire que la reconstruction cherche à produire la partie géométrique de la description alors que l'analyse cherche à produire sa partie sémantique, ce que nous allons détailler dans les sections 1.3.3 pour la reconstruction et 1.3.2 pour l'analyse.

Enfin, deux thématiques majeures sont connexes à l'analyse et à la reconstruction, si bien que j'ai été amené à m'y intéresser au cours de mes travaux. En amont, la remise en géométrie (section 1.3.1), qui est indispensable dès que l'on cherche à positionner les données dans un référentiel géographique et en particulier afin d'utiliser des sources de données multiples pour analyser et reconstruire une scène. En aval, la texturation (section 1.3.4) qui consiste à appliquer une texture (image) sur la géométrie résultant de la reconstruction.

### 1.3.1 Remise en géométrie

Dans ce document, j'utilise le terme *remise en géométrie* pour désigner l'ensemble des méthodes qui permettent de localiser précisément les données image et laser dans un référentiel terrain (c'est à dire fixe par rapport à la terre) et d'assurer une consistance géométrique entre différentes sources de données. Ce terme regroupe donc à la fois :

- La calibration intrinsèque des capteurs qui consiste à déterminer où se situe la donnée acquise dans un référentiel propre au capteur (position d'un point 3D, rayon 3D pour un pixel).
- La calibration extrinsèque qui consiste à déterminer la position de ce référentiel capteur dans le référentiel d'un capteur de géo-positionnement (GPS, INS,...) lié rigidement.
- Le recalage qui consiste à déterminer la position d'un référentiel capteur (image ou laser ou géo-positionnement) dans un référentiel terrain. Ce n'est pas toujours de cette façon que le recalage est défini car il peut être plus simple (voire indispensable si les méta informations de géométrie de l'acquisition sont perdues) de recaler

directement des données entre elles sans passer par les référentiels des capteurs qui les ont acquises. C'est cependant de mon point de vue la bonne façon de définir le recalage car elle permet de séparer les sources d'erreur entre calibration et orientation. Le recalage peut être *absolu* si il se fait une une donnée dont la précision dans un référentiel terrain est contrôlée (points d'appui), ou relatif s'il s'agit juste de mettre des données en cohérence sans qu'une localisation absolue (dans un référentiel terrain) soit recherchée.

La remise en géométrie s'appuie toujours sur l'établissement de correspondances :

- Entre les données et des points d'appuis connus pour la calibration et le recalage absolu.
- Entre données elles même pour le recalage relatif.

### 1.3.2 Analyse

Dans ce document, le terme d'analyse de scènes désigne l'ensemble des techniques permettant de remonter à un niveau sémantique à partir de données brutes. L'exemple le plus simple d'analyse est la classification ponctuelle, c'est à dire l'attribution d'un label sémantique à chaque pixel d'une image ou chaque point 3D d'un nuage de points. Les approches les plus utilisées pour résoudre ce problèmes sont basées sur de l'apprentissage supervisé, c'est à dire que l'algorithme apprend à attribuer des labels à partir de nombreux exemples qui lui sont fournis. Aux approches classiques que sont les SVM, les Random Forest et AdaBoost se sont plus récemment rajoutés les CNN (Convolutional Neural Networks) qui viennent du Deep Learning et surpassent largement ces méthodes au prix d'un apprentissage très coûteux en temps de calcul et le besoin d'exemples encore beaucoup plus nombreux.

L'autre grande catégorie de l'analyse est la détection. La détection consiste à retrouver des objets de type connus dans la donnée brute. Elle peut être vue comme un cas particulier de classification entre les labels objet et non-objet. Cependant, la notion d'objet y est beaucoup plus forte et la détection cherchera souvent directement à retrouver l'objet d'intérêt dans son intégralité plutôt qu'à labelliser la donnée brute. Dans ce cas, la détection peut s'appuyer sur un algorithme d'extraction de primitive comme RANSAC pour détecter des objets de géométrie très simple, ce qui se rapproche de la reconstruction. Pour des objets plus complexes, la détection pourra utiliser des méthodes basées sur des dictionnaires de formes, ou sur des descripteurs tels que SIFT.

Enfin l'analyse se repose souvent sur la segmentation. C'est un problème très difficile à cause de la complexité de l'espace de recherche (ensemble des partitions des objets à segmenter) dont la taille croît plus qu'exponentiellement comme je le rappelle dans ([Vallet et al., 2014](#)). C'est aussi un problème dont l'objectif est difficile à formuler, à mi-chemin entre extraction de primitive et détection d'objets. C'est aussi un problème très abstrait et général qui peut s'appliquer de façons très diverses : la classification peut être vue comme un problème de segmentation dans un espace de descripteurs, la détection comme un problème de segmentation d'objets individuels, et la reconstruction comme une segmentation entre l'espace occupé et libre de la scène.

Ces trois classes de problèmes peuvent être regroupées en un seul problème appelé *segmentation sémantique* et qui consiste à découper l'intégralité de la donnée en objets sémantiques. C'est donc à la fois une segmentation (mais avec un critère d'homogénéité

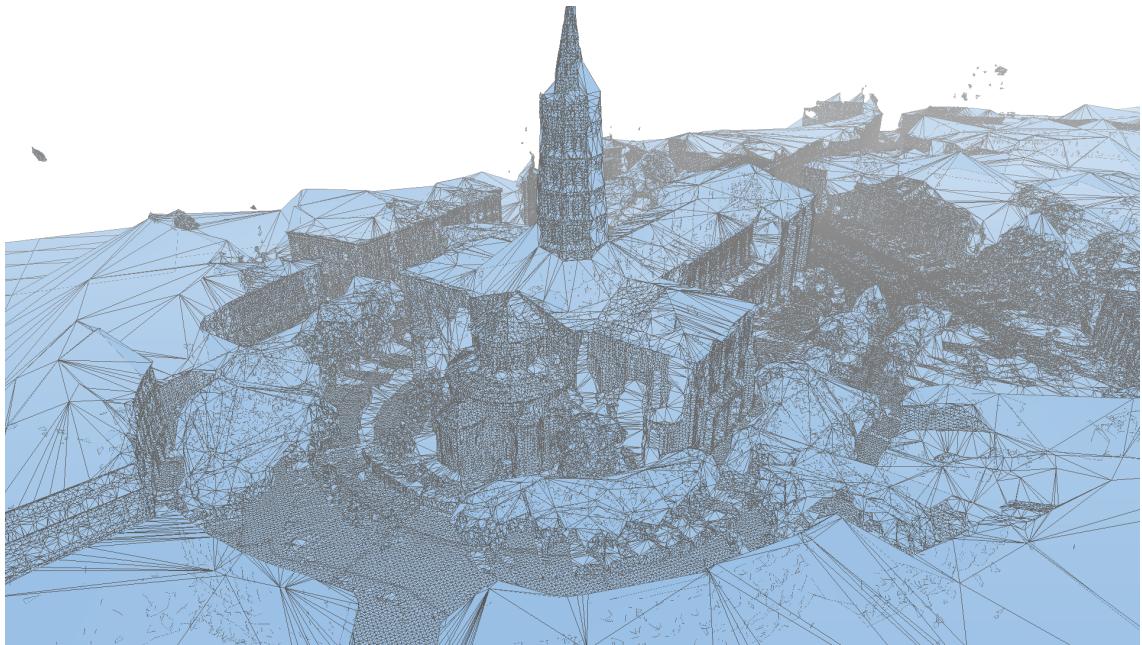


FIGURE 1.5 – Reconstruction de maillage triangulé à partir d'un scan de cartographie mobile

"appartenance au même objet" particulièrement difficile à définir), un problème de classification puisque les segments sont pourvus d'un label sémantique, et un détecteur universel d'objets puisque tous les objets de la scène sont détectés comme des segments labellisés. C'est vers la résolution de ce problème unique que tendent mes recherches en analyse.

Dans tous les deux le résultat de l'analyse est déjà partiellement géométrisé, puisque classification et segmentation produisent des régions, une détection peut produire un résultat de même nature, ou une représentation grossière comme une boîte englobante ou une ellipsoïde. L'analyse sémantique s'appuie sur la géométrie de la scène pour la sémantiser et en produit un découpage, géométrique lui aussi. Elle est donc indissociable de la reconstruction qui cherche à produire une représentation géométrique des objets de la scène.

Enfin, en introduisant une dimension temporelle à l'analyse elle s'élargit aussi à la détection de changement et au suivi d'objets mobiles. Dans les deux cas, l'une des difficultés majeure consiste à remonter à une notion d'objet dans la scène (ce qui est déjà de l'analyse) afin de comparer les objets à deux dates différentes dans le cas de la détection de changement, ou entre deux vues successives dans le cas du suivi.

### 1.3.3 Reconstruction

La reconstruction est un terme employé pour désigner de nombreuses techniques différentes. La définition générale que j'en donne ici est qu'elle regroupe l'ensemble des techniques qui consistent à produire une représentation géométrique d'une scène à partir de données brutes. Plus concrètement, la reconstruction de scènes s'appuie sur les techniques suivantes :

- Géométrisation des images : alors que les nuages de points sont déjà géométrisés (constitués de points dont les coordonnées définissent une position dans l'espace), les images nécessitent d'être mises en géométrie pour être exploitées. Ceci se fait d'abord par plusieurs étapes : calibration interne, ajustement de faisceaux et corrélation. La calibration interne permet de lier un pixel à un rayon 3D dans le repère de la caméra, l'ajustement de faisceaux permet d'assurer la cohérence relative de repères caméras, qui deviennent des repères absolu si des points d'appuis de coordonnées géographiques connues sont utilisés. Enfin la corrélation permet de déterminer quels faisceaux s'intersectent en un point de la scène et donc de produire un nuage de points de la scène. Le terme reconstruction est souvent utilisé pour décrire ce processus, même si il est de mon point de vue abusif car un nuage de points est une représentation éparse d'une scène continue. Le problème de la géométrisation des images est un problème central en photogrammétrie et en vision par ordinateur, dont les méthodes (mais pas les termes) sont similaires, mis à part une plus grande importance donnée à la métrologie dans le cadre photogrammétrique.
- Reconstruction de surface : un nuage de points n'est qu'une représentation géométrique éparse qui n'est pas consistante avec la nature continue des scènes. On retrouve cette nature continue en reconstruisant une surface approchant ces points au mieux. Cette reconstruction peut se faire de façon plus ou moins structurée :
  - 2.5D : il s'agit de représenter la géométrie de la scène comme un ensemble de points dont l'une des coordonnées est fonction des deux autres. La forme la plus courante est  $z = f(x, y)$  en coordonnées cartésiennes mais d'autres systèmes de coordonnées sont possibles. Les valeurs de cette fonction sont stockées dans une grille régulière 2D. Les exemples les plus courants sont les modèles d'élévation ( $x, y$  et  $z$  vont vers l'est, le nord et le haut) ou les cartes de profondeur en géométrie image. Cette représentation est très utilisée car simple et compacte. De plus il est facile de définir une interpolation (bilinéaire, bicubique, ...) pour passer du nuage de points à une surface continue). Enfin, la corrélation dense produit naturellement des cartes de profondeur dans la géométrie des images utilisées.
  - Triangulation : elle détermine une surface triangulée s'appuyant sur les points en exploitant divers critères pour assurer que cette surface est une bonne représentation numérique de la scène réelle.
  - Reconstruction implicite : dans ces approches, on ne représente pas une surface mais un volume (par l'intermédiaire d'un fonction caractéristique valant 1 à l'intérieur et 0 à l'extérieur, ou d'une fonction de distance signée négative à l'intérieur et positive à l'extérieur). La surface est alors définie implicitement comme l'interface entre le vide et le plein. Le problème est alors de discréteriser la fonction indicatrice ou de distance dans tout l'espace couvrant la scène d'intérêt. On découpe en général les grandes scènes (villes entières) en dalles, mais celles-ci ne doivent pas être trop petites pour minimiser les raccords. Les grilles de voxels sont donc en général inexploitables, et on s'oriente alors soit sur des structures multi-résolution comme les octrees, soit sur une triangulation de Delaunay du nuage de points. Dans le deuxième cas, l'interface est un maillage triangulé (cf figure 1.3.3).
  - Décimation : A partir d'une surface triangulée, on cherche à réduire au maximum le nombre de triangles tout en minimisant l'écart à la surface originale afin de

- remonter à une représentation plus structurée, compacte et légère de la scène.
- Reconstruction polyédrique : on cherche à approcher le nuage de points par une surface polyédrique, dont les faces ne sont plus nécessairement des triangles mais des polygones plans. De nombreux objets anthropiques (bâtiments en particulier) ont une structure polyédrique.
  - Reconstruction paramétriques : aussi appelée approche descendante (top-down) celle-ci consiste à chercher des instances d'un modèle rigide ou déformable dans les données brutes. Ces approches sont très robustes et produisent une représentation très structurée de la scène, mais très peu flexibles car il faut un modèle pour chaque partie de la scène qu'on cherche à modéliser. On parle alors d'approche bibliothèque où la bibliothèque contient tous les modèles d'objets possibles. Ces approches ne sont adaptées à l'information géographique que dans des contextes très précis où la diversité d'objets d'intérêt est limitée comme par exemple l'extraction de panneaux de signalisation ou de marquages au sol en terrestre, où les bâtiments en aérien dans des zones de typologie très uniforme. En général, la typologie des objets est trop variée pour permettre aux approches bibliothèque de pouvoir en appréhender la majorité.
  - Reconstruction de grammaire : c'est une approche assez proche de celle d'avant, sauf que le modèle ajusté aux données est la réalisation d'une grammaire. Le problème est donc très difficile car l'espace de recherche (ensemble des réalisations possibles d'une grammaire) est très complexe et donc l'optimisation sous-jacente est très difficile. Elles souffrent aussi du même manque de généralité que les autres approches top-down qui la rendent inexploitable à large échelle.
  - Reconstruction hybride : elle consiste à produire une représentation de la scène mélangeant différents niveaux de structuration, comme par exemple des objets d'une bibliothèque là où ils sont présents, des primitives (formes géométriques simples comme des morceaux de plans, cylindres, sphères) dans les zones de la scène qui correspondent à ce modèle, et surface triangulée (ou MNS) ailleurs. Cela permet de compenser le manque de généralité des approches basées sur le modèle en autorisant des représentations moins structurées là où la géométrie de la scène ne correspond pas à l'un des modèles possibles.

Si les reconstructions de plus bas niveau (2.5D, maillages, implicite, décimation) sont purement géométriques, les autres s'appuient plus ou moins sur la sémantique :

1. la reconstruction paramétrique reconstruit des objets typés (toit bipan, panneau triangulaire,...) qui presuppose donc qu'un objet de ce type a été détecté.
2. la reconstruction de grammaire presuppose que l'objet à reconstruire est celui que la grammaire cherche à décrire
3. la reconstruction polyédriques posent un a priori fort sur la géométrie à reconstruire qui n'est vrai que sur certains types d'objets (toits ou autres structures anthropiques)
4. la reconstruction hybride n'est pas directement sémantique mais elle distingue des zones quelconques et des zones plus structurées (plans, cylindres, sphères) qui correspondent généralement à des structures anthropiques et induit donc une sémantisation légère de la scène.

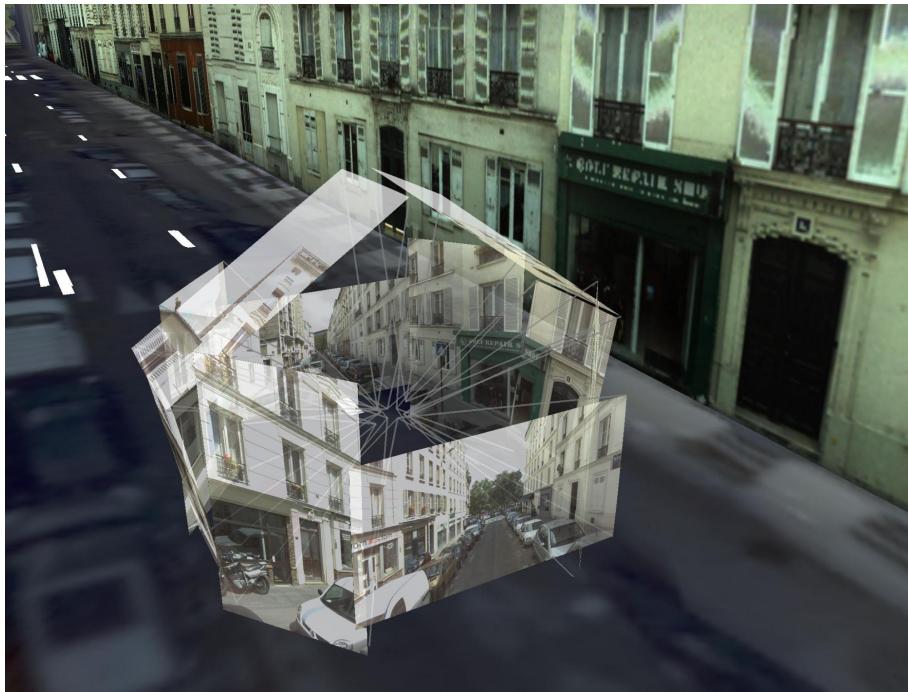


FIGURE 1.6 – Texturation d'une route à partir d'imagerie aérienne et d'une façade à partir d'imagerie terrestre et visualisation d'une des panoramiques utilisées pour former cette texture.

#### 1.3.4 Texturation

Le fait d'appliquer une texture à la géométrie reconstruite (cf Figure 1.3.4) est un problème lié mais méthodologiquement assez indépendant du problème de la reconstruction. Je m'y suis intéressé en tant qu'étape finale indispensable de la reconstruction de scènes urbaines.

La texturation se fait classiquement en trois étapes :

- Rectification : il s'agit de projeter chaque image sur la surface à reconstruire. C'est un calcul géométrique assez simple, qui se fait en fait en sens inverse : les géométries à texturer sont projetées dans les images. Cependant, la gestion des occultations est plus complexe et peut devenir très lourde en temps de calcul si elle n'est pas faite de façon optimisée.
- Égalisation : sur leurs recouvrement, les images doivent avoir une radiométrie la plus proche possible afin de faciliter leur mélange. En général, il faut donc appliquer des corrections radiométrique pour tendre vers cette égalisation.
- Mosaïque : puisqu'en général les images à utiliser pour la texturation se superposent, il s'agit de définir des lignes de raccord entre ces images. Dans l'idéal ces lignes de raccord doivent être calculées de façon à être les moins visibles possible. Le mosaïque peut aussi chercher à cacher les lignes de raccord en mélangeant les images (on parle alors de blending).

Dans le monde de l'information géographique, la génération d'ortho-photographies peut être vue comme un cas particulier de texturation sur une géométrie 2.5D, c'est à dire

sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé pour la rectification. Si on utilise un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), c'est à dire sans filtrer le sur-sol, on parle alors d'ortho vraies. Celles-ci sont encore très peu utilisées à cause de nombreux artefacts en particulier au niveau des discontinuités altimétrique qui sont rarement bien représentées dans un MNE.

## 1.4 Enjeux

Nous allons maintenant détailler les enjeux de la recherche que je mène, sur les plans scientifiques (section 1.4.1) ou sociaux (section 1.4.2).

### 1.4.1 Enjeux scientifiques

Pour moi, la recherche sur l'analyse de scènes se pose principalement deux questions d'intérêt :

1. Pour un ensemble de données brutes imageant une même scène, comment produire la meilleure description (structurée et sémantisée) de cette scène ?
2. Quelles données faut-il acquérir et comment faut-il les traiter pour satisfaire un besoin de description d'une scène ?

Ces deux questions sous-tendent toute ma recherche à l'IGN, et surtout la première car, comme je l'ai indiqué, l'IGN cherche plus à produire une représentation fidèle générique du territoire qui soit adaptée à un maximum d'applications qu'à adapter ses données à des applications particulières.

### 1.4.2 Enjeux sociaux

La description du territoire sur lequel nous vivons est un enjeux sociétal majeur, car la bonne connaissance de notre habitat permet d'aider toutes les prises de décision le concernant et concernant les activités que nous y menons. Je regrouperai ces enjeux dans les catégories suivantes :

- La navigation : les cartes ont au départ été dessinées pour permettre à leurs utilisateurs de choisir et de suivre un itinéraire. Cet enjeu est encore d'actualité avec les cartes numériques embarquées dans les systèmes de navigation par GPS, et encore plus avec l'émergence de la navigation autonome qui nécessite des cartes dédiées à la localisation précise du véhicule.
- L'aménagement du territoire et son administration : notre société utilise une part importante de son activité à aménager son habitat : bâtiments, infrastructures et réseaux permettent d'adapter notre environnement à nos enjeux de société. Les décisions concernant cet aménagement impactent fortement la société et son activité économique et industrielle. Ces décisions doivent donc être prises en évaluant au mieux leurs conséquences. Cette évaluation se repose en particulier sur des simulations à vocation prédictives : simulation de la circulation routière, propagation du bruit, de polluants, d'ondes électromagnétiques, météorologie, inondations, ... . Toutes ces simulations s'appuient sur une description du territoire, et leurs résultats ne peuvent être fiables (et donc utiles) que si cette description l'est aussi.

- La puissance publique : pour administrer un territoire, il faut disposer d'une description précise et actuelle de ce territoire, que ce soit pour l'imposition (cadastre) ou l'évaluation des aides allouées par l'état ou l'union européenne par exemple.
- La sécurité : la sécurité est un secteur où l'information géographique est la plus cruciale. En cas d'événement grave (terrorisme, incendie,...) des équipes d'intervention doivent mener des opérations souvent périlleuses sur les scènes concernées, et la préparation de ces opérations est d'autant plus facilitée que l'on dispose d'informations fiables et précises sur ces scènes. Cela est encore plus vrai pour la défense de notre territoire, ce qui explique que l'origine des services géographiques soit souvent militaire, comme c'est le cas pour l'IGN où les liens avec la défense restent très importants.

Dans le chapitre suivant, je vais m'efforcer d'expliquer comment ma recherche s'est organisée pour répondre à ces enjeux en détaillant leur déclinaison en grandes thématiques de recherche.

## Chapitre 2

# Synthèse des travaux

Dans ce chapitre, je cherche à présenter une synthèse des travaux que j'ai réalisés depuis mon arrivée à l'IGN en septembre 2008 qui explique leur cohérence et leur logique d'ensemble. Je commencerai donc par définir les thématiques de la recherche que je mène à l'IGN, puis je détaillerai comment j'ai abordé ces thématiques au travers de mes travaux sur les 4 familles méthodologiques définies au chapitre précédent.

### 2.1 Thématiques

Le rôle de la recherche à l'IGN est multiple. En ce qui me concerne, la première mission que me donne l'IGN est d'assurer une expertise sur le périmètre méthodologique défini au chapitre précédent. Cette expertise passe par une veille permanente, et par la réalisation de prototypes permettant de maîtriser toutes briques de la chaîne de traitement décrite dans la Figure 1.4. Cela peut consister en l'amélioration d'outils existant à l'IGN ou la conception de nouveaux outils préfigurant de possibles futures chaînes de production IGN. Par rapport à sa production actuelle, les enjeux de l'IGN sont multiples : amélioration du niveau de détail, du nombre de types d'objets représentés, maîtrise de la précision de localisation, automatisation des traitements, ... Dans ce contexte, un choix stratégique majeur du laboratoire MATIS a été d'investir sur la cartographie mobile qui permet de se rapprocher des scènes d'intérêt pour augmenter la résolution des données et donc le niveau de détail des produits (cf section 1.2.2). Ainsi, une vaste majorité de mes travaux de recherche se sont focalisés sur la cartographie mobile qui est une technique assez nouvelle donc très ouverte, et moins sur l'imagerie satellite et aérienne qui sont déjà bien maîtrisées à l'IGN.

Ma stratégie scientifique s'appuie sur l'exploitation optimale de l'information que procure une acquisition sur la réalité tout au long de la chaîne de traitement illustrée sur la figure 1.4 et en particulier sur l'idée de fidélité (section 2.1.1), de travail en "vraie" 3D (section 2.1.2), de prise en compte de la dimension temporelle de l'acquisition (section 2.1.3), d'exploitation des complémentarités entre données (sections 2.1.4 et 2.1.5) et entre méthodologies (sections 2.1.6 et 2.1.7). Enfin, je parlerai de deux thématiques orthogonales aux précédentes mais omniprésentes dans mon travail, que sont l'optimisation (section 2.1.8) et le passage à l'échelle (section 2.1.9).

---

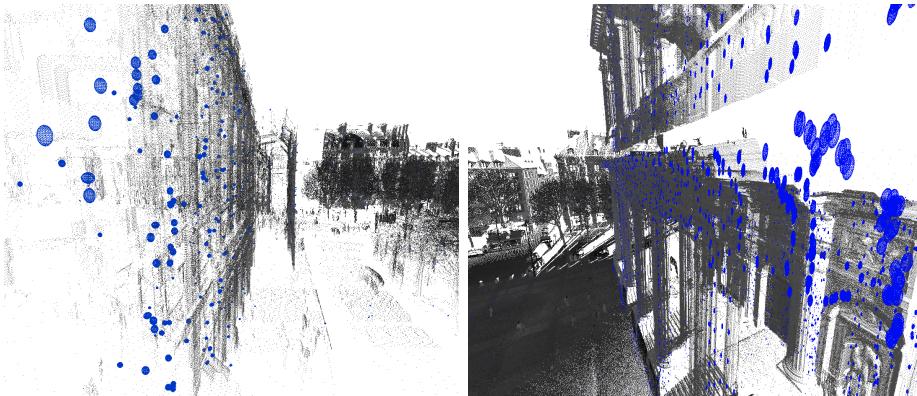


FIGURE 2.1 – Ellipsoïdes d’incertitudes dessinées sur un point sur 300 d’un scan de cartographie mobile

### 2.1.1 Fidélité

La fidélité est une notion centrale en information géographique où les données que nous manipulons sont acquises sur des scènes réelles et doivent donc représenter une réalité objective. Cette notion est centrale et structurante dans mes travaux. La fidélité d’une représentation numérique de la réalité mesure sa consistance avec la scène réelle. Une première façon d’envisager la fidélité est celle des incertitudes (Section 2.1.1.1) qui passe par la maîtrise de la géométrie d’acquisition (Section 2.1.1.2) et que je propose d’aborder via la théorie de Dempster Shafer (Section 2.1.1.3).

#### 2.1.1.1 Incertitudes

L’écart entre la réalité et sa représentation peut être vu comme une variable aléatoire dont la distribution peut être contrôlée ou modélisée. Cependant, peu de méthodes dans mon périmètre méthodologique produisent des incertitudes sur leurs résultats, à part certaines méthodes de classification qui peuvent produire des probabilités d’appartenance aux classes. La modélisation des incertitudes sur les données brutes utilisées, et leur propagation au long de la chaîne de traitement (cf Figure 2.1) est un sujet difficile que j’ai abordé à plusieurs reprises sur des sujets qui s’y prenaient bien et qui va devenir de plus en plus prépondérant dans mon travail afin de pouvoir quantifier la fidélité des produits des méthodes que je développe. Ce travail requiert d’avoir une maîtrise fine de la géométrie d’acquisition des données.

#### 2.1.1.2 Géométrie d’acquisition

La fidélité passe aussi à mon sens par un travail très méthodique sur l’information que donne une acquisition sur la réalité physique et la garantie que les produits des méthodes soient compatibles avec l’ensemble de cette information. Par exemple, recalcer deux jeux de données ne consiste pas à trouver une déformation (rigide ou non) permettant de les aligner, mais de ré-estimer les poses ou les trajectoires des capteurs qui les ont acquises. En effet, les systèmes de géopositionnement des plateformes d’acquisition donnent ces trajectoires et leurs incertitudes, que l’on peut donc propager jusqu’à la donnée brute (points laser et

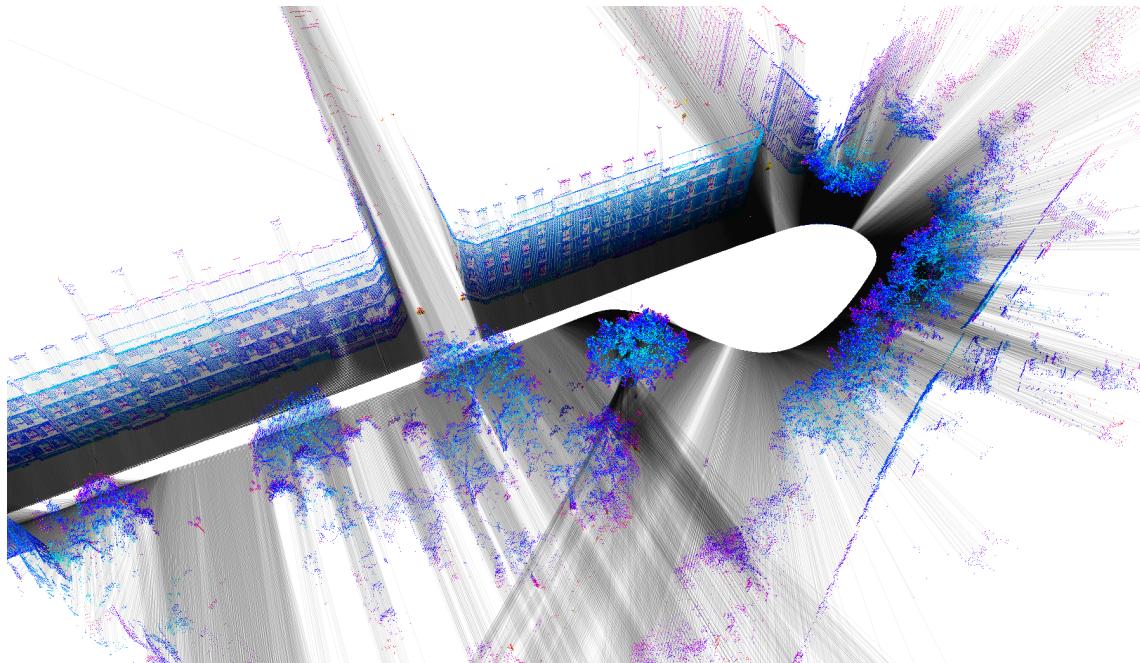


FIGURE 2.2 – Nuage de rayons laser acquis par un véhicule de cartographie mobile. Cette information est géométriquement plus riche et physiquement plus fidèle qu'un nuage de points.

pixels) comme illustré sur la figure 2.1.

Ainsi, de nombreuses informations ou métainformations d'acquisition pertinente d'un point de vue de l'information qu'elles donnent sur la scène acquise sont souvent perdues dès les premières étapes de traitement voir jamais enregistrées. Le fait que le laboratoire MATIS développe ses propres plate-formes d'acquisition est de ce point de vue une chance énorme que j'ai pu saisir pour mener ce travail rigoureux de préservation de l'information. Ce travail a un intérêt scientifique important, en ce qu'il permet de mieux comprendre la donnée. Ainsi la maîtrise de la géométrie d'acquisition a plusieurs avantages :

1. La connaissance du centre optique pour chaque point d'un scan laser donne l'information physique que l'espace est vide le long du segment entre ce centre et ce point. Une information équivalente peut être obtenue pour l'image après une phase de corrélation donnant la profondeur de chaque pixel. La section 2.1.1.3 détaille le formalisme utilisé pour modéliser cette information. De ce point de vue, une information physique importante est systématiquement perdue habituellement : les pulse laser sans retour. Ceux ci indiquent que l'espace est vide le long d'un rayon du centre optique vers la direction d'émission, dont la longueur est égale à la portée du Lidar. L'accès à cette information permet de garantir plus de fidélité pour une reconstruction de surface ou une détection de changements par exemple. En effet, une surface physique ne peut pas être traversée par un rayon d'une acquisition laser, même si ce rayon n'a pas généré de retour, puisque c'est incompatible avec la physique de l'acquisition (cf Figure 2.2). De même si un tel rayon intersecte une surface de la scène à une autre époque, il peut indiquer un changement entre cette époque et la sienne.
2. La maîtrise de la géométrie d'acquisition facilite l'interprétation de la donnée, comme

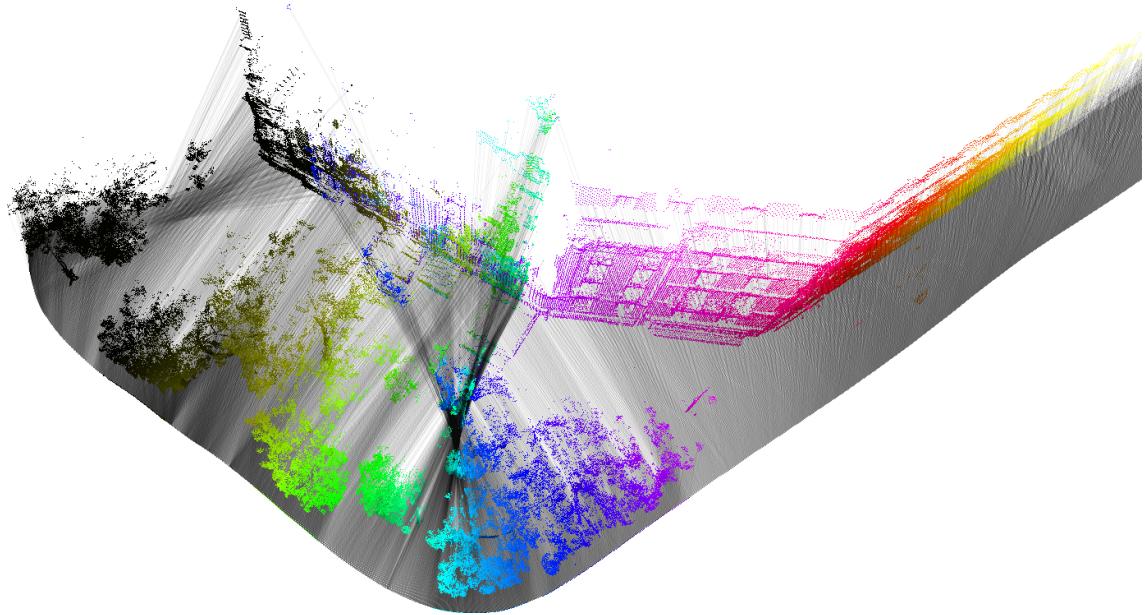


FIGURE 2.3 – La visualisation d'un nuage de segments permet de se rendre compte des effets de rebroussement des faisceaux laser.

dans l'exemple de la Figure 2.3 où une densité très hétérogène de points sur une façade s'explique par un rebroussement des faisceaux laser pendant un virage du véhicule.

3. La connaissance de la géométrie du capteur permet de définir une topologie entre les points (point suivant/précédent, point correspondant dans la ligne de scan d'avant/après) comme illustré en Figure 2.4. La connaissance de cette topologie peut accélérer les calculs de voisinage, et être utilisée comme solution initiale pour une reconstruction de surface.

La contrepartie est que cela réduit la généralité des méthodes développées qui s'appuient sur des informations souvent absentes des jeux de données utilisés par la recherche. C'est une démarche cependant indispensable pour garantir un maximum de fidélité.

#### 2.1.1.3 Dempster Shafer

Une acquisition Lidar ou une corrélation image donne une information physique sur la répartition dans l'espace de matière solide (ou du moins réfléchissant la lumière). C'est une information plus riche qu'un nuage de points ou une carte de profondeur. Les réflexions que nous avons eues sur ce point avec mes doctorants Jérôme Demantké et Wen Xiao nous ont conduit à choisir le formalisme de la théorie de Dempster-Shafer ([Dempster, 2008](#)) pour représenter cette information. Appliquée à l'état (vide ou plein) de l'espace, cette théorie permet de représenter la fiabilité de cette information, et en particulier la présence ou non d'information sur cet état dans l'espace. Ainsi, comme le montre la figure 2.5, un rayon Lidar indique que l'espace est vide entre le centre optique et la cible, plein après, et ne donne aucune information partout ailleurs. Les probabilités Bayesiennes ne permettent pas de représenter fidèlement cette information car l'état  $p(\text{vide}) = p(\text{plein}) = 1/2$  ne permet pas de distinguer entre l'absence d'information (en est en dehors du volume scanné) et l'information conflictuelle (sur la cible, on a une information incertaine entre vide et plein

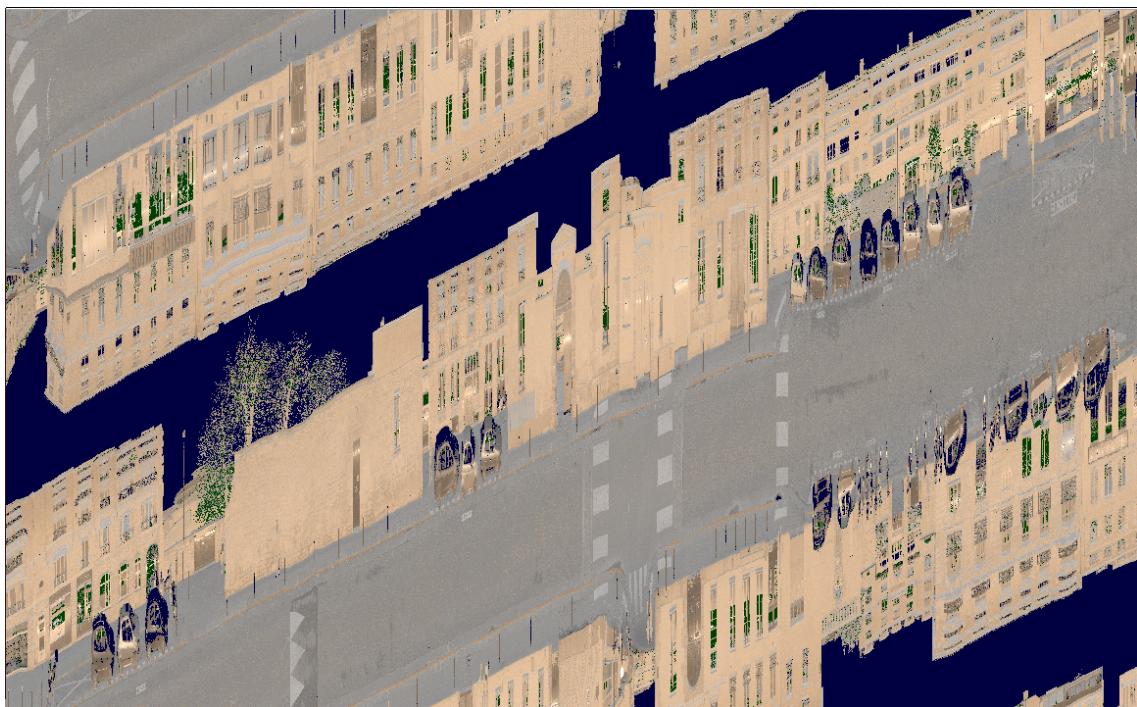


FIGURE 2.4 – Représentation d'un scan de cartographie mobile en topologie capteur : verticalement : angle du capteur, horizontalement : temps d'acquisition.

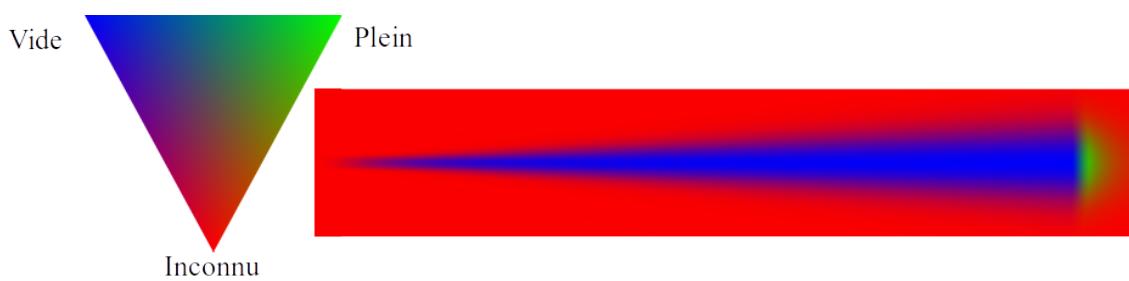


FIGURE 2.5 – Représentation de l'information donnée sur état de l'espace par un écho laser ou une corrélation : vide du centre optique à l'écho/profondeur de la corrélation, plein après, inconnu ailleurs.

---

car on est sur une interface, ce qui est une information très pertinente et très différente de la précédente). Cette information modélisée pour chaque rayon peut être combinée pour plusieurs rayons ou plusieurs époques par une règle associative et commutative, et donc indépendante de l'ordre choisi (Senz and Ferson, 2002). Enfin, la théorie de Dempster Shafer permet de représenter des incertitudes d'ordre géométrique en "floutant" cette information de façon consistante avec les incertitudes sur la géométrie d'acquisition, et donc de propager cette incertitude jusqu'aux produits (surface reconstruite, changement détecté, ...)

### 2.1.2 Vraie 3D

Comme déjà mentionné en section 1.2.2, l'augmentation de la fidélité et donc de la précision et du niveau de détail des données passe par un rapprochement des capteurs de la scène imagée. Alors que la description du territoire s'est longtemps faite en 2D (cartes, orthophotos) ou 2.5D (Modèles Numériques d'Élévation), ce rapprochement impose un travail en vraie 3D, c'est à dire avec une représentation, des structures de données et des méthodes où toutes les dimensions sont équivalentes. Cette tendance se ressent dans l'information géographique par l'utilisation croissante de nuages de points caractérisés par leurs coordonnées ( $x, y, z$ ) et la mise en place de traitements dédiés à ces nuages de points (Weinmann et al., 2015a) (Weinmann et al., 2015b).

Mais au delà des nuages de points, je cherche à exploiter les nombreux outils qu'a développés l'informatique graphique pour représenter et traiter des scènes en 3D : maillages triangulés, triangulations de Delaunay 3D, structures multi-résolution 3D (octree/kd-tree), atlas de texture, lancer de rayon, décimation ... Ce en quoi ma thèse dans ce domaine (cf section 4.3) m'aide beaucoup.

### 2.1.3 Intégration de la dimension temporelle

Les données que nous traitons sont acquises dans l'espace temps. Chaque pixel, chaque point laser a été acquis à un instant donné et ne donne donc une information sur la scène d'intérêt qu'à cet instant (cf Figure 2.6). Cette dimension temporelle prend de plus en plus de place dans mes travaux car elle a de nombreuses implications :

- Possibilité d'analyser la dynamique des scènes à différentes échelles temporelles, de la seconde pour les objets mobiles aux années pour les évolutions structurelles des villes. Cette analyse peut donc passer par le suivi d'objets mobiles et la détection de changement.
- Possibilité de mettre à jour des données de référence
- Prise en compte des effets de la temporalité sur les données :
  - Déformations d'objets par les scanners laser plans
  - Déplacements d'objets entre leur acquisition par les différents capteurs d'une plate-forme d'acquisition
  - Gestion des rebroussements du plan du laser lors de rotations du capteur (cf Figure 2.3).
  - Intégration de la trajectoire du capteur comme donnée à traiter, c'est à dire poser les problèmes de recalage comme problèmes de ré-estimation de trajectoire.



FIGURE 2.6 – Visualisation d'une image orientée et d'un nuage laser acquis simultanément. Le laser est coloré suivant son décalage temporel avec l'instant d'acquisition de l'image (de noir=avant à blanc=après). Les lignes bleues sont acquises simultanément à l'image. Pour les autres, la dimension temporelle devra être prise en compte car la scène peut avoir changé dans l'intervalle de temps, en particulier en présence d'objets mobiles.

Ainsi, au delà de la vraie 3D, c'est même en vraie 4D que je considère devoir travailler.

#### 2.1.4 Complémentarité des points de vue

L'utilisation optimale de l'information passe par l'exploitation conjointe de données acquises depuis des points de vue très différents. De ce point de vue, la complémentarité aérien/terrestre est exemplaire. Les données aériennes (ou satellitaires) permettent une couverture du territoire à large échelle et assez fréquente, alors que les données terrestres sont beaucoup plus détaillées mais offrent une couverture beaucoup plus partielle. Cette complémentarité est aussi très frappante sur les bâtiments : les toits sont vus en aérien mais pas en terrestre, et les façades sont très mal vues en aérien mais très précisément en terrestre (cf Figure 2.7). L'exploitation de cette complémentarité m'a d'autant plus occupé que mon poste à l'IGN s'intitule "chargé de recherche en reconstruction conjointe aérien-terrestre".

Mais d'autres complémentarités de points de vue sont aussi d'actualité :

- Complémentarité de l'imagerie verticale et oblique en aérien
- Complémentarité des points de vue drone (très basse altitude), aérien (altitude moyenne) et satellitaire (très haute altitude)
- Complémentarité des points de vue terrestres : stations fixes, cartographie mobile embarquée sur bateau, voiture, fauteuil roulant, sac à dos, ... (cf Figure 2.8).

Ce sujet est de mon point de vue très lié à la reconstruction de surfaces triangulées

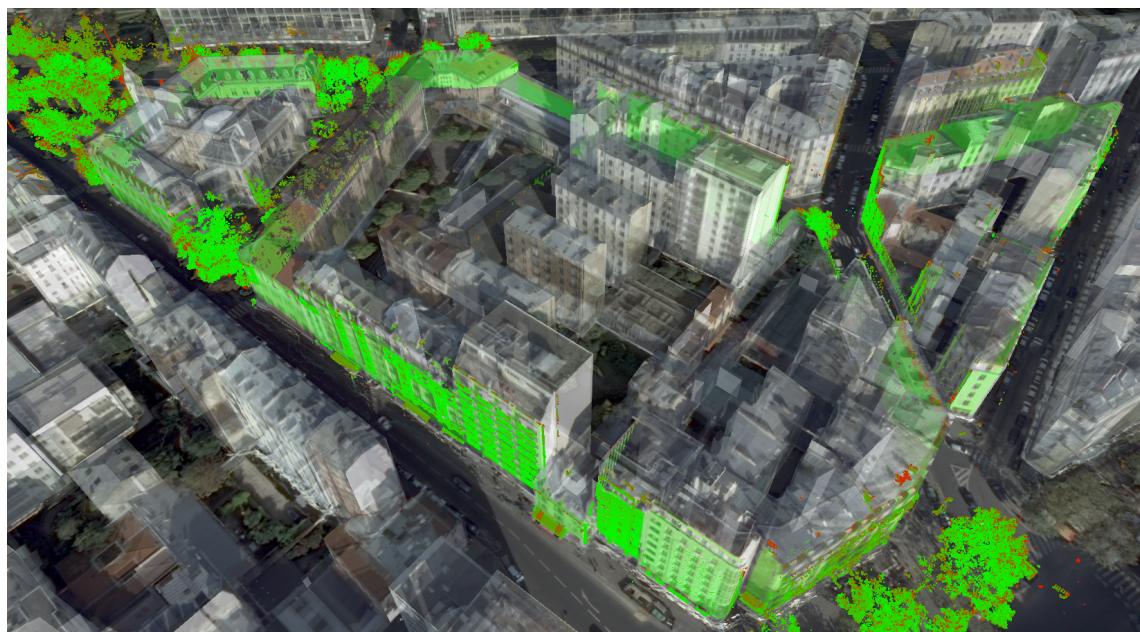


FIGURE 2.7 – Modèle 3D texturé de ville produit à partir d’images aériennes, et nuage de points de cartographie mobile utilisé pour enrichir (géométrie, sémantique, texture) ses façades.

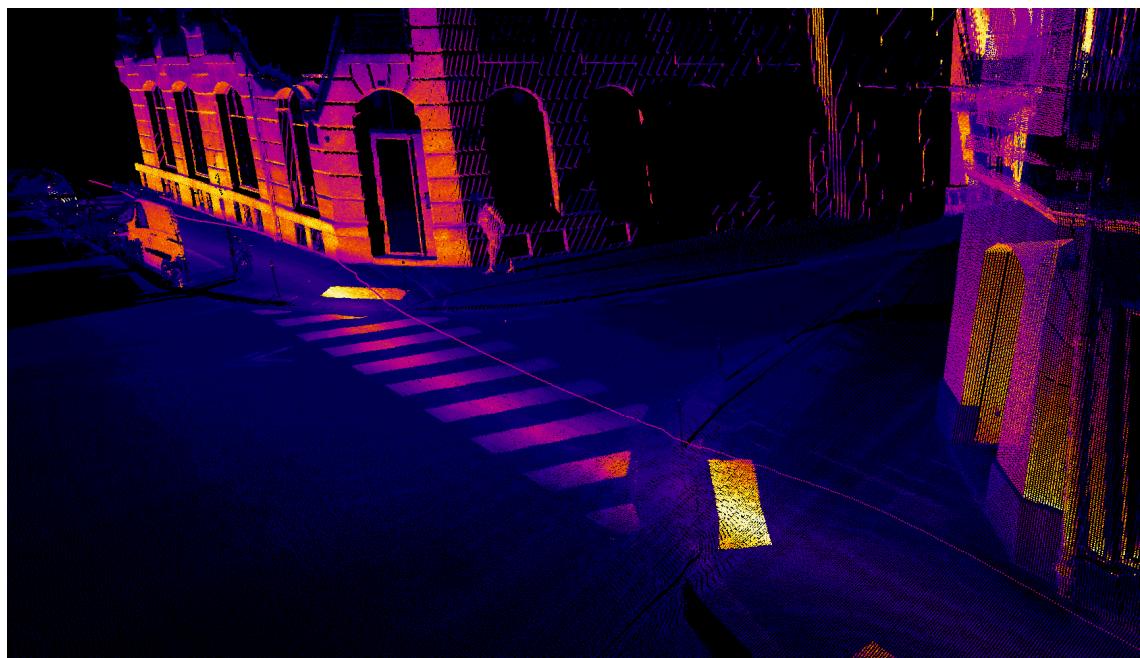


FIGURE 2.8 – Scan laser réalisé par le véhicule Viapolis adapté à la circulation sur le trottoir et permettant de combler les occultations de celui-ci lorsqu'il est vu depuis la rue en cartographie mobile.

---

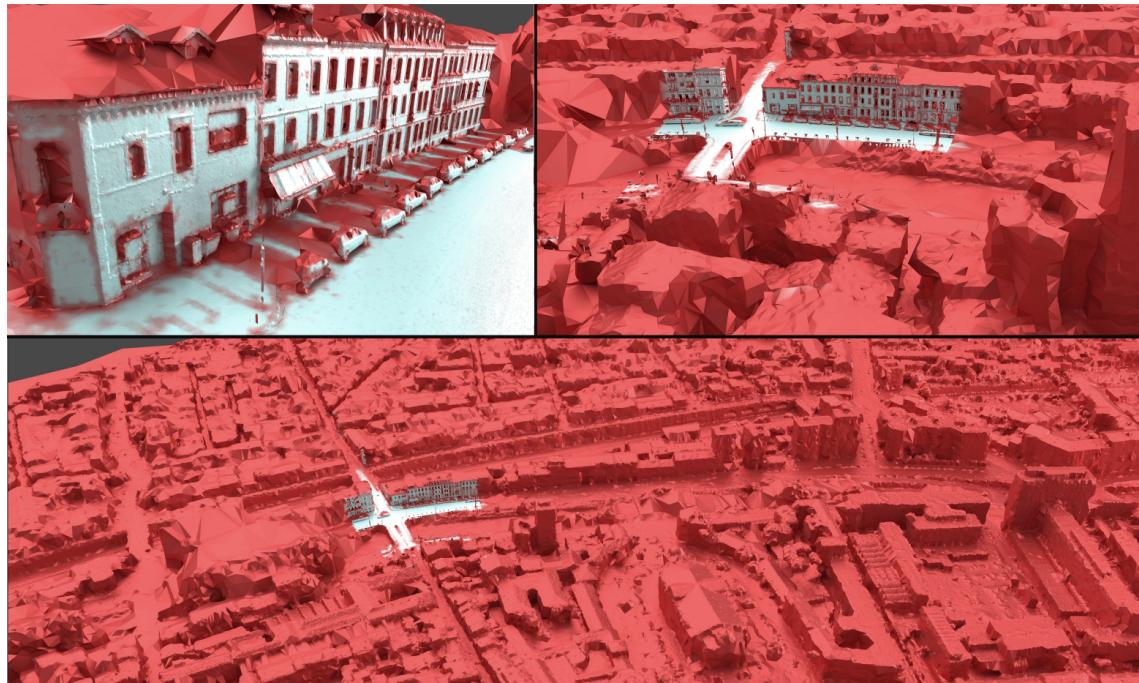


FIGURE 2.9 – Reconstruction de surface combinant lidar aérien et mobile terrestre et prenant en compte les incertitudes (de bleu clair=certain à rouge=incertain).

en vraie 3D (cf Figure 2.9). En effet, la 2.5D suppose un point de vue vertical et n'est donc adapté qu'à l'aérien vertical et au satellitaire (et encore le satellitaire a souvent un point de vue assez voire très oblique). La 3D permet cette intégration de point de vue et de résolution variées de part sa flexibilité, au coût de traitements et de modes de visualisation certes plus complexes, mais sur lesquels la communauté de l'informatique graphique a développé de nombreux outils et technologies.

### 2.1.5 Complémentarité laser/image

Les données images et laser ont des structures très différentes qui ont conduit des communautés scientifiques à se développer autour de chacune indépendamment (photogrammétrie et lasergrammétrie). Pourtant, leurs complémentarités sont importantes :

- Mesure géométrique directe vs indirecte :
  - Laser : (quasi) garantie de présence d'une cible à la distance mesurée
  - Image : la mesure géométrique se fait par corrélation entre deux images, or une corrélation n'indique pas avec certitude la présence de matière en ce point de l'espace, en particulier à cause de sa sensibilité :
    - aux effets spéculaires
    - aux structures répétitives
    - aux zones peu texturées et/ou sombres (faible dynamique)
- Le Lidar est un capteur actif alors que l'image est un capteur passif. Son résultat est donc sensible aux conditions d'éclairage lors de la capture de la scène.

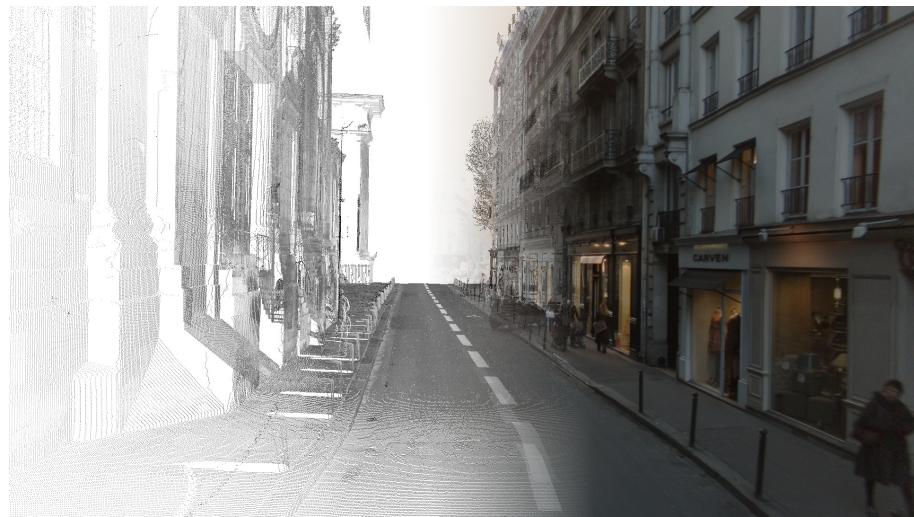


FIGURE 2.10 – Superposition d'une image et d'un scan laser de la même scène.

- Le Lidar est Mono bande (en général dans le proche infra rouge) alors que l'image est tri-bandes (rouge, vert, bleu) ce qui lui donne une plus grande richesse spectrale et donc un supplément d'information utile en particulier pour l'interprétation.
- La résolution de l'image est en général plus importante et plus isotrope que celle du lidar. Mis à part pour les images de type *push-broom*, la géométrie d'acquisition est aussi différente, avec une résolution angulaire constante dans les deux directions pour l'image, et une résolution angulaire constante dans une direction pour le lidar (le long d'une ligne), et une résolution spatiale variable pour l'autre direction puisque les lignes sont acquises à fréquence fixe et donc la distance entre deux lignes dépend de la vitesse (variable en général) du capteur.

L'augmentation significative des capacités d'acquisition fait que l'on dispose maintenant souvent de données image et Lidar de la même scène (cf Figure 2.10), qu'on ne sait souvent exploiter que séparément. Une thématique importante de mon travail de recherche est donc d'exploiter au mieux ces complémentarités dans les domaines méthodologiques que j'étudie.

### 2.1.6 Couplage segmentation/classification

La segmentation et la classification (cf Figure 2.11) regroupent des ensembles de techniques assez dissociées. La classification consiste à construire ou apprendre un modèle prédictif pour attribuer un label à un vecteur de descripteurs. Si l'on classe des points ou des pixels, on omet la notion pourtant centrale d'objet. Inversement, la segmentation cherche à découper la scène en objets sur des critères purement géométriques indépendamment de leur sémantique. Ces méthodes sont ainsi enchaînées de deux façons :

- Segmentation puis classification : la scène est segmentée en tant que nuage de points (Golovinskiy et al., 2009), de cartes d'accumulation horizontales (Serna and Martegui, 2014) ou de super-voxels (Aijazi et al., 2013) et la classification se fait alors sur les segments et peut donc exploiter toute l'information du segment pour décider de la classe. Cependant, le résultat dépend entièrement de la qualité de la segmentation qui se fait sur des critères purement géométriques et donc peine à capturer des

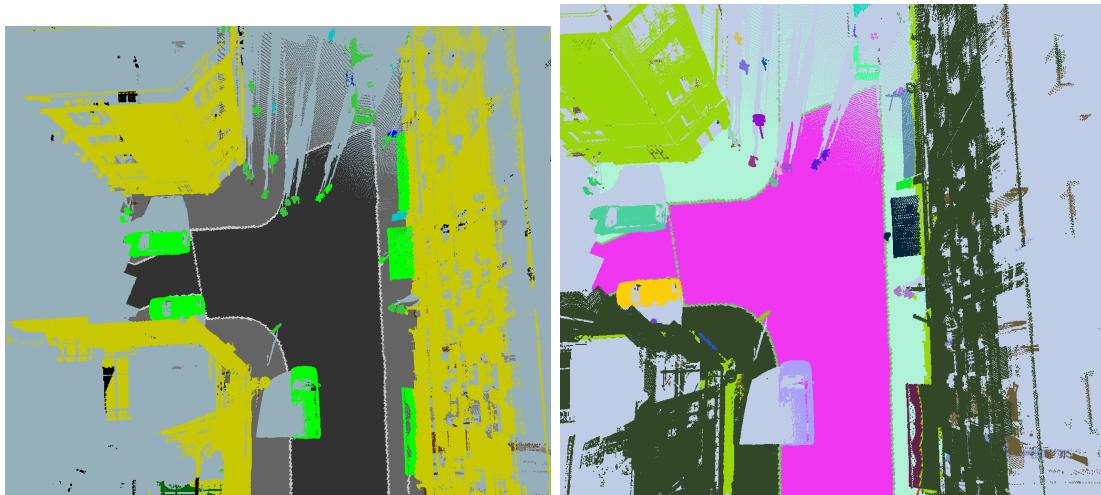


FIGURE 2.11 – Classification (gauche) et segmentation (droite) d'un scan de cartographie mobile terrestre

objets complexes.

- Classification puis segmentation : les points ou pixels de données sont d'abord classés (potentiellement de façon floue) (Weinmann et al., 2015c) puis ce résultat de classification est segmenté en objets. Il est dans ce cas difficile de retrouver des objets complexes dont les différentes parties seront réparties dans des classes différentes, ou de séparer des objets proches.

Très récemment, des méthodes de Deep Learning ont été utilisées pour réaliser classification et segmentation conjointement, c'est à dire pour découper une image en objets sémantisés, ce qu'on nomme aussi une segmentation sémantique (Long et al., 2015).

Ce couplage segmentation/classification est un thème central dans l'analyse de scène et je l'ai abordé plus ou moins directement dans la plupart de mes travaux. Il constitue un premier niveau de couplage entre géométrie et sémantique, qui est complété par un deuxième niveau, plus structuré, de couplage entre reconstruction et classification.

### 2.1.7 Couplage analyse/reconstruction

Analyse et reconstruction, c'est à dire sémantique et géométrie structurée ont une interaction qui est centrale dans mon travail de recherche et prolonge le problème de segmentation sémantique mentionné précédemment. En effet, en supposant la donnée segmentée en objets sémantisés, chacun de ces objets peut être reconstruit avec une méthode adaptée (toits, végétation, route, plans d'eau,...) comme cela a été fait pour reconstruire un MNS à partir de données d'occupation des sols (Hollaus et al., 2010) et même plus récemment à l'échelle de l'intégralité des Pays-Bas à partir de Lidar aérien (Elberink et al., 2013). Cette approche a encore plus récemment été formulée sous forme d'un problème global d'optimisation avec des a priori variables venant d'une classification (Verdie et al., 2015).

Le cheminement inverse est aussi possible : une reconstruction géométrique fournit une représentation plus riche de la scène qui peut être exploitée pour la sémantiser, comme c'est le cas de tous les algorithmes classiques de classification qui utilisent (entre autre)



FIGURE 2.12 – Le calcul d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) urbain modélisant précisément le sol permet de définir une élévation au dessus de ce sol (de noir=+0m à blanc=+10m) très utile pour la sémantisation car la typologie des objets lui est très liée.

---

un Modèle Numérique de Surface ([Syed et al., 2005](#)). En vraie 3D, il est aussi possible d'exploiter le résultat d'une reconstruction pour aider une sémantisation, par exemple en reconstruisant la surface du sol afin de définir un attribut géométrique (élévation au dessus de cette surface) qui est particulièrement pertinent pour la classification (Figure [2.12](#)).

### 2.1.8 Optimisation

L'optimisation est un outil omniprésent dans mes recherches sur lequel s'appuient la plupart de mes travaux. Mais au delà d'un outil précieux, l'optimisation est pour moi une méthodologie scientifique permettant d'aborder rigoureusement les problèmes posés et de jalonna leur résolution. En effet, l'optimisation pose le problème de l'objectif, de la finalité même de la recherche menée. Une fois ses objectifs précisément définis par l'intermédiaire d'une fonction objectif (probabilité ou mesure de qualité à maximiser, coût, énergie, erreur à minimiser), il est possible de s'appuyer sur de nombreuses méthodes d'optimisation qui offrent des garanties importantes sur la qualité des résultats, des propriétés de convergence, etc. dans la résolution du problème. Cette approche a aussi le mérite de permettre une comparaison parfaitement objective de méthodes, car si elles cherchent à optimiser la même fonction objectif donnée, alors la comparaison de la valeur de cette fonction sur différents résultats permet de les ordonner de façon triviale.

De nombreux problèmes abordés dans ce document sont des problèmes d'optimisation très difficile car leur solution vit dans un espace mathématique complexe : ensemble des partitions d'un ensemble pour la segmentation, espaces de dimension variable pour la détection d'objets multiples et la reconstruction. Si les Rational Jumps Markov Chain Monte Carlo (RJMCMC) offrent un moyen générique de traiter ces problèmes ([Brédif and Tournaire, 2012](#)), leur temps de calcul pour parvenir à une solution correcte est souvent prohibitif, auquel cas on préfère une solution plus heuristique. Cependant, cette heuristique peut être guidée par la fonction objectif qui peut alors aider à son design et aux choix sous-jacents.

### 2.1.9 Passage à l'échelle

Les volumes de données acquis par l'IGN, que ce soit par ses avions ou ses véhicules de cartographie mobile sont considérables et englobent l'intégralité d'un territoire riche et diversifié avec des typologies de scènes extrêmement variable. Au cours de ma carrière de recherche, la thématique du BigData a pris énormément d'ampleur. Le terme BigData regroupant de nombreux aspects, plutôt que d'en tenter une définition, je préfère décrire deux de ses composantes qui m'intéressent dans mon travail de recherche :

- **Le volume de données** : appréhender de très larges volumes de données passe par le découpage de cette données de façon intelligente afin de pouvoir répartir les traitements sur une architecture distribuée, et le recollage des résultats (cf Figure [2.13](#)). Si l'IGN travaille principalement par dalles, cette approche a des limites et un découpage plus consistant avec l'organisation de la scène (pâtés de maison, quartiers, villes, ...) permet de limiter les effets de bords. Une question ouverte importante est celle de savoir si ce découpage doit être fait dans l'espace objet (géographique) ou dans les données d'acquisition. Le premier choix est plus logique mais le second plus simple.

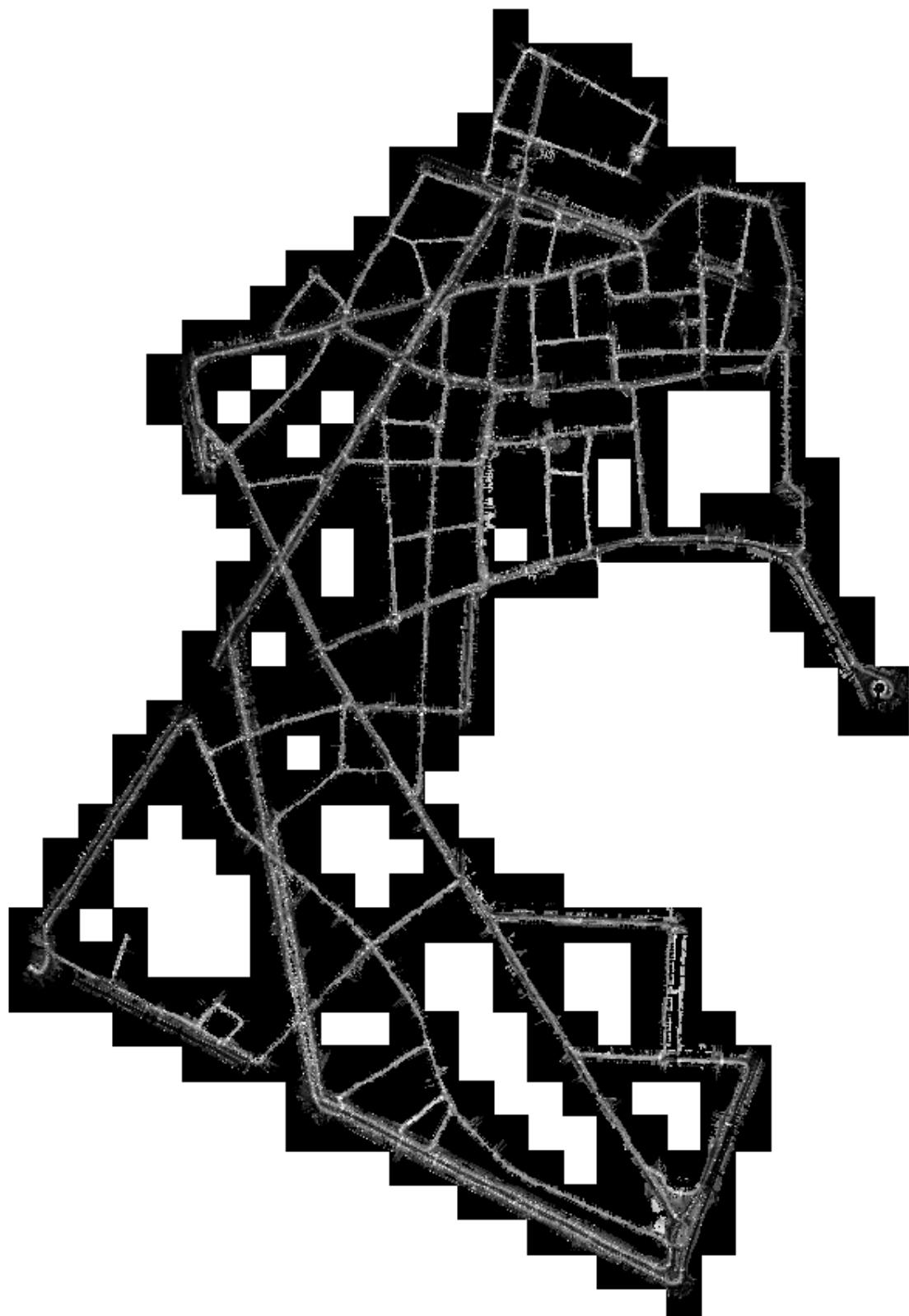


FIGURE 2.13 – Passage à l'échelle d'un calcul d'orthophoto laser sur un quartier de Paris (dalles de 50 m de côté à 2 cm de résolution) nécessitant le traitement de plusieurs centaines de Go de données laser.

---

— **La diversité des scènes** : une tendance importante de nombreux travaux de recherche est d'améliorer la qualité des traitements en introduisant des *a priori* forts pour compléter les lacunes des données (occlusions, faible résolution, bruit, outliers). Or, un *a priori* fort n'est pas possible sur une scène aussi variée que le territoire français, ou même de ses villes. Même des *a priori* simples comme le parallélisme, l'orthogonalité, la symétrie que l'homme recherche naturellement dans ses constructions ne sont pas vérifiés sur les constructions anciennes. Ainsi les approches populaires de reconstruction de façade basées sur des grammaires ont peu d'intérêt dans une optique de représentation fidèle car la diversité des façades françaises rend impossible la définition d'une grammaire suffisamment générique pour les englober toutes. Une approche que nous chercherons à développer pour pallier cet inconvénient dans le contexte de la reconstruction est la météo-reconstruction. Celle-ci consiste à disposer de plusieurs méthodes de reconstruction avec des *a priori* divers et de classifier les objets à reconstruire en fonction de ces *a priori* afin de sélectionner la meilleure méthode à utiliser. De façon duale, chaque méthode disponible pourrait être utilisée et le meilleur résultat choisi, ce qui devient un problème de qualification. Le problème de diversité est fortement lié à celui de l'optimisation, car si la fonction objectif est suffisamment bien définie, l'optimisation pourra donner des garanties de ne pas produire de résultats aberrants quelles soient ses entrées.

## 2.2 Synthèse des travaux

Cette section présente les divers travaux que j'ai menés depuis mon arrivée au laboratoire MATIS de l'IGN fin 2008. Ils sont regroupés par méthodologie et liés aux thématiques définies ci-dessus.

### 2.2.1 Remise en géométrie

Assurer une consistance géométrique entre les différentes sources de données brutes acquises sur la scène d'intérêt est une étape primordiale dans la logique de couplage de sources de données hétérogènes qui est la mienne. Ce terme regroupe la calibration intrinsèque de chaque capteur qui consiste à positionner précisément les données acquises dans le référentiel du capteur, et la calibration extrinsèque ou le recalage qui cherchent à localiser précisément le (référentiel) capteur dans un référentiel terrain.

Je me suis intéressé au recalage suite à la constatation que la texturation de modèles 3D à partir d'images qui n'ont pas servi à le produire était très limité par la qualité du géo-référencement de ces images. En effet, la qualité perçue d'une texturation est très impactée par l'alignement des discontinuités géométriques et radiométriques. Le géo-référencement natif de nos images, ainsi que le niveau de généralisation des modèles 3D ne permettait pas de produire des textures de qualité satisfaisante. J'ai ainsi abordé le problème par le biais d'une thèse sur le recalage de données de cartographie mobile sur un modèle 3D. L'idée centrale de cette thèse est d'aligner un scan de cartographie mobile avec un modèle 3D en cherchant à ré-estimer la trajectoire du véhicule de façon à minimiser l'écart entre le nuage de points et le modèle (Monnier et al., 2013a) (Monnier et al., 2013b). La nouveauté de l'approche est qu'elle se base sur un modèle de déformation du nuage propre à l'acquisition et qu'on ne peut donc pas utiliser une méthode de recalage de l'état

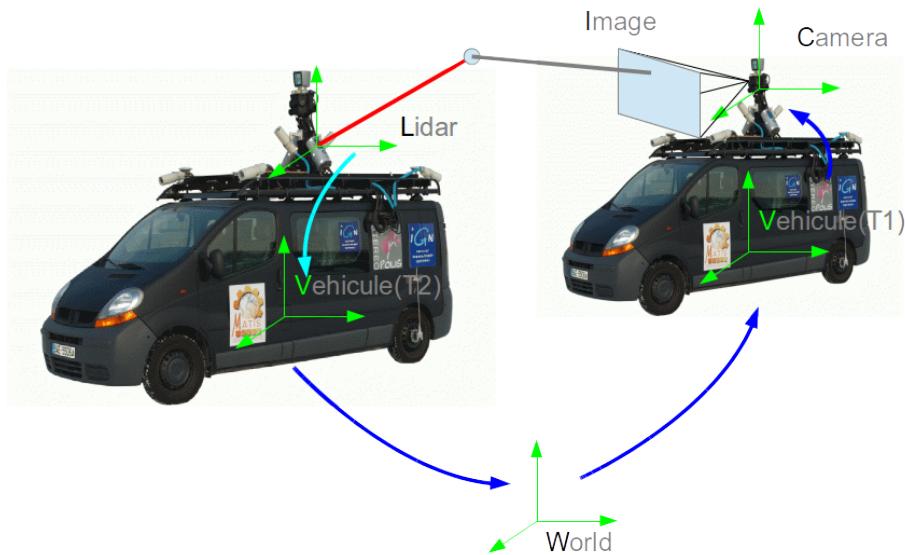


FIGURE 2.14 – Principe d’une calibration laser hybride : le recalage de la projection des points d’un nuage laser dans une image permet de réestimer la pose du laser sur le véhicule (flèche bleu clair)

de l’art (soit rigide, soit non rigide mais avec un modèle de déformation indépendant de l’acquisition). Depuis début 2015, j’encadre une nouvelle thèse qui reprend ces travaux en y intégrant plusieurs innovations importantes : la gestion des incertitudes à tous les niveaux de la chaîne d’acquisition (Mezian et al., 2016) ainsi que la modélisation des incertitudes sur le modèle 3D lui même afin d’autoriser le recalage à déformer la trajectoire et le modèle en exploitant ces incertitudes au lieu de se reposer sur un paramétrage délicat (en cours).

D’autre part, je me suis intéressé à aligner très précisément les données image et laser acquis à partir d’une même plate-forme afin de pouvoir les exploiter conjointement pour pouvoir tirer partie de leur complémentarité (cf Figures 2.14 et 2.15) pour la reconstruction et la sémantisation. Par rapport aux travaux précédents, l’idée est de traiter le problème du recalage en amont de la reconstruction au lieu de le traiter *a posteriori*. Ce recalage image/laser prend la forme d’une calibration hybride des capteurs image et laser cherchant à ré-estimer la pose du laser par rapport à l’image de sorte à optimiser leur alignement (Miled et al., 2016) en maximisant l’information mutuelle entre le niveau de gris dans l’image et la réflectance du Lidar. Cette mesure statistique dense est en effet robuste pour corrélérer des signaux de modalités différentes (la réflectance Lidar est une mesure dans le proche infra-rouge). Par rapport aux approches usuelles en aérien (Mastin et al., 2009), la notre se distingue par la ré-estimation des paramètres de calibration extrinsèque du capteur Lidar ainsi que par la définition de l’information mutuelle sur les points lidar et non sur des pixels (donc interpolés pour le Lidar). Ces deux choix vont dans le sens de plus de fidélité (cf Section 2.1.1).

## 2.2.2 Analyse

L’analyse des données consiste à en extraire une information sémantisée, ou du moins de plus haut niveau que la donnée brute. Elle peut être une fin en soi (détection de changement,



FIGURE 2.15 – Superposition d'un nuage de points et d'une image de cartographie mobile illustrant la qualité d'une calibration hybride.

classification) ou une étape avant la reconstruction. L'analyse repose toujours sur une segmentation de la donnée en objets qui peuvent être géométriques ou sémantiques.

#### 2.2.2.1 Segmentation

La segmentation consiste à trouver la meilleure partition d'un ensemble en parties (ou segments) suivant certains critères. C'est un problème très particulier du traitement de données, très général et difficile à cause de la complexité de l'espace de recherche (ensemble des partitions d'un ensemble) dont la taille croît plus qu'exponentiellement comme je le rappelle dans (Vallet et al., 2014). C'est aussi un problème dont l'objectif est difficile à formuler, à mi-chemin entre extraction de primitives et détection d'objets, et qui cherche en général à trouver un compromis entre 3 objectifs :

1. Attache aux données
2. Homogénéité des segments
3. Régularité des bords des segments

comme l'ont très bien formalisé Mumford et Shah (Mumford and Shah, 1989). Cet article de référence cité plus de 5000 fois dans les domaines du traitement d'image et de la vision par ordinateur montre bien l'aspect fondamental de la segmentation dans ces domaines. La segmentation englobe en effet les différentes composantes de l'analyse de données :

- la classification (Section 2.2.2.3) est un problème de segmentation dans un espace de descripteurs
- la détection d'objets (Section 2.2.2.2) et de changements (Section 2.2.2.4) est un problème de segmentation d'objets individuels.

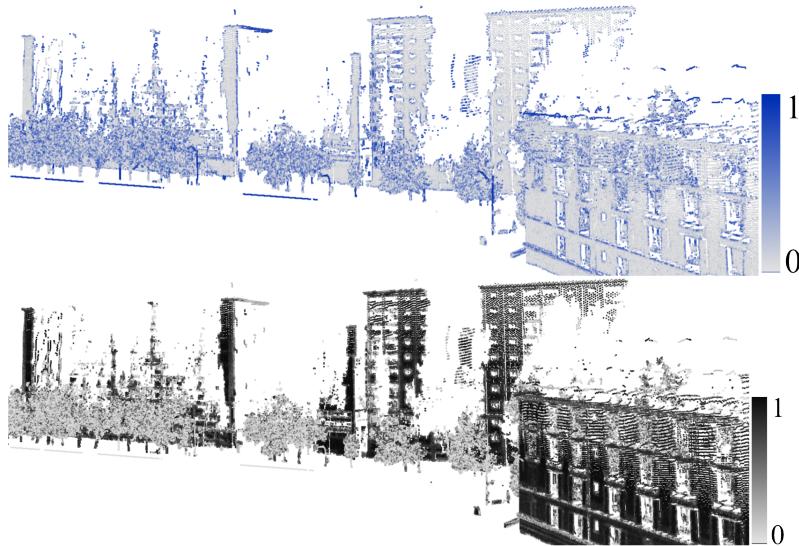


FIGURE 2.16 – Descripteur de linéarité (haut, bleu) et de planarité (bas, noir) sur un scan de cartographie mobile avec un voisinage "optimal" déterminé automatiquement

- La reconstruction (Section 2.2.2.2) peut être vue comme un problème de segmentation entre l'espace occupé et libre de la scène.

Ces différents aspects seront donc abordés séparément dans les sections citées. Plusieurs de mes travaux m'ont orienté vers un type particulier de segmentation que j'appelle *segmentation vectorielle*. L'objectif d'une segmentation vectorielle est de définir la segmentation non pas comme une partition de la donnée, mais de définir les bords entre segments par une représentation géométrique de plus haut niveau (donnée vecteur), plus compacte, plus structurée et plus facilement utilisable dans un SIG. La reconstruction (d'objets structurés) en est un exemple.

### 2.2.2.2 Détection

L'analyse d'une scène urbaine à partir de données de cartographie mobile est un problème complexe que j'ai commencé à aborder sur des exemples particuliers avant de chercher à généraliser mon approche, et principalement sur des données laser. Mon approche se base assez classiquement sur une extraction de descripteurs locaux. Le problème de ces descripteurs est que leur calcul dépend fortement du paramétrage choisi, et en particulier du choix de la taille du voisinage. Or une scène urbaine s'analyse à plusieurs échelles différentes, et cette contrainte est ainsi très pénalisante. Nous avons ainsi proposé un critère permettant de sélectionner des voisinage "optimaux" pour le calcul de ces descripteurs afin de les rendre indépendants d'un choix d'échelle (Demantké et al., 2011) (cf Figure 2.16). Cette méthode est maintenant utilisée pour le calcul des descripteurs de toutes les méthodes récentes de classification de nuages de points dans la communauté ISPRS. Nous nous en sommes aussi servi dans le cadre d'un stage sur la détection et l'individualisation d'arbres (Monnier et al., 2012) et dans le cadre d'une thèse pour la détection et l'individualisation de façades (Demantke et al., 2012) (cf Figure 2.17). Bien que les deux méthodes soient guidées par les mêmes descripteurs, elles m'ont permis d'explorer deux

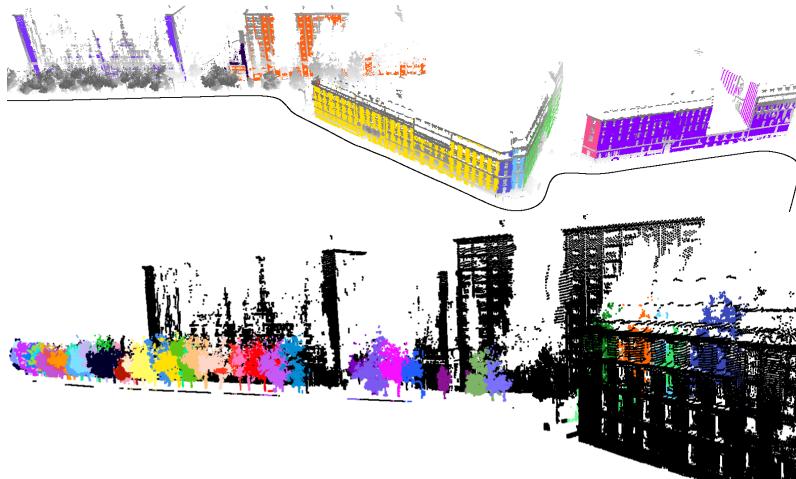


FIGURE 2.17 – Détection et individualisation de façades (haut) et d’arbres (bas) dans un scan de cartographie mobile terrestre.

approches différentes de la détection :

- La détection d’arbres repose principalement sur un travail sur les projections horizontales des différents descripteurs, une détection d’accumulations pour extraire les structures verticales et l’introduction d’a priori contextuels : le feuillage permet de séparer les troncs des poteaux, les arbres se situent à une distance minimale des façades…
- Les façades étant des primitives planes verticales, leur détection se base sur la reconnaissance de telles primitives par une approche de type RANSAC exploitant les descripteurs pour favoriser les points de voisinage planaire et vertical. Ce travail explorait aussi le passage à l’échelle car cette extraction est faite sur une succession de blocs glissants avec recouvrement, et une étape de fusion combinait les morceaux de façades détectés individuellement en façades uniques.

Ces travaux, ainsi que ma participation au projet TerraMobilita m’ont conduit à formuler le problème général d’analyse d’un scan de cartographie mobile comme celui d’une segmentation sémantique, c’est à dire un découpage du nuage laser en objets typés. Ce problème combine un problème de segmentation et de classification en un problème unique qui peut être vu comme un problème de détection universelle puisque tous les objets de la scène sont détectés en tant que segments typés (Vallet et al., 2015a). Ce problème très général et très ambitieux est une de mes principales perspectives de recherche et j’encadre actuellement des travaux allant dans ce sens.

### 2.2.2.3 Classification

La classification n’est pas mon thème central de recherche. Je m’y intéresse surtout à cause de ses interactions avec la détection et la reconstruction et je m’appuie alors sur l’expertise d’autres membres de mon équipe.

A partir d’images, je me suis intéressé principalement aux façades qui constituent l’un des éléments les plus importants des scènes urbaines lorsqu’elles sont acquises depuis le sol. En particulier, je me suis intéressé à la détection de façades aveugles dans le cadre

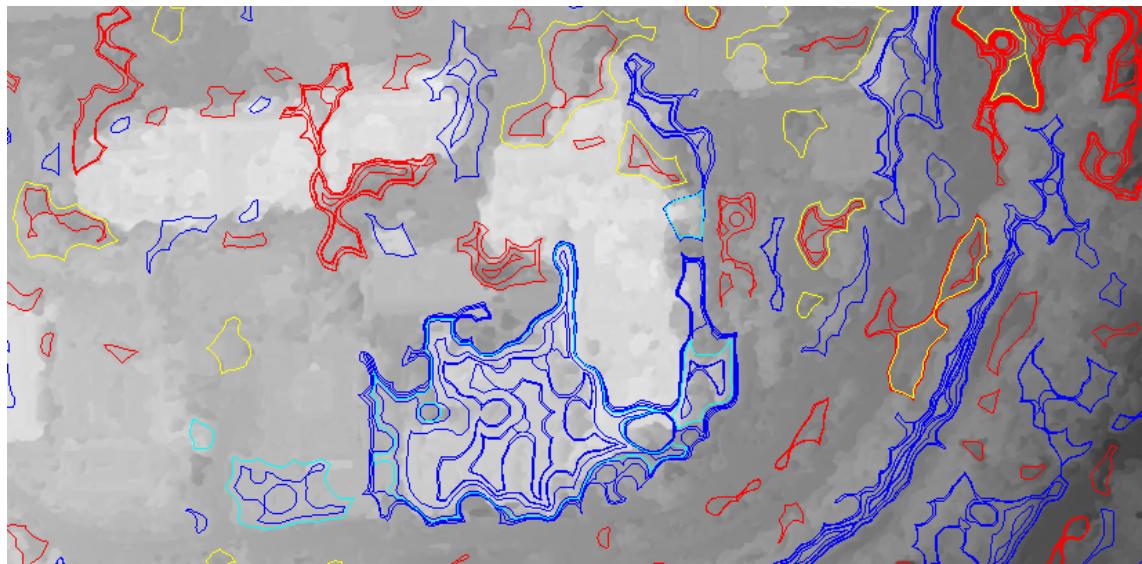


FIGURE 2.18 – Détection de changement par persistance : les changements positifs (bleu) et négatifs (rouge) sont analysés à plusieurs niveaux pour définir des changements unitaires (jaune et cyan).

du projet ePlu où cette information était primordiale car conditionnant les droits à bâtir ([Burochin et al., 2014](#)). Ce travail combine classification et reconstruction car d'une part la classification est fortement facilitée par la rectification de l'image sur le plan porteur de la façade (ce qui nécessite la reconstruction de ce plan). Il combine aussi classification et détection car la classification se basait sur un ensemble de descripteurs calculés sur l'image rectifiée, et nous avons montré que l'intégration de descripteurs venant d'une détection d'ouvertures améliorait significativement la qualité de la classification.

#### 2.2.2.4 Détection de changement

La détection de changement est une forme d'analyse des scènes urbaines, mais comme c'est une analyse temporelle contrairement à l'analyse "instantanée" décrite dans la section précédente, j'ai préféré la séparer. La détection de changement est encore un sujet connexe à la reconstruction, puisque la mise à jour de modèles de villes peut être fortement optimisée en focalisant un opérateur sur les zones de changement. Je me suis d'abord intéressé à la détection de changement du point de vue aérien à partir de modèles numériques d'élévation (MNE) et en particulier par analyse de leurs différences à deux dates. Ma contribution majeure dans ce domaine a été l'idée qu'un changement est caractérisé par sa forme, et que celle-ci doit s'analyser à plusieurs niveau afin de remonter à un "objet" changement consistant (cf Figure 2.18), plutôt que de se reposer sur un seuillage ou une classification pixellaire qui omet cette notion d'objet ([Vallet, 2013](#)).

Suivant ma thématique de transition vers la vraie 3D (cf Section 2.1.2), j'ai ensuite encadré une thèse sur la détection de changements, cette fois à partir de scans de cartographie mobile. Nous avons commencé par étudier le changement de façon très géométrique en comparant l'information qu'un scan donne sur les parties vides ou pleine de la scène et en définissant le changement comme une inconsistance entre ces sources d'information, ce

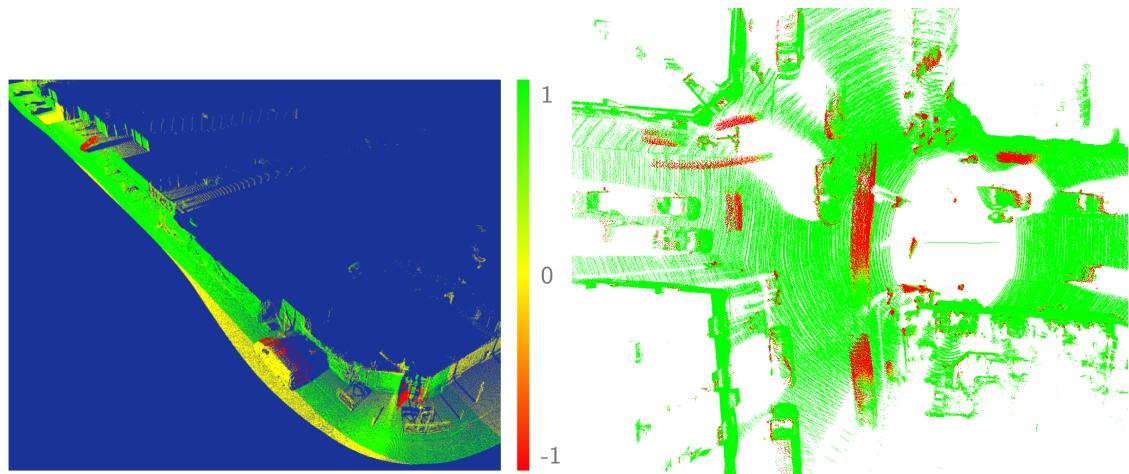


FIGURE 2.19 – Gauche : Exemple de détection de changements entre deux scans de cartographie mobile (deux passages du véhicule dans la même rue) : vert=consistant, jaune=pas de contrepartie, rouge=change. Droite : Méthode identique appliquée aux vues à 10 Hz acquises avec un scanner dynamique Velodyne

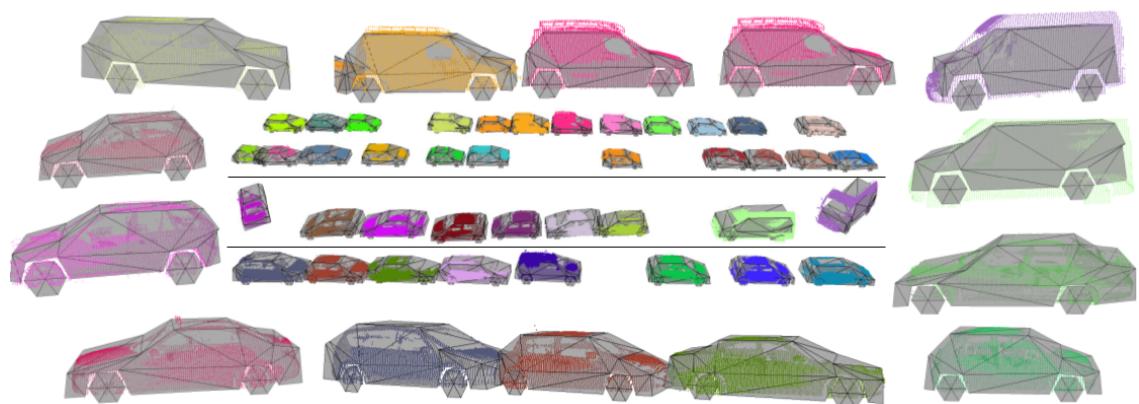


FIGURE 2.20 – Ajustement d'un modèle paramétrique de voiture à des voitures détectées dans un nuage de points de cartographie mobile

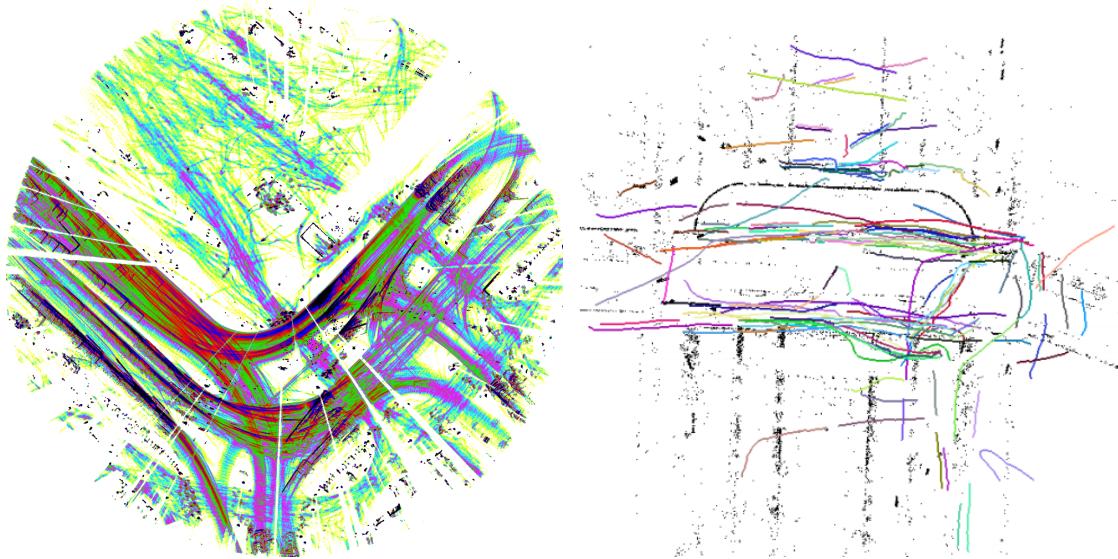


FIGURE 2.21 – Gauche : Cartographie de flux d’objets mobiles sur la place de la République obtenue par accumulation de ces points. Droite : Trajectoires de piétons extraites à partir d’un scan laser dynamique

qui permet de s’affranchir des problèmes d’occlusion dont souffrent les méthodes classiques basées sur des distances point à point ou point à triangle (Xiao et al., 2013) (Xiao et al., 2015). Cette méthode permet de déterminer quels points d’un scan appartiennent à un objet dont la géométrie a changé entre deux époques (cf Figure 2.19), mais n’introduit pas de notion d’objet. Pour cela, nous nous sommes alors concentrés sur les voitures en stationnement (Xiao et al., 2016). Ce travail a été l’occasion d’explorer la thématique de l’interaction reconstruction/sémantique. En effet, nous avons commencé par adapter un algorithme de reconstruction de voitures à partir d’images basé sur (Velizhev et al., 2012) pour pouvoir l’appliquer sur un nuage de points (cf Figure 2.20). Le principe de cette reconstruction est de définir un modèle paramétrique de voiture, appris à partir d’exemples, et d’ajuster ce modèle aux données. Le travail a permis de montrer que ces paramètres, issus donc d’une reconstruction, sont très utiles à l’analyse :

- Pour déterminer si le nuage de points en question est bien une voiture (classification voiture/non-voiture)
- Pour déterminer le type de la voiture (classification voiture compacte, coupé, SUV, camionnette, ...)
- Pour déterminer si deux voitures sont identiques ou non (classification changement/non-changement) même si l’apport des paramètres issus de la reconstruction est moins clair dans ce dernier cas.

Enfin je me suis intéressé à la détection d’objets mobiles, que j’ai vu comme un cas particulier de détection changement sur une très courte échelle de temps (cf Figure 2.19, droite). J’ai pu mener ce travail dans le cadre du projet TerraMobilita où les collectivités partenaires s’intéressaient aux flux piétons sur les grandes places. Nous avons alors adapté la méthode de détection de changements (Xiao et al., 2015) détaillée ci-dessus pour l’appliquer à un scan dynamique qui image la scène à 10 Hz, et donc en cherchant des changements à l’échelle de temps du dixième de seconde. Cette méthodologie permet de

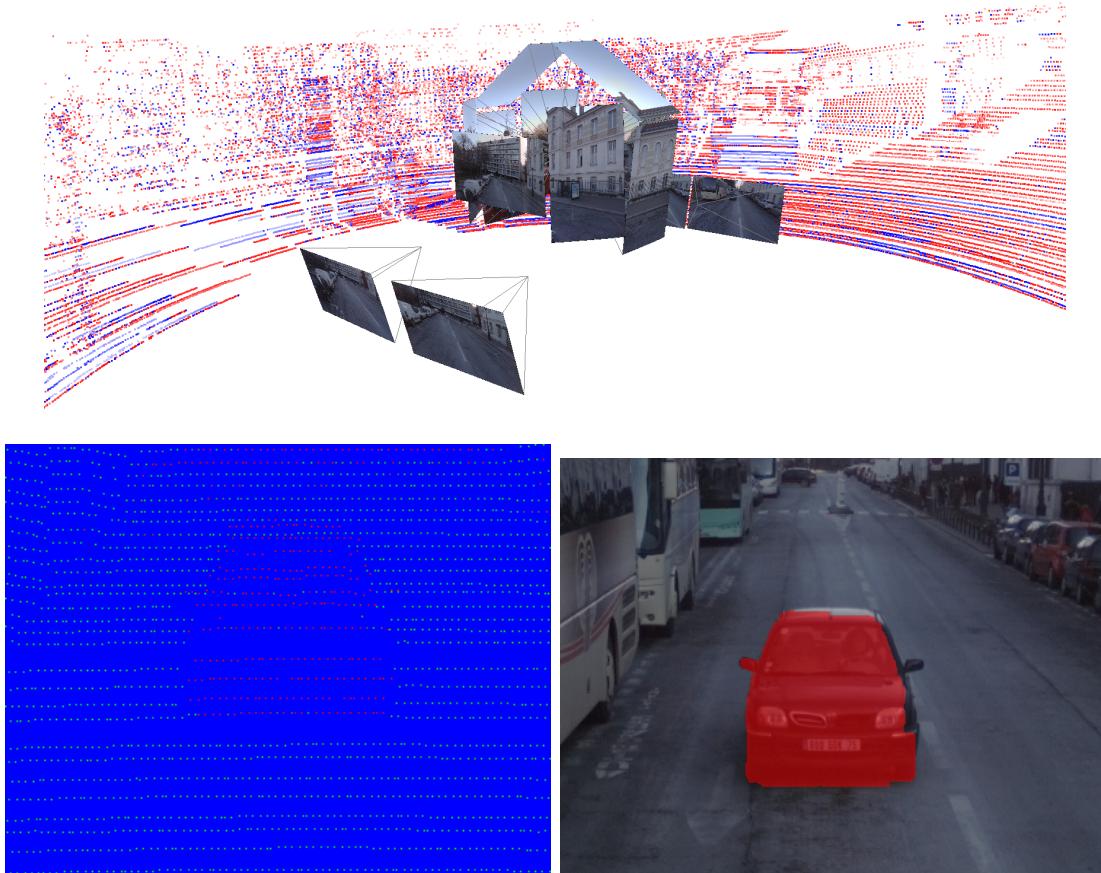


FIGURE 2.22 – Haut : images orientées et scan laser dynamique acquis simultanément. Bas gauche : Extraction des points correspondant à la partie mobile de la scène. Bas droite : Détourage dans une image d'un objet mobile détecté dans le scan laser.

déetecter les objets mobiles même à partir d'une plate-forme mobile, ce qui peut aussi avoir des applications à la navigation autonome ([Gidel et al., 2010](#)).

En créant ensuite des cartes d'accumulation de ces changements, nous avons ainsi pu réaliser une cartographie exhibant les flux d'objets mobiles sur les zones choisies (cf Figure 2.21, droite). Ce travail va même plus loin en proposant un suivi des objets mobiles (cf Figure 2.21, gauche), ce que nous avons posé comme un problème de segmentation de trajectoires dans l'espace temps guidé par une formulation énergétique résolue en deux temps : détection d'objet-secondes (objets sur un intervalle d'une seconde) dans l'espace temps puis raccord des objets-secondes ayant des positions et des vitesses compatibles par un regroupement optimisé par un algorithme de clique maximale.

En revanche pour la cartographie, seules les parties de la scène stables dans le temps (au moins de l'ordre de l'année) sont pertinents, et ces objets mobiles sont donc principalement des données inutiles à filtrer. C'est le principe du travail ([Vallet et al., 2015b](#)) mené dans



FIGURE 2.23 – Illustration du problème de redécoupage d'empreintes cadastrales. L'utilisation des discontinuités altimétrique ne permet pas toujours de décomposer les structures architecturales individuelles.

le cadre du projet iSpace&Time où nous avons utilisé la même méthodologie de détection d'objets mobiles, mais cette fois afin de pouvoir aller les détourer dans des images acquises simultanément (cf Figure 2.22), exhibant encore l'intérêt de coupler image et laser. Ce détourage repose sur un graphe-cut cherchant à segmenter l'image en deux zones (mobile ou non). L'information image est exploitée en favorisant que la limite entre les zones fixes et mobiles soit alignée avec ses contours, et le laser en tant que terme d'attache aux données pour favoriser que les points mobiles se projettent dans une zone labellisée mobile.

### 2.2.3 Reconstruction

La reconstruction est au cœur de mes travaux depuis 2008 où j'ai été recruté comme chargé de recherches à l'IGN sur le sujet de la "reconstruction conjointe aérien/terrestre de modèles de villes". J'ai ainsi étudié la reconstruction sous de nombreux angles, en fonction du niveau de structuration de la géométrie produite, des données en entrées et des a priori correspondants. J'entends par reconstruction toutes les méthodes qui permettent d'obtenir une description géométrique d'un objet à partir de données brutes d'acquisition (image et laser) de cet objet. Les méthodes de reconstruction se distinguent surtout par les données en entrée et les a priori que l'on peut avoir sur ces données, et sur le type de modèle que l'on cherche à produire en sortie. Je me suis d'abord focalisé sur les bâtiments, en abordant séparément le problème des toits (Section 2.2.3.1) et des façades (Section 2.2.3.2). J'ai aussi contribué aux travaux de Bahman Soheilian sur les amers visuels (Section 2.2.3.3) avant de m'orienter, pour plus de généralité, vers la reconstruction de surfaces triangulées étanches intégrant tous types de données (Section 2.2.3.4).

#### 2.2.3.1 Reconstruction de toits

La reconstruction de bâtiments pose plusieurs problèmes importants :

- Les données aériennes verticales ne permettent de reconstruire que les toits, les données terrestres que les façades. Plus récemment, les données obliques permettent de s'intéresser aux deux mais sont limitées par de nombreuses occultations. Les deux problèmes sont donc en général abordés séparément, et je les ai donc séparés entre cette section et la suivante. Je propose cependant en Section 2.2.3.4 des travaux récents visant à intégrer toits et façades dans une approche unifiée.

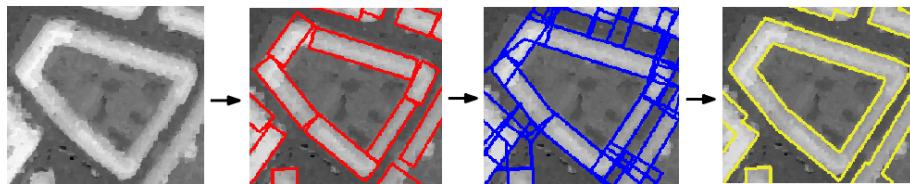


FIGURE 2.24 – Extraction d'emprises de bâtiments à partir d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). De gauche à droite : MNE, extraction de rectangle, raccord des rectangles, filtrage par coupe de graphe.

- Les toits et les façades sont des objets très structurés, ce qui appelle à utiliser des a priori (planarité par morceaux séparés par des discontinuités  $C_0$  et  $C_1$  pour les toits par exemple) mais leurs typologies sont très variées. De plus, retrouver ces structures complexes dans des données brutes est un problème très difficile.

La reconstruction de modèles de ville en 3D était déjà un sujet très étudié au laboratoire MATIS avant mon arrivée, et j'avais déjà eu l'occasion de travailler sur ce sujet au cours d'un stage de DEA réalisé au MATIS en 2004 (Vallet and Taillandier, 2005). Dans ce travail, je devais recaler un modèle de bâtiment généralisé déjà reconstruit sur des images aériennes pour affiner sa géométrie. A mon retour au MATIS en 2008, une chaîne de production (Bati3D) avait été mise en place et l'enjeu principal à l'époque était de l'améliorer. La chaîne utilisait des empreintes polygonales de bâtiment dont elle se servait pour inférer des formes de toit et utilisait l'a priori que tous les pans de toits se basaient sur ces empreintes. Or cet a priori était souvent faux, en particulier quand l'empreinte contenait plusieurs structures distinctes (cf Figures 2.23). Mon premier objectif a ainsi été de proposer une segmentation polygonale de ces empreintes (Vallet et al., 2009) (Vallet et al., 2010a) (Vallet et al., 2010b) (Vallet et al., 2011) qui améliorait significativement la qualité des reconstructions et a ensuite été transférée en production. J'ai résolu ce problème de segmentation vectorielle en détectant les directions principales des façades, puis en appliquant une stratégie de découpe récursive gloutonne où à chaque étape, chaque sous empreinte était coupée en deux dans l'une des directions principales tant que ces découpes s'appuyaient sur des discontinuités verticales suffisamment importantes. Les sous empreintes résultantes étaient ensuite fusionnées pour autoriser des empreintes non convexes.

Dans le cas où l'information des empreintes serait manquante sur la scène d'intérêt, j'ai aussi participé à un travail sur l'extraction de ces empreintes par une approche top-down (Brédif et al., 2013). Ce travail s'appuyait sur une détection de rectangle par RJMCMC, et se poursuivait par la construction d'un arrangement permettant de raccorder ces rectangles. Enfin, une partition optimale de cet arrangement permettait de retrouver les emprises (cf Figure 2.24). Ces deux travaux montrent bien le lien reconstruction/segmentation mentionné plus haut puisque, dans le deux cas, la méthode produit une segmentation vectorielle d'une donnée brute.

### 2.2.3.2 Reconstruction de façades

Dans la norme CityGML utilisée couramment pour désigner les niveaux de détails des bâtiments, les niveaux 2 et inférieurs modélisent les façades comme de simples plans descendant des limites de gouttières jusqu'au sol. Pour aller au delà du niveau 2, il faut modéliser la géométrie de la façade et nous savions que les données aériennes seraient trop

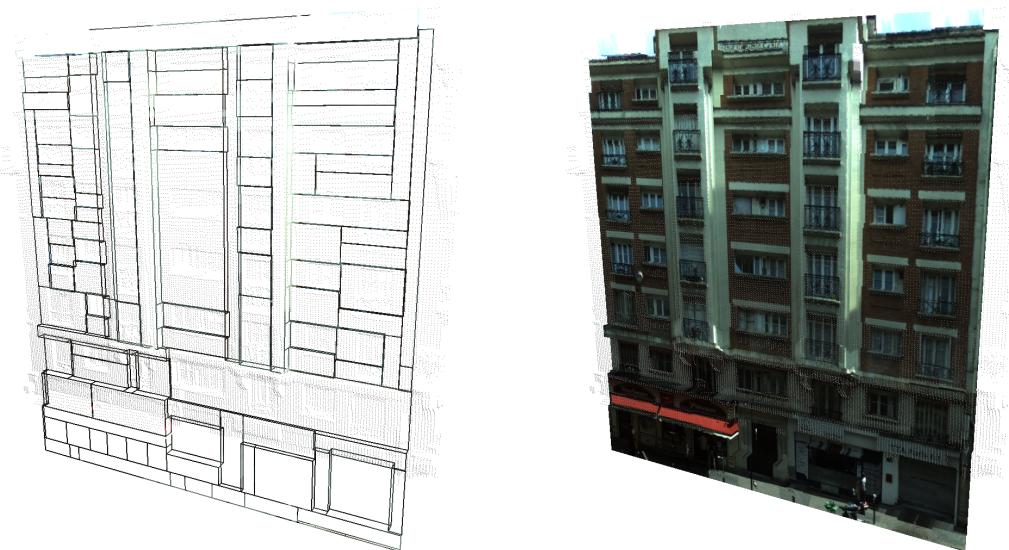


FIGURE 2.25 – Segmentation hiérarchique de façades et son extrusion permettant une reconstruction structurée à partir d'un nuage de points. Gauche version filaire, Droite : version texturée.

limitées par leur résolution et leur angle de vue sur les façades. Ainsi, nous nous sommes orientés vers les données de cartographie mobile pour modéliser les façades, avec l'idée de profiter de la complémentarité image/lidar (cf Section 2.1.5) pour cette reconstruction. Ces deux travaux ont été l'occasion d'explorer deux approches presque opposées :

- Dans le premier ([Burochin et al., 2010](#)), l'image était rectifiée puis analysée pour extraire une segmentation hiérarchique de la façade par des découpages horizontales et verticales. Une formulation énergétique favorisait les découpages qui retrouvaient les alignements (bords de fenêtres, portes,...), puisque c'est l'un des seuls a priori exploitable sur la diversité des façades françaises. Une fois cette découpe effectuée, chaque segment pouvait être extrudé pour s'ajuster au nuage de points. (cf Figure 2.25)
- Le deuxième ([Demantke et al., 2012](#)) partait du scan Lidar et ne supposait pas la connaissance a priori du plan principal de la façade. Ainsi, l'approche consistait dans un premier temps à détecter toutes les façades dans le scan en intégrant les descripteurs mentionnés dans la section 2.2.2 dans un algorithme de type RANSAC. Il en résultait un ensemble de rectangles verticaux qui étaient ensuite déformés pour s'ajuster au nuage de points ([Demantké et al., 2013](#)). L'information image était alors injectée en relâchant les a priori de régularité de la grille élastique sur les discontinuités radiométrique de l'image, ce qui permettait de produire par texturation un modèle photo-réaliste de façade avec ses discontinuités géométriques et radiométriques alignées (Figure 2.26).

### 2.2.3.3 Reconstruction d'amers visuels

Les amers visuels sont des marqueurs visuels stables et bien définis des environnements urbains pouvant être exploités pour la localisation basée image. En effet, si la géométrie

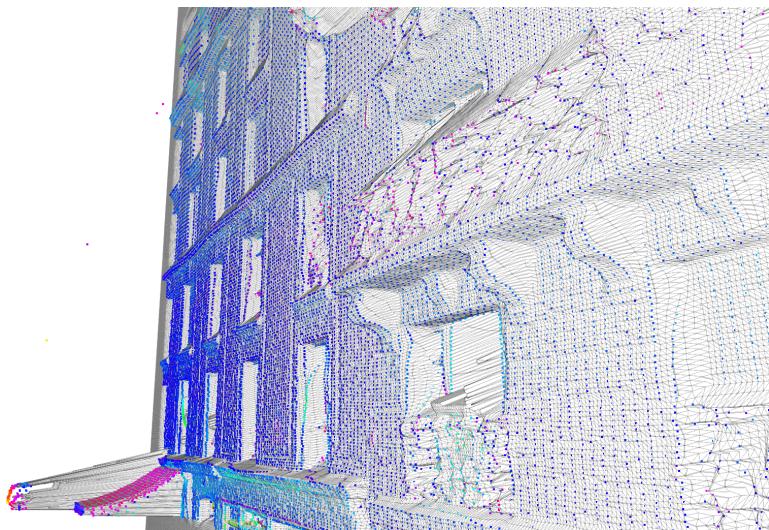


FIGURE 2.26 – Reconstruction de façades par une grille élastique ajustée à un nuage de points



FIGURE 2.27 – Détection de panneaux sur une image urbaine.

---

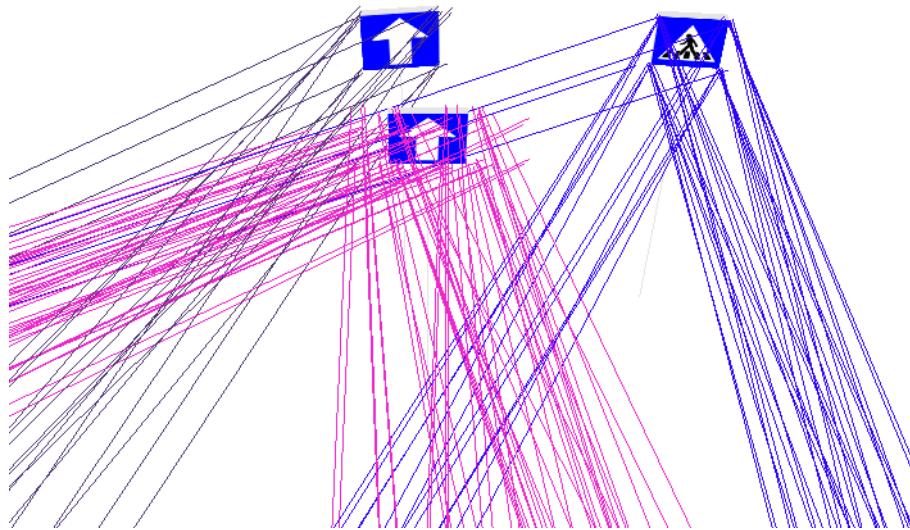


FIGURE 2.28 – La reconstruction de panneaux 3D à partir de détection 2D est un problème difficile de clustering. Il est en effet fréquent de voir apparaître des panneaux "fantômes" mélangeant des detections de panneaux distincts dont le filtrage nécessite des avancées méthodologiques importantes.

et la position géographique d'un amer détecté dans une image sont connus, il est possible d'orienter précisément cette image par rapport à cet amer, et donc de la géolocaliser.

Je n'ai pas participé directement à des travaux sur la détection d'amers, mais j'ai contribué aux travaux de Bahman Soheilian sur la reconstruction de panneaux de signalisation à partir d'images multiples de cartographie mobile (Soheilian et al., 2013a). Le premier problème qui se pose pour cette reconstruction est de regrouper ensemble les detections (en 2D, cf Figure 2.27) qui correspondent au même panneau réel (en 3D). C'est encore un problème de segmentation (ou de clustering), qui est particulièrement difficile car on ne peut pas définir de métrique a priori par paires de détection : si les detections sont géométriquement incompatibles, on est sûrs qu'elles ne correspondent pas au même objet. Mais si elles le sont, cela peut tout à fait être une coïncidence. Ces coïncidences tendent à faire apparaître des panneaux "fantômes" (Figure 2.28) qui ne correspondent pas à un panneau réel lorsque des heuristiques simples sont utilisées pour grouper les detections. J'ai formulé ce problème comme un problème d'optimisation, cherchant à optimiser 3 critères :

1. Minimiser le nombre d'objets 3D.
2. Minimiser le nombre de détection 2D inutilisées.
3. Minimiser l'erreur de reconstruction

Le problème sous-jacent est combinatoirement difficile, et j'ai proposé une méthode basée sur les cliques maximales pour le résoudre (Vallet et al., 2014), avec certaines approximations permettant à cette résolution de se faire en un temps acceptable même dans les cas difficiles, au coût de perdre la garantie d'optimalité. Une fois ce problème de groupement résolu, la reconstruction se fait par une approche top-down où un modèle de panneau est ajusté aux detections 2D correspondantes (Soheilian et al., 2013b) (Figure 2.29), ce qui se fait par optimisation sous contrainte des paramètres du panneau. Ce problème de reconstruction fait donc interagir reconstruction et sémantique, car c'est le fait de détecter un

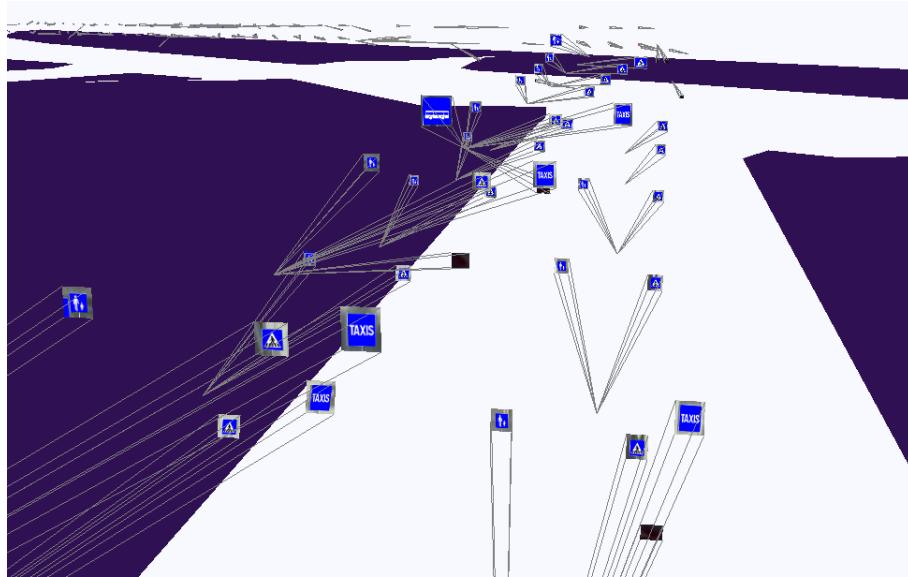


FIGURE 2.29 – Reconstruction de panneaux de signalisation à partir de leurs détections 2D.

objet de type connu qui permet de le reconstruire précisément.

#### 2.2.3.4 Reconstruction de surfaces triangulées étanches

Plus récemment, je me suis orienté vers une méthode plus générale, c'est à dire non limitée aux façades et à une grille 2.5D. Il s'agit de reconstruire directement une surface triangulée à partir du nuage de point (Caraffa et al., 2016). Si ce problème de géométrie algorithmique est assez bien étudié, l'état de l'art n'est pas utilisable directement sur nos données et nous avons ainsi proposé une méthode passant bien à l'échelle, et utilisant des informations capteur habituellement non utilisée sur des nuages de points où elle est absente et qui permet de résoudre des ambiguïtés et de garantir une consistance de la surface avec la physique de l'acquisition. Cette méthode permet d'intégrer des données image et laser de tout point de vue (Figure 2.9), mais aussi toute source de données donnant une information géométrique sur la scène d'intérêt.

#### 2.2.4 Texturation

La texturation est principalement utile pour la visualisation de modèles 3D puisqu'un modèle 3D texturé est beaucoup plus réaliste donc facilement interprétable qu'un modèle non texturé. Je suis cependant convaincu qu'au delà de cet aspect purement cosmétique, le champs d'application de la texturation est plus large, que ce soit pour l'interprétation de scènes 3D, la localisation de véhicules autonomes ou d'agents et la correction radiométrique des images.

La texturation est le domaine le plus proche de l'informatique graphique que j'ai pu aborder, et aussi le premier où j'ai abordé la thématique de la complémentarité de données aériennes et terrestre (section 2.1.4). En effet, les modèles 3D de ville produits par l'IGN

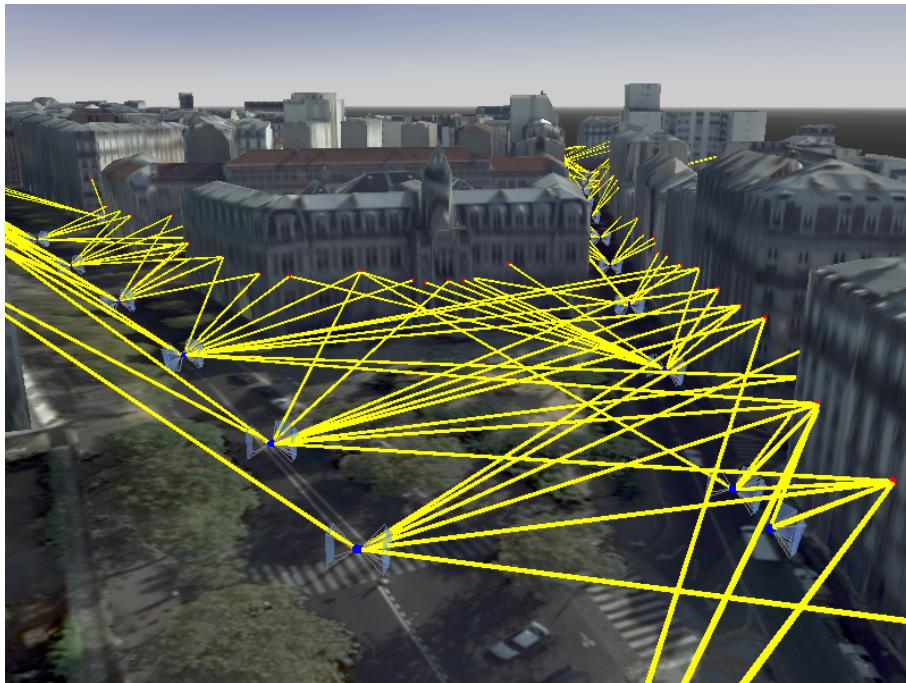


FIGURE 2.30 – Graphe de visibilité entre façades (points rouges) et images orientées (points bleus)

ont des textures de façade de mauvaise qualité visuelle car ces façades sont vues sous des angles très rasants en imagerie aérienne. L'utilisation d'images terrestres permet donc en théorie une amélioration très significative de cette qualité. Cette idée était cependant freinée en pratique par de nombreux verrous :

- Calcul de visibilité en vraie 3D (cf section 2.1.2) et problème lié de passage à l'échelle (cf section 2.1.9). Il consiste à déterminer pour chaque élément géométrique quelles sont les images orientées qui le voient ou réciproquement quels éléments géométriques voient chaque image orientée (cf Figure 2.30). Ce calcul est très coûteux car pour gérer correctement les occultations, on doit pour chaque pixel de chaque image orientée intersecter une demi droite avec une scène 3D complexe. J'ai levé ces verrous en proposant une implémentation du calcul de visibilité sur la carte graphique qui est une machine à réaliser de tels calculs de visibilité (Vallet and Houzay, 2011)
- Problème assez proche de gestion des occultations de la façade par l'avant plan (Hammoudi et al., 2013) (Hammoudi et al., 2012a) y compris en exploitant la complémentarité image-laser décrite en section section 2.1.5) (Hammoudi et al., 2012b) (Hammoudi et al., 2012a).
- Corrections radiométriques : encore une fois, la prépondérance de l'aspect tridimensionnel de la scène nous empêche d'utiliser les approches classiques de correction physique des images aériennes, ce qui m'a poussé vers une approche plus générale et moins paramétrique d'égalisation (Vallet and Lelégard, 2013) (cf Figure 2.31). Dans une optique de contrôle de la qualité radiométrique des images que j'utilisais, j'ai aussi participé à des travaux du laboratoire sur la détection (Lelégard et al., 2010) et la correction (Lelégard et al., 2012) de flou de bougé ainsi que la détection de flou local (Lelégard et al., 2011).



FIGURE 2.31 – Texturation sans (haut) et avec (bas) égalisation radiométrique non paramétrique de façades à partir d'images de cartographie mobile

Plus récemment, j'ai ré-abordé le problème de la texturation, mais cette fois-ci à partir de laser lorsque nous nous sommes rendus compte que la qualité de la mesure de la réflectance de la scène par un laser est suffisamment précise et pertinente pour s'en servir pour réaliser des orthophotos de réflectance d'une grande qualité et facilement interprétables (cf Figure 2.32). J'ai ainsi mis en place une chaîne de traitement permettant de réaliser ces orthophotos d'un type très différent en particulier au niveau du mosaïquage (Vallet and Papelard, 2015), et nous l'avons distribué sur un cluster afin de permettre son passage à l'échelle (Brédif et al., 2016). Cette orthophoto utilise un filtrage des points laser appartenant au sol et peut donc être combinée avec une représentation géométrique de celui-ci (cf Figure 2.33).



FIGURE 2.32 – Orthoimage aérienne (gauche) et laser terrestre (droite). La seconde est plus précise, présente moins d'occlusions et est insensible aux conditions d'éclairement



FIGURE 2.33 – Modèle 3D de sol texturé réalisé à partir d'un scan de cartographie mobile.

---

## Chapitre 3

# Perspectives et conclusion

L'analyse et la reconstruction de scènes urbaines est encore un sujet très ouvert que la communauté scientifique et les travaux mentionnés dans ce document n'ont fait qu'effleurer. Les enjeux sont encore nombreux et seront abordés dans les sections de ce chapitre.

### 3.1 Remise en géométrie en ligne

Concernant la remise en géométrie (calibration et recalage), il me semble qu'il y a encore de nombreuses perspectives sur la calibration en ligne de plate-formes mobiles, c'est à dire utilisant des données d'acquisition et non une acquisition spécifique dans une scène contrôlée. La calibration a alors un lien fort avec le recalage puisqu'il est indispensable de séparer les erreurs venant de la calibration de celles qui viennent de l'estimation de pose ou de trajectoire. Le problème est encore plus difficile dans le cas hybride mélangeant des capteurs de types différents. Si mes travaux ont permis de bien avancer sur l'optimisation itérative d'un tel problème dans des cas simples (remise en cause de la trajectoire uniquement ou de la calibration uniquement), de nombreux enjeux restent ouverts :

- le cas général où la calibration et la trajectoire sont remis en cause simultanément
- le cas où l'on ne dispose pas d'une bonne solution initiale
- la mise en correspondance robuste image/laser et laser/laser
- l'intégration d'incertitudes sur tous les éléments à recaler, y compris des sources de données externes

Ce sujet est très important dans l'optique de combiner des sources de données variées pour l'analyse et la reconstruction, si bien que j'ai récemment demandé l'ouverture d'un poste de chargé de recherches au MATIS pour m'appuyer sur ces sujets.

### 3.2 Passage à l'échelle

Même si j'ai abordé cette thématique à de nombreuses reprises dans mes travaux, le passage à l'échelle reste un perspective majeure dans ce sens qu'elle impactera nécessairement tous les nouveaux développements que je pourrai faire. En particulier, je prévois de baser mes travaux à venir sur l'entrepôt de données que nous devons mettre en place au cours

---

du projet Li3DS (cf section 6.7). Celui-ci permettra en effet un accès facile à tous les types de données acquis sur une scène d'intérêt par l'intermédiaire de requêtes particulièrement adaptées au traitement de données massives (systèmes de découpage avec recouvrement). Il permet aussi d'y réintégrer tous les résultats de traitements potentiellement distribués accompagnés des métadonnées qui permettent de garantir de ne perdre aucune information. Cet entrepôt facilitera ainsi grandement le développement d'algorithmes de traitement passant à l'échelle et leur mise en œuvre.

Mais le passage à l'échelle passera principalement par l'utilisation d'outils dédiés à la répartition des calculs sur une architecture de type *cloud*. Nous sommes actuellement en train d'expérimenter de telles technologies dans le cadre du projet iQmulus, que ce soit Hadoop (White, 2009) et le paradigme Map/Reduce pour la parallélisation ou Docker (Merkel, 2014) pour empaqueter les algorithmes à distribuer, et Spark pour la distribution elle-même, qui doit être adaptée à chaque méthode. Nous sommes en particulier en train d'appliquer ces technologies à notre algorithme de reconstruction de surface étanche, ce qui nécessite d'étudier finement les interactions entre les différents algorithmes pour gérer les raccords entre les blocs répartis.

### 3.3 Incertitudes

Le monde de l'information géographique produit des données massives qui sont utilisées pour prendre des décisions de politique publique et d'aménagement très importantes. Cependant, ces informations sont nécessairement entachées d'erreurs venant de sources diverses : géo-référencement des données, défauts de mise à jour, erreurs humaines, généralisation, etc. Ainsi le travail autour des incertitudes est double : d'une part être capable de modéliser toutes les sources d'erreurs et de les propager à toutes les étapes du traitement, mais aussi analyser avec les utilisateurs des données leur sensibilité à ces incertitudes. Ainsi, une simulation de bruit faite pour décider de l'aménagement d'une rue bruyante peut être très sensible à la modélisation géométrique de la rue. Au fur et à mesure que les usages se développent, les utilisateurs sont de plus en plus sensibles à ce problème et de plus en plus exigeants sur la qualité géométrique des données qu'ils utilisent. Dans ce contexte, la maîtrise des incertitudes est un enjeu primordial. Je souhaite en particulier travailler avec des spécialistes de la simulation urbaine afin de les aider à intégrer cette composante d'incertitude géométrique dans leurs travaux et la propager jusqu'à leurs résultats.

### 3.4 Mise à jour

La masse de données géographiques en circulation est considérable, et le monde change vite. Ainsi l'actualité des données est un enjeu important de l'information géographique. D'autant plus que la plupart des productions actuelles sont "jetables", dans le sens où la mise à jour consiste à produire à nouveau en jetant l'ancienne production. Ce processus est coûteux et il est évident qu'il gagnerait à exploiter les données déjà produites pour ne proposer que des mises à jour correctives. La mise à jour est ainsi très liée à la détection de changement et à la qualification pour l'identification des objets/zones périmés, que nous étudions à l'IGN depuis quelques années déjà. Cependant la question la plus difficile est celle de la mise à jour de données structurées en elles mêmes, de l'intégration de changements

---

dans une description complète ayant sa logique propre. De mon point de vue, cela ne peut passer que par une formalisation des typologies de changement (apparition, disparition, modification de la géométrie, séparation d'un objet en plusieurs, regroupement d'un objet en un,...) A ces questions s'ajoute celle de l'utilisation de nouvelles données pour améliorer un modèle même si la scène n'a pas changé.

### 3.5 La 3D

Il peut paraître étonnant d'indiquer la 3D comme une perspective de recherche alors qu'elle est déjà bien présente depuis plus d'une vingtaine d'années dans le monde de l'information géographique. Cependant, la 3D ne s'est pas disséminée vite à grande échelle. Si la modélisation en 3D d'édifices remarquables, de quartiers ou même de villes est assez bien maîtrisée, leur exploitation est encore balbutiante au delà de la visualisation, et complètement absente à l'échelle d'un pays. Alors que des pays comme l'Angleterre et les Pays-Bas ont réalisé des acquisitions de l'intégralité de leur territoire en laser aéroporté, de nombreuses questions se posent encore sur les moyens d'exploiter de telles données et sur leurs usages. En effet, les SIG utilisés pour exploiter l'information géographique sont encore majoritairement en 2D et les SIG 3D commencent à peine à apparaître. Mon point de vue, étayé par ma thèse en informatique graphique, est que l'information géographique va s'approprier les maillages texturés dans les années à venir jusqu'à en faire le mode principal de représentation utilisé car ce sont eux qui permettent la représentation la plus fidèle de la réalité (comme le montre leur utilisation massive dans l'industrie de l'animation et du jeu vidéo). La modélisation fine de nombreuses agglomérations sous forme de maillage texturé réalisée par Google Maps (mode Satellite) montre l'émergence de cette tendance. L'information géographique pourra ainsi bénéficier des développements considérables que ces industries ont permis autour des maillages texturés. A l'heure actuelle, le maillage texturé reste encore anecdotique par rapport au nuage de points sur lequel il a pourtant de nombreux avantages comme une structure de voisinage bien définie et une continuité géométrique. Leur plus grande complexité sera de mon point de vue vite contrebalancée par ces avantages, ce qui explique que j'oriente mes recherches de façon significative sur le traitement de maillages texturés dans un cadre géographique à large échelle :

1. Leur texturation à partir d'images orientées, qui combine un problème d'optimisation pour déterminer la meilleure image à utiliser pour chaque triangle et un problème d'égalisation radiométrique ([Waechter et al., 2014](#)).
2. Leur sémantisation ou segmentation sémantique, utilisant potentiellement cette texture en adaptant à ces maillages les méthodes qui existent pour l'image ou les nuages de points.
3. Leur simplification géométrique consistant à réduire le nombre de triangle pour faciliter leur traitement et leur visualisation tout en maintenant un maximum de fidélité et en préservant les structures ([Salinas et al., 2015](#)).
4. Leur généralisation en un modèle structuré, sémantisé et avec niveaux de détails (de type CityGML) qui est une forme de reconstruction ascendante, et un problème encore très ouvert.

Je vais aussi investiguer dans une thèse qui débutera en novembre 2016 une représentation hybride, les *complexes simpliciaux*, qui mélangent triangles, arêtes et points individuels,

---

afin de correspondre plus finement à la dimensionnalité locale de la scène à son échelle d'acquisition (un fil paraît linéaire, un feuillage paraît ponctuel, etc.).

### 3.6 La 4D

Bien qu'un peu redondant avec la 3D (section 3.5) et la mise à jour (section 3.4), je tiens à mentionner la 4D, c'est à dire l'intégration de la dimension temporelle dans les données géographiques comme une perspective qui me tient d'autant plus à cœur que j'ai pris depuis début 2015 la responsabilité d'un axe structurant du laboratoire MATIS intitulé "Géométrie 4D des données". En particulier l'approche 4D consiste à prendre complètement en compte les différentes dynamiques des scènes urbaines dans leur analyse et leur modélisation, en particulier aux différentes échelles de temps :

- Seconde : les villes sont remplies d'objets mobiles (piétons, véhicules) qui prennent un place de plus en plus importante dans les données au fur et à mesure que le capteur se rapproche de la scène dont la partie mobile devient de moins en moins négligeable devant la partie statique. La prise en compte de cette dynamique est importante soit parce qu'on s'intéresse à cette dynamique (mesure de flux) soit parce qu'on ne s'y intéresse pas et donc qu'on veut la filtrer, l'éliminer des données. Dans les deux cas il faut être au moins capable de la séparer du reste de la scène
- Heure : de nombreux changements ont lieu dans les villes à l'échelle de l'heure : stationnement, encombrement des trottoirs par des poubelles, du mobilier de restaurant, des 2 roues... Le stationnement intéresse les gestionnaires de l'offre de parking, l'encombrement de l'espace public est un sujet important pour la mobilité douce (en particulier la circulation des fauteuils roulants et poussettes).
- Jour/semaine : en plus des changements ci dessus qui peuvent aussi se produire à l'échelle du jour, on peut citer l'impact des événements temporaires (marchés, foires, travaux,...)
- Mois/ans : Les changements les plus pérennes sur la structure de la ville (destruction/construction) se font à cette échelle, ainsi que l'évolution de la végétation, qui suit aussi le rythme des saisons.

La donnée captée dans la ville est un instantané de toutes ces dynamiques, ce qui nous pousse à analyser des séries temporelles de données afin de séparer et analyser ces différentes échelles temporelles.

### 3.7 Conclusion

L'analyse et la reconstruction de scènes urbaines est un sujet vaste que j'ai cherché à traiter en tirant partie de différentes complémentarités de données (typologie et point de vue) et méthodologiques. Cette volonté d'intégrer des données de types hétérogènes dans mes travaux m'a conduit à m'intéresser un large spectre de thématiques : remise en géométrie, analyse, reconstruction et texturation. J'ai abordé ces thématiques le plus souvent en termes d'optimisation, c'est à dire en fixant toujours le but avant les moyens, et avec un soucis constant de fidélité, de robustesse et de passage à l'échelle.

---

Ma principale perspective de recherche, qui est de traiter non plus des images ou des nuages de points, mais des surfaces triangulées texturées (ou plus généralement des complexes simpliciaux) s'inscrit logiquement dans la continuité de mes travaux en ce qu'elle permet de travailler sur un objet unique réalisant déjà l'intégration de sources hétérogènes, couplant géométrie et radiométrie et pouvant porter des incertitudes. Ce positionnement ouvre de très nombreuses possibilités que j'ai hâte d'explorer avec l'aide de l'équipe que j'ai la chance d'avoir autour de moi et des projets de recherche passionnantes auxquels je participe.



## Deuxième partie

# Curriculum Vitae



## Chapitre 4

# Parcours scolaire et professionnel

### 4.1 Parcours scolaire

- 1998 : Baccalauréat S, mention bien
- 1998-1999 : Classe préparatoire *MPSI* - Lycée Saint Louis, Paris
- 1999-2000 : Classe préparatoire *PSI\** - Lycée Saint Louis, Paris
- 2000-2001 :
  - Élève officier à l'école de l'air, Salon-de-Provence
  - Aspirant de l'armée de l'air, affecté à l'escadron de chasse 1/5 Vendée, Base aérienne d'Orange.
  - Tronc commun, École Polytechnique
- 2001-2002 : Première année du cycle d'ingénieur, École polytechnique.
- 2002-2003 : Deuxième année du cycle d'ingénieur, spécialisations en informatique et en mécanique, École polytechnique.
- 2003 : Accès au corps des télécommunications, depuis fusionné avec le corps des mines.
- 2003-2004 :
  - 3ème année du cycle d'ingénieur, Télécom Paris Tech. Spécialisation en traitement d'image et reconnaissance des formes.
  - DEA IARFA : Intelligence Artificielle, Reconnaissance des Formes et Applications, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

### 4.2 Stages

J'ai effectué trois stages dans le domaine de la recherche pendant mon cursus :

- 2003 : "Paramétrisation authalique de surface" encadré par Bruno LEVY, INRIA Nancy - LORIA - ALICE
  - 2004 : "Recalage de modèles 3D contraints sur de multiples images aériennes", encadré par Franck Taillandier, IGN - MATIS. Ce stage a donné lieu à une publication dans une conférence internationale ([Vallet and Taillandier, 2005](#)).
-

- 2005 : "Variational segmentation framework in prolate spheroidal coordinates for 3D real-time echocardiography" encadré par Elsa Angelini et Andrew Laine, Columbia University, HBIL. Ce stage a donné lieu à une publication dans une conférence internationale ([Vallet et al., 2006](#)).

### 4.3 Thèse

Suite à 3 stages de recherches, une carrière dans le monde de la recherche était une évidence pour moi et je me suis donc naturellement orienté vers une thèse qui a débuté en septembre 2005. Ayant beaucoup apprécié mon expérience en géométrie algorithmique à l'INRIA Nancy, et l'INRIA proposant 3 premiers postes en thèse aux ingénieurs du corps des télécommunications, je décidai d'effectuer une thèse sous la direction de Bruno Lévy dans l'équipe ALICE.

Cette thèse intitulée "Base de fonctions sur les variétés" se déroulait dans un contexte un grand problème de géométrie algorithmique, la paramétrisation globale de surface, restait très ouvert et suscitait de nombreuses recherches. La paramétrisation globale ou quadrangulation de surface consiste à construire un quadrillage le plus régulier possible sur une surface (c'est à dire que les cases du quadrillage doivent être les plus carrées possibles et que le quadrillage doit présenter le moins de singularités possible). Les deux approches les plus prometteuses pour résoudre ce problème ouvert sont l'approche basée sur les champs de direction et l'approche utilisant les fonctions propres du Laplacien.

#### 4.3.1 Champs de directions

Il s'agit de découper le problème de la paramétrisation globale sépare en général en deux sous problèmes :

- Construire un champs de direction "4-symétrique" (invariant par rotation de  $\pi/2$ ) donnant l'orientation du quadrillage.
- Construire le quadrillage se basant sur le champs de direction.

J'ai ainsi principalement étudié le premier problème qui a donné lieu à 3 publications :

- ([Li et al., 2006](#)) dans lequel nous proposons un mode de visualisation pour les champs de direction, qui nous permettra de faciliter leur étude.
  - ([Ray et al., 2008](#)) dans lequel nous analysons la structure mathématique des champs de direction à symétries sur les surfaces et nous proposons le premier algorithme permettant de contrôler explicitement leurs singularités. Ma contribution majeure est la démonstration d'un théorème généralisant celui de Poincaré-Hopf qui explicite la structure topologique des champs de direction à symétries sur les surfaces à trous.
  - ([Ray et al., 2009](#)) dans lequel nous proposons un contrôle plus lâche des singularités leur permettant d'émerger afin de réduire la courbure du champs (donc la distorsion du quadrillage). Ma contribution majeure est la démonstration d'un théorème qui explicite le lien entre les singularités d'un champs de direction, sa courbure et la courbure Gaussienne de la surface sur laquelle il est défini.
-

### 4.3.2 Fonctions propres du Laplacien

L'approche de paramétrisation globale par fonctions propres du Laplacien consiste à utiliser le diagramme de Morse de ces fonctions propres pour construire directement le quadrillage. L'idée est que ces fonctions propres généralisent les sinusoïdes sur des surfaces quelconques, de sorte que leurs maxima et minima sont répartis de façon régulière et périodique sur la surface comme le quadrillage que nous cherchons. Ma contribution majeure ([Vallet and Lévy, 2008](#)), et qui reste mon article le plus cité à ce jour pose de façon rigoureuse le problème du calcul de ces fonctions propres et en particulier la discréétisation du problème continu, ainsi que l'implémentation de cette solution sur de très grands maillages.

### 4.3.3 Conclusion

Cette thèse a été l'occasion de développer mon approche personnelle de la recherche en informatique :

- un travail de tous les aspects d'un problème, des plus théoriques (démonstrations de théorèmes généraux) aux plus pratiques (implémentation optimisée, out-of-core et passant à l'échelle)
- une approche "optimisation" à la majorité des problèmes qui consiste à s'intéresser aux objectifs avant de s'intéresser aux moyens, c'est à dire poser clairement le problème (par la définition d'une qualité des solutions permettant de les comparer entre elles) que l'on cherche à résoudre.
- une analyse fine de la façon de représenter l'information géométrique de façon numérique à cause de l'importance de cette représentation pour les traitements géométriques.

Ainsi, malgré une différence thématique importante entre mon travail de thèse et les travaux que je conduis depuis mon arrivée à l'IGN, cette approche est celle que je continue d'appliquer aux recherches auxquelles je participe.

A la suite de ma thèse soutenue en août 2008 (moins de 3 ans après son commencement), j'ai ainsi cherché à continuer ma carrière en recherche dans un établissement qui me permettrait de mettre à profit cette approche mais aussi qui me permettrait de me rapprocher des applications de mes travaux sans m'éloigner du travail théorique et méthodologique. L'IGN est vite apparu comme le meilleur choix de ce point de vue. J'y avais réalisé un stage au cours duquel j'avais apprécié le côté innovant des recherches d'un point de vue à la fois méthodologique et applicatif. De plus, mon statut au corps des télécommunications me permettait de postuler directement à un poste de chargé de recherches à l'IGN à l'issue de ma thèse.

## 4.4 Parcours à l'IGN

J'ai été recruté à l'IGN en septembre 2008 sur un poste de chargé de recherche en reconstruction conjointe aérien terrestre. Comme mentionné en introduction, cet intitulé porte deux éléments majeurs de ma thématique de recherche : la reconstruction qui est de mon point de vue le problème central du traitement de l'information géographique, et la combinaison de sources de données hétérogènes pour tirer parti de leurs complémentarités.

---



FIGURE 4.1 – Visualisation dans GeoLabX d'un modèle 3D texturé de ville produit à partir d'images aériennes et enrichi par cartographie mobile : surface de sol reconstruite et séparée entre route et trottoir, marquages au sol et panneaux reconstruits en 3D, arbres détectés et individualisés intégrés sous forme de nuages de points

Mon travail à l'IGN a commencé par une année en forme de post-doc où j'ai travaillé exclusivement sur la problématique du découpage d'empreintes cadastrales dans le cadre du projet TerraNumerica. Suite à deux départs de cadres, j'ai rapidement pris la responsabilité d'une action de recherche, structure propre à la recherche de l'IGN qui regroupe les recherches sur une thématique au sein d'un laboratoire. Cette action de recherche intitulée "Analyse et reconstruction de scènes urbaines" comme ce document a été le cadre de l'ensemble de mes travaux de recherche depuis. Au delà d'un rôle de coordinateur sur les travaux du laboratoire autour des thématiques de mon axe, j'ai été amené à définir les objectifs de cet axe année par année et à 4 ans, exercice de prise de recul important et qui m'a aidé à définir les grandes directions de recherche que j'ai décrites en première partie. En tant que responsable de cet axe, j'ai aussi participé à l'évaluation de la recherche de l'IGN par l'AERES.

Avec cette responsabilité, ont aussi commencé les expériences d'encadrement et d'enseignement (chapitre 5), ainsi que ma participation à des montages et conduites de projets de recherche collaboratifs (chapitre 6). De plus, la recherche très technologique que nous menons au laboratoire MATIS m'a conduit à structurer les développements de mon axe en créant une librairie de traitement de nuages de points Lidar dans laquelle ont été intégrés une bonne partie des travaux de mon axe, permettant ainsi facilement l'utilisation des algorithmes développés par d'autres et donc facilitant la pérennisation de ces méthodes.

De plus, la recherche sur des données 3D géoréférencées de types très différents nécessite un bon outil de visualisation permettant de les visualiser conjointement, ainsi que les résultats intermédiaires et finaux. J'ai ainsi animé les développements autour du visualiseur 3D GeoLabX développé au MATIS pour en faire un outil modulaire et flexible, permettant la visualisation de nombreuses données 3D de travail (images orientées, nuages

de points, modèles 3D, MNE, objets structurés, ...) du laboratoire et maintenant largement utilisé (cf Figure 4.1). C'est un outil précieux pour développer de nouvelles méthodes, mais aussi pour communiquer et faire comprendre nos résultats. La plupart des figures de ce document ont été produites par cet outil.

Enfin, suite au départ de son responsable, j'ai pris la responsabilité d'une autre action de recherche "Systèmes de numérisation terrestre". Celle-ci étend le spectre de compétences sur lesquelles je dois m'assurer de maintenir une expertise au laboratoire pour l'IGN, en restant dans la continuité de mes travaux car les thèmes majeurs de cette action de recherche sont la calibration et le recalage, deux thèmes centraux pour l'utilisation conjointe de données hétérogènes. Cette responsabilité m'a aussi donné l'occasion de renforcer les liens entre production et traitement de données au sein du laboratoire.



## Chapitre 5

# Encadrement et enseignement

### 5.1 Stages encadrés

- 2011 : Reconstruction de végétation à partir de données laser terrestres par Fabrice Monnier (EGID, Université Bordeaux III).
- 2014 : Segmentation de nuages de points de cartographie mobile par croissance de régions par Houssem Nouira
- 2015 : Recalage de trajectoire basé sur des points d'intérêt laser par Triomphant Koyame-Linga (Institut d'Optique).
- 2015 : Recalage conjoint de données laser et image par Mourad Miled (Master 2 : Sciences pour l'Ingénieur, Intelligence artificielle, Image et son pour les systèmes intelligents, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6).
- 2016 : Segmentation de nuages de points par poursuite de coupe multivariée et apprentissage de métrique par Stéphane Guinard (ENSG)
- 2016 : Asservissement visuel d'image sur nuage de point par Wang Xin ()

### 5.2 Thèses encadrées

#### 5.2.1 Reconstruction de modèles 3D photoréalistes de façades à partir de données image et laser terrestre

Cette thèse a été soutenue début 2014 par Jérôme Demantké et dirigée par Nicolas Paparoditis (Université Paris Est - Ecole Doctorale ICMS). C'est la première thèse que j'ai encadrée et elle a été l'occasion pour moi d'appréhender la séparation des responsabilités entre directeur et encadrant de proximité, celles-ci étant assurées par la même personne (Bruno Lévy) au cours de ma propre thèse. D'un point de vue scientifique, cette thèse était découpée en deux parties :

1. Détection de rectangles de façades dans des nuages de points de cartographie mobile
  2. Reconstruction de ces façades en 2.5D généralisée (surface décrite par une équation de la forme  $z = f(x, y)$  mais dans un système de coordonnées non euclidien adapté à la géométrie d'acquisition)
-

Cette thèse a été ma première occasion de me confronter au problème de l'exploitation de données de types différents pour la reconstruction, mais aussi à la combinaison géométrie/sémantique puisque la reconstruction en 2.5D généralisée utilise des a priori sur le type d'objet reconstruit. Enfin, cette thèse a été l'occasion d'une réflexion sur l'adaptation des structures géométriques à ce que l'on cherche à représenter. En effet, nous n'avons retenu aucune des deux solutions les plus évidentes (2.5D en géométrie façade et 2.5D en géométrie capteur) mais une troisième intermédiaire qui combine leurs avantages respectifs. Enfin, cette thèse a été l'occasion d'une collaboration au sein du laboratoire puisque la détection de façades s'appuyait sur les travaux de stage de Jérôme sur des descripteurs avec sélection optimale de voisinage que j'avais suivis mais pas encadrés ([Demantké et al., 2011](#))

### **5.2.2 Recalage automatique de nuages de points laser terrestres sur un modèle 3D de ville**

Cette thèse a été soutenue fin 2014 par Fabrice Monnier et dirigée par Nicolas Paparoditis (Université Paris Est - Ecole Doctorale ICMS). J'ai encadré cette thèse en parallèle de mes travaux sur la texturation de modèles 3D de villes à partir d'images terrestre. Une limite importante de ces travaux était le manque de consistance entre ces deux sources de données très différentes. Il est donc vite apparu qu'un recalage précis entre les données de cartographie mobile et le modèle 3D était indispensable. Cette thèse était guidée par l'idée que ce qui doit être ré-estimé au cours de ce recalage ne sont pas les données elles même mais la trajectoire du véhicule. Ainsi nous nous sommes orientés vers un recalage basé sur le nuage laser uniquement (car plus précis et robuste qu'un nuage photogrammétrique) mais comme la trajectoire est ré-estimée, ce recalage s'applique ainsi naturellement aussi aux images. Ce travail a ainsi nécessité des développements théoriques afin de formuler le problème de recalage comme un problème d'optimisation sur la trajectoire, permettant ainsi une déformation non rigide du nuage guidée par sa géométrie d'acquisition. Cette estimation est alternée avec un calcul d'appariement points/façade ce qui en fait une forme d'ICP (Iterative Closest Points).

### **5.2.3 Détection de changements à partir de scans de cartographie mobile**

Cette thèse a été soutenue fin 2015 par Wen Xiao et dirigée par Nicolas Paparoditis (Université Paris Est, Ecole Doctorale MSTIC). L'objectif premier de cette thèse est de détecter les changements entre deux passages d'un véhicule de cartographie mobile dans la même rue. Afin de séparer les changements des occlusions, nous nous sommes attachés à définir précisément (d'un point de vue physique) l'information qu'un scan laser donne sur l'occupation de l'espace par de la matière opaque. Une investigation sur les moyens de formaliser et comparer cette information partielle à deux époques nous a conduit à choisir la théorie de Dempster-Shafer (DST) qui permet de modéliser plus finement l'information partielle que la théorie Bayésienne. En particulier, la DST permet la séparation entre :

- l'absence d'information en un point de l'espace (pas de rayon laser à proximité)
  - une information contradictoire (à la fois vide et occupé) qui caractérise une interface (c'est l'état de l'espace en chaque point du nuage qui se situe précisément sur cette interface)
-

ce que les probabilités Bayésiennes ne permettent pas.

#### **5.2.4 Trajectography registration by combined data-model deformation for geometric enriching of existing city models**

Cette thèse en cours depuis janvier 2015 par Miloud Mezian est co-dirigée par Nicolas Paparoditis (Université Paris Est, Ecole Doctorale MSTIC), et encadrée par Bahman Soheilian. C'est la première thèse que je dirige officiellement, ayant obtenu une dérogation à condition de passer mon HDR d'ici la fin de la thèse (décembre 2017). Mon objectif initial de soutenir mon HDR avant la mi-thèse ne s'est que légèrement décalé. Cette thèse prend la suite de celle de Fabrice Monnier (cf section 5.2.2) qu'elle étend de plusieurs façons :

1. Déformation des modèles 3D de bâtiments : nous considérons que les écarts constatés entre le modèle 3D et le nuage de points viennent à la fois du géo-référencement du nuage et d'imprécisions dans le modèle 3D. Un modèle de déformation pour ceux-ci est donc proposé, et l'algorithme de recalage cherche à ajuster simultanément la trajectoire du véhicule et la géométrie du modèle.
2. Prise en compte des incertitudes : afin d'éviter les choix heuristiques de paramètres dont souffrait la thèse de Fabrice Monnier, et que qualifier le résultat du recalage, nous modélisons finement toutes les incertitudes qui interviennent à la fois dans le processus de construction du nuage de points et du modèle 3D afin de dériver une méthode non paramétrique qui optimise la vraisemblance du résultat.

#### **5.2.5 Hybrid urban scene analysis from mobile mapping images and laser scan**

Cette thèse de Mohamed Boussaha que je co-dirigerai avec Patrick Rives (INRIA Sophia Antipolis - LAGADIC) et encadrée par Loïc Landrieu commencera en octobre 2016. C'est ma première thèse en codirection avec un directeur extérieur à l'IGN. Cette thèse est sans doute celle dont le thème est le plus central à ce document puisqu'il s'agira de reconstruire un maillage texturé de scène urbaine à partir de données de cartographie mobile puis d'analyser (segmenter, sémantiser et structurer par des relations) ce maillage. La sémantisation de maillages structurés est un sujet nouveau mais très prometteur d'après moi puisque les maillages texturés sont une représentation informatique plus proche de la réalité que les images (qui n'en sont qu'une projection) et les nuages de points laser (qui n'en sont qu'un échantillonnage discret).

#### **5.2.6 Reconstruction de complexes simpliciaux à partir de scans de cartographie mobile**

Cette thèse de Stéphane Guinard encadrée par Laurent Caraffa et que je dirigerai commencerà en novembre 2016. L'objectif principal de cette thèse est de reconstruire non pas une surface triangulée de la scène imagée mais une représentation plus riche pouvant contenir des triangles, des arêtes et des points. Cet objet mathématique se nomme un complexe simplicial. Cette idée est motivée par le fait qu'à l'échelle où elle est numérisée, la réalité ne peut pas toujours être appréhendée comme une interface 2D entre volumes perméables ou non aux rayons lumineux. En particulier, des fils électriques, grilles, chaînes, barrières,

---

... peuvent apparaître localement comme linéaires et non surfaciques à la résolution de la données, et le feuillage d'un arbre apparaîtra comme ponctuel. Au delà de la construction de tels complexes simpliciaux, l'objectif de cette thèse est aussi de redéfinir pour eux des outils de traitement de surfaces triangulées comme la décimation, la segmentation et la texturation. Ces outils s'intègrent naturellement dans la chaîne de traitement de données image et laser, en particulier pour la production de données structurées et sémantisées puisque ces outils ont vocation à produire une représentation continue plus fidèle de la réalité.

### 5.3 Encadrements d'ingénieurs

Depuis début 2015, j'encadre deux ingénieurs (Jean-Pierre Papelard et Emmanuel Habets) qui font partie de l'axe de recherche Traitement et Acquisition de Données qui se spécialise sur les plate-formes de numérisation et leur calibration. Étant aussi responsable de l'axe qui traite ces données, j'ai poussé pour une meilleure collaboration entre ces deux axes, en particulier en poussant l'utilisation de plate-formes de développement communes adaptées à la fois à la production et au traitement des données, mais aussi en impliquant davantage ces ingénieurs dans des travaux de recherches menés par mes doctorants et post-doctorants, comme le montrent plusieurs publications communes (Monnier et al., 2013a) (Monnier et al., 2013b) (Soheilian et al., 2013b) (Vallet and Papelard, 2015) (Miled et al., 2016).

J'ai aussi encadré deux ingénieurs (Quoc-Dinh Nguyen et David Vandergucht) dans le cadre du projet TerraMobilita (cf section 6.5) dont le rôle était principalement la réalisation des expérimentations avec les collectivités locales prévues en fin de projet pour valoriser les travaux de recherche. Cette expérience de transfert direct (c'est à dire encadré par la recherche) est plus simple et moins conflictuel que le transfert indirect (réalisé par une autre unité) mais est plus consommateur de temps car nécessitant un suivi fin.

### 5.4 Encadrements de post doctorants

L'encadrement de post-doctorant est une expérience agréable car l'expérience de la thèse les rend opérationnels rapidement et assez indépendants, ce qui permet de se focaliser sur les verrous scientifiques et moins sur les obstacles techniques.

#### 5.4.1 Détection de façades aveugles

Mon premier post-doctorant, Jean-Pascal Burochin, a été recruté sur le projet ePlu (cf section 6.2) pour travailler sur la thématique de la détection de façades aveugles à partir d'images aériennes. Ce travail a été l'une de mes premières expériences de combinaison d'aspects géométriques (utilisation de modèles 3D de villes pour rectifier les images, détection d'ouvertures rectangulaires) et sémantiques (classification supervisée). Ce sujet est d'autant plus ambitieux que la résolution de l'imagerie aérienne ainsi que les forts angles d'incidence sur les façades font que même un opérateur humain n'arrive pas à classer plus d'un tiers des façades.

---

### 5.4.2 Reconstruction de maillages étanches

J'encadre Laurent Caraffa depuis début 2015 dans le cadre du projet iQmulus (cf section 6.6). L'objectif de son travail est de concevoir une méthode de reconstruction de surface à partir de sources de données hétérogènes : nuages de points aériens et terrestres, photogrammétrie aérienne et terrestre, bases de données géographiques, etc. La surface résultante doit être étanche pour permettre des simulations d'inondation réalisées par d'autres partenaires du projet. Ce travail se base sur la même modélisation de la physique du processus d'acquisition que dans la thèse de Wen Xiao (cf section 5.2.3) en termes d'occupation de l'espace incertaine. La différence fondamentale est que cette information est modélisée explicitement dans tout l'espace sur une triangulation de Delaunay 3D. Cette triangulation permet de poser le problème de reconstruction de surface étanche comme une labellisation de tétraèdres aussi consistante que possible avec la physique de l'acquisition. Ce post-doc d'un an a été prolongé d'un an pour aborder la question du passage à l'échelle car la méthode actuelle est limitée à une triangulation de Delaunay tenant dans la mémoire de la machine utilisée.

## 5.5 Enseignement

- Master Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations (PPMD), ENSG : Traitement d'images, reconstruction (depuis 2009).
- Master Sciences de la Terre de l'Environnement et des Planètes (STEP), IPGP / Paris 7 / ENS : Introduction au traitement d'images (depuis 2010).
- Ingénieur 2ème année, ENSG : Traitement d'images (depuis 2014).
- Formation continue EVAFI, ENSG : C++
- Formation continue IGN, ENSG : Introduction au C++
- Formation continue IGN, ENSG : Introduction à la programmation GPU
- Master BIM (ENPC) : un cours sur la modélisation urbaine 3D chaque année

## 5.6 Projets d'étudiants

L'école de l'IGN, l'ENSG favorise de plus en plus les interactions entre étudiants et chercheurs, localisés sur deux sites différents. En plus des cours que nous dispensons dans le cursus ingénieur et master, nous sommes de plus en plus impliqués dans les stages en tant qu'encadrant ou référent, et dans les projets recherche ou informatique. Sur l'année scolaire 2015-2016, j'ai encadré directement 2 projets de recherche et un projet informatique. Ces projets sont l'occasion d'expérimenter des idées nouvelles sur lesquelles nous n'avons pas de ressources propres à investir mais qui nous paraissent prometteuses. C'est aussi une forme de formation par la recherche, et une occasion de faire naître des vocations.

---



# Chapitre 6

## Projets

### 6.1 TerraNumerica

Le projet FUI TerraNumerica (2008-2012) est le premier projet collaboratif auquel j'ai participé, dès mon arrivée à l'IGN. Ce projet consistait à développer un ensemble de méthodologies pour modéliser les villes en 3D à partir d'imagerie aérienne. Dans ce cadre j'étais en charge d'améliorer la chaîne de production de modèles 3D de l'IGN en redécoupant le cadastre pour y intégrer toutes les discontinuités verticales, ce qui est un problème de segmentation vectorielle qui s'est avéré particulièrement dur et mal posé. Ce projet a été l'occasion pour moi de découvrir le fonctionnement d'un gros projet de recherche et développement.

### 6.2 ePLU

Le projet ePLU (2009-2013) était un petit projet porté principalement par le COGIT, le laboratoire de cartographie de l'IGN, dont le but était de développer des outils facilitant la compréhension du Plan Local d'Urbanisme, et en particulier de traduire ses règles en termes de contraintes géométriques sur les constructions pour aider les architectes à concevoir des bâtiments le respectant. Les règles du PLU étant différentes si les façades adjacentes à la parcelle d'intérêt sont aveugles ou non, j'ai encadré un travail de post-doc sur la détection de façades aveugles dans ce cadre (cf section 5.4.1)

### 6.3 iSpace&Time

Le projet iSpace&Time (2010-2013) était un projet dont l'objectif principal était de proposer un StreetView (navigateur immersif dans de l'imagerie panoramique de cartographie mobile) dans lequel la partie dynamique de la scène pouvait être supprimée et remplacée par une autre, par exemple, des résultats de simulation de trafic routier/piéton. Ma tâche dans ce projet consistait à détourer les objets mobiles dans les images. Je me suis basé pour cela sur la thèse de Wen Xiao (cf section 5.2.3) sachant qu'un laser de robotique était utilisé simultanément à l'acquisition des images, et que les résultats de la thèse permettaient d'en extraire la partie dynamique. J'ai alors transféré cette information portée par

---

le nuage de points à l'image en utilisant un graphe cut guidé par ces points, ce qui est encore un exemple de traitement conjoint image/laser.

## 6.4 eFusion

Le projet eFusion (2010-2013) était un projet de la DGA qui vise à exploiter de l'image-rie satellitaire pour des applications défense. Ce projet a été ma première occasion d'aborder la thématique de la détection de changements, ici appliquée principalement aux bâtiments.

## 6.5 TerraMobilita

Le projet ANR TerraMobilita (2011-2015) est le plus central à cette HDR. Il se concentrait sur les données de cartographie mobile, leur traitement, leur visualisation interactive et à leurs applications au service des collectivités locales. C'est aussi le projet qui m'a le plus occupé car j'en ai assuré été le chef pour l'IGN pendant 1 an et demi, que j'y ai encadré une thèse (section 5.2.3) et deux ingénieurs et assuré la coordination et les livraisons de données pour les expérimentations.

## 6.6 iQmulus

Le projet européen FP7 iQmulus(2013-2017) a pour objectif de proposer des outils de traitement de gros nuages de points dans le cloud afin de pouvoir exploiter les couvertures nationales de Lidar aérien inexploitables à l'heure actuelle car trop volumineuses. Le projet est organisé par un regroupement de compétences scientifiques en vue de répondre à des besoins des organismes nationaux ou locaux qui souhaitent exploiter ces nuages. Mon rôle dans ce projet est principalement l'encadrement d'un post-doc (cf section 5.4.2) mais aussi la supervision du transfert dans le cloud de plusieurs algorithmes de traitement de nuages de points développés dans mon action de recherche.

## 6.7 Li3DS

Le projet RAPID (DGA) Li3DS (2015-2017) est organisé autour de deux composantes :

- La réalisation d'un dispositif d'acquisition image/laser géo-référencés portable (sac à dos) s'inspirant des réalisations précédentes de l'axe Traitement et Acquisition de Données (TAD) que je dirige depuis 2015.
  - La mise en place d'un entrepôt de données d'acquisition (image, laser et géoréférencement) préservant toute l'information relative à l'acquisition et sa géométrie. Cet entrepôt, lien indispensable entre production et traitement de données géolocalisées, se base sur des prototypes que nous avons mis en place au laboratoire pour travailler sur les données de cartographie mobile.
-

## 6.8 Platinum

Le projet ANR Platinum (2015-2019) se fixe pour objectif la production et la mise à jour d'un référentiel de données visuelles géo-référencées et sémantisées et son utilisation pour la localisation et la navigation d'agents équipés de capteur image et/ou laser (robots, piétons, automobilistes, etc.). Je suis responsable dans ce projet du lot de travaux sur la constitution et la mise à jour du référentiel lui-même, et je co-dirigerai dans ce cadre une thèse sur sa constitution (cf section 5.2.5) et un post-doc sur la gestion temporelle de ce référentiel, en particulier sur l'intégration des mises à jour.



## Chapitre 7

# Diffusion

La diffusion est le terme que j'utilise pour regrouper tous les aspects de la vie d'un chercheur où il diffuse de l'information scientifique entre différents acteurs.

### 7.1 Animation scientifique

L'animation scientifique est une des composantes essentielles du métier de chercheur car c'est à cette occasion qu'il valorise son travail et celui des autres en permettant des interactions entre différents acteurs.

Le premier niveau d'interaction est celui au sein du laboratoire. Le laboratoire MATIS s'intéresse à un large spectre de thématiques du traitement d'image, de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur. Ses 35 membres (en moyenne) s'intéressent donc en général à des sujets différents mais suffisamment connexes pour envisager de nombreuses interactions et collaborations. Mais cela n'est possible que si chacun a une connaissance précise des travaux des autres membres du laboratoire. Afin de faciliter ce processus, j'ai proposé en 2012 d'organiser des Séminaires Techniques de laboratoire au cours desquels des membres du laboratoire ou des invités présentent leurs travaux. Ces séminaires sont ouverts principalement aux membres du laboratoire, mais aussi parfois plus largement à toute la recherche de l'IGN.

Les journées de la recherche de l'IGN constituent un vecteur de diffusion du contenu de nos travaux moins technique mais plus large. Des travaux personnels ou que j'ai encadrés y ont été présentés à plusieurs reprises, à l'oral ou sous forme de posters.

Un vecteur particulièrement efficace de diffusion sont les visites de laboratoire que j'ai organisées ou auxquelles j'ai participé à plusieurs reprises pour des groupes d'étudiants ou des partenaires actuels ou potentiels de projets collaboratifs. C'est un mode de diffusion que j'apprécie car un peu plus informel et qui permet de vraies discussions avec les intéressés. De plus, nous avons la chance de disposer de systèmes d'acquisition qui gagnent à être vus "in vivo".

Enfin, je considère être du devoir de tout chercheur de participer à des actions de vulgarisation afin d'aider le plus grand nombre à comprendre nos thématiques de recherche et leur impact social, et pourquoi pas susciter des vocations. L'IGN organise chaque année des portes ouvertes auxquelles la recherche participe activement et qui jouent pleinement

---

ce rôle. Nous participons aussi tous les ans au festival de l'innovation numérique de l'Ile de France, Futurs en Seine, qui est une belle vitrine pour nos innovations. Enfin, j'ai participé à un documentaire sur la cartographie mobile réalisé pour la banque des savoirs du conseil général de l'Essonne.

## 7.2 Open data et benchmarks

Nous avons la chance, en tant qu'institut géographique national, et parce que nous développons des systèmes d'acquisition, de disposer de données d'acquisition de très bonne qualité et en grande quantité. Ces données à la pointe de la technologie sont très intéressantes pour tous les chercheurs de nos communautés, et nous les poussons à les utiliser en proposant certains jeux de données en OpenData. Mieux encore, nous avons organisé fin 2014 un benchmark d'analyse de scans de cartographie mobile urbaine pour lequel nous avons annoté près de 300 millions de points laser (Vallet et al., 2015a). Ce benchmark a aussi été l'occasion pour moi de définir un objectif ambitieux en termes de segmentation sémantique pour la communauté scientifique, que ce soit au niveau de la structure du traitement (à la fois une segmentation et une classification objet, c'est à dire un détecteur universel) ou de la finesse sémantique au travers d'une ontologie hiérarchique.

## 7.3 Transfert

Le transfert est une composante importante du travail de recherche à l'IGN où la finalité de nos travaux est de préparer l'activité à venir de l'IGN et d'améliorer les processus actuels. Le transfert peut prendre plusieurs formes à l'IGN :

- Rédaction de fiches TRL : le service de la valorisation peut demander aux chercheurs de rédiger des fiches récapitulant quelles technologies sont mûres pour un transfert au laboratoire. Ces fiches décrivent les entrées/sorties de la méthode et surtout son niveau de maturité (TRL). Ces fiches permettent de prévoir des industrialisation en amont.
- Projets R&D : dans le cadre de certains projets de recherche collaboratifs, le financement permet de recruter des ingénieurs encadrés par des chercheurs. Cela permet d'industrialiser efficacement un code de recherche, mais ce mode de transfert étant "techno push", cela ne garantit pas que le résultat sera effectivement utilisé en production à l'IGN.
- Projets de développement : ce sont des projets décidés par la hiérarchie de l'IGN et réalisés par son service des développements avec l'appui de la recherche. Ces projets débouchent en général sur un outil opérationnel utilisé en production, mais avec peu de retours vers la recherche qui ne suit le projet que de loin. Il est très difficile de travailler de façon collaborative (sur les mêmes plate-formes) entre recherche et développement qui ont des méthodes de travail, des objectifs et des rythmes différents. De plus, le transfert est assez binaire : soit la recherche livre un outil de haut TRL "presse bouton" qui sera utilisé tel quel, soit les développements s'inspirent librement de l'outil de recherche voir s'appuient juste sur l'expertise recherche sans tenter de faire évoluer l'outil existant vers plus de maturité.

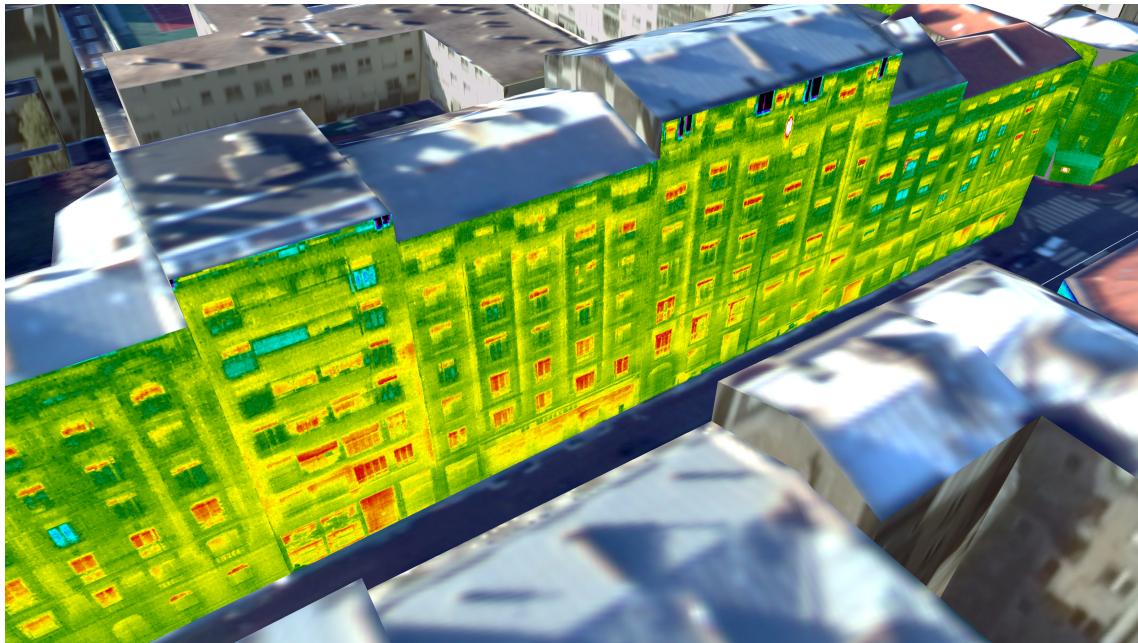


FIGURE 7.1 – Texturation de façade à partir d'une thermographie mobile terrestre.

Dans mon expérience, le transfert est un sujet intéressant et gratifiant car c'est une utilisation directe et valorisante d'un travail de recherche. Cependant de nombreux obstacles humains, organisationnels, politiques et techniques (dans une moindre mesure) rendent l'exercice périlleux, voire conflictuel.

## 7.4 Expérimentations

Les expérimentations sont des occasions propres à la recherche dans un institut comme l'IGN qui a de nombreux partenaires dans les collectivités territoriales. Il s'agit en général de faire une démonstration d'un prototype de recherche sur les données d'un territoire afin de préparer une potentielle future collaboration. Ces expérimentations rajoutent un surcroît de travail au chercheur qui doit opérer son outil souvent instable et peu mature à une échelle suffisamment grande. Cependant ces expérimentations sont bénéfiques de deux points de vue :

- Cela pousse le chercheur à réfléchir à la robustesse et au passage à l'échelle de ses méthodes, ce qui nécessite souvent d'intégrer ces aspects dans la conception même de la méthode.
- Cela permet d'illustrer les articles écrits sur la méthode sur des jeux de données réels et des cas d'usage intéressants, en lien avec des utilisateurs.

Au cours de ma carrière à l'IGN, j'ai ainsi participé à quelques expérimentations :

- Texturation thermique de Saint Mandé (cf Figure 7.1) : il s'agissait d'utiliser une vidéo acquise par une caméra thermique montée sur un véhicule de cartographie mobile pour texturer un modèle 3D blanc de la ville de Saint Mandé. Cela permet un géo-référencement et une élimination des redondances de l'information thermique. J'ai utilisé pour cela mes travaux sur la texturation de modèle 3D à partir d'images

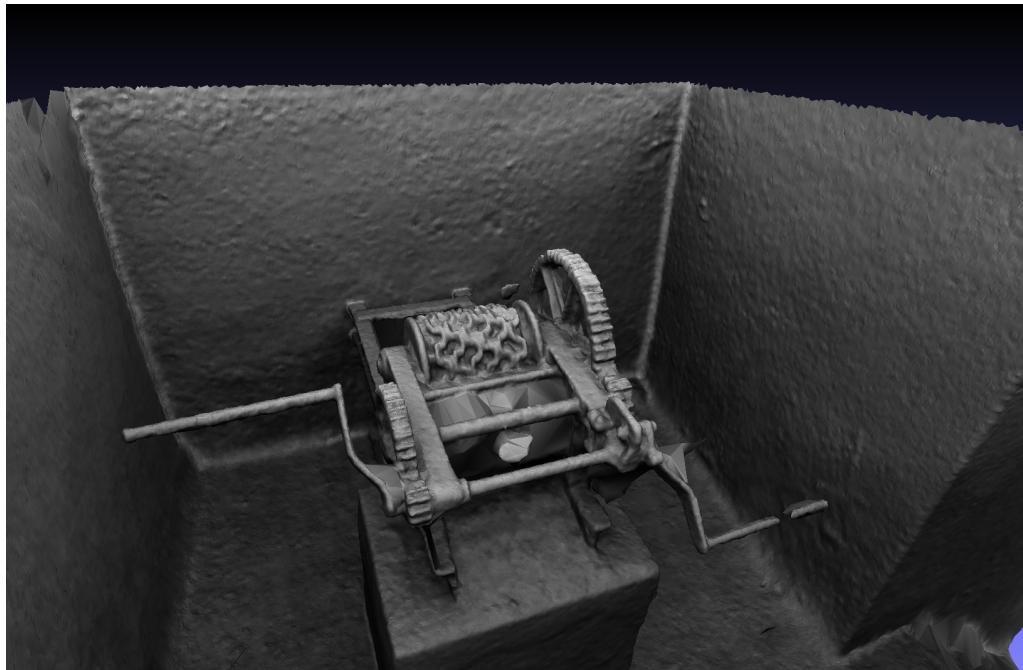


FIGURE 7.2 – Reconstruction d'un engin de levage dans les égouts de Paris à partir d'images multiples.

terrestre que j'ai adaptés à ce cas d'usage. Le résultat est resté visible plus d'un an sur une borne installée à la mairie de Saint Mandé.

- Texturation de Toulouse : la ville de Toulouse s'était montrée intéressée par une texturation des façades d'un modèle 3D de la ville avec de l'imagerie terrestre. Sur ce très gros chantier, l'un de mes doctorants a appliqué la méthode de recalage de données de cartographie mobile sur un modèle 3D qu'il développait (cf section 5.2.2) et j'ai utilisé mon outil de texturation sur les données recalées.
- Ortho laser : la communauté d'agglomération d'Aurillac souhaitait évaluer l'apport de la cartographie mobile pour réaliser une orthoimage très fine de la chaussée dans le cadre de la directive DT-DICT qui impose à tous les gestionnaires de réseaux enfouis une localisation de leurs réseaux à une précision meilleure que 10 cm. Cette expérimentation a été l'occasion de tester à grande échelle (plus de 110 km d'acquisition sur une semaine) les outils de recalage développés au laboratoire, ainsi que l'outil de production d'ortho laser (ortho-image générée à partir de l'intensité du signal laser).
- Egouts de Paris (cf Figure 7.2) : dans le cadre d'une réponse à appel d'offre de la Mairie de Paris sur la numérisation de ses égouts, l'IGN a acquis de nombreuses images dans ces égouts, qui ont permis de constituer un nuage de points par appariement dense. Ce nuage de points a constitué un jeu de données très intéressant pour tester l'algorithme de reconstruction de surface développé dans le cadre du projet iQmulus (cf section 5.4.2), et c'est le résultat de cet algorithme qui a été présenté à la Mairie de Paris.

## 7.5 Conclusion

Mon travail de chercheur est composé de très nombreuses facettes, ce qui le rend palpitant mais impose une gestion du temps rigoureuse pour éviter de s'éparpiller entre ces nombreuses tâches. Il est ainsi souvent nécessaire (et frustrant) de revoir ses objectifs de qualité à la baisse afin de pouvoir répondre à la majorité des sollicitations. Depuis 2015, je cherche à m'impliquer sur moins de sollicitations afin de pouvoir mieux répondre à celles auxquelles je choisis de répondre. C'est un exercice de priorisation difficile car la plupart de ces sollicitations sont sur des sujets qui m'intéressent fortement et sont en relation avec les grandes lignes de ma recherche que j'ai essayé de tracer dans ce document.



## Chapitre 8

# Liste des Publications

### 8.1 Chapitres de livres

- ([Vallet and Mallet, 2016a](#)) B. Vallet, C. Mallet. Analyses de scènes avec un véhicule de cartographie mobile (Chapitre 2). In : Télédétection pour l'Observation des Surfaces Continentales en zones urbaines et côtières, Baghdadi N., Zribi M. (Eds), ISTE, Elsevier, 2016.
- ([Vallet and Mallet, 2016b](#)) B. Vallet, C. Mallet. Urban mapping with the mobile mapping technology (Chapter 2). Land Surface Remote Sensing in Urban and Coastal Areas, Baghdadi N., Zribi M. (Eds), Elsevier, 2016.

### 8.2 Articles de revues avec comité de lecture

- ([Xiao et al., 2016](#)) W. Xiao, B. Vallet, K. Schindler, N. Paparoditis. Street-side vehicle detection, classification and change detection using mobile laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 114, pp. 166-178, 2016.
  - ([Vallet et al., 2015a](#)) B. Vallet, M. Brédif, A. Serna, B. Marcotegui, N. Paparoditis. TerraMobilita/iQmulus Urban Point Cloud Analysis Benchmark. Computers & Graphics 49, pp.126-133, February 27, 2015.
  - ([Xiao et al., 2015](#)) W. Xiao, B. Vallet, M. Brédif, N. Paparoditis. Street environment change detection from mobile laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 38, pp. 38-49, 2015.
  - ([Burochin et al., 2014](#)) J.-P. Burochin, B. Vallet, M. Brédif, C. Mallet, T. Brosset, N. Paparoditis. Detecting blind building façades from highly overlapping wide angle aerial imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 96, pp.193–209, October 2014.
  - ([Soheilian et al., 2013a](#)) B. Soheilian, N. Paparoditis, B. Vallet. Detection and 3D reconstruction of traffic signs from multiple view color images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 77 (2013) 1–20.
  - ([Brédif et al., 2013](#)) M. Brédif, O. Tournaire, B. Vallet, N. Champion. Extracting polygonal building footprints from digital surface models : A fully-automatic global optimization framework. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol 77, pp. 57-65, 2013.
-

- (Monnier et al., 2013a) F. Monnier, B. Vallet, N. Paparoditis, J.-P. Papelard, N. David. Mise en Cohérence de Données Laser Mobile sur un Modèle Cartographique par Recalage Non-Rigide . Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 202, pp.27-41 , Meilleur article étudiant de l'année 2013, April 2013.
- (Hammoudi et al., 2013) K. Hammoudi, F. Dornaika, B. Soheilian, B. Vallet, J. McDonald, N. Paparoditis. A Synergistic Approach for Recovering Occlusion-free Textured 3D Maps of Urban Facades from Heterogeneous Cartographic Data. In International Journal of Advanced Robotic Systems, Volume 10, (10 pages), 2013.
- (Vallet and Lelégard, 2013) B. Vallet, L. Lelégard. Partial iterates for symmetrizing non-parametric color correction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 82, pp.93–101, August 2013.
- (Hammoudi et al., 2012a) K. Hammoudi, F. Dornaika, B. Soheilian, B. Vallet, J. McDonald, N. Paparoditis. Recovering occlusion-free textured 3D maps of urban facades by a synergistic use of terrestrial images, 3D point clouds and Area-based information. In Journal of Procedia Engineering (Elsevier), Special Issue of International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, Volume 41, Issue C, pp. 971-980, September 2012.
- (Vallet et al., 2011) B. Vallet, M. Pierrot-Deseilligny, D. Boldo, M. Brédif. Building footprint database improvement for 3D reconstruction : A split and merge approach and its evaluation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 66, Issue 5, pp.732-742, September 2011.
- (Vallet et al., 2010a) B. Vallet, M. Pierrot-Deseilligny, M. Brédif, D. Boldo. Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3D : une approche par découpe et fusion. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Volume 195, pp.42-50.

### 8.3 Articles de conférences avec comité de lecture

- (Miled et al., 2016) M. Miled, B. Soheilian, E. Habets, B. Vallet. Hybrid online mobile laser scanner calibration through image alignment by mutual information. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 12-19 July 2016.
- (Mezian et al., 2016) M. Mezian, B. Vallet, B. Soheilian, N. Paparoditis. Uncertainty propagation for terrestrial mobile laser scanner. ISPRS XXIII Congress, Prague, July 2016.
- (Vallet et al., 2015b) B. Vallet, W. Xiao, M. Brédif. Extracting mobile objects in images using a Velodyne Lidar point cloud. Photogrammetric Image Analysis, Munich, Germany, March 2015.
- (Vallet and Papelard, 2015) B. Vallet, J.-P. Papelard. Road Orthophoto/DTM generation from mobile laser scanning. CMRT15, La Grande Motte, France, October 2015.
- (Cléry et al., 2014) I. Cléry, M. Pierrot-Deseilligny, B. Vallet. Automatic georeferencing of a heritage of old analog aerial photographs. Photogrammetric Computer Vision - PCV 2014, Zurich, Switzerland, 5th - 7th September 2014.

- (Vallet et al., 2014) B. Vallet, B. Soheilian, M. Brédif. Combinatorial clustering and its application to 3D polygonal traffic sign reconstruction from multiple images. Photogrammetric Computer Vision - PCV 2014, Zurich, Switzerland, 5th - 7th September 2014.
- (Soheilian et al., 2013b) B. Soheilian, O. Tournaire, N. Paparoditis, B. Vallet, J.-P. Papelard. Generation of an integrated 3D city model with visual landmarks for autonomous navigation in dense urban areas. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Gold Coast, Australia, 23-26 June 2013.
- (Demantké et al., 2013) J. Demantké, B. Vallet, N. Paparoditis. Facade Reconstruction with Generalized 2.5D Grids. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Laser Scanning, 2013.
- (Monnier et al., 2013a) F. Monnier, B. Vallet, N. Paparoditis, J.-P. Papelard, N. David. Registration of Terrestrial Mobile Laser Data on 2D and 3D Geographic Database by Use of a Non-Rigide ICP Approach. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Laser Scanning, 2013.
- (Vallet, 2013) B. Vallet. Homological persistence for shape based change detection between Digital Elevation Models. ISPRS Annals – Volume II-3/W2, WGIII/3 ISA13 – The ISPRS Workshop on Image Sequence Analysis, pp.49-54, Antalya, Turkey, 11 November 2013.
- (Xiao et al., 2013) W. Xiao, B. Vallet, N. Paparoditis. Change Detection in 3D Point Clouds Acquired by a Mobile Mapping System. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, pp.331-336, Antalya, Turkey, November 2013.
- (Demantke et al., 2012) J. Demantke, B. Vallet, N. Paparoditis. Streamed Vertical Rectangle Detection in Terrestrial Laser Scans for Facade Database Production. XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Melbourne, Australia, August 2012.
- (Hammoudi et al., 2012b) K. Hammoudi, F. Dornaika, B. Soheilian, B. Vallet, J. McDonald, N. Paparoditis. Recovering quasi-real occlusion-free textures for facade models by exploiting fusion of image and Laser street data and image inpainting. In Proc. International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS), Dublin, Ireland , May 2012.
- (Hammoudi et al., 2012a) K. Hammoudi, F. Dornaika, B. Soheilian, B. Vallet, N. Paparoditis. Generating Occlusion-free Textures for Virtual 3D Model of Urban Facades by Fusing Image and Laser Street Data. In Proc. IEEE Virtual Reality 2012, California, USA, March 2012.
- (Monnier et al., 2012) F. Monnier, B. Vallet, B. Soheilian. Trees Detection from LASER Point Clouds Acquired in Dense Urban Areas by a Mobile Mapping System. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, pp. 245-250, 2012, XXII ISPRS Congress , Melbourne, Australia, 25 August – 01 September 2012.
- (Lelégard et al., 2012) L. Lelégard, E. Delaygue, M. Brédif, B. Vallet. Detecting and Correcting Motion Blur from Images Shot with Channel-dependent Exposure Time. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

- Sciences, Volume I-3, pp.341-346, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 25 August – 01 September 2012.
- (Demantké et al., 2011) J. Demantké, C. Mallet, N. David, B. Vallet. Dimensionality based scale selection in 3D lidar point cloud. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Laserscanning 2011, Calgary, Canada, August 2011.
  - (Lelégard et al., 2011) L. Lelégard, B. Vallet, M. Brédif. Multiscale Haar transform for blur estimation from a set of images. PIA11, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38 (3/W22), pp. 65-70, Munich, Germany, 5-7 October 2011.
  - (Vallet and Houzay, 2011) B. Vallet, E. Houzay. Fast and accurate visibility computation in urban scenes. PIA11, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38 (3/W22), pp. 77-82, Munich, Germany, 5-7 October 2011.
  - (Vallet et al., 2010b) B. Vallet, M. Pierrot-Deseilligny, M. Brédif, D. Boldo. Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3D : une approche par découpe et fusion. in Actes du 17ème congrès francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Caen, France, Janvier 2010.
  - (Lelégard et al., 2010) L. Lelégard, M. Brédif, B. Vallet, D. Boldo. Motion blur detection in aerial images shot with channel-dependent exposure time . International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38, part 3A, pp. 180-185, Saint-Mandé, France, 1-3 September 2010.
  - (Burochin et al., 2010) J.-P. Burochin, B. Vallet, O. Tournaire, N. Paparoditis. A Formulation For Unsupervised Hierarchical Segmentation Of Façade ImagesWith Periodic Models . International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38, part 3A, pp. 227-232, Saint-Mandé, France, 1-3 September 2010.
  - (Vallet et al., 2009) B. Vallet, P. Pierrot-Deseilligny, D. Boldo. Building Footprint Database Improvement for 3D reconstruction : a Direction Aware Split and Merge Approach. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 38 (Part 3/W4), pp.139-144, Paris, France, September 2009.
  - (Vallet and Taillandier, 2005) F. Taillandier, B. Vallet. Fitting Constrained 3D Models in Multiple Aerial Images. BMVC, Oxford, UK, 2005.

## 8.4 Articles de conférences sans comité de lecture

- (Brédif et al., 2016) M. Brédif, B. Vallet, B. Ferrand. Distributed dimensionality-based rendering of lidar point clouds. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GeoBigData), Volume : XL-3/W5.
- (Caraffa et al., 2016) L. Caraffa, M. Brédif, B. Vallet. 3D octree based watertight mesh generation from ubiquitous data. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GeoBigData), Volume : XL-3/W5.

# Bibliographie

- Aijazi, A. K., Checchin, P., and Trassoudaine, L. (2013). Segmentation based classification of 3d urban point clouds : A super-voxel based approach with evaluation. *Remote Sensing*, 5(4) :1624–1650. [38](#)
- Anguelov, D., Dulong, C., Filip, D., Frueh, C., Lafon, S., Lyon, R., Ogale, A., Vincent, L., and Weaver, J. (2010). Google street view : Capturing the world at street level. *Computer* 43 (6), pages 32–38. [16](#)
- Brédif, M. and Tournaire, O. (2012). librjmcmc : An Open-source Generic C++ Library for Stochastic Optimization. *XXnd Congress of the ISPRS, Melbourne, Australia*. [41](#)
- Brédif, M., Tournaire, O., Vallet, B., and Champion, N. (2013). Extracting polygonal building footprints from digital surface models : A fully-automatic global optimization framework. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77 :57–65. [53, 91](#)
- Brédif, M., Vallet, B., and Ferrand, B. (2016). Distributed dimensionality-based rendering of lidar point clouds. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GeoBigData), Volume : XL-3/W5*. [59, 94](#)
- Burochin, J.-P., Vallet, B., Brédif, M., Mallet, C., Brosset, T., and Paparoditis, N. (2014). Detecting blind building façades from highly overlapping wide angle aerial imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96 :193–209. [48, 91](#)
- Burochin, J.-P., Vallet, B., Tournaire, O., and Paparoditis, N. (2010). A formulation for unsupervised hierarchical segmentation of façade images with periodic models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38, part 3A, pp. 227-232, Saint-Mandé, France, 1-3 September*. [54, 94](#)
- Caraffa, L., Brédif, M., and Vallet, B. (2016). 3d octree based watertight mesh generation from ubiquitous data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GeoBigData), Volume : XL-3/W5*. [57, 94](#)
- Cléry, I., Pierrot-Deseilligny, M., and Vallet, B. (2014). Automatic georeferencing of a heritage of old analog aerial photographs. *Photogrammetric Computer Vision - PCV 2014, Zurich, Switzerland, 5th - 7th September*. [92](#)
- Demantke, J., Vallet, B., and Paparoditis, N. (2012). Streamed vertical rectangle detection in terrestrial laser scans for facade database production. *XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Melbourne, Australia, August*. [46, 54, 93](#)

- Demantké, J., Mallet, C., David, N., and Vallet, B. (2011). Dimensionality based scale selection in 3d lidar point cloud. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Laserscanning 2011, Calgary, Canada, August.* **46**, 76, 94
- Demantké, J., Vallet, B., and Paparoditis, N. (2013). Facade reconstruction with generalized 2.5d grids. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Laser Scanning.* **54**, 93
- Dempster, A. P. (2008). The dempster–shafer calculus for statisticians. *International Journal of Approximate Reasoning,* 48(2) :365–377. 32
- El-Sheimy, N. (1996). A mobile multi-sensor system for gis applications in urban centers. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. 31-B2*, pages 95–100. 16
- Elberink, S. O., Stoter, J., Ledoux, H., and Commandeur, T. (2013). Generation and dissemination of a national virtual 3d city and landscape model for the netherlands. *Photogrammetric engineering & remote sensing,* 79(2) :147–158. 39
- Gandolfi, S., Barbarella, M., Ronci, E., and Burchi, A. (2008). Close photogrammetry and laser scanning using a mobile mapping system for the high detailed survey of a high density area. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. 35-Part B5*, pages 909–914. 16
- Geiger, A., Lenz, P., and Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving ? the kitti vision benchmark suite. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 16
- Gidel, S., Checchin, P., Blanc, C., Chateau, T., and Trassoudaine, L. (2010). Pedestrian detection and tracking in an urban environment using a multilayer laser scanner. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 11(3) :579–588. 51
- Golovinskiy, A., Kim, V. G., and Funkhouser, T. (2009). Shape-based recognition of 3d point clouds in urban environments. In *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, pages 2154–2161. IEEE. 38
- Gontran, H., Skaloud, J., and Guilleron, P.-Y. (2007). A mobile mapping system for road data capture via a single camera. *Advances in mobile mapping technology, C. Tao and D. Li (Eds). Taylor & Francis Group, London*, pages 43–50. 16
- Goulette, F., Nashashibi, F., Abuhadrous, I., Ammoun, S., and Laugeau, C. (2006). An integrated on-board laser range sensing system for on-the-way city and road modelling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. 36-1.* 16
- Grajner-Brzezinska, D. (1996). Positioning accuracy of the gpsvan. *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of The Institute of Navigation*, pages 657–665. 16
- Hammoudi, K., Dornaika, F., Soheilian, B., Vallet, B., McDonald, J., and Paparoditis, N. (2012a). Recovering occlusion-free textured 3d maps of urban facades by a synergistic use of terrestrial images and 3d point clouds and area-based information. *Journal of Procedia Engineering (Elsevier) and Special Issue of International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors,* 41 C :971–980. 58, 92, 93

- Hammoudi, K., Dornaika, F., Soheilian, B., Vallet, B., McDonald, J., and Paparoditis, N. (2012b). Recovering quasi-real occlusion-free textures for facade models by exploiting fusion of image and laser street data and image inpainting. *Proc. International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS), Dublin, Ireland , May.* **58, 93**
- Hammoudi, K., Dornaika, F., Soheilian, B., Vallet, B., McDonald, J., and Paparoditis, N. (2013). A synergistic approach for recovering occlusion-free textured 3d maps of urban facades from heterogeneous cartographic data. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10. **58, 92**
- Hollaus, M., Mandlburger, G., Pfeifer, N., and Mücke, W. (2010). Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. *IAPRS*, 38 :1–3. **39**
- Kukko, A., Andrei, C.-O., Salminen, V.-M., Kaartinen, H., Chen, Y., Rönnholm, P., Hyppä, H., Hyppä, J., Chen, R., Haggrén, H., Kosonen, I., and Čapek, K. (2007). Road environment mapping system of the finnish geodetic institute—fgi roamer. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39, pages 241–247. **16**
- Lelégard, L., Brédif, M., Vallet, B., and Boldo, D. (2010). Motion blur detection in aerial images shot with channel-dependent exposure time. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, vol. 38, part 3A, pp. 180-185, Saint-Mandé, France, 1-3 September. **58, 94**
- Lelégard, L., Delaygue, E., Brédif, M., and Vallet, B. (2012). Detecting and correcting motion blur from images shot with channel-dependent exposure time. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, pp.341-346, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 25 August – 01 September.* **58, 93**
- Lelégard, L., Vallet, B., and Brédif, M. (2011). Multiscale haar transform for blur estimation from a set of images. *PIA11, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, vol. 38 (3/W22), pp. 65-70, München, Germany, 5-7 October. **58, 94**
- Li, W.-C., , Vallet, B., Ray, N., and Levy, B. (2006). Representing higher-order singularities in vector fields on piecewise linear surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proceedings Visualization '06)*, to appear. **70**
- Long, J., Shelhamer, E., and Darrell, T. (2015). Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3431–3440. **39**
- Mastin, A., Kepner, J., and Fisher, J. (2009). Automatic registration of lidar and optical images of urban scenes. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, pages 2639–2646. IEEE. **44**
- Merkel, D. (2014). Docker : Lightweight linux containers for consistent development and deployment. *Linux J.*, 2014(239). **62**

- Mezian, M., Vallet, B., Soheilian, B., and Paparoditis, N. (2016). Uncertainty propagation for terrestrial mobile laser scanner. *ISPRS XXIII Congress, Prague, July.* **44**, 92
- Miled, M., Soheilian, B., Habets, E., and Vallet, B. (2016). Hybrid online mobile laser scanner calibration through image alignment by mutual information. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 12-19 July.* **44**, 78, 92
- Monnier, F., Vallet, B., Paparoditis, N., Papelard, J.-P., and David, N. (2013a). Mise en cohérence de données laser mobile sur un modèle cartographique par recalage non-rigide. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 202 :27–41. **43**, 78, 92, 93
- Monnier, F., Vallet, B., Paparoditis, N., Papelard, J.-P., and David, N. (2013b). Registration of terrestrial mobile laser data on 2d and 3d geographic database by use of a non-rigid icp approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Laser Scanning.* **43**, 78
- Monnier, F., Vallet, B., and Soheilian, B. (2012). Trees detection from laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, pp. 245-250, 2012, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 25 August – 01 September.* **46**, 93
- Mumford, D. and Shah, J. (1989). Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications on pure and applied mathematics*, 42(5) :577–685. **45**
- Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N., and Houzay, E. (2012). Stereopolis ii : A multi-purpose and multi-sensor 3d mobile mapping system for street visualisation and 3d metrology. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 200, pages 69–79. **15**, 16
- Ray, N., Vallet, B., Alonso, L., and Lévy, B. (2009). Geometry aware direction field processing. *ACM Transactions on Graphics.* **70**
- Ray, N., Vallet, B., Li, W.-C., and Lévy, B. (2008). N-symmetry direction field design. In *ACM Transactions on Graphics*. Presented at SIGGRAPH. **70**
- Salinas, D., Lafarge, F., and Alliez, P. (2015). Structure-aware mesh decimation. In *Computer Graphics Forum*, volume 34, pages 211–227. Wiley Online Library. **63**
- Sentz, K. and Ferson, S. (2002). *Combination of evidence in Dempster-Shafer theory*, volume 4015. Citeseer. **34**
- Serna, A. and Marcotegui, B. (2014). Detection, segmentation and classification of 3d urban objects using mathematical morphology and supervised learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93 :243–255. **38**
- Soheilian, B., Paparoditis, N., and Vallet, B. (2013a). Detection and 3d reconstruction of traffic signs from multiple view color images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77 :1–20. **56**, 91

- Soheilian, B., Tournaire, O., Paparoditis, N., Vallet, B., and Papelard, J.-P. (2013b). Generation of an integrated 3d city model with visual landmarks for autonomous navigation in dense urban areas. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Gold Coast, Australia, 23-26 June.* **56**, **78**, **93**
- Syed, S., Dare, P., and Jones, S. (2005). Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and lidar data : an object-oriented approach. In *Proceedings of SSC2005 spatial intelligence, innovation and praxis : the national biennial conference of the spatial sciences institute*, pages 512–522. Melbourne : Spatial Science Institute Melbourne. **41**
- Vallet, B. (2013). Homological persistence for shape based change detection between digital elevation models. *ISPRS Annals – Volume II-3/W2, WGIII/3 ISA13 – The ISPRS Workshop on Image Sequence Analysis, pp.49-54, Antalya, Turkey, 11 November.* **48**, **93**
- Vallet, B., Angelini, E., and Laine, A. (2006). Variational segmentation framework in prolate spheroidal coordinates for 3d real-time echocardiography. *SPIE Conference on Medical Imaging, San Diego, CA, USA, Vol. 6144.* **70**
- Vallet, B., Brédif, M., Serna, A., Marcotegui, B., and Paparoditis, N. (2015a). Terramobilita/iqmulus urban point cloud analysis benchmark. *Computers & Graphics*, 49 :126–133. **47**, **86**, **91**
- Vallet, B. and Houzay, E. (2011). Fast and accurate visibility computation in urban scenes. *PIA11, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), vol. 38 (3/W22), pp. 77-82, Münich, Germany, 5-7 October.* **58**, **94**
- Vallet, B. and Lelégard, L. (2013). Partial iterates for symmetrizing non-parametric color correction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82 :93–101. **58**, **92**
- Vallet, B. and Lévy, B. (2008). Spectral geometry processing with manifold harmonics. *Computer Graphics Forum (Proceedings Eurographics).* **71**
- Vallet, B. and Mallet, C. (2016a). Analyses de scènes avec un véhicule de cartographie mobile (chapitre 2). In *Télédétection pour l'Observation des Surfaces Continentales en zones urbaines et côtières, Baghdadi N., Zribi M. (Eds), ISTE, Elsevier.* **15**, **91**
- Vallet, B. and Mallet, C. (2016b). Urban mapping with the mobile mapping technology (chapter 2). In *Land Surface Remote Sensing in Urban and Coastal Areas, Baghdadi N., Zribi M. (Eds), Elsevier.* **91**
- Vallet, B. and Papelard, J.-P. (2015). Road orthophoto/dtm generation from mobile laser scanning. *CMRT15, La Grande Motte, France, October.* **59**, **78**, **92**
- Vallet, B., Pierrot-Deseilligny, M., Boldo, D., and Brédif, M. (2011). Building footprint database improvement for 3d reconstruction : A split and merge approach and its evaluation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 :732–742. **53**, **92**
- Vallet, B., Pierrot-Deseilligny, M., Brédif, M., and Boldo, D. (2010a). Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3d : une approche par découpe et fusion. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 195 :42–50. **53**, **92**

- Vallet, B., Pierrot-Deseilligny, M., Brédif, M., and Boldo, D. (2010b). Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3d : une approche par découpe et fusion. *Actes du 17ème congrès francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Caen, France, Janvier.* **53, 94**
- Vallet, B., Pierrot-Deseilligny, P., and Boldo, D. (2009). Building footprint database improvement for 3d reconstruction : a direction aware split and merge approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 38 (Part 3/W4), pp.139-144, Paris, France, September.* **53, 94**
- Vallet, B., Soheilian, B., and Brédif, M. (2014). Combinatorial clustering and its application to 3d polygonal traffic sign reconstruction from multiple images. *Photogrammetric Computer Vision - PCV 2014, Zurich, Switzerland, 5th - 7th September.* **22, 45, 56, 93**
- Vallet, B. and Taillandier, F. (2005). Fitting constrained 3d models in multiple aerial images. *BMVC, Oxford, UK.* **53, 69, 94**
- Vallet, B., Xiao, W., and Brédif, M. (2015b). Extracting mobile objects in images using a velodyne lidar point cloud. *Photogrammetric Image Analysis, Munich, Germany, March.* **51, 92**
- Velizhev, A., Shapovalov, R., and Schindler, K. (2012). Implicit shape models for object detection in 3d point clouds. In *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, volume 2. **50**
- Verdie, Y., Lafarge, F., and Alliez, P. (2015). LOD Generation for Urban Scenes. *ACM Trans. on Graphics, 34(3).* **39**
- Waechter, M., Moehrle, N., and Goesele, M. (2014). Let there be color ! large-scale texturing of 3d reconstructions. In *European Conference on Computer Vision*, pages 836–850. Springer. **63**
- Weinmann, M., Jutzi, B., Hinz, S., and Mallet, C. (2015a). Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105* :286–304. **34**
- Weinmann, M., Mallet, C., Jutzi, B., and Hinz, S. (2015b). Efficient interpretation of 3d point clouds by assessing feature relevance. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 10/2015* :308–315. **34**
- Weinmann, M., Urban, S., Hinz, S., Jutzi, B., and Mallet, C. (2015c). Distinctive 2d and 3d features for automated large-scale scene analysis in urban areas. *Computers & Graphics, 49* :47 – 57. **39**
- White, T. (2009). *Hadoop : The Definitive Guide*. O'Reilly Media, Inc., 1st edition. **62**
- Xiao, W., Vallet, B., Brédif, M., and Paparoditis, N. (2015). Street environment change detection from mobile laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 38* :38–49. **50, 91**
- Xiao, W., Vallet, B., and Paparoditis, N. (2013). Change detection in 3d point clouds acquired by a mobile mapping system. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, pp.331-336, Antalya, Turkey, November.* **50, 93**

- Xiao, W., Vallet, B., Schindler, K., and Paparoditis, N. (2016). Street-side vehicle detection, classification and change detection using mobile laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114 :166–178. [50](#), [91](#)

