



Contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points

Tania Landes

► To cite this version:

Tania Landes. Contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Strasbourg, 2020. tel-03210034

HAL Id: tel-03210034

<https://theses.hal.science/tel-03210034>

Submitted on 27 Apr 2021

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

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

Ecole doctorale n° 269 : « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur »
(ED 269)

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie
(ICUBE, UMR 7357)

Equipe Télédétection Radiométrie et Imagerie Optique (TRIO)

Habilitation à diriger les recherches
présentée par :

Tania LANDES

Discipline : Sciences de l'Ingénieur / Spécialité : Topographie, Géomatique

**Contribution à la segmentation
et à la modélisation 3D du milieu urbain
à partir de nuages de points**

Soutenue le 1^{er} décembre 2020

Garant scientifique : **M. Pierre GRUSSENMEYER**, INSA Strasbourg, France

Membres du jury

M. Christian HEIPKE	Leibniz Universität Hannover, Allemagne	Rapporteur
Mme Rafika HAJJI	Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc	Rapporteuse
M. François GOULETTE	Mines Paris Tech, France	Rapporteur
Mme Nadia BAHLOULI	Université de Strasbourg, France	Présidente de jury
M. Nicolas PAPARODITIS	ENSG – IGN – Université Gustave Eiffel, France	Examineur
M. POLIDORI Laurent	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, France	Examineur
M. NAJJAR Georges	Université de Strasbourg, France	Examineur

Avant-propos

Ce mémoire synthétise le fruit de vingt années de recherches effectuées depuis mon arrivée à l'INSA Strasbourg. Il est structuré en deux parties : une **première partie** présente **un aperçu des avancées réalisées dans chacun de mes axes de recherche** ; une **deuxième partie** recueille de façon sommaire mes activités d'enseignement, de recherche et **administratives** passées et actuelles.

Mes travaux de **recherche** se focalisent sur une thématique spécifique de modélisation 3D d'objets urbains à partir de nuages de points. En évaluant la qualité des algorithmes développés sur la base de données acquises sur des sites patrimoniaux, nous espérons participer au rayonnement de la spécialité topographie, assez peu connue du grand public, tout en mettant en valeur le patrimoine architectural, urbain et paysager de nos territoires. La première partie du mémoire souligne d'une certaine façon l'importance de la topographie sur le chemin menant du nuage de points au modèle 3D.

Les nombreux projets de fin d'études venus nourrir ces travaux prouvent que nos recherches s'adossent naturellement à la formation dispensée dans nos murs et viennent simultanément enrichir des **enseignements** en instruments et méthodes, lasergrammétrie, photogrammétrie, compensation de réseaux, initiation à la recherche voire en générer de nouveaux, comme récemment l'initiation au processus BIM (*Building Information Modeling*). La deuxième partie du mémoire en témoigne.

Enfin, les thématiques **multi-disciplinaires** auxquelles j'ai contribué m'ont donné la chance de collaborer avec des spécialistes de divers métiers, en plus de ceux de la topographie, tels que l'archéologie, l'architecture, la géographie, la climatologie, le droit, le génie civil, la communication, la mécanique, les mathématiques, l'informatique, l'histoire et la liste ne demande qu'à s'allonger. De côtoyer cette diversité de métiers et leurs problématiques spécifiques a éveillé ma curiosité intellectuelle et naturellement enrichi mes recherches, mais de toutes ces expériences, je retiendrai avant tout les précieuses rencontres humaines qu'elles auront occasionnées.

*« Le seul véritable voyage (...),
ce ne serait pas d'aller
vers de nouveaux paysages,
mais d'avoir d'autres yeux. »*

Marcel Proust

Remerciements

J'adresse, en premier lieu, mes remerciements à l'ensemble des membres du jury. C'est un réel honneur pour moi que vous m'accordiez de votre temps, compte tenu des nombreuses responsabilités qui vous incombent par ailleurs.

Je suis particulièrement reconnaissante envers Rafika Hajji, François Goulette et Christian Heipke, d'avoir spontanément accepté la lourde mission de rapporteuse et rapporteurs de ce travail. Je vous remercie par avance pour vos commentaires et suggestions qui enrichiront assurément nos perspectives de recherche. Ich möchte mich ganz besonders bei Christian Heipke bedanken, der sich die Mühe gegeben hat, diese Arbeit auf Französisch zu lesen. Es ist mir eine außerordentliche Ehre Christian Heipke, Präsident der ISPRS, als Referenten zu haben.

Je souhaite ensuite adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des étudiant.es et doctorant.es qui ont consacré de leur temps et de leur matière grise à faire progresser nos problématiques de recherche. Quelle satisfaction d'assister à cet instant précis où vous vous appropriez le sujet et où vous laissez se révéler votre incroyable potentiel ! Les « hauts et les bas » qui ponctuent une thèse de doctorat auront permis de partager avec vous des moments intenses et inoubliables.

A ce stade, j'aimerais exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes avec qui j'ai collaboré mais surtout qui ont contribué à ce que ce mémoire d'habilitation à diriger la recherche voie (enfin) le jour. Certains ont usé de stratégies subtils, d'autres m'ont encouragée autrement, mais toujours de façon chaleureuse et bienveillante, à prendre ma plume et à mener ce travail jusqu'au bout. Voilà enfin ce moment tant attendu et agréable qui me donne le droit de les appeler sur le devant de la scène.

Pierre Grussenmeyer, tu as joué un rôle décisif dans mon parcours professionnel et par ricochet dans ma vie personnelle également. Tu m'as indiqué la voie à suivre pour embrasser le métier passionnant que j'exerce aujourd'hui. Capitaine, mais aussi moteur pour notre équipe, tu tiens la barre et je réitère mon message adressé à l'issue du gala mémorable de fin de congrès du CIPA 2013 : merci de m'avoir invitée à monter dans ta barque !

Georges Najjar, ta bienveillance à mon égard, mêlée à ton enthousiasme communicatif pour la climatologie urbaine, ont constitué un « îlot de chaleur » humain central pour moi, avec un indice de confort inégalé grâce à la présence de *George's tree*.

Laurent Polidori, tes encouragements amicaux et tes remarques « non complaisantes », mais tellement constructives ont fait de toi mon coach mental « *high-dynamic-range* » et m'ont motivée à réaliser ce travail de synthèse. J'admire ton niveau d'exigence et ta capacité à transmettre l'envie de se surpasser.

Je tiens également à remercier mes collègues topographes : Hélène, Mathieu, Pierre, Jacques, Emmanuel, Gilbert, Samuel et Daniel, que je retrouve avec grand plaisir au quotidien. Nous avons à cœur et en commun, de participer à la formation de bons ingénieurs topographes tout en essayant d'intensifier nos activités de recherche, malgré nos charges administratives et d'enseignement. Samuel, ta générosité et ta curiosité sont précieuses pour notre équipe ; je ne conçois pas une journée de terrain sans toi. Ma chère Hélène, quelle joie que tu aies rejoint notre équipe et accepté de prendre le relais de l'organisation des Journées de la Topographie. L'avenir s'annonce coloré, comme tes macarons et ponctué de points d'exclamation !

Pour des moments inoubliables partagés sur des sites exceptionnels, mes remerciements s'adressent aussi aux très nombreux professionnels de divers horizons rencontrés sur ma route, dont Gertrud Kuhnle, Matthias Heissler, Pierre Kastendeuch, Rollins Guild, Marc Saudreau, Jean-Jacques Schwien, Sabine Bengel, Maxime Werlé...et tant d'autres encore. Mes pensées vont également à M. Tschaen, qui ne manque jamais d'évoquer notre devoir de faire évoluer la formation de nos élèves.

La rédaction d'un mémoire de ce type ne peut se réaliser sans sacrifier des soirées, des nuits et des week-ends. Je remercie très affectueusement ma grande et ma petite famille, en particulier ma fille Anna, ainsi que mes cher.es ami.es, pour leur patience, leur compréhension et leurs encouragements. Merci à Hélène, *uncle* Marcel, Steffen et Brigitte pour la relecture minutieuse de ce mémoire, à la virgule près.

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma mère, non seulement d'avoir éveillé ma vocation d'enseignante en m'offrant un tête-à-tête, du haut de mes 7 ans, avec un gigantesque tableau noir et de magnifiques craies multicolores, mais aussi et surtout pour son soutien indéfectible. Je « *like* » sa devise « *Donne le meilleur de toi-même, et ce sera très bien* » !

Résumé

La modélisation 3D répond à la fois à un enjeu économique mais aussi environnemental, que ce soit à l'échelle du bâtiment ou de la ville. Ces dix dernières années, les techniques d'acquisitions ont considérablement évolué du point de vue de leur rapidité, du volume de données à gérer, de l'hétérogénéité des informations acquises par les systèmes multi-capteurs, de même que les méthodes de traitement des données. De nouveaux processus sont nés de ces bouleversements, comme le processus « *scan-to-BIM* » caractérisant les étapes menant du nuage de points à une maquette numérique intelligente. En adoptant la maquette numérique, intégrée dans un processus collaboratif BIM (*Building Information Modeling*), les acteurs du bâtiment sont en mesure d'effectuer des simulations et de réduire, en plus des coûts, l'impact environnemental lié aux interventions sur le bâtiment, tout au long de son cycle de vie. En pratique, pour aboutir à une maquette numérique intelligente du bâtiment à partir d'un relevé de l'existant, de nombreux verrous technologiques sont à lever. Dans ce contexte, j'ai eu la chance d'encadrer divers travaux de recherches portant sur les thématiques de l'acquisition de données 3D (généralement sous formes de nuages de points 3D) à leur traitement, jusqu'à la production de la maquette numérique.

Au travers des thèses que j'ai eu l'occasion de suivre, j'ai participé à la création et la mise en œuvre de chaînes de traitements de nuages de points acquis par LiDAR¹ aéroporté, LiDAR terrestre et autres capteurs 3D. Ces travaux ont permis d'aboutir au développement de systèmes d'acquisitions innovants (thèse Mittet, 2015), d'algorithmes de consolidations (thèses Hullo, 2013 et Lachat, 2019), **de segmentation et de modélisations de nuages de points pour la reconstruction de bâtiments** (thèse Tarsha-Kurdi, 2008), de façades (thèse Boulaassal, 2010) et d'intérieurs de bâtiments (thèse Macher, 2017). La question de l'évaluation de la qualité des modèles a été abordée dans chacune des thèses, en particulier à l'échelle du bâtiment entier (thèse Mohamed, 2013).

Souhaitant mettre au profit de problématiques environnementales l'expérience acquise au travers de l'ensemble de ces travaux de la phase de relevés à celle de la production de la maquette numérique, le regard longtemps focalisé sur le bâtiment s'est alors tourné vers d'autres objets urbains que sont **les arbres en ville**, avec l'ambition de les reconstruire en 3D. Ce défi audacieux a été relevé, grâce à l'impulsion de spécialistes en climatologie urbaine de l'équipe ICube-TRIO. Il a finalement permis de créer un nouvel axe de recherche au sein de notre équipe : **l'apport de la lasergrammétrie à la modélisation du climat urbain**. En répondant au besoin, pour les modèles de simulation du climat urbain, de disposer de reconstructions 3D fidèles des arbres, nous avons, par la même occasion, été initiés à l'impact des arbres sur la création de microclimats urbains. Débutée à l'échelle de l'arbre et d'un parc (thèse Bournez, 2018), l'étude se poursuit actuellement à l'échelle de la ville et de la région (thèse Philipps, en cours).

Nous rappellerons, dans la première partie de ce mémoire, les avancées majeures dans chaque étape de la chaîne de traitements mise en place, avant de proposer des perspectives de recherche. Dans le processus du « *scan-to-BIM* », la segmentation essentiellement géométrique méritera d'être enrichie d'information sémantique pour aboutir à une maquette numérique de bâtiment intelligente, appelée également « jumeau numérique ». Les efforts que nous mènerons en ce sens seront également profitables aux modèles climatiques urbains, ces derniers exigeant notamment la connaissance de la géométrie urbaine. Le tout sera accompagné d'un souci permanent de maîtriser les erreurs affectant la chaîne de traitement et par voie de conséquence les modèles qui en découlent.

Au vu de la sensibilité grandissante de nos pays européens à une économie verte, qui se traduit notamment par l'accompagnement de la transition énergétique, l'avenir laisse entrevoir de belles perspectives d'évolution aux thématiques de recherche de notre équipe.

¹ LiDAR : *Light Detection and Ranging*

Abstract

3D modeling responds to both an economic and an environmental issue, whether at the building or at city scale. Over the past ten years, acquisition techniques have evolved considerably in terms of their speed, the amount of data to be managed, the heterogeneity of information acquired by multi-sensor systems, as well as in terms of processing methods. In this context, new processes such as the “scan-to-BIM” process have emerged. It characterizes the steps leading from point cloud to an intelligent digital model called BIM (Building Information Modeling). By adopting the digital model, building stakeholders are able to perform simulations and reduce, in addition to costs, the environmental impact related to interventions on the building, throughout its life cycle. In practice, to achieve an intelligent digital building model from a survey, many technological obstacles need to be overcome. In this context, I had the chance to supervise various research works on the topics of 3D data acquisition, from the processing of this data to the production of the 3D digital model.

Through doctoral research studies that I had the opportunity to co-supervise, I participated in the construction of processing chains on point clouds acquired by airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and other 3D sensors. This work has led to the development of innovative acquisition systems (PhD Mittet, 2015), registration algorithms (PhD Hullo, 2013 and PhD Lachat, 2019), **segmentation and modeling of point clouds for the reconstruction of buildings** (PhD Tarsha-Kurdi, 2008), of facades (PhD Boulaassal, 2010) and of indoor scenes (PhD Macher, 2017). The issue of assessing the quality of models was addressed in every thesis, particularly at the scale of buildings (Mohamed thesis, 2013).

Based on the experience acquired through all of this work, we focused also on environmental issues, with the ambition to reconstruct urban trees in 3D. This daring challenge was met, thanks to the collaboration of specialists in urban climatology from the ICube-TRIO team. Finally, a new topic of research has been created within our team: the contribution of laserscanning to urban climate modeling. Urban climate simulation models need truthful 3D models of trees in order to assess the impact of vegetation on the creation of urban microclimates. A first work has shown that the challenge can be faced at the tree level and a park level (PhD Bournez, 2018). The study is currently continuing at city and regional levels (PhD Philipps).

In the first part of this work, we will recall the major advances in each step of the established processing chain, before proposing research perspectives. In the “scan-to-BIM” process, the segmentation, up to now mainly geometric, deserves to be enriched with semantic information in order to result in a so-called “digital twin” of the building. The efforts that we will carry out in this direction will also benefit urban climatological models, which require knowledge of urban geometry. To control the errors affecting the models delivered by the processing chain remains a center of interest.

In view of our skills and the growing interest of our European countries for a green economy and for energy transition, the future offers good prospects for the development of our team's research topics.

Table des matières

Avant-Propos.....	i
Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Abstract.....	vi

Partie 1 : Synthèse des travaux de recherche..... 1

1. Introduction générale	2
2. Acquisition de données.....	5
2.1 De la tachéométrie à la lasergrammétrie.....	5
2.2 Scanners et stations totales : chronique d'une fusion annoncée ?	9
2.2.1 Lorsque la station totale se dote des atouts d'un scanner	9
2.2.2 Lorsque le scanner se dote des atouts d'une station totale	11
2.3 Du statique au mobile	12
3. Consolidation et/ou géoréférencement de nuages de points	15
3.1 Consolidation et géoréférencement, en théorie.....	15
3.2 La consolidation, en pratique : un puzzle mouvant	17
4. Prétraitement de nuages de points.....	19
5. Segmentation et classification.....	20
5.1 Une définition pour la segmentation	20
5.2 Segmentations basées sur le nuage de points	20
5.3 Méthodologies de segmentations développées	22
5.3.1 Segmentation de contours de toits.....	22
5.3.2 Segmentation de façades	25
5.4 Classification de nuages de points	27
5.4.1 Détection de sols/plafonds/murs.....	28
5.4.2 Détection d'ouvertures	30
6. Modélisation de nuages de points	33
6.1 Une définition pour la modélisation	33
6.1.1 Modélisation par maillage.....	34
6.1.2 Modélisation par primitives géométriques.....	35
6.2 Méthodologie de reconstruction 3D d'arbres.....	36
6.2.1 La 3D pour les modèles climatiques.....	36
6.2.2 Reconstruction 3D d'arbres en ville	37
6.3 Méthodologies de reconstruction 3D de bâtiments	39
6.3.1 Reconstruction de bâtiments	39
6.3.2 Reconstruction d'éléments de façades	40
6.3.3 Reconstruction d'éléments en intérieur	42

7. Evaluation de la qualité des résultats	43
7.1 Erreurs liées à l'acquisition des données	45
7.1.1 Erreurs liées à l'instrument de mesure	45
7.1.2 Erreurs liées au mode opératoire	46
7.2 Erreurs liées à l'objet numérisé	48
7.3 Erreurs liées à la chaîne de traitements	49
7.3.1 Approches mises en place pour évaluer l'étape de segmentation	49
7.3.2 Approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation	52
7.3.3 Degré d'automatisation des chaînes de traitements	60
7.3.4 Qualité et niveau de détail	60
7.3.5 Evaluation de modèles restitués	64
8. Conclusion générale et perspectives	67
8.1 Processus scan-to-BIM : considérer la segmentation sémantique	68
8.2 Du multi-capteurs aux multi-applications environnementales	70
8.3 Modèles 3D comme jumeaux numériques	72
8.4 Rapprochement et interaction utilisateur-modèle 3D (RV, RA)	73
8.5 Qualification des modèles 3D	74
9. Références citées dans le mémoire	76
10. Liste complète des travaux publiés depuis 1999	86

Partie 2 : Curriculum Vitae et synthèse des activités de maître de conférences.....98

1. Curriculum vitae	99
2. Activités d'ENSEIGNEMENT	100
2.1 Créations de nouveaux modules d'enseignements	100
2.2 Charge d'enseignement au fil des années	101
2.3 Activités et responsabilités liées à l'enseignement	101
3. Activités de RECHERCHE	103
3.1 Publications et production scientifique	103
3.2 Co-encadrement de thèses	104
3.3 Encadrement de stages de recherche	107
3.3.1 Encadrement de Projets de Fin d'Etudes PFE (stages de Master II)	108
3.3.2 Encadrement d'étudiants en Projet de Recherche Technologique (PRT)	109
3.4 Diffusion des travaux (rayonnement et vulgarisation)	112
3.4.1 Direction d'Ouvrages	112
3.4.2 Ouvrages de vulgarisation	112
3.4.3 Conférences invitées, séminaires grand public et autres	112
3.4.4 Expertises pour instances nationales et étrangères réputées (2014-2020)	113

3.4.5	Membre de jurys de thèses.....	114
3.4.6	Membre de jury de Master extérieur à l'INSA Strasbourg.....	114
3.4.7	Distinctions.....	114
3.5	Responsabilités scientifiques.....	115
3.5.1	Responsabilités dans des sociétés savantes.....	115
3.5.2	Organisation de congrès internationaux.....	116
3.5.3	Participation à des programmes nationaux.....	117
3.5.4	Responsabilité de contrats de recherche, publics et industriels (PRT ou PFE).....	118
4.	Activités ADMINISTRATIVES au sein de l'INSA Strasbourg.....	120

ANNEXES	121
A.1. Systèmes de lasergrammétrie et domaines d'utilisation	122
A.2. Géoréférencement direct et indirect.....	122
A.3. Approche de recalage global de nuages de points hétérogènes.....	124
A.4. Approches frontières et approches régions	124
A.5. Segmentations basées sur l'image	125
A.6. Approches de classification supervisée	125
A.7. Reconstruction 3D détaillée du feuillage d'un arbre.....	126
A.8. Résolution, pas, exactitude et précision : quelques rappels	126
A.9. Comparaison d'outils de reconstruction 3D d'arbres.....	129
A.10. Niveaux de détails, norme britannique et américaine	129
A.11. Niveau de connaissance versus nature de l'élément restitué.....	132
A.12. Enseignements dispensés en 2019/2020	133
A.13. Enseignements dispensés dans d'autres établissements.....	134
A.14. Formations continues dispensées	134

*N.B. Les **références bibliographiques citées dans ce mémoire** sont rassemblées en fin de première partie, page 76 ; celles dont je suis co-auteure sont mises en évidence par la couleur de police (**référence en bleu**). La **liste de toutes mes publications** est fournie page 86 et présente les travaux rangés par type de publication (ex : [\[AICL-1\]](#)).*

PARTIE I :

Synthèse des travaux de recherche

1. Introduction générale

Ce mémoire met en perspective les activités de recherche menées, depuis mon recrutement en 1999 en tant qu'enseignante puis maître de conférences, dans le domaine du traitement de nuages de points. S'il ne rentre pas dans le détail technique des travaux, il met en avant la cohérence entre les projets réalisés et leur articulation logique autour de mes axes de recherche. Les travaux développés ont toujours eu en toile de fond le métier d'ingénieur géomètre topographe et pour ligne de mire l'objectif d'automatiser les traitements chronophages qu'il est amené à effectuer, avec le souci, à moyen terme et dans une modeste mesure, de contribuer à faciliter son quotidien.

Après une thèse soutenue en 2000 et réalisée au sein de l'institut de photogrammétrie et de télédétection (IPF, *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung*) de l'Université technique de Karlsruhe (devenue KIT, *Karlsruhe Institute of Technology*), j'ai rejoint l'équipe de recherche en topographie de l'INSA Strasbourg, alors rattachée à l'UMR MAP CNRS/MCC 694.

Après une plongée dans la détection de paramètres hydrauliques par traitement d'images radar durant mes 3 ans de thèse, j'ai opéré une légère reconversion thématique pour faciliter mon intégration à l'équipe en place, dont le thème de recherche principal était la **photogrammétrie architecturale**. Initialement rattachée au LERGEC (Laboratoire d'Etudes et de Recherche en Génie Civil), notre équipe a rejoint l'unité mixte de recherche n°694 du laboratoire MAP (Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage), accueillant plusieurs équipes d'architectes, de 2002 à 2009. La stratégie développée par notre groupe PAGE de l'INSA (Photogrammétrie Architecturale et Géomatique) s'inscrivait alors dans le thème « outils numériques et patrimoine architectural » du MAP. Malgré notre rattachement ultérieur, en 2010, à l'Equipe TRIO (Télédétection, Radiométrie et Imagerie Optique) du Laboratoire LSIT devenu ICube UMR 7357 en 2013 (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie), nos thématiques de recherche sont restées étroitement liées au développement des outils de mesure, de compréhension, de représentation et de gestion du patrimoine urbain à partir de techniques topographiques. Les travaux mentionnés dans ce mémoire s'inscrivent dans les thèmes de recherche énumérés ci-dessous.

Thèmes de recherche

- Etude de systèmes et méthodes d'acquisition de données 3D par lasergrammétrie et modalités d'imagerie
- Cartographie et modélisation 3D d'objets topographiques et architecturaux (BIM) en milieu urbain
- Techniques et méthodes de numérisation 3D pour la documentation du patrimoine culturel.

Mes recherches portent essentiellement sur l'analyse et le développement de méthodes d'acquisition et de traitements de données 3D adaptées aux problématiques de modélisation tridimensionnelle des objets urbains. Les données sur lesquelles s'appuient mes travaux sont des nuages de points obtenus par techniques lasergrammétiques (systèmes actifs) ou indirectement par techniques photogrammétriques (systèmes passifs). En début de carrière, en raison des compétences acquises durant ma thèse (télédétection Radar), les problématiques liées au traitement d'images issues de capteurs satellitaires (du domaine du visible à l'infrarouge jusqu'aux hyperfréquences) faisaient partie de mes centres d'intérêt. Au fil des années, les circonstances ont voulu que je me concentre davantage sur les données lasergrammétiques et que je me rapproche progressivement de l'objet, en menant des recherches à l'échelle de la ville (exploitation de données satellites puis ariennes) ensuite à celle des bâtiments en extérieur, puis en intérieur et enfin à l'échelle des arbres (exploitation de données terrestres).

Apports dans le domaine

Au travers des thèses que j'ai eu la chance de co-encadrer avec Pierre Grussenmeyer, j'ai participé à la création et la mise en œuvre de chaînes de traitements de nuages de points acquis par LiDAR aéroportés, LiDAR terrestre et autres capteurs 3D, dont un système innovant basé sur des caméras 3D et développé dans le cadre de la thèse de Marie-Anne Mittet (2015). Ces chaînes de traitements sont constituées d'algorithmes de consolidations (thèses Hullo, 2013 et Lachat, 2019), **de segmentation et de modélisations de nuages de points pour la reconstruction de bâtiments** à partir de données LiDAR aéroportées (thèses Tarsha-Kurdi, 2008 et Mohamed, 2013), de façades à partir de données LiDAR terrestres (thèse Boulaassal, 2010) et d'intérieurs de bâtiments (thèse Macher, 2017). Ces travaux nous ont donné une certaine légitimité pour participer à deux ANR : l'ANR URBANIA (2016-2018) et l'ANR BIOM (2017-2021).

Par ailleurs, les connaissances et compétences acquises dans le domaine du traitement de nuage de points m'ont permis d'ouvrir un nouvel axe de recherche au sein de notre équipe : **l'apport de la lasergrammétrie à la modélisation du climat urbain**, via la problématique de reconstruction 3D d'arbres en ville. Les travaux ont débuté avec des projets de recherche technologique, puis des projets de fin d'études pour finalement donner naissance à un sujet de thèse (thèse Bournez, 2018), encadré conjointement avec Georges Najjar et Pierre Kastendeuch, géographes et climatologues. Georges Najjar et Pierre Kastendeuch sont à l'origine de la création d'un réseau de plus d'une vingtaine de stations météorologiques distribuées dans Strasbourg et ses environs et effectuant, en continu, des mesures d'échanges radiatifs et de chaleur depuis bientôt 10 ans (Najjar et al., 2015 ; Neusch et al., 2003). L'ANR COOLTREES obtenue en 2017 et coordonnée par des collègues de l'INRA² de Clermont Ferrand s'appuie en grande partie sur ces mesures et sur les travaux de thèse mentionnés.

Du nuage au livrable : un chemin semé de jalons

Les deux grandes phases jalonnant une mission de relevé topographique dans le but de produire un livrable sont la phase **d'acquisition** et la phase de **traitement** de données. Alors que les systèmes d'acquisition se démocratisent à grande vitesse et permettent de relever des millions de points sur le terrain de façon aisée avec de moins en moins de besoins en termes de compétences topographiques, le temps gagné sur le terrain se répercute sur le temps de traitement exigé au bureau. Le nombre croissant de sujets de recherche portant sur le traitement des données issues de nouveaux systèmes de numérisation témoignent de l'actualité de ce thème.

Alors qu'il y a une vingtaine d'années, le topographe levait les points qui serviraient à l'établissement de son plan, il doit aujourd'hui extraire, parmi les milliers de points composant ses nuages, ceux qui serviront effectivement à fixer des contours caractéristiques de l'objet à lever. Le terme « digitalisation » qui s'appliquait autrefois au passage du papier au numérique prend alors une nouvelle signification, puisqu'il s'agit de dessiner, avec le nuage de points en support, l'élément numérique qui parfois sera reproduit sur un plan papier. Cela suppose toutefois que les multiples stations soient préalablement définies dans un même référentiel, au travers d'une étape de consolidation. Pour faciliter la reconnaissance, au sein du nuage, des éléments requis par le cahier des charges, une étape préliminaire de segmentation s'avère utile. Très souvent manuelle, donc non dénuée d'erreurs, la segmentation de nuages de plusieurs millions de points reste extrêmement chronophage et fortement dépendante de l'objet d'intérêt, c'est pourquoi la recherche de l'automatisation d'un tel processus est au centre des préoccupations dans de nombreux domaines (militaire, médical, industriel, etc.). De la même manière, dans l'optique de poursuivre le traitement

² INRA : Institut National de Recherche Agronomique

en vue de construire une maquette numérique de l'objet scanné, la modélisation est un sujet très convoité et gagne, de la même manière, à être automatisée.

Les étapes essentielles dans le processus menant du nuage à un livrable de type plan 2D ou maquette numérique 3D peuvent être déclinées en 6 phases clés :

- l'acquisition,
- la consolidation et/ou le géoréférencement,
- le prétraitement,
- la segmentation /classification,
- la modélisation,
- l'évaluation des résultats et des étapes intermédiaires.

Ces phases clés, illustrées de façon schématique dans la Figure 1 ci-dessous, constitueront les chapitres de mon mémoire. Nous rappellerons chaque phase individuellement, le moment venu.

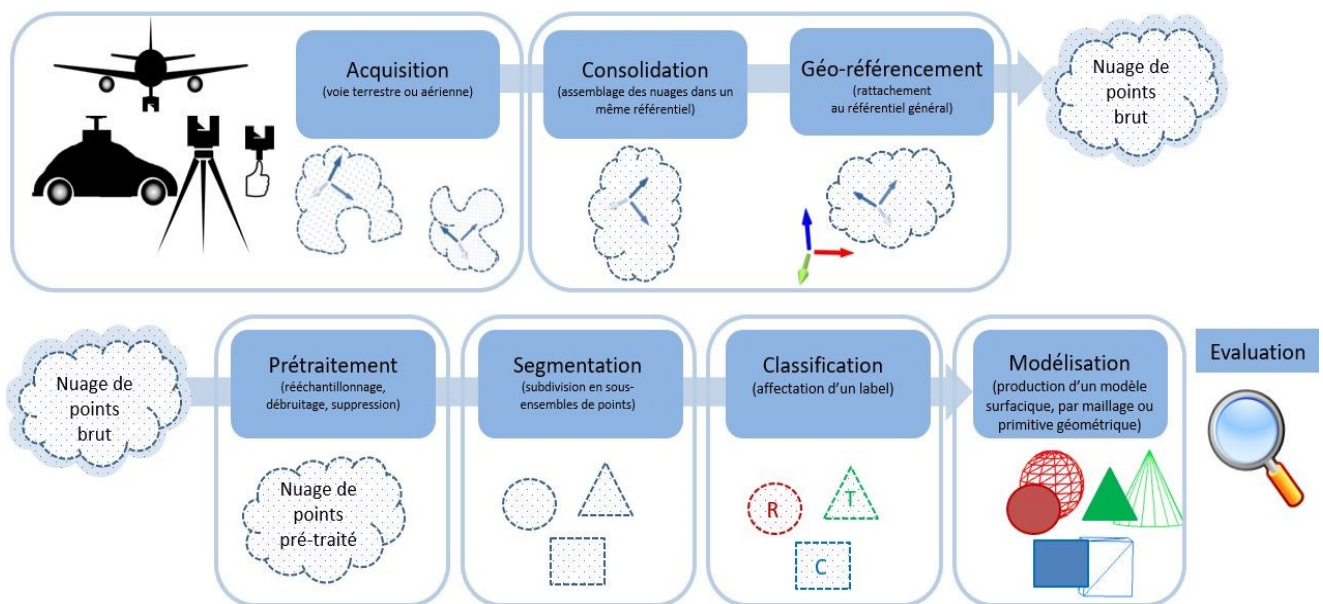
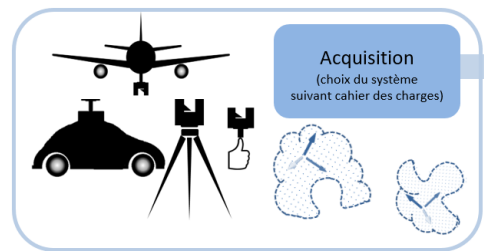


Figure 1 : De l'acquisition de nuages de points à la production de modèles 3D : les phases clés

La chaîne de traitements présentée ci-dessus englobe des algorithmes qui ont été développés généralement dans le cadre de thèses et qui seront mis en lumière dans les chapitres suivants. Tout d'abord nous définirons les **enjeux**, puis nous mentionnerons les **travaux réalisés en lien** avec chacune des phases clés.

2. Acquisition de données

La phase d'acquisition désigne d'une part le **choix du système** et d'autre part le **relevé** dans les règles de l'art, en respect du cahier des charges. Le cahier des charges fixe l'objet d'étude, l'emprise de la zone d'étude, le type de livrable attendu, la précision attendue sur le livrable, le format exigé, etc.



Le **choix du système** (terrestre, aérien, statique, dynamique) ne peut se faire qu'au regard du cahier des charges. Face à la multitude de technologies et de solutions, le choix le plus adapté peut paraître difficile et devra porter sur l'analyse de 3 critères principaux, comme le préconise Lachat (2019) :

- la précision : précision requise pour le projet et atteignable par l'instrument. Afin de qualifier cette précision, les relevés effectués avec les systèmes mobiles sont généralement comparés aux relevés, de la même zone, réalisés avec des systèmes statiques. Les approches mises en place pour arriver à qualifier les données et les livrables seront évoquées dans un chapitre consacré à l'étude de qualité (chapitre 7).
- le coût de l'appareil : investissement exigé, comprenant également les logiciels associés.
- les modalités d'acquisition : mobilité du système, conçu pour le levé d'intérieur ou d'extérieur, portée minimale et maximale, étendue du site, accessibilité, etc.

Même si elle n'apparaît pas explicitement dans la Figure 1, la question de la **gestion du volume** de données (diffusion, stockage) n'est pas à négliger dans la chaîne de traitements, car le client devra être en mesure d'exploiter la maquette livrée et de garantir sa conservation dans le temps. Les données 3D acquises par lasergrammétrie sont généralement volumineuses. Une optimisation de la quantité de points par prétraitement (rééchantillonnage) ou par le choix du format adapté (par exemple *.e57*, *.las*) sans perte d'information utile est à garder à l'esprit. Le format de diffusion, dépendant des logiciels de visualisation ou d'exploitation disponibles chez le client, devra donc être discuté lors de l'établissement du cahier des charges, en amont de l'acquisition.

Le besoin croissant de créer des modèles 3D de villes et de bâtiments, plus ou moins intelligents, de façon la plus automatique possible, pour la gestion des bases de données cartographiques des collectivités territoriales, a fait naître des systèmes d'acquisitions de plus en plus rapides et maniables (systèmes de cartographie mobile sur véhicules ou drone). Force est de constater qu'inversement, le capteur peut être amené à créer le besoin. Ce contexte nous invite à effectuer un **bilan des capteurs de numérisation 3D** en fixant le périmètre d'études aux besoins du géomètre topographe avant d'aborder les questions relatives au traitement des données qu'ils délivrent et à la qualification des livrables qui en découlent.

2.1 De la tachéométrie à la lasergrammétrie

Le domaine de la topographie évolue au gré des innovations technologiques. Nous assistons à la naissance de dispositifs de mesure toujours plus rapides, plus précis et plus polyvalents. Les géomètres ne constituent pas à eux seuls la communauté exploitant des techniques d'arpentage. Ces dernières profitent également au secteur du bâtiment au sens large, pour le suivi et la surveillance structurelle d'ouvrages ou de terrains, au milieu industriel, à celui des géosciences, de l'architecture, etc.

Au travers du prisme de l'objet d'étude, les instruments et méthodes topographiques couvrent un **large spectre d'échelles**, allant de la Terre à celle d'une statuette en passant par celle de la ville jusqu'au bâtiment, en intérieur comme en extérieur. Suivant le type de données à produire, les techniques de relevés peuvent s'appuyer sur des données spatialisées, c'est-à-dire de type image (télédétection, photogrammétrie) ou vectoriel (lasergrammétrie, tachéométrie, systèmes de positionnement par satellite). Suivant l'échelle de la zone à couvrir, les **capteurs impliqués seront placés à bord de plateformes** satellitaires, aériennes ou terrestres. Le Tableau 1 associe aux échelles de relevés, les systèmes d'acquisition généralement adaptés.

Échelle du relevé	Objets à numériser	Systèmes d'acquisition
Échelle régionale	Paysage	Imagerie satellitaire, moyenne et haute résolution (télédétection)
	Topographie	Photogrammétrie aérienne à petite échelle
	Zone étendue	- Télédétection aérienne (LiDAR / Radar aéroporté) - Système GNSS
Échelle locale	Zone restreinte / village	- Photogrammétrie aérienne (avion, drone) - Télédétection aérienne (LiDAR / Radar aéroporté)
	Bâtiments	Lasergrammétrie (LiDAR terrestre)
	Zone de fouille (archéologie)	- Photogrammétrie terrestre - Station totale - Système GNSS
Échelle de l'objet	Artéfacts (archéologie)	Photogrammétrie terrestre
	Petits objets	Lasergrammétrie (LiDAR à courte portée)

Tableau 1 : Techniques d'acquisition suivant les échelles de relevé et les objets d'étude associés
(inspiré de Ramos et Remondino, 2015)

Les échelles couvertes par la **lasergrammétrie** sont **semblables à celles couvertes par la photogrammétrie**. L'utilisation des deux techniques est placée au même niveau au regard de la **taille de l'objet** à numériser et de sa complexité, comme en atteste la Figure 2. Toutefois, que ce soit en aérien ou terrestre, les deux techniques se destinent davantage à se compléter qu'à se concurrencer. Quelques travaux de numérisation appliqués à des sites du patrimoine culturel nous ont permis de mettre en exergue cette complémentarité, et ce dès le début de la démocratisation des scanners laser (Landes et al., 2007 ; Grussenmeyer et al., 2008 ; Grussenmeyer et al., 2012). Même si des scanners sont équipées de caméras, le texturage photo-réaliste ne sera satisfaisant qu'après une campagne de prises de vues dédiée à cet objectif.

Les équipements conventionnels du géomètre, à l'instar des théodolites, ont connu des changements radicaux au cours des cinquante dernières années. Des tachéomètres aux stations totales **motorisées et robotisées**, l'électronique a apporté de nombreuses innovations aux appareils de mesure. Aujourd'hui, toute station totale est capable de mesures rapides sans réflecteur et du suivi automatique de prisme. De plus, un pilotage via un contrôleur permet de télécommander l'appareil à distance, s'il ne suit pas de lui-même le prisme par un système de prisme actif. Déjà dans les années 90, des travaux de recherche ont permis de mettre au point une **station totale pilotée à distance** depuis une tablette et équipée de plusieurs caméras (Scherer, 2002). Le couplage de la station totale avec un récepteur GNSS est également envisageable sur un grand nombre d'instruments de mesure (Scherer et Lerma, 2009). Ces systèmes de levés, qu'il s'agisse des antennes GNSS ou des stations totales, exigent de l'opérateur, avant toute mesure, de sélectionner les points d'intérêt et de procéder à des mesures individuelles. En occupant ce **rôle de guide de la mesure**, l'opérateur doit faire preuve d'une capacité d'abstraction en dessinant mentalement le plan qu'il produira sur la base des mesures ponctuelles effectuées.

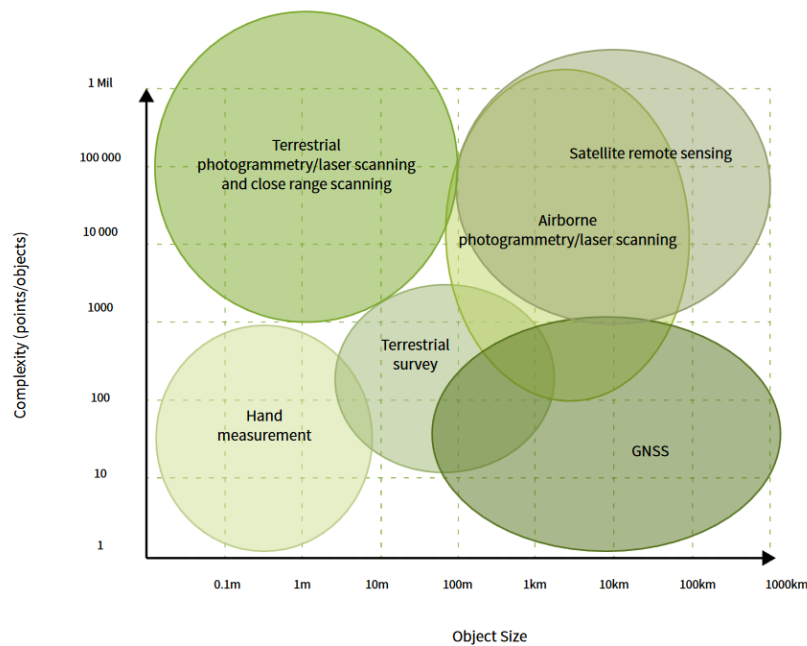


Figure 2 : Techniques d'acquisition en fonction de la taille et de la complexité de l'objet à numériser
(Boardman & Bryan, 2018)

Depuis les années 2000, les **scanners laser terrestres (SLT)** occupent une place grandissante dans les projets de numérisation. Apprécisés pour leur vitesse d'acquisitions de points en 3D et leur facilité d'utilisation, ils n'ont cessé de se développer, même si les coordonnées 3D des points d'intérêt qui composeront le plan futur ne sont obtenues qu'après une chaîne de traitement plus ou moins laborieuse. La vitesse à laquelle ils fournissent des nuages de points denses (souvent colorisés) représentant la géométrie 3D du site ou de l'objet étudié les rend particulièrement attrayants. Ne serait-ce qu'à des fins de communication, leur utilisation s'est grandement démocratisée dans de nombreux corps de métiers. En dehors des livrables susceptibles d'être générés à partir des données acquises avec ces instruments, les SLT tendent à supplanter la station totale dans le cadre de relevés d'intérieurs ou d'extérieur, voire pour la surveillance d'ouvrages d'art (Böhler, 2006 ; Slob & Hack, 2004 ; Heritage & Hetherington, 2007 ; Soni et al., 2015), comme nous le verrons plus loin (paragraphe 2.2.2, p. 11). Grâce à une technologie de mesure toujours plus précise et rapide et à des capacités logicielles de traitement de données toujours plus avancées, le balayage laser terrestre est devenu une technique fiable permettant de fournir une cartographie tridimensionnelle du site avec précision.

Les **techniques de mesure 3D optiques** ne se limitent pas à celles mentionnées dans ces quelques lignes. La Figure 3 résume les principales techniques en distinguant les technologies actives des technologies passives, parmi lesquelles nous retrouvons la photogrammétrie. La portée à laquelle sont susceptibles de travailler les catégories de scanners laser dépend du principe de télémétrie employé (triangulation, impulsions, décalage de phase), comme présenté en annexe A.1 (p. 122). La majorité des données utilisées dans les projets que nous évoquerons dans la suite du document aura été acquise à l'aide de **scanners à impulsions** (ou temps de vol direct) et à **décalage de phase**, vu que l'objet d'étude principal était le bâtiment (extérieur/intérieur). Les scanners à **triangulation** dont nous disposons à l'INSA sont utilisés dans le cadre de contrôles qualité, lorsqu'il s'agit de constituer un nuage de référence avec un scanner à **bras articulé** (par exemple Landes et al., 2013) ou encore pour évaluer les performances de scanners à main pour la numérisation en intérieur ou le relevé de petits objets (Lachat et al., 2017a ; Salgues et al., 2020).

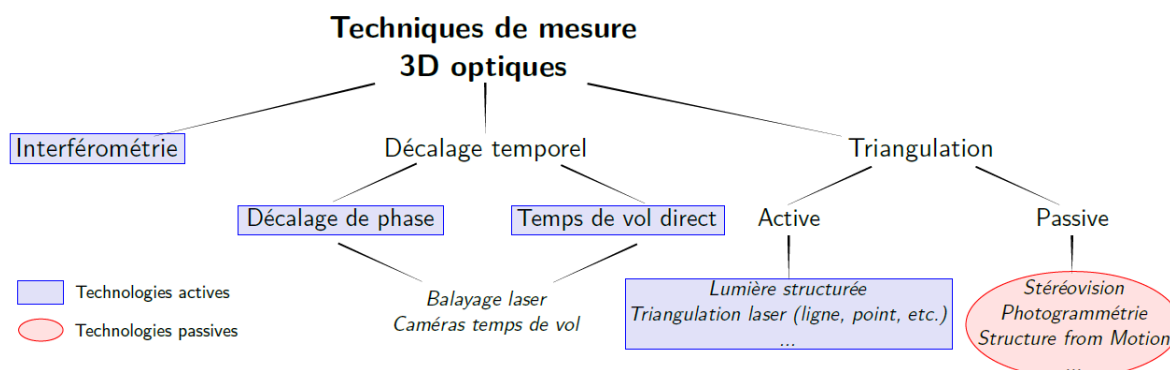


Figure 3 : Classification des techniques de mesures de distance optiques et sans contact (Lachat, 2019)

Le large déploiement des instruments de numérisation n'a pas écarté de la scène la **technique photogrammétrique**, bien au contraire. Le coût, assez onéreux des scanners ou multi-stations que nous verrons plus loin, a finalement participé à redorer son blason, car depuis des décennies, la photogrammétrie permet de produire de la donnée tridimensionnelle, cependant de façon indirecte, par post-traitement. Longtemps tributaire d'instruments de stéréo-restitutions et réservée à un public de photogrammètres avertis, la photogrammétrie est sortie de sa niche, grâce d'une part à l'avènement de l'imagerie numérique et d'autre part au développement d'algorithmes d'appariement d'images stéréoscopique, toujours plus puissants, conduisant également à la création de nuages de points denses.

La technologie des **caméras temps de vol**, encore nommées caméras 3D ou caméras de profondeur, trouve ses principales applications dans le domaine de la robotique ou dans l'industrie, mais il nous a paru intéressant de détourner leur usage à des fins de numérisation de petits objets (Lachat et al., 2015a ; Lachat et al., 2015b ; Lachat et al., 2015c) et de cartographie mobile (Mittet et al., 2013 ; Mittet et al., 2014).

L'évolution des matériels et techniques que nous venons d'évoquer est perceptible également au travers **des thématiques des sessions des conférences** en rapport avec la numérisation de patrimoine. Prenons, pour exemple, les thématiques abordées ces 15 dernières années lors des conférences bisannuelles du Comité International de Photogrammétrie Architecturale (CIPA)³ :

- 2005/2007/2009 : techniques combinées, modélisation 3D interactive basée sur l'imagerie, techniques lasergrammétriques, premières applications drone, couplage avec solutions de vision assistée par ordinateur
- 2009/2011/2013 : photogrammétrie automatisée, intégration de données, modélisation paramétrique, gestion de nuages de points volumineux
- 2013/2015/2017 : corrélation épipolaire dense, modélisation 3D automatisée, BIM, visualisation via le web
- 2017/2019 : traitement de nuages de points, modélisation 3D automatique, utilisation de smartphones, réalité virtuelle, augmentée, sémantique

De plus, des « workshops » voient le jour pour promouvoir la recherche, les développements et les échanges sur des sujets émergents, comme par exemple LaserScanning (11^{ème} édition en 2019), LowCost (6^{ème} édition en 2019), Indoor 3D (4^{ème} édition en 2019) ou encore Semantics 3D (1^{ère} édition en 2019).

³ Source : discours de clôture de la conférence 3D Arch 2019, par Fabio Remondino.

Ces thématiques diverses et variées témoignent de la dynamique autour des techniques lasergrammétriques, photogrammétriques ainsi qu'autour des traitements portant sur les données qui en découlent. Les verrous se déplacent au fil des années.

2.2 Scanners et stations totales : chronique d'une fusion annoncée ?

Les atouts associés à la technique de mesure lasergrammétrique (rapidité, exhaustivité, simplicité) avec des instruments toujours plus légers et conviviaux, ont propulsé les LiDAR sur le devant de la scène dans de très nombreux domaines (construction, suivi de chantier, forensique, retro-ingénierie, archéologie, géologie, agriculture, etc.), dont celui de la topographie évidemment.

Le rôle de l'opérateur topographe s'en voit bouleversé, car derrière un LiDAR terrestre, il n'est plus le guide de la mesure. Il ne choisit pas (ou plus) les points caractéristiques des lignes décrivant l'ouvrage qu'il est censé relever. Néanmoins, son expérience est essentielle dans le choix judicieux des stations (avec un scanner statique), des positions des cibles, dans le choix du pas de balayage et dans les méthodes de géoréférencement à mettre en œuvre pour que la phase de traitement soit efficace. La Figure 4 met en parallèle un relevé effectué avec un scanner laser et des mesures réalisées avec une station totale. Au tachéomètre, l'opérateur lèverait la dizaine de points permettant de tracer aussi fidèlement que nécessaire le contour de l'ouverture, tandis qu'au scanner laser, il n'aurait à définir que la densité de points souhaitée, mais devra en revanche extraire les arêtes décrivant l'ouverture par post-traitement.

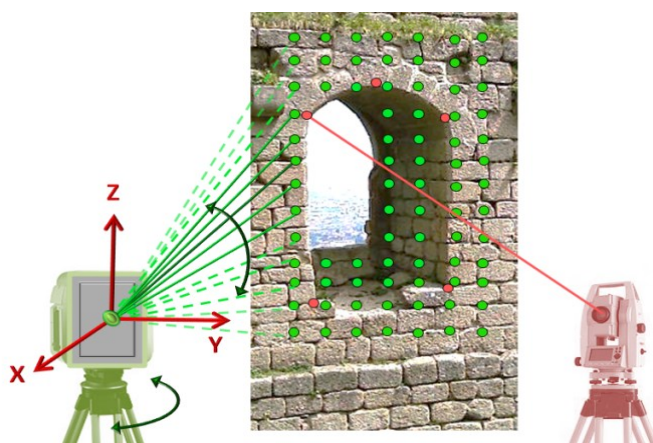


Figure 4 : Relevé d'une ouverture à partir d'un scanner laser terrestre (à gauche) et au tachéomètre sans réflecteur (à droite)

Le besoin systématique du géomètre d'effectuer des relevés précis et exhaustifs dans un référentiel national a amené les constructeurs de matériel topographique à développer des systèmes permettant à la fois de lever des points spécifiques et de numériser une partie de l'environnement. Nous assistons à deux tendances : des stations totales qui se dotent d'un système à balayage et inversement, des scanners qui s'adjoignent les caractéristiques de stations totales.

2.2.1 Lorsque la station totale se dote des atouts d'un scanner

Au même titre que les systèmes de cartographie mobile, les stations totales tendent à devenir de plus en plus des dispositifs multi-capteurs, donc multi-tâches. En plus de l'intégration d'un récepteur GNSS dans les stations totales, occasionnant un gain d'efficacité supplémentaire, ces dernières tendent à intégrer également un dispositif de numérisation laser, tout en conservant les performances et principales caractéristiques d'une station totale.

Nous ne citerons que deux systèmes concurrents, de deux marques leader sur le marché de la topographie (voir aussi tableau 2) :

- Leica Nova MS60 MultiStation : première « multi-station » mise sur le marché en 2015, elle combine les capacités de précision des **stations totales**, **l'imagerie** numérique haute résolution, le **balayage laser** 3D et la connectivité **GNSS** dans un unique instrument. La fusion de ces technologies a toutefois été réalisée en conservant l'aspect bien connu et la convivialité d'une station totale.
- Trimble SX10 : commercialisée en octobre 2016, cette « **station totale de balayage** » appartient également à la catégorie de systèmes multicapteurs innovants et polyvalents. Elle a toutefois fait l'objet de débats du fait de **l'abandon de lunette**. La visée d'un point spécifique se fait à partir d'une tablette, sur la base d'images haute résolution fournies par 3 caméras intégrées au système. Notre équipe a eu le privilège de participer aux tests de cette station avant sa commercialisation et nos résultats constituent un « livre blanc », téléchargeable sur le site du constructeur ([Lachat et al., 2017a](#)).

Parmi les spécifications mentionnées dans le tableau 2, nous pouvons souligner le critère de **vitesse de balayage**, qui représente le point faible de ce genre de dispositifs lorsqu'il s'agit de scanner de grands espaces, comparé à des vitesses allant jusqu'à 1 000 000 de pts/seconde avec les scanners les plus récents.

Marque et modèle	Leica Nova MS60	Trimble SX10
		
Année de commercialisation	2015	2016
Fréquence de balayage	30 000 pts / sec	26 000 pts / sec
Portée	Jusqu'à 2 km	600 m
Principe de mesure de distance ⁴	Technologie WaveForm Digitizing	Temps de vol ultra-haute vitesse, technologie Trimble Lightning
Exactitude de mesure de distance (sans prisme)	2 mm + 2 ppm	2 mm + 1.5 ppm
Densité	12.5 mm @ 50 m	6.25 à 50 mm @ 50 m
Poids (avec batterie)	7.7 kg	7.85 kg

Tableau 2 : Stations totales dotées d'un système à balayage
(données constructeurs, Leica_MS60@2020, Trimble_SX10@2020)

Ce genre de systèmes trouve son intérêt principal dans le levé de sites pour lesquels **des mesures directes de points de détails sont prédominantes** et lorsque seuls quelques objets, de géométrie plus complexe, méritent d'être scannés (exemple : un levé de façade avec moulures, linteaux profilés, etc.).

⁴ Leica et Trimble ont tous deux déposé un brevet pour une technologie de détermination électronique de distance semblant combiner les atouts de télémétrie par impulsions et par différence de phases (technologie WFD, *Waveform Digitizing* pour Leica et technologie *Lightning* pour Trimble). Pour plus d'informations, consulter les « livres blancs » sur les sites des constructeurs.

Si les stations totales s'équipent de systèmes de balayage laser, nous observons également la tendance inverse, de la part des constructeurs de scanners, à vouloir adjoindre au scanner les capacités d'une station totale.

2.2.2 Lorsque le scanner se dote des atouts d'une station totale

Les scanners munis d'un plomb optique présentent l'**avantage de pouvoir être mis en station** et de proposer des méthodes de levés conventionnelles pour un topographe (orientation sur des références, relèvement, analyse d'écarts, etc.). Néanmoins, ils sont rattrapés par d'autres défauts : leur poids, leur manque de maniabilité et leur vitesse d'acquisition moindre, comparativement à celle des scanners non dotés de ces attributs. Leur vitesse moindre s'explique notamment par le principe de télémétrie employé (par impulsions, plutôt que par différence de phases). De plus, ils exigent des **compétences en topographie** dont ne peuvent pas prétendre tous les utilisateurs potentiels de scanners laser, c'est pourquoi le développement de ces systèmes ne semble pas être poursuivi par les constructeurs (exemple du C10 dans le Tableau 3).

En effet, les utilisateurs de scanners issus du milieu industriel ne ressentent pas le besoin de géoréférencer directement le nuage de points. Ils se contentent souvent **de consolider les nuages** (voire de rattacher ultérieurement le lever à un système de référence général). Afin d'élargir au maximum le panel des utilisateurs, les constructeurs ont travaillé sur l'ergonomie et la convivialité d'utilisation de ces scanners, en reléguant l'utilisateur au **rôle de « presse-bouton »**. C'est aussi la raison pour laquelle ces scanners à utilisation en station libre sont plus facilement et largement adoptés. Le Tableau 3 présente deux scanners illustrant chacune des deux familles mentionnées et dont nous disposons à l'INSA.

Toutefois, tôt ou tard, les utilisateurs prennent conscience des dérives possibles liées à une **consolidation des nuages deux à deux** (que nous verrons au paragraphe 3.2) sans toutefois disposer des compétences nécessaires pour introduire davantage de robustesse dans le réseau (intégration de points de calage, cheminements en boucles, contrôles intermédiaires, compensation en bloc, recouvrement suffisant, etc.). Les erreurs liées au mode opératoire sont souvent constatées au bureau, une fois les acquisitions effectuées, c'est-à-dire au moment de la consolidation.

Marque et modèle	Leica ScanStation C10	FARO Focus3D X330
		
Année de commercialisation	2009	2013
Fréquence de balayage	50 000 pts/sec	Jusqu'à 976 000 pts/sec
Portée	0.10 – 300 m	0.60 – 330 m
Principe de mesure de distance	Impulsions	Différence de phase
Exactitude de mesure de distance	4 mm @ (1m – 50 m)	2 mm @ (10m et 24 m)
Précision de centrage	1.5 mm à 1.50 m (plomb laser)	-
Densité	Espacement < 1mm sur toute la portée et tout le champ	1.5 mm – 50 mm @ 10 m
Poids (avec batterie)	13.4 kg	5.2 kg

Tableau 3 : Exemples de scanners conçus pour géoréférencer directement (C10) et indirectement (Focus 3D X330) les points observés ; extraits des données constructeurs : Leica_C10@2020, FARO_X330@2020

Ce constat a motivé les constructeurs à développer des **scanners plus autonomes** qui sont à même de calculer leur position approchée dans un référentiel local (défini par la première position du scanner), puis de procéder à une consolidation séquentielle en cours de parcours grâce au **suivi en temps réel du mouvement du scanner entre les stations** (via un système inertiel). L'utilisation de cibles n'est plus indispensable. Ensuite, si le nuage scanné depuis la dernière station est en recouvrement avec celui de la première station, le logiciel intégré compensera automatiquement les écarts de fermeture du cheminement en boucle (**consolidation en bloc**). Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les systèmes Leica RTC 360, Trimble X7 et Z+F imager 5016 (Tableau 4). Souvent vendus avec une tablette, ces systèmes permettent à l'utilisateur de suivre le levé en temps réel et d'assister à **la consolidation sur le terrain**, donnant ainsi la possibilité de reprendre les mesures ou d'ajouter une station, si nécessaire.

Marque et modèle	Leica RTC 360	Trimble X7	Z+F imager 5016
			
Année de commercialisation	2018	2019	2016
Fréquence de balayage	2 000 000 pts/sec	500 000 pts/sec	1 000 000 pts/sec
Portée	0.5 m à 130 m	0.6 m à 80 m	0.3 à 360 m
Principe de mesure de distance	Temps de vol haute vitesse ultra-dynamique (WFD)	Haute vitesse, mesure digitale de distance par temps de vol	Décalage de phase
Exactitude de mesure de distance (sans prisme)	1 mm + 10 ppm	2 mm	1 mm + 10ppm
	1.9 mm @ 10 m (précision du point 3D)	2.4 mm @ 10 m (précision du point 3D)	N/A
Densité	3, 6 ou 12 mm @ 10 m	4, 5, 6, 9 ou 11 mm @ 10 m	1, 2, 3, 6, 11, 23 mm @ 10 m
Poids (avec batterie)	5.7 kg	5.8 kg	7.3 kg

Tableau 4 : Comparatif de scanners laser dernière génération, proposant une consolidation en temps réel, sur le terrain, avec ou sans cibles (Leica_RTC360@2020, Trimble_X7@2020, Z+F_5016@2020)

Ces tendances au développements de scanners et stations totales hybrides et le besoin d'effectuer de nombreuses stations successives laisse entrevoir des évolutions dans la mobilité de ces systèmes.

2.3 Du statique au mobile

Dans le contexte du passage des capteurs statiques aux capteurs mobiles, sans être exhaustive, la Figure 5 schématise la diversité et l'évolution des instruments de mesures 3D, en partant des instruments de topographie conventionnels statiques (GNSS, stations totales), en passant par les scanners laser terrestres statiques ou dynamiques, jusqu'à des solutions d'acquisition plus récentes qui répondent aux contraintes **d'acquisitions dynamique et en temps réel**. Ce développement et cette évolution permanente sont guidés notamment par le souci de démocratiser les solutions de numérisation 3D.

L'intégration de capteurs de positionnement et de capteurs imageurs (caméras, capteurs multispectraux, hyperspectraux) ou ponctuels de mesures 3D (LiDAR) est de longue date un duo exploité à bord de vecteurs satellitaires et aéroportés (sur avions et plus récemment sur drones). Plus

tard, dans les années 2000, les **systèmes de cartographie mobile**, déployés sur des véhicules, se sont développés en milieu urbain, en même temps que les systèmes de géolocalisation grand public. L'objectif des systèmes de cartographie mobile en milieu urbain est d'acquérir des données géoréférencées des objets d'intérêt pour de nombreuses applications (modélisation urbaine 3D, détection de piétons et de véhicules, navigation autonome, numérisation des routes et réseaux ferrés, etc.). Si certains dispositifs se basent sur la lasergrammétrie (ex : Lara3D devenu L3D2 en 2012, voir Goulette et al., 2006), d'autres exploitent les principes de photogrammétrie ou combinent les deux (ex : Stéréopolis II, voir Paparoditis et al., 2012). Même s'ils ne permettent pas de produire de la donnée aussi exacte et précise que les systèmes statiques, ces solutions génèrent de la donnée répondant aux besoins de la cartographie pour du PCRS (Plan Corps de Rue Simplifié) par exemple.

A l'époque de la commercialisation de systèmes de **cartographie mobile en extérieur**, un doctorant de notre laboratoire a construit un système mobile équipé d'une antenne GPS, d'une centrale inertielle et d'un scanner à balayage, fixés tous les trois sur un chariot tiré par un piéton (Alshawa et al., 2007). Loin des préoccupations ergonomiques, cette conception aura eu le mérite de familiariser notre équipe avec les problématiques notamment de positionnement en ville (masques dans les canyons urbains, multi-trajets), de synchronisation des instruments à bord (fréquence d'acquisition différente entre le GPS, le scanner et la centrale inertielle), de gestion de données volumineuses et enfin de reconstruction des nuages de points de corps de rue depuis une plateforme en mouvement (Alshawa et al., 2009). Un état de l'art sur un certain nombre de dispositifs dédiés à la cartographie mobile en extérieur est proposé dans Vallet et Mallet (2016).

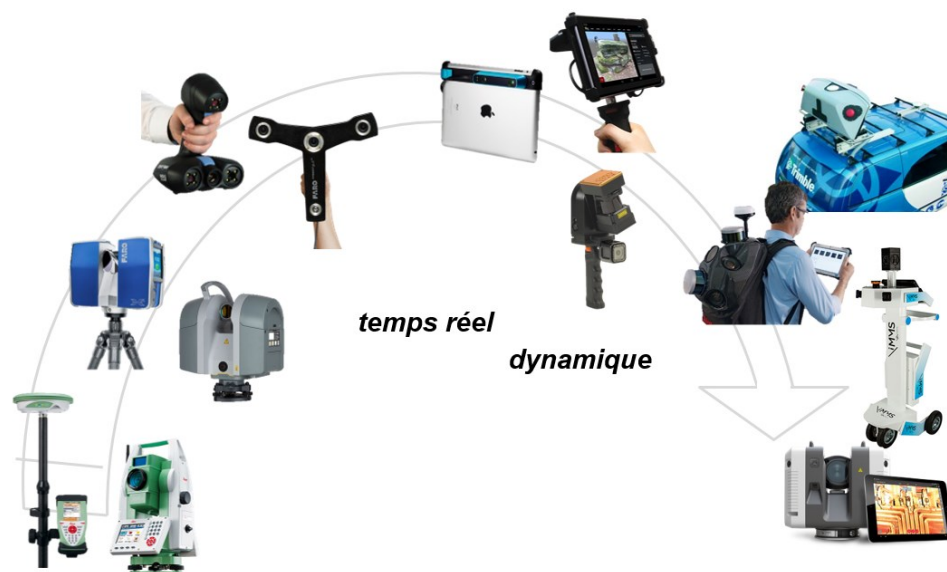


Figure 5 : Diversité des instruments de mesures 3D : des instruments conventionnels aux systèmes dynamiques (inspiré de Lachat, soutenance de thèse 2019)

En parallèle se sont développés les **systèmes de cartographie mobile en intérieur**. Pour les applications intérieures donc sans accès à un signal GNSS, les systèmes d'acquisition sont équipés de capteurs tels que des odomètres, des lasers, des caméras ou encore des unités de mesures inertielles. Ceux-ci peuvent être regroupés en 3 catégories (Figure 5) : les systèmes **sur roues**, les systèmes portables de type « **sacs à dos** » et les systèmes **tenus à la main**. Plus que jamais, les deux communautés de photogrammètres/géomaticiens et de vision par ordinateur se rapprochent, car elles partagent l'intérêt commun de se repérer et de cartographier l'environnement. La première communauté met en avant sa maîtrise du géoréférencement et de la mesure précise, en échange de méthodes robustes de positionnement sans capteur GNSS développées par la seconde.

La **localisation basée sur l'utilisation d'un capteur de vision** consiste à estimer la trajectoire d'une caméra par rapport à un repère initial. Elle englobe trois familles d'approches (Mittet, 2015) :

- les méthodes de reconstruction 3D à partir du mouvement (SfM ou *Structure from Motion*) : elles portent sur la restitution de la géométrie de l'environnement,
- l'odométrie visuelle : elle ne s'attache initialement qu'à déterminer la trajectoire de la caméra,
- la cartographie et la localisation simultanée (SLAM ou *Simultaneous Localization And Mapping*), axée à la fois sur la détermination de la trajectoire et sur la reconstruction 3D.

L'utilisation des techniques SLAM peut donc répondre à un besoin double : celui de produire des modèles d'environnement détaillés et/ou d'avoir une idée précise de l'emplacement d'un robot mobile. Tout en naviguant dans un environnement inconnu, le robot va progressivement en acquérir une carte tout en cherchant à se localiser à l'aide de cette carte.

Dans ce contexte et sur impulsion du constructeur Trimble, nous avons engagé une thèse qui avait pour but de conceptualiser et de proposer un prototype de système de cartographie mobile « *low cost* » devant fonctionner sans GPS, sur la base de capteurs Kinect à bord d'un système **sur roues** (thèse Mittet, 2015). Les compétences en robotique de l'étudiante auront été précieuses, une moitié de la thèse ayant été consacrée au montage du système et à sa calibration (Mittet et al., 2013). Une seconde partie aura permis de réfléchir à une méthode de calcul de trajectoire basée sur l'odométrie visuelle (Mittet et al., 2014) et de nous initier au SLAM. Le système de cartographie mobile obtenu présentait évidemment quelques limites en termes d'utilisation (en extérieur uniquement à la nuit tombée, portée de mesure limitée, besoin de points d'ancrage tels que des potelets urbains).

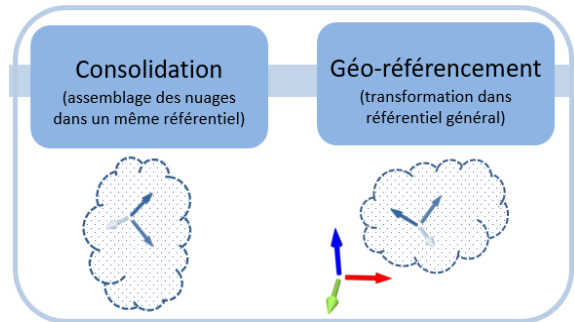
Plus tard, nous avons eu l'occasion d'expérimenter un système « **sac à dos** » (GreenValley LiBackPack C50) et deux instruments de la famille des systèmes **tenus à la main**, pour étudier la pertinence de leur utilisation dans un objectif de numérisation en intérieur (FreeStyle de FARO dans Lachat et al., 2017b et ZebRevo RT de Geoslam dans Salgues et al., 2020). Récemment, **la lunette** de réalité augmentée Hololens (Microsoft) a été détournée de son utilisation première, qui est d'immerger son porteur dans la réalité mixte, pour être considérée comme un système de cartographie mobile (Khoshelham et al., 2019). Les résultats à première vue encourageants méritent toutefois d'être confirmés.

Il ressort de ces travaux, sans grande surprise, que le mode opératoire joue un rôle crucial dans la mise en œuvre des systèmes basés sur le principe du SLAM et que ces systèmes ne peuvent pas concurrencer le niveau de précision atteignable avec un système statique. Une connaissance des **sources d'erreurs** et une compréhension des relations qui lient les capteurs équipant ces systèmes de cartographie mobile sont nécessaires pour quantifier la précision des données qu'ils sont en mesure de produire. Le paragraphe 7.1. (p. 45) évoquera les erreurs affectant les acquisitions réalisées au scanner laser terrestre, sans tenir compte toutefois de celles générées par le couplage des capteurs.

Nos recherches portent davantage sur le traitement de données que sur la création de systèmes de cartographie, néanmoins nous aurons tout de même eu l'occasion de nous pencher sur les questions liées aux calculs de trajectoire à partir de systèmes imageurs et de tester des systèmes innovants. Si les systèmes de numérisation se sont démocratisés et sont à l'origine de la production de données de terrain en masse, le curseur désignant le poste où le topographe a un rôle prépondérant à jouer s'est décalé du terrain vers le bureau. Le challenge à relever pour produire le livrable répondant à un cahier des charges spécifique se situe donc non seulement dans **l'acquisition** mais aussi dans le **traitement des nuages de points**, dont les étapes principales seront présentées dans les prochains chapitres. Nous pouvons noter qu'avec le développement récent de systèmes de numérisation capables de produire des nuages de points en temps réel sur le terrain, la Figure 1 (p.4) est amenée à évoluer : **l'étape de consolidation/géoréférencement pourra, à terme, être intégrée à la phase d'acquisition.**

3. Consolidation et/ou géoréférencement de nuages de points

Il arrive souvent qu'un objet ne puisse pas être numérisé en totalité à partir d'une unique station : soit l'objet est de dimension importante, soit il est d'architecture complexe, ou encore, des obstacles empêchent sa visée directe. Dans cette situation, plusieurs stations d'acquisitions sont à prévoir. Au départ, les nuages de points résultant de ces stations multiples sont définis chacun dans un repère relatif au scanner laser. Il faut donc, dans un second temps, regrouper dans un seul et unique système de coordonnées l'ensemble des nuages de points acquis depuis les différentes stations. Cette opération est désignée par la « **consolidation** » (*registration* en anglais) ou, de façon plus générique, le « **recalage** ». Lorsque les coordonnées des points du nuage doivent être exprimées dans un repère global, il faudra procéder à l'opération de « **géoréférencement** »⁵. Ces deux notions sont explicitées dans les paragraphes suivants.



3.1 Consolidation et géoréférencement, en théorie

La consolidation revient à effectuer un **recalage relatif entre nuages** par l'identification de « points homologues » dans les deux nuages à consolider (cibles ou points caractéristiques), pour rapporter les deux nuages **dans un même référentiel local**, à savoir le référentiel correspondant à l'une des deux stations. Pour cela, l'opérateur doit sélectionner au minimum trois paires de « points homologues » dans les deux nuages à recaler, représentées par **des cibles** (Figure 6) ou directement des **points des nuages**, ou encore des « primitives homologues ». Puis, les valeurs compensées des paramètres de la transformation associée à ce changement de repère peuvent être calculées. L'erreur de consolidation qui en découle représente la distance moyenne subsistant finalement entre les deux nuages de points.

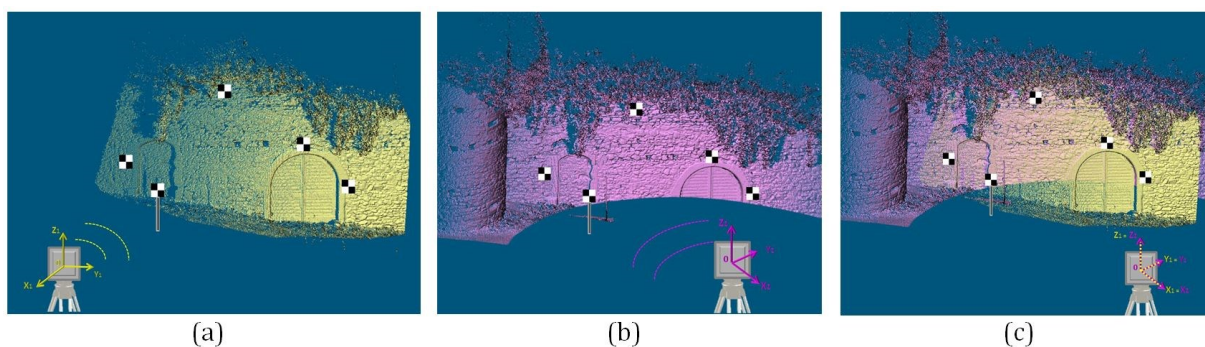


Figure 6 : Consolidation de nuages de points acquis depuis deux stations différentes ; a) station placée à gauche du porche ; b) station placée à droite du porche ; c) résultat de la consolidation basée sur les cibles

Dans le cas où le référentiel dans lequel l'opérateur souhaite connaître les coordonnées des points du nuage est un référentiel général externe (système de coordonnées géographiques nationales), il

⁵ Un parallèle peut être établi entre la consolidation et l'orientation relative en photogrammétrie, de même qu'entre le géoréférencement et l'orientation externe, à la seule différence qu'il n'est pas nécessaire de mettre les nuages à l'échelle contrairement aux mesures 3D extraites de traitements photogrammétriques.

procède au **géoréférencement indirect** du ou des nuages de points préalablement consolidés. Il est nécessaire, pour cela, de disposer de points de canevas, connus dans ce référentiel général ou déterminés par techniques topographiques conventionnelles (cheminement polygonal par tachéométrie ou levé GNSS).

Si le scanner laser est conçu pour être centré sur un point connu et orienté à partir de cibles placées sur des repères, il prend alors la place d'un tachéomètre au sein d'un cheminement polygonal et permet de procéder au **géoréférencement direct** du/des nuages de points. La zone à scanner se limite dans ce cas à la zone d'intérêt et le volume de données à gérer sera réduit en conséquence. De plus, tous les points du nuage seront connus, dès la phase terrain, dans le référentiel général souhaité, sans nécessiter de traitement ultérieur. Les approches de géoréférencement direct et indirect de nuages de points acquis par scanner laser terrestre sont rappelées en annexe A.2, p. 122.

Dans sa thèse, Elise Lachat (2019) a proposé une allégorie très didactique pour illustrer les approches de géoréférencement direct et indirect (Figure 7).

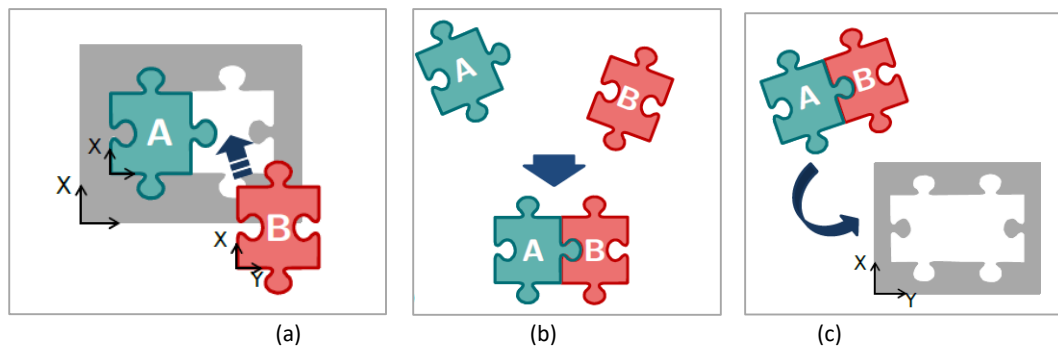


Figure 7 : Principe de géoréférencement et de consolidations : a) géoréférencement direct ; b) consolidation simple de deux nuages de points ; c) géoréférencement indirect en deux étapes : consolidation puis géoréférencement de l'ensemble (Lachat, 2019)

Le choix de l'une ou l'autre approche de géoréférencement influence directement la **configuration du réseau de stations** en lasergrammétrie terrestre (position et nombre de stations). En effet, dans le cas d'un géoréférencement indirect, il faudra prévoir des stations proches pour garantir une zone de recouvrement importante entre nuages et une densité de points adaptée à une détection fiable des cibles (ou des entités géométriques servant au recalage) au sein de la scène à scanner. En géoréférencement direct, le choix de la station est guidé par le seul besoin de scanner l'objet d'intérêt.

La **consolidation** peut être basée sur des cibles ou simplement sur **les nuages de points**. Généralement, l'étape de recalage grossier est suivie de l'application d'un algorithme de type ICP⁶ permettant d'affiner le recalage. Pour profiter des avantages de la consolidation basée sur le nuage de points sans perte de qualité de consolidation/géoréférencement, il est conseillé de détecter au préalable des entités géométriques de type plan, lignes, cylindres. En environnement bâti par exemple, en intérieur comme en extérieur, la consolidation **basée sur les plans** est une solution judicieuse et de plus en plus répandue (Theiler et Schindler, 2012). Les plans sont détectés par ajustement au nuage de points ou en analysant les normales aux points. En environnement industriel notamment, lorsque la consolidation doit s'opérer sans cibles (contraintes de temps ou espaces exiguës), il est envisageable de s'appuyer sur des primitives géométriques extraites préalablement. L'utilisation **des cylindres** est particulièrement adaptée, comme en attestent les travaux de consolidation menés durant la thèse de Jean-François Hullo, en collaboration avec EDF R&D (Hullo, 2013 ; Hullo et al., 2011 ; Hullo et al., 2012).

⁶ ICP ou *Iterative Closest Point* : algorithme itératif très répandu pour procéder au recalage de nuages de points dont l'alignement est déjà approximativement connu. Il a été initié par Besl and McKay (1992).

Dans un premier temps, les moyens et méthodes mis en œuvre pour acquérir des nuages de points denses dans des scènes intérieures complexes telles que les centrales nucléaires ont été étudiés. Ensuite, sur la base des données utilisables pour la consolidation (données laser terrestres, algorithmes de reconstruction de primitives), un algorithme de recalage basé sur l'utilisation de primitives appariées a été proposé, avant de confirmer la pertinence d'une approche probabiliste pour parvenir à cet appariement. Plusieurs types d'informations, tels que des informations de géolocalisation ou des modèles CAO (conception assistée par ordinateur) a priori pourraient être utilisés à l'avenir pour guider l'estimation des paramètres de pose.

Ces dernières années, la **consolidation basée sur les cibles a été grandement automatisée** dans les logiciels de traitements de nuages de points, tout en gagnant en robustesse (reconnaissance automatique des cibles au sein du nuage brut, sans devoir les numéroter au préalable). Si elle constitue la méthode la plus recommandable, elle reste toutefois assez chronophage comparée à la numérisation d'espaces complets, sans cibles et en temps réel, proposée par les scanners mobiles basés sur le SLAM (vus au paragraphe 2.3, p. 12). Face à la concurrence entre les systèmes issus d'une part de la communauté des topographes et d'autre part de la communauté des roboticiens, les constructeurs travaillent d'arrache-pied à l'automatisation du processus de consolidation des nuages. Ainsi, depuis 2018 nous pouvons assister au déploiement d'algorithmes de **consolidation basés exclusivement sur le nuage**, d'abord en post-traitement, puis en **temps réel** simultanément à l'acquisition, comme mentionné au paragraphe 2.2.2 (p. 11).

Dans l'optique de compléter ou plus généralement de coupler les acquisitions des systèmes statiques avec celles de systèmes mobiles, nous nous sommes intéressés à la problématique de consolidation de données 3D hétérogènes (Lachat et al., 2016). Les outils logiciels, généralement « boîtes noires », proposés par les revendeurs de scanners et ayant pour finalité d'effectuer la consolidation et/ou le géoréférencement de nuages de points fournissent des critères de qualité souvent difficiles à interpréter du fait d'une terminologie inadaptée ou évasive. Forts de ces constats, nous avons proposé une thèse ayant pour objectif de maîtriser les étapes de consolidation et en même temps d'évaluer les logiciels existants (thèse Lachat, 2019).

3.2 La consolidation, en pratique : un puzzle mouvant

Elise Lachat s'est penchée dans sa thèse sur l'estimation des paramètres de transformation les plus probables entrant dans le calcul de consolidations de nuages basées sur des cibles. Il s'agit tout d'abord d'extraire des entités d'intérêt (ou éléments caractéristiques) et remarquables dans chaque jeu de données, puis de les filtrer et de les apparier (mettre en correspondance) afin d'obtenir des paires d'entités homologues (ou éléments de jonction). Connaissant ces entités appariées, il est ensuite possible d'estimer les paramètres de transformation qui les lient ce qui conduit à l'obtention de nuages consolidés, comme schématisé sur la Figure 8.

Le modèle de transformation est généralement une similitude spatiale ou une transformation de Helmert 3D. Si l'on illustre le principe du recalage à l'aide de pièces de puzzle, l'idée consiste tout simplement à rapporter une nouvelle pièce dans le référentiel de la précédente, à l'aide des paramètres de transformation calculés, selon un recalage séquentiel ou global (Figure 9).

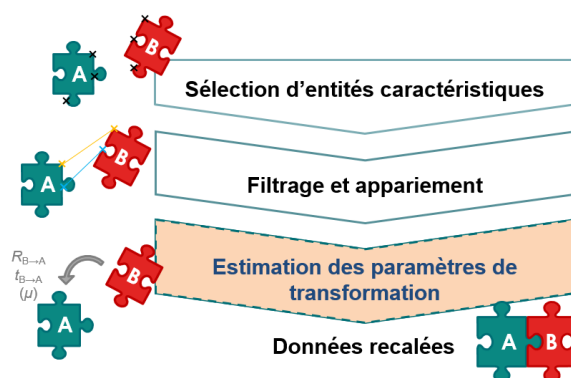


Figure 8 : Étapes et enjeux du recalage de nuages de points (Lachat, 2019)

$$X_B = \mu (R_{A \rightarrow B} \cdot X_A + t_{A \rightarrow B})$$

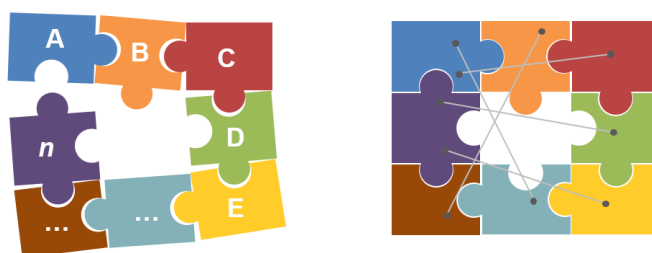


Figure 9 : Consolidation de plusieurs nuages de points selon un recalage séquentiel par paires (à gauche) ou un recalage global (à droite), selon Lachat (2019)

Dans le cas du **recalage séquentiel**, approche la plus intuitive à envisager, la consolidation s'opère par paires mais présente le risque d'introduire une dérive, désignée communément en topographie par la « transmission/propagation d'erreurs ». Dans le cas du **recalage global**, le risque de propagation d'erreurs est réduit et les erreurs de recalage sont distribuées de façon homogène entre les données à travers un calcul de compensation en bloc. Cette dernière approche a été mise en oeuvre et a donné naissance à un **algorithme open source** baptisé MORPHEd pour *Multisensor gLObal Registration based on Points for HEterogeneous 3D Data* (Lachat et al., 2018). Le modèle mathématique utilisé à cet effet s'inspire du principe d'aérottriangulation. La consolidation des données 3D est basée sur l'utilisation de points communs tels que des cibles ou des points représentatifs sélectionnés manuellement, qui sont automatiquement appariés si les correspondances initiales sont inconnues (processus schématisé en annexe A.3, p. 124). Surtout, il permet de produire un rapport d'évaluation de la qualité de la consolidation opérée. L'évaluation de l'approche sera évoquée au paragraphe 7.1.2.2 (p. 47). Plusieurs améliorations de l'algorithme actuel sont à entrevoir, dont le fait que les entités caractéristiques retenues pour le recalage sont pour l'instant des cibles artificielles ou des points sélectionnés à la main. Ce frein à l'automatisation devrait pouvoir être levé en utilisant des détecteurs de points d'intérêt 3D par exemple.

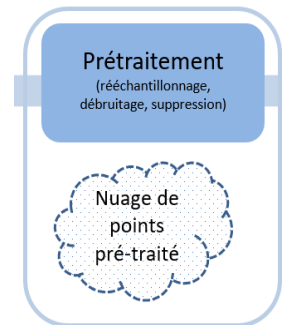
Le besoin de pouvoir assembler des nuages de sources diverses ajouté à la démocratisation d'outils de consolidation à l'interface simplifiée, dont non seulement les algorithmes mais aussi les rapports d'erreurs manquent de transparence, nous ont incités à nous pencher sur la **question de la consolidation** de nuages de points. Après consolidation et/ou géoréférencement, les nuages sont figés dans un repère local ou général et nous pouvons procéder à présent à **leur traitement** en vue d'en extraire l'information recherchée.

4. Prétraitement de nuages de points

La phase de prétraitement est souvent une étape nécessaire à l'obtention d'un jeu de données utiles et cohérentes.

Son objectif est multiple :

- Réduire **le bruit dans le nuage** en appliquant un processus de correction et/ou de suppression de points faux ou indésirables (artefacts liés à la présence de miroirs, de surfaces réfléchissantes). Si le nuage est affecté d'un bruit important, détectable en analysant l'« épaisseur » du nuage sur une surface plane, il peut être nécessaire de l'atténuer par application d'outils de filtrage.
- Réduire **le volume de données** : il peut s'avérer utile d'effectuer un rééchantillonnage, afin de faciliter la manipulation des données et d'accélérer les étapes de traitements ; le choix du format est déterminant également, de même que le choix de subdiviser les données en dalles ou portions de nuages.

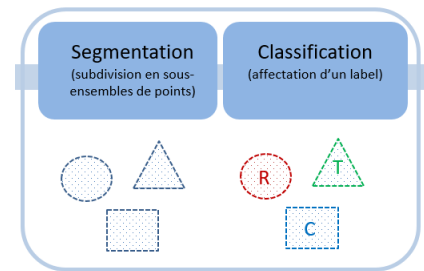


L'étape de « prétraitement » apparaît dans la Figure 1 (p. 4) après l'étape de consolidation et géoréférencement. Elle aurait également trouvé sa place plus en amont, car un nuage de points bruité peut gagner à être traité avant son entrée dans la consolidation (Sappa et al., 2001). En effet, en présence de données volumineuses ou redondantes, un rééchantillonnage préalable à la consolidation est envisageable, à condition de ne pas perdre en qualité de détection d'éléments de jonction. Néanmoins, du fait de la proposition de certains constructeurs d'automatiser la consolidation en temps réel sur le terrain, il nous semble plus opportun de conserver, dans notre schéma, l'étape de prétraitement comme une étape en sortie de géoréférencement.

Aucun travail de recherche de notre équipe n'aura particulièrement porté sur la question du prétraitement de(s) nuage(s). Des **outils gratuits** et commerciaux proposent des solutions intéressantes de réduction du bruit, qui sont adaptés à nos besoins. Pour cette raison, ce chapitre restera très succinct comparé à ceux qui décrivent les étapes qui entourent le prétraitement. Nous passons à présent aux étapes de **segmentation et classification** du nuage de points.

5. Segmentation et classification

En raison de la difficulté, selon les méthodologies mises en œuvre, à scinder clairement la segmentation et la classification, nous avons fait le choix de les aborder dans la même partie.



5.1 Une définition pour la segmentation

Une étape préalable à la modélisation géométrique sur la base du nuage de points est l'étape de segmentation. Cette étape consiste à **décomposer le nuage en sous-ensembles de points disposant de mêmes caractéristiques**, qu'elles soient géométriques, radiométriques, spectrales, sémantiques ou temporelles. L'objectif premier est de contourner un travail de segmentation manuel chronophage au vu des millions de points à traiter, en automatisant cette étape au maximum. De nombreuses approches sont considérées dans la littérature, comme le résumant assez récemment les travaux de Grilli et al. (2017) en venant ainsi enrichir l'état de l'art effectué quelques années plus tôt par Vosselman et al. (2004).

Si elle est un processus intervenant largement en analyse et traitement d'image, la segmentation reste un terme difficile à définir, en raison des nombreux domaines dans lesquels le processus est employé à des fins diverses et variées : en **robotique** pour analyser les images perçues par les robots/véhicules intelligents, en **imagerie médicale** pour aider au diagnostic, à la localisation de pathologies et évidemment en **téledétection spatiale** pour classifier le contenu d'images multi- ou hyperspectrales. Ce terme de segmentation est employable à partir du moment où il est question de catégoriser des objets suivant ce qui les distingue (par recherche de **dissimilarités**, comme l'approche frontières ou basée sur des contours) ou ce qui les rend similaires (par recherche des **similarités**, comme l'approche régions). Le but de l'opération de segmentation est de simplifier des scènes complexes en rassemblant des objets/pixels de mêmes caractéristiques pour faciliter ensuite les traitements ultérieurs (des explications complémentaires sur les approches frontières et régions sont fournies en annexe A.4, p. 124).

Un grand nombre de **méthodes de segmentation, éprouvées dans le domaine du traitement d'images**, ont été résumées en annexe A.5, p. 125. Elles sont encore en pleine effervescence dans le domaine du traitement de nuages de points. Le décalage temporel entre les deux domaines s'explique d'une part par la relative jeunesse des systèmes et techniques produisant des nuages de points et d'autre part par le fait que les données ponctuelles tridimensionnelles sont denses et bruitées, ce qui pose des problèmes considérables lorsqu'il s'agit de les segmenter (Douillard et al., 2011). Il peut être judicieux, pour profiter pleinement des algorithmes qui ont fait leurs preuves en traitement d'images, de convertir préalablement le nuage en image. Par exemple, le passage du **nuage à l'image** a été utile dans la thèse de Tarsha-Kurdi (2008) d'une part pour détecter le sol du sursol et d'autre part pour détecter les toits de bâtiments dans les cartes altimétriques produites à partir de données LiDAR.

5.2 Segmentations basées sur le nuage de points

L'étude d'un état de l'art sur les méthodes de **segmentation de nuages de points 3D** ouvre un vaste champ d'investigations, car la catégorisation de très nombreuses méthodes est différente suivant le domaine d'application, les objectifs recherchés, le domaine d'activité des auteurs, etc. Nous renverrons vers les travaux de thèse de Chaperon (2002), de Girardeau-Montaut (2006) et de Poux (2019), qui présentent des états de l'art sur la segmentation de nuages de points.

Il était prévisible que les segmentations basées sur l'image inspirent grandement les solutions de segmentation basées sur le nuage. Les nuages de points ainsi décomposés en régions homogènes sont nommés « clusters » en anglais ou « segments » en français⁷. Au vu des nombreuses approches suggérées dans la littérature, nous allons tenter de proposer une classification des méthodes de segmentation en la calquant sur celle établie pour l'image et développée en annexe A.5, p 125.

- **Approches de segmentations basées sur les régions** : croissance de région (Vosselman et al., 2004) et de composantes connexes (Girardeau-Montaut, 2006), segmentation par profil et la segmentation par division-fusion.
- **Approches de segmentations basées sur les contours ou frontières** de régions : elles s'appuient sur les propriétés des points (et points environnants) et exploitent le changement brutal du critère d'uniformité comme les normales des points, gradients, etc. (Rabbani et al., 2006, Castillot et Zhao, 2013).
- **Approches basées sur l'agrégation** de points : comme dans la section des approches basées sur l'image, on entend ici une agrégation d'éléments de base (dans notre cas, le point) pour en créer des sous-groupes en s'appuyant sur des processus supervisés ou non supervisés. Grilli et al. (2017) intitulent ces approches, les approches de segmentation par apprentissage machine (« *machine learning segmentation* ») et y incluent la segmentation basée sur les K-moyennes, ou sur des arbres de décision ou classification hiérarchique. Ces méthodes associent des mesures (caractéristiques) représentatives pour chaque point 3D, basées par exemple sur les caractéristiques géométriques et radiométriques (position des points, normales des surfaces estimées localement, réflectance des points, etc.) pour finalement effectuer l'agrégation dans cet espace de critères. Nous pouvons citer ici les travaux de Lu et al. (2016), Comaniciu et Meer (2002), Lavoué et al. (2005).
- **Approches hybrides** : elles combinent une ou plusieurs approches déjà évoquées, généralement les deux premières (contours et croissance de région), pour exploiter le potentiel et simultanément surmonter les limites des approches respectives. Le succès de ces approches est évidemment tributaire de celui des méthodes sur lesquelles elles s'appuient. Citons par exemple Vieira et Shimada (2005) qui proposent une segmentation par croissance de région basée sur le nuage préalablement maillé puis décomposé en sous-régions de caractéristiques géométriques différentes, qui deviennent à leur tour un noyau pour la croissance de région.

Les solutions de segmentations qui ont connu un fort succès dans le contexte de traitement de données potentiellement bruitées, sont les solutions d'ajustement de modèles paramétriques provenant du monde de la vision assistée par ordinateur et qui méritent d'être listées à part :

- **Approches de segmentations basées sur la reconnaissance de formes géométriques** : Deux algorithmes issus du domaine de la vision par ordinateur sont largement utilisés lorsqu'il s'agit d'ajuster ou d'extraire des formes géométriques à des nuages de points. Ce sont le paradigme RANSAC ou *Random Sample Consensus* (Fischler et Bolles, 1981) et la transformée de Hough (Hough, 1962). Ces deux méthodes ont fait leur preuve pour la détection automatique de primitives géométriques, même en présence d'une forte proportion de points aberrants, comme il est courant d'en rencontrer dans les nuages de points acquis par lasergrammétrie. Cette caractéristique leur confère le nom d'« estimateurs robustes » (le principe des moindres carrés n'étant pas en mesure de déceler aussi aisément les points aberrants).

⁷ Serna & Marotegui (2014) ont recensé les méthodes de segmentation utilisées par les chercheurs dans leur chaîne de traitements menant à la classification d'objets urbains à partir de données LiDAR aériennes. Le « *clustering* » ou action d'agréger des points ou unités d'études apparaît pour certains dans l'étape de segmentation, pour d'autres, dans l'étape de classification.

Dans le processus de segmentation mis en place (Tarsha-Kurdi et al., 2007b ; Boulaassal et al., 2007), nous avons considéré des points satisfaisant aux mêmes conditions mathématiques, à savoir que l'ensemble des points décrivant une surface plane rentrent dans le calcul de l'équation du plan passant par ces points. Il s'agit donc d'une approche de segmentation basée sur la reconnaissance de formes géométriques, puisque nous cherchons ainsi à regrouper des points suivant la **primitive géométrique « plan »**.

Il est impossible de fournir une liste exhaustive de toutes les approches existantes. Par exemple, les approches basées sur le maillage (Caraffa et al., 2016) ou encore les approches de partitionnement de l'espace sous forme de grille 2D (dans le cas de l'image) ou de grille 3D composée dans ce cas de voxels n'apparaissent pas dans notre liste. Elles sont souvent associées à des problématiques d'optimisation de gestion de données volumineuses. Vu que la structuration du nuage en voxels (ou en maillage) permet d'exploiter la connaissance du voisinage de chaque voxel (ou facette de maillage), ces approches pourraient toutefois être mentionnées parmi les approches de segmentations basées sur la croissance de régions ou de détection de contours (Vo et al., 2015).

Au fil des lectures d'articles scientifiques, il peut paraître déroutant que le terme « **classification** » soit parfois utilisé comme synonyme de « segmentation », ou comme opération préalable (ou ultérieure), à la segmentation. En imagerie, dans l'étape de segmentation, les pixels sont analysés du point de vue d'attributs spectraux ou contextuels et sont agrégés pour constituer des groupes de pixels appelés « objets ». Chaque pixel ou objet est ensuite assigné à une classe unique et classifié indépendamment (ou non) de ses voisins. De la même manière, dans nos travaux, nous situerons la **classification comme une étape suivant celle de la segmentation**, comme présenté dans la Figure 1.

Pour généraliser la définition de la segmentation à tout type de donnée, nous considérerons, dans ce mémoire, la **segmentation** comme une **subdivision de l'ensemble des données (images ou points 3D) en sous-ensembles homogènes (forcément connexes en imagerie), suivant des critères prédéfinis** (Landes et al., 2011)⁸. Les méthodologies de segmentations développées au cours de nos travaux de recherche sont présentées dans les paragraphes suivants. Il nous est arrivé d'intégrer dans le processus de segmentation des connaissances a priori sur l'objet. Dans ce cas, nous pourrions parler de segmentation sémantique⁹.

5.3 Méthodologies de segmentations développées

Les méthodologies présentées dans les paragraphes suivants ont pour objectif de segmenter les nuages de points acquis par LiDAR aéroporté et/ou terrestre pour en extraire les toits et les façades, de façon aussi automatique que possible.

5.3.1 Segmentation de contours de toits

Dans le but d'extraire et reconstruire des bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés, nous avons développé une méthode semi-automatique de segmentation de nuages de points acquis en zone urbaine. La chaîne de traitements est explicitée dans la Figure 10.

⁸ Les définitions proposées dans ce document pour la segmentation, la modélisation, etc. font l'objet d'une mission d'un groupe de travail auquel participent des membres de l'Association Francophone de Topographie.

⁹ N.B. : Dans le domaine de la vision par ordinateur, la segmentation sémantique est un processus visant à associer une classe à chaque pixel sans en distinguer des instances, tandis que la classification vise à détecter un type d'objet dans une scène (Li et al., 2017).

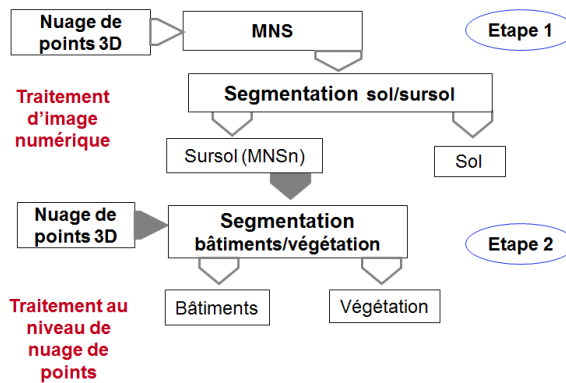


Figure 10 : Approche de segmentation de nuages de points acquis par LiDAR aéroporté (Tarsha-Kurdi, 2008)

Afin de mettre à profit à la fois les avantages liés aux segmentations basées sur des images et les segmentations basées sur les nuages de points, nous avons choisi de combiner les deux approches de façon séquentielle, en distinguant en premier lieu le sol du sursol, puis en second lieu les bâtiments au sein du segment « sursol ».

5.3.1.1 Distinction sol/sursol

Dans la première étape, le nuage de points 3D (1er écho) est converti en grille raster devenant ainsi un MNS (modèle numérique de surface) par échantillonnage. Il s'agit de séparer les pixels caractérisant le sol des pixels caractérisant le sursol, pour ensuite revenir au nuage de points et récupérer les points associés à chacune des classes. Pour segmenter le nuage de points et attribuer les segments détectés à l'une des deux classes que sont le sol et le sursol, les étapes principales sont les suivantes :

- 1- Détection des contours des segments du sursol, basée sur l'utilisation d'un filtre local (opérateur de **convolution**) qui tient compte de la différence entre les valeurs d'altitudes minimales et maximales dans l'environnement direct du pixel étudié.
- 2- Détection des pixels constituant ces segments via le développement d'un algorithme basé sur un opérateur de **convolution** et remplissage des pixels désignant le sursol ; Calcul des altitudes des pixels du sursol
- 3- Filtrage de la classe sursol après succession d'opérations de **morphologie** mathématique.

La Figure 11 retrace les résultats intermédiaires menant aux segments de la classe sursol.

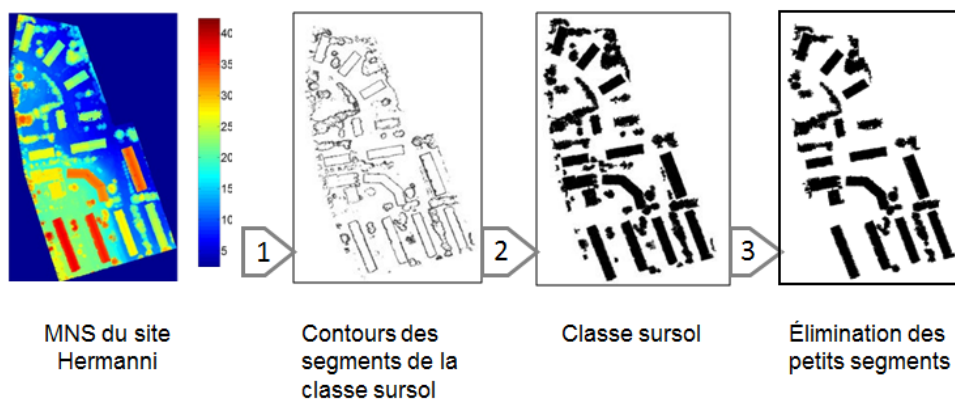


Figure 11 : Résultats de l'approche de segmentation sol/sursol développée dans Tarsha-Kurdi (2008)

La segmentation ainsi développée se base sur une série d'opérations de seuillage et de filtres, entrant dans la catégorie des **segmentations basées sur les contours** ou frontières de régions. Elle a été affinée et s'est montrée particulièrement performante, même en présence de fortes discontinuités de terrain provoquées par un terrain accidenté (fossés, fleuves, ruptures de pentes diverses ou simplement du bruit), comme l'illustre la Figure 12. La solution consiste à traiter le MNS dans plusieurs directions différentes, et à prendre l'intersection de tous les résultats.

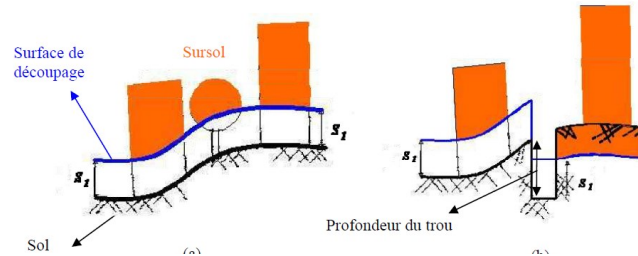


Figure 12 : Fausse attribution de points à la classe « sursol » en raison de la présence d'une rupture de pente brutale. A gauche, situation classique ; à droite, avec différence de niveau brutale

5.3.1.2 Segmentation des bâtiments

Pour aborder ensuite la segmentation du sursol en vue d'en extraire les bâtiments, le nuage de points a été considéré conjointement au MNS. En effet, en combinant les deux jeux de données, il a été possible d'extraire des critères à partir de l'altitude des points contenus dans chaque cellule du MNS (écart altimétrique maximal entre points d'un même pixel, angle maximal de la pente du toit) et de faciliter la distinction entre végétation et bâtiment. Après passage de plusieurs opérateurs de convolution, un algorithme de **croissance de région** utilisant le critère de variation des dénivelés a permis de mettre en évidence les bâtiments (Figure 13).

Les limites de l'algorithme de segmentation développé sont la nécessité de le renseigner avec des seuils dépendant de la **typologie urbaine**. Le fait qu'il présente des faiblesses dans certaines situations défavorables (bâtiments de petite taille, arbres accolés aux bâtiments) sera surmontable par ajout de données ou dans une étape de contrôle. Ses atouts résident dans le fait que le processus est semi-automatique, que les résultats sont particulièrement satisfaisants au vu du manque de richesse de la donnée (premier écho et densités de points faibles) et qu'il s'est montré efficace même en présence de discontinuités de terrain. Nous y reviendrons dans le chapitre consacré à l'évaluation des résultats de nos approches.

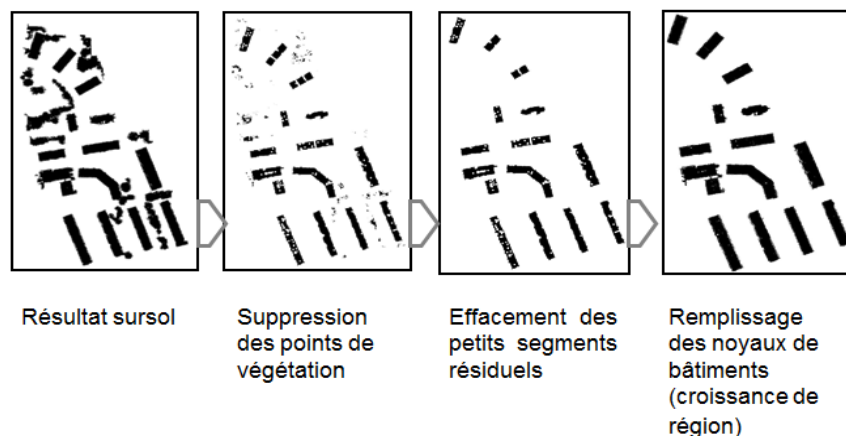


Figure 13 : Approche de segmentation des bâtiments développée dans Tarsha-Kurdi (2008)

Dans le contexte des approches de segmentation non paramétriques (*data driven approaches*), nous avons choisi de tester des méthodes de **segmentation basées sur la reconnaissance de formes géométriques**, en l'occurrence des plans, en vue de détecter des plans de toiture de bâtiments en 3D (Tarsha-Kurdi et al., 2007c). La croissance de région, la transformée de Hough 3D ou encore RANSAC, sont des méthodes permettant de produire des modèles plus universels que les approches paramétriques, en ce sens qu'elles permettent une segmentation par ajustement de primitive. Cette approche suppose que les objets étudiés puissent être décomposés en primitives géométriques telles que des plans, des cylindres et des sphères. Par conséquent, les formes primitives sont ajustées aux données du nuage de points et les points conformes à la représentation mathématique de la forme primitive sont étiquetés comme appartenant au même segment.

Une **étude comparative des deux algorithmes Hough 3D et RANSAC** en termes de temps de traitement et de sensibilité à certaines caractéristiques du nuage de points a montré que l'algorithme RANSAC s'avère plus efficace que Hough (Tarsha-Kurdi et al., 2007b). Un avantage parmi d'autres est que le temps de traitement est négligeable même en présence d'un nuage en entrée très volumineux et bruité. Le principe et le pseudocode de l'algorithme RANSAC - rarement détaillés dans la littérature - ainsi que son analyse complète ont été publiés (Tarsha-Kurdi et al., 2008). Une fois les segments plans décrivant des toits détectés, leur plan moyen est calculé en respectant le principe des moindres carrés. A ce stade, la reconstruction 3D des toits pourrait commencer (voir paragraphe 6.3.1, p. 39).

5.3.2 Segmentation de façades

Étant donné que les modèles de villes en 3D doivent être réalistes non seulement vu du ciel, mais également en vue piéton, la génération de modèles de façades en 3D suscite de plus en plus d'intérêt. Une autre impulsion à la problématique de génération de modèles de façades est donnée par les géomètres réalisant souvent manuellement des plans de façades à partir d'ortho-images issues de relevés au scanner laser ou directement par digitalisation dans le nuage de points.

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Boulaassal (2010) ont permis de développer une approche de segmentation semi-automatique de façades de bâtiments scannés depuis le sol à l'aide d'un système statique (Figure 14).

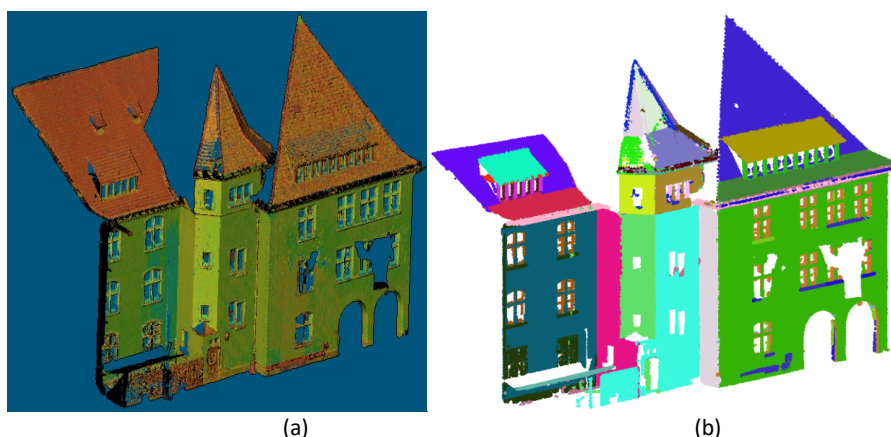


Figure 14 : Portion de façade du lycée des Pontonniers (Strasbourg) ; a) nuage de points après prétraitements ; b) résultat de segmentation du nuage de points selon la primitive géométrique « plan » (Boulaassal, 2010)

Dans le prolongement des travaux de Tarsha-Kurdi (2008), l'algorithme RANSAC a été choisi pour sa robustesse à calculer les paramètres d'un modèle même en présence de valeurs aberrantes dans le jeu de données, mais a dû être amélioré en deux temps dans l'objectif **d'extraire les segments plans décrivant les façades des bâtiments**. Il a été appliqué de façon séquentielle pour supprimer les points

valides du jeu de données initial au fur et à mesure qu'un segment plan est détecté (Boulaassal et al., 2007 ; Boulaassal et al., 2009). Un problème se pose lorsque des points sont affectés à un plan, mais appartiennent, d'un point de vue sémantique, à un autre plan (voir Figure 15a). L'affectation des points à un plan dépend en effet de l'ordre chronologique dans lequel les plans sont détectés.

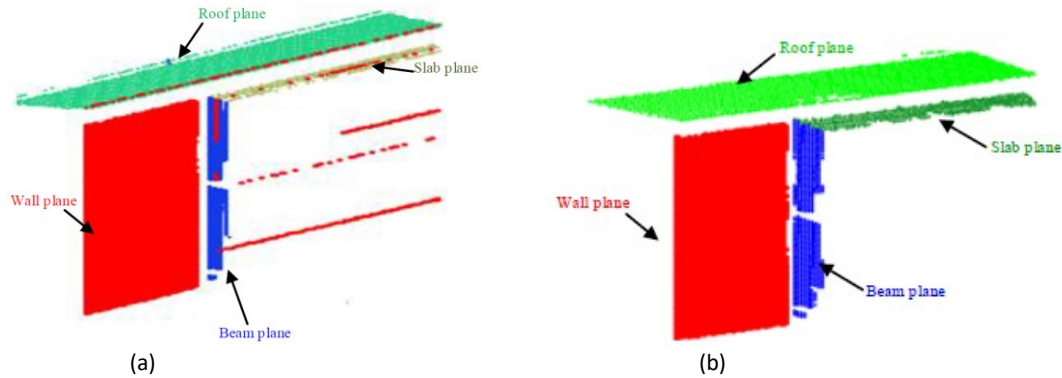


Figure 15 : Application de l'algorithme RANSAC avant et après optimisation ; a) Segmentation erronée due à une détection chronologique de plans ; b) Résultats après amélioration de l'algorithme (Boulaassal et al., 2009)

Pour contourner ce problème, les distances euclidiennes entre tous les points des données brutes et chaque plan détecté sont recalculées. De cette manière, les points affectés à un plan sont déterminés à partir de l'ensemble du nuage, indépendamment de l'ordre chronologique dans lequel le plan a été détecté. Les points précédemment perdus sont récupérés et attribués à leur plan correspondant. La Figure 15b illustre l'amélioration ainsi apportée au résultat.

Par la suite, un deuxième algorithme, basé sur la triangulation de Delaunay, a été développé pour extraire **les points composant les contours des segments plans**. L'idée exploitée ici repose sur l'hypothèse selon laquelle les points de contour appartiennent aux côtés longs des triangles de Delaunay (Figure 16), à l'interface entre le nuage et l'absence de points (contour du mur et des fenêtres). Après calcul et tri par ordre croissant de tous les côtés des triangles, un seuil définissant les points situés sur le contour de l'ouverture est calculé (Figure 16b).

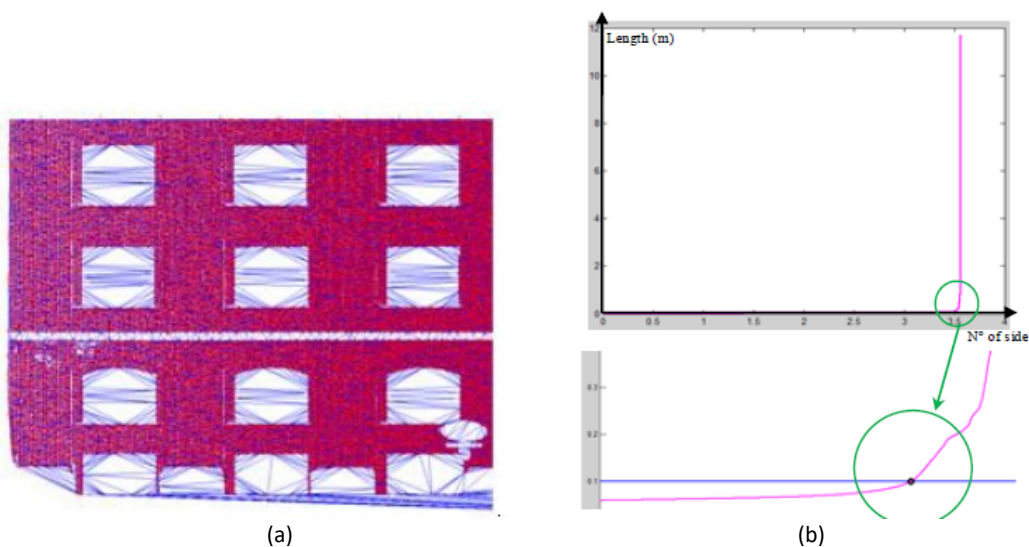


Figure 16 : Triangulation Delaunay pour l'extraction de points décrivant les contours des ouvertures ; a) Résultat de la triangulation, sur une façade préalablement segmentée selon les plans principaux ; b) Définition du seuil de détection des points de contours

Afin d'évaluer les performances des deux algorithmes développés dans cette thèse, ils ont été appliqués successivement sur des nuages de caractéristiques différentes en termes de densités, de types de façades et de dimensions de détails architecturaux. Comme en attestera l'évaluation de la qualité de cette segmentation (paragraphe 7.3.1.2, p. 50), tant du point de vue qualitatif que quantitatif, les deux algorithmes pour la modélisation 3D de façades de bâtiments fournissent des résultats très satisfaisants (Figure 17).



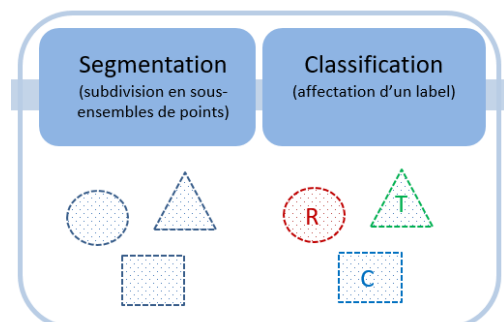
Figure 17 : Segmentation de façades en plans principaux (à gauche) et détection des points de contours (à droite), (Boulaassal et al., 2009)

A ce stade, nous disposons des **segments plans et des points de contours de ces segments plans**, de même que les points de contour caractérisant des ouvertures de façades. Ces algorithmes nous auront été utiles, plus tard, dans la détection de sols, murs, plafonds au sein de nuages acquis en intérieur. Comme suggéré dans Grilli et al. (2017), étant donné que les primitives ou segments plans qui constituent les sols, murs et plafonds sont détectés en introduisant des connaissances a priori, il nous semble plus pertinent d'évoquer les travaux de segmentation « sémantique » en mur/sol/plafond au sein de l'étape de classification.

5.4 Classification de nuages de points

La classification de nuages de points consiste à **ranger des entités** (points individuels ou sous-ensemble de points produits par segmentation) **dans des classes spécifiques**. Cela revient à attribuer un nom de classe à chaque point ou segment, une classe étant une information sémantique venant enrichir le nuage de points.

Si la classification d'images multispectrales reste un thème de recherche inépuisable car revu en permanence avec l'évolution des données image en entrée (évolutions en termes de résolution spatiale, spectrale, radiométrique, temporelle), la classification de nuages de points s'en inspire grandement. La donnée en entrée (le point) complique toutefois le problème, car il s'agit d'associer à chacun des points d'un nuage plus ou moins volumineux, une « étiquette » (ou « label ») qui le caractérise. Nous retrouvons le problème face auquel se trouvaient les chercheurs désireux de classer des images à très haute résolution spatiale. La solution aura consisté, en remplacement du pixel comme unité de base, de considérer un regroupement de pixels, appelés « objets », respectant des critères d'homogénéité, et de considérer l'objet comme donnée en entrée de la classification. Ainsi est née la classification « orientée-objet », qu'une équipe de précurseurs a développée et commercialisée en 2000 dans un logiciel nommé *ecognition* (racheté en 2010 par Trimble). La tendance est similaire aujourd'hui pour la classification du nuage de points : il est proposé



de subdiviser le nuage de points en un ensemble de « segments » au lieu de considérer chaque point individuellement (étape de segmentation vue précédemment), avant de classifier ces segments. Si la classification s'appuie sur des segments disposant d'une information a priori, nous parlerons de **segmentation sémantique ou classification supervisée**. Si elle s'appuie sur des segments disposant exclusivement de caractéristiques géométriques, nous parlerons de **classification non supervisée**.

En raison des nombreux enjeux qui y sont liés (cartographie automatique, véhicule autonome, suivi environnemental, extraction de modèles numériques de terrain, etc.) et simultanément de la complexité des scènes 3D (échantillonnage irrégulier des points 3D, densité variable des points, types d'objets très différents), la thématique de « **classification des nuages de points** » occupe une place grandissante en recherche. L'ouvrage de Martin Weinmann (2016) propose un bel aperçu des étapes de traitement et d'analyse des nuages de points 3D (filtrage de données bruitées, extraction d'objets, consolidation et interprétation sémantique des nuages de points 3D). Des approches intéressantes sont menées également sur la base des bâtiments maillés (Boulch et al., 2013).

Le choix du classificateur est déterminant parmi les diverses approches possibles (annexe A.6, p. 125), mais certains chercheurs soulignent également l'importance du **choix des critères de descriptions** en entrée aux classificateurs et proposent des approches de segmentation sémantique riche de ces critères notamment celui du voisinage 3D local (Weinmann et al., 2015 ; Niemeyer et al., 2014 ; Poux, 2019). Bien que la classification supervisée se révèle souvent plus efficace que la classification non supervisée, elle peut souffrir d'un sur-ajustement qui limite son extensibilité à des applications plus larges, ce qui entrave son automatisation (Poux, 2019).

L'essor des **techniques d'apprentissage profond** (*deep learning*) pour la reconnaissance automatique d'objets en 2D et 3D attire un très grand nombre de chercheurs issus de divers domaines (médical, transport, militaire, civil, etc.), comme le rappelle Jiao et al. (2019). Avec l'émergence, ces trois dernières années des réseaux neuronaux convolutifs (*CNN*, *Convolutional Neural Networks*) dans le domaine de l'analyse de nuages de points, les problématiques de segmentation automatique s'affinent encore davantage notamment en milieu urbain (Ballouch et al., 2020). Un état de l'art exhaustif des solutions d'apprentissage profond applicables à des nuages de points 3D est fourni dans Guo et al. (2019). Les auteurs y distinguent les méthodes efficaces pour la détection/suivi d'objets en 3D, de celles visant à segmenter des nuages de points 3D (d'instances et sémantique). Ces approches ont prouvé leur efficacité, à condition qu'elles puissent se « nourrir » d'énormes quantités de données labellisées, étape cruciale pour **améliorer l'apprentissage** de l'algorithme. Il s'agit là du frein le plus problématique, avec celui de « boîte noire », à leur adoption aisée.

Les paragraphes suivants illustrent les classifications d'ores et déjà opérées sur des segments dans nos projets de recherche.

5.4.1 Détection de sols/plafonds/murs

Dans le contexte du développement durable, la nécessité de rénover le patrimoine culturel l'emporte sur celle de construire de nouveaux bâtiments. Toutefois, le processus de numérisation vers le modèle numérique « intelligent » de bâtiment, aussi nommé système d'information du bâtiment (*BIM*), reste à ce jour un processus essentiellement manuel et chronophage. Une raison à cela s'explique d'une part, par l'énorme quantité de données à traiter, par la reconstruction nécessaire de parties non mesurables directement (masquées en raison d'obstacles) et par l'absence d'information sémantique dans les nuages de points. Dans les travaux de thèse d'Hélène Macher (2014-2017), financés par l'Ordre des Géomètres Experts, évidemment sensibilisé à ces verrous, nous avons mis en place une approche semi-automatique pour la reconstruction 3D **d'intérieurs de bâtiments** existants à partir de nuages de points.

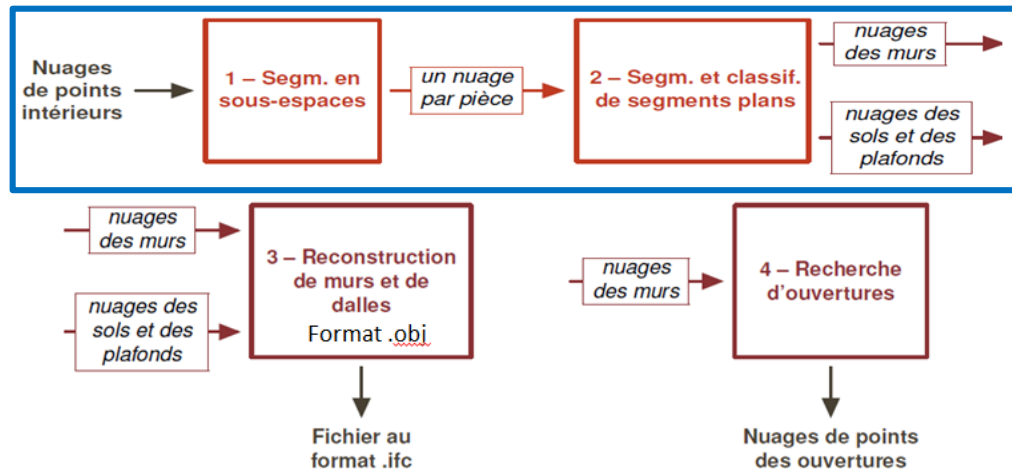


Figure 18 : Processus de segmentation (encadré en bleu) et de reconstruction à partir d'un nuage de points acquis en intérieur et développé dans la thèse de Macher (2017)

Comme l'illustre la Figure 18, deux segmentations successives sont effectuées de manière à extraire les nuages de points correspondant aux sols, aux plafonds et aux murs : une segmentation en sous-espaces et une segmentation en plans, suivie d'une **classification de ces segments plans** (résultat en image dans la Figure 19).

5.4.1.1 Segmentation en sous-espaces

Le nuage de points complet de l'intérieur du bâtiment est tout d'abord décomposé en nuages par étages, par analyse **d'histogramme des altitudes des points (segmentation en étages)**, Figure 19b. En considérant une coupe horizontale dans le nuage de points de chaque étage au niveau des plafonds et en projetant les nuages sur un plan horizontal, les pièces apparaissent. S'en suit alors une **segmentation en pièces (croissance de région sur image binaire)**. Les régions 2D ainsi détectées permettent de récupérer les nuages de points associés à chaque pièce et de disposer de régions en 3D (Figure 19 c, d).

5.4.1.2 Segmentation et classification des segments plans

A l'échelle de chaque pièce (Figure 19d), plusieurs segmentations en plans sont nécessaires avant de procéder à leur classification en « sols », « plafonds » et « murs ».

Le paradigme de RANSAC, adopté pour sa robustesse et sa performance dans les travaux de thèse qui ont précédé (Tarsha-Kurdi, 2008 et Boulaassal, 2010) a été supplanté ici par une version améliorée appelée MLESAC et disponible dans Matlab (Torr et Zisserman, 2000). MLESAC adopte le même principe d'échantillonnage que RANSAC pour générer des solutions potentielles, mais prend en compte la dispersion des points par rapport au plan généré pour proposer la solution respectant « le maximum de vraisemblance » au lieu de celle associant le plus grand nombre de points au plan. Cet **estimateur robuste MLESAC** a donc été choisi pour **extraire les segments plans**. Ensuite, les segments plans décrivant **sols et plafonds** ont été déterminés par **analyse d'histogramme** de l'altitude des points et d'une contrainte d'horizontalité. Enfin, grâce à la connaissance des contours des pièces, extraits de la segmentation en pièces, les segments plans décrivant les murs peuvent être isolés de manière itérative en respectant des critères de **verticalité et d'écart-type**. Une dernière étape a consisté à associer les faces de murs constituant des cloisons à l'aide de critères de parallélisme et de distances (Figure 19e).

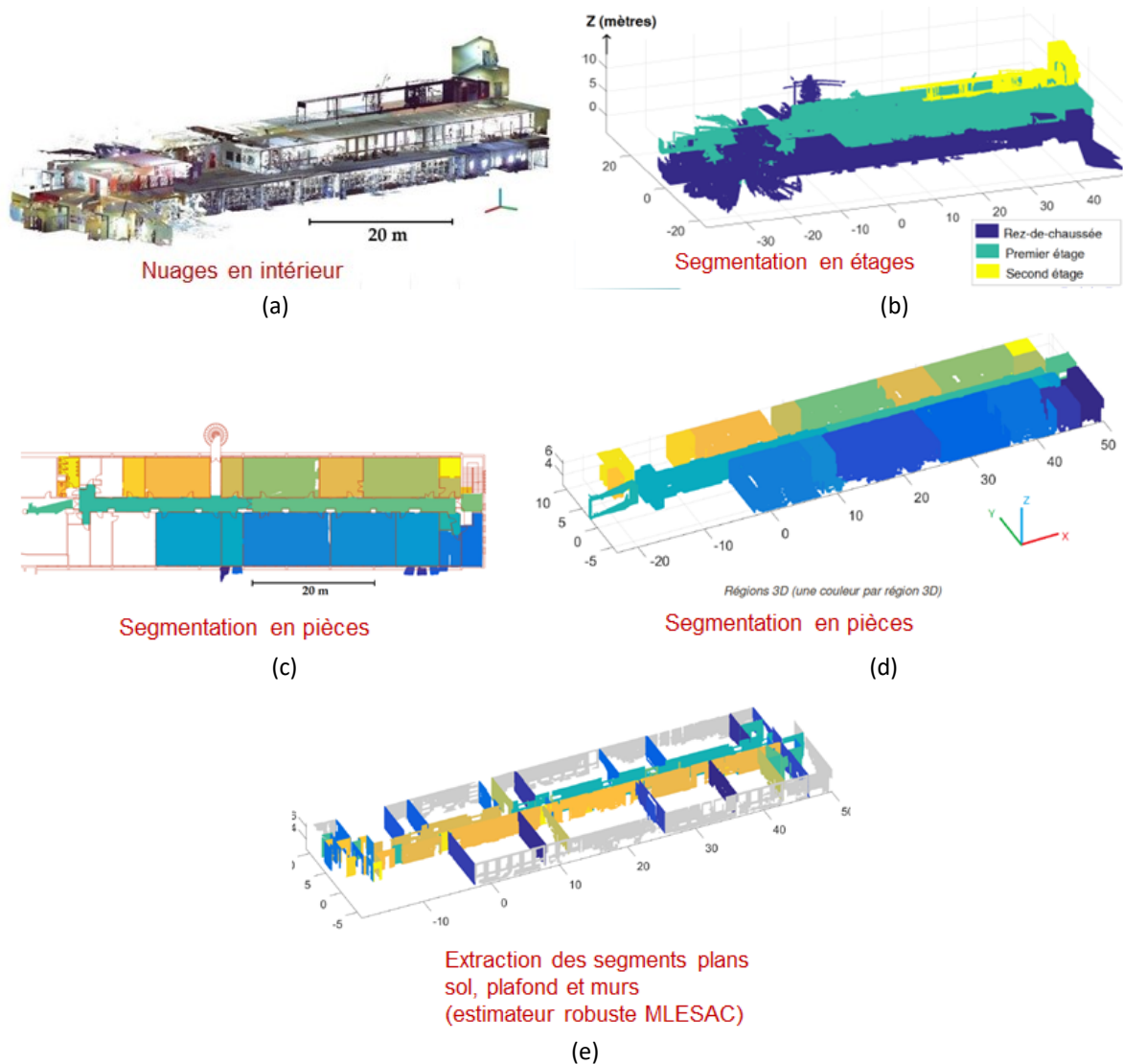


Figure 19 : Etapes de la segmentation en étages, pièces, puis sol, plafond et mur (Macher et al., 2017)

Cette approche, dont les résultats seront évalués dans le paragraphe 7.3.1.3 (p.51) ont donné lieu à plusieurs publications dans des revues ou à l'occasion de conférences (Macher et al., 2014a ; Macher et al., 2014b ; Macher et al., 2015 ; Macher et al., 2016).

5.4.2 Détection d'ouvertures

Dans la suite logique des éléments détectés, nous avons décidé de nous focaliser ensuite sur la reconstruction d'ouvertures (en priorité des fenêtres) à partir de nuages de points acquis en extérieur et en intérieur. Ces travaux répondent par ailleurs à un besoin défini dans les objectifs de l'ANR BIOM (*Building Indoor & Outdoor Modeling*), qui vise à modéliser automatiquement et simultanément les bâtiments en intérieur et extérieur à partir d'images et de nuages de points denses. Le but à moyen terme est d'obtenir une représentation 3D complète, géométriquement précise, sémantiquement annotée des bâtiments et des objets qu'ils contiennent sous la forme de BIM.

La reconstruction 3D exige une détection préalable, ce qui nous a amenés à effectuer un bilan des solutions les plus appropriées pour **l'extraction de fenêtres dans des nuages de points de bâtiments**. En s'inspirant des travaux de segmentation d'ores et déjà menés dans notre équipe, nous avons entrepris le développement d'algorithmes de détection et de placement automatique de fenêtres au sein de la maquette numérique (projets de recherche technologique et de fin d'études de Julie Thierry en 2018/2019 et de Leyla Roy en 2019/2020). Ces études ont également permis de souligner l'importance de disposer du **nuage extérieur** comme guide pour l'extraction des fenêtres en intérieur. L'algorithme tire profit non seulement de l'aspect géométrique du nuage de points (coordonnées 3D) mais aussi d'autres caractéristiques telles que **l'information de couleur** associée à chaque point, **l'intensité laser** ou encore dans un futur proche l'information thermique (Figure 20).

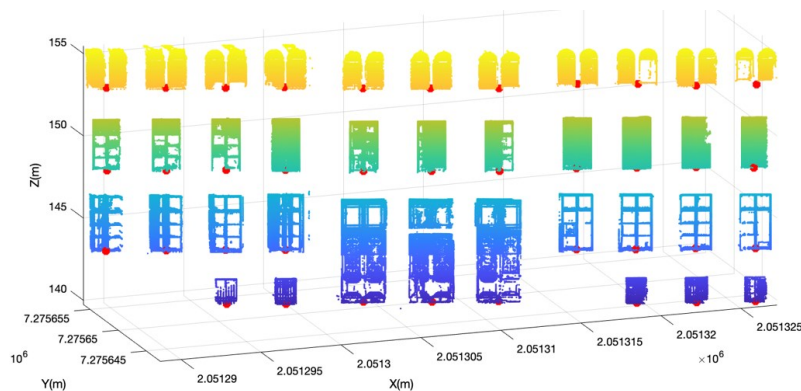


Figure 20 : Résultat de la détection des points d'insertion des fenêtres sur un nuage de points de façade (PRT et PFE Leyla Roy, 2019/2020)

Une thèse démarrée fin 2018 (Assi et al., 2019a) a porté sur **l'extraction de fenêtres et de portes** en exploitant le manque de points au niveau des fenêtres pour en déduire s'il s'agit d'ouvertures ou de zones obstruées. Une fonction d'énergie a été développée dans ce contexte sur un nuage de points d'intérieur, transformé préalablement en une image binaire (Figure 21).

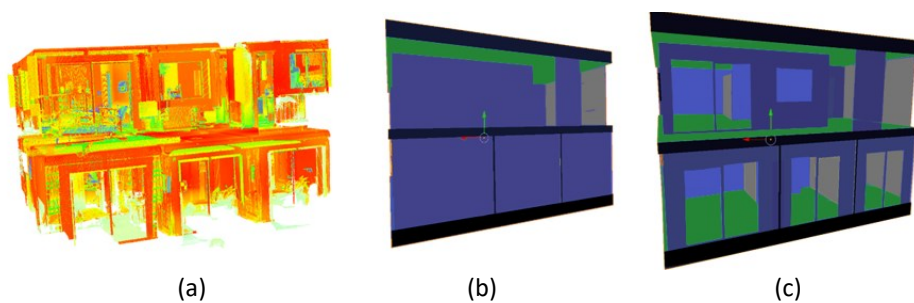


Figure 21 : Détection des ouvertures dans un nuage de points d'intérieur par application d'une fonction d'énergie ; a) nuage de points brut d'un intérieur de bâtiment ; b) segmentation en murs, sols et plafonds ; c) segmentation en portes et fenêtres (Assi et al., 2019a)

La pertinence d'utiliser des **descripteurs et des détecteurs de points d'intérêts 3D** pour permettre non seulement la mise en correspondance d'éléments d'ouvertures scannés en intérieur et en extérieur, mais aussi de réduire le volume de données à traiter, sont des perspectives intéressantes (Assi et al., 2019b).

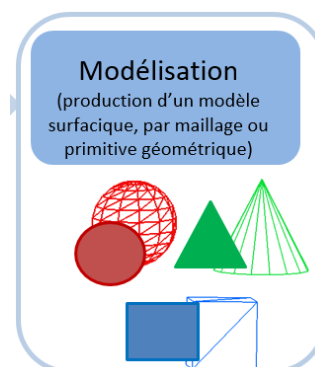
Enfin, des approches d'apprentissages machine ont également été abordées. Les réseaux de neurones exigent de disposer **d'un grand ensemble de données d'apprentissage** (vérité terrain, données labellisées) ; dans notre problématique, cela signifie un grand nombre de nuages de points de façade acquis en extérieur et intérieur avec différentes formes de fenêtres, correctement étiquetés. Rassembler ces jeux de données d'apprentissage et surtout les étiqueter manuellement est chronophage et laborieux. Cela contraste avec notre objectif d'automatiser le processus. Des perspectives de recherche seront évoquées en ce sens (voir Conclusions et perspectives, p. 67).

La possibilité d'accéder à des données labellisées étant particulièrement handicapante dans le domaine du patrimoine, nous avons été invités à participer, sous l'impulsion d'une équipe italienne de Turin, au partage d'une base de données de référence (*benchmark*) composée de nuages de points labellisés. Ces bases de données servent à entraîner des outils d'apprentissage profond et ainsi à améliorer la classification automatique (hébergée sur <http://archdataset.polito.it/>) et publiée dans (Matrone et al., 2020). Ce genre d'initiative a déjà vu le jour il y a quelques années dans le contexte de classification de nuages de points acquis par systèmes mobiles dans des corps de rues (Vallet et al., 2015 <http://data.ign.fr/benchmarks/UrbanAnalysis/> ou plus récemment Roynard et al., 2018 <http://caor-mines-paristech.fr/fr/paris-lille-3d-dataset>).

Nos développements ont particulièrement porté sur le volet de la **segmentation appliquée à la détection de toits, de façades et d'ouvertures**. Cette segmentation s'est voulue principalement **géométrique** au vu des objets d'étude. En passant de l'échelle d'un bâtiment à celle des ouvertures d'une façade, nous constatons que nos recherches s'orientent vers des solutions de segmentation couplant la géométrie à la sémantique. Une fois arrivé au bout de la chaîne de segmentation voire de classification du nuage de points, il est opportun, suivant le cahier des charges, de modéliser les segments issus des étapes précédentes. Le chapitre suivant présente les **solutions de modélisations mises en œuvre** pour répondre à une problématique de reconstruction 3D d'arbres et de reconstruction de bâtiments.

6. Modélisation de nuages de points

Le nuage de points constitue à lui seul une représentation tridimensionnelle de l'objet d'étude, à partir duquel des livrables sont extraits : mesures de longueurs, réalisation de plans de coupes, de sections, de profils en long/travers, etc. A l'heure actuelle, aussi bien les plans de corps de rue, de façades que les plans d'intérieur sont en **grande partie réalisés à la main**, sur la base du nuage de points ou d'une projection du nuage de points colorisé sur un plan (ortho-images). Si toutefois le rendu visuel est prépondérant ou si la maquette numérique du bâtiment est exigée, il est opportun de transformer ces données discrètes en une représentation continue, par le biais d'une modélisation.



6.1 Une définition pour la modélisation

La modélisation 3D est un terme largement adopté dans de nombreuses disciplines, pourtant il peut prêter à confusion par sa vastitude. Le *grandictionnaire.com* ne propose pas moins de 10 définitions, suivant le domaine d'études concerné (informatique, mathématiques, commerce, cybernétique, hydrologie, industrie automobile). Analysons les deux premières :

- Domaine de l'informatique, de la conception et du DAO ¹⁰: « **Procédé de construction de la maquette (ou modèle) d'un objet virtuel**, le plus souvent tridimensionnel, par sa description en langage informatique. Le modèle ainsi créé constitue **une représentation détaillée de l'objet**, qui servira à produire une image de synthèse » (Culture Montréal, 2015) ou encore « **Description dans un langage compréhensible par l'ordinateur de la forme, du mouvement et des caractéristiques d'un objet ou d'un ensemble d'objets qui crée un modèle. La modélisation permet la construction, entre autres, du modèle 2D et du modèle 3D. Une modélisation comprend une partie appelée modélisation géométrique et une partie appelée modélisation fonctionnelle.** » (Office québécois de la langue française, 2002).
- Domaine des mathématiques : « **Utilisation d'une représentation théorique, habituellement sous forme mathématique, d'un système ou d'une réalité complexe, développé pour faciliter la compréhension et l'étude du comportement de ce système ou de cette réalité.** » (Organisation météorologique mondiale, 2011).

Ces différences de sens ont été mises en exergue lorsque nos travaux de modélisation 3D de bâtiments ont suscité un vif intérêt de la part de nos collègues climatologues. La modélisation, au sens des climatologues, vise à simuler, et à long terme prédire, les flux de chaleurs au sein des villes. Ce n'est donc pas un hasard si la définition de la modélisation « mathématique » ci-dessus a été proposée par l'organisation météorologique mondiale.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous entendrons par **modélisation 3D**, l'action de **produire, dans un environnement informatique, un objet virtuel sous forme de représentation géométrique (surfactive ou volumique) en trois dimensions, à partir de relevés effectués sur un objet physique ou à partir de connaissances fondées de l'objet**. Nous ne nous pencherons pas sur la modélisation de phénomènes physiques, tels que les flux de chaleurs urbains, mais plutôt sur la modélisation géométrique 3D d'arbres que nous avons menée en interaction avec une équipe de climatologues, comme nous l'expliquerons dans le paragraphe 6.2.2. (p. 37).

¹⁰ DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

La modélisation à partir d'un nuage de points se base sur des points caractéristiques du nuage et vise à passer de données discrètes à des données continues (surfaiques). Elle permet non seulement de réduire le volume de données (la densité des points du nuage est généralement démesurée au vu du besoin), mais aussi de structurer les données et enfin d'envisager une texturation ultérieure qui donne au modèle 3D l'aspect **d'un clone de la réalité**, sous forme virtuelle. Selon l'usage et la destination du produit final, le modèle doit reprendre certaines caractéristiques et propriétés de l'objet réel. Nous pouvons distinguer les variantes suivantes (Landes et al., 2011, modifié) :

- Le modèle « **restitué** » est obtenu à partir d'hypothèses émanant d'experts du site et qui sont intégrées au cours du processus de modélisation. Il peut être sujet à polémique, car il fait référence à un univers de connaissances architecturales et archéologiques.
- Le modèle « **tel que saisi** » représente l'objet tel qu'il existe au moment de l'acquisition des données. Les informations nécessaires à sa construction sont celles issues exclusivement du relevé de l'objet. C'est une construction fidèle à l'objet en l'état, au moment de sa mesure.
- Le modèle « **tel que construit** » est élaboré sur la base de plans de l'objet, en plus des mesures effectuées sur celui-ci, sans aucune extrapolation ni hypothèse. Il reproduit l'objet tel qu'il était le jour de sa construction, sans les traces d'usures ou de détériorations qu'il est susceptible d'avoir subies.

Avec l'arrivée du BIM, pour ne pas confondre la maquette numérique née de l'imagination de l'architecte et la maquette construite à partir du bâtiment existant, les notions de « **BIM tel que conçu** » et « **BIM tel que construit** » ont fait leur apparition. Pour faire l'analogie avec les 3 modèles cités précédemment, on peut considérer que le « **BIM tel que construit** » s'apparente soit au modèle « tel que saisi » soit au modèle « tel que construit », suivant l'état de l'édifice et le cahier des charges.

Les techniques de modélisation couramment utilisées sont les méthodes de **modélisation par maillage** (ou non paramétriques) et les méthodes de **modélisation par primitives géométriques** (ou paramétriques). Ces deux techniques visent à représenter l'objet, par le biais d'une surface ou d'un volume. Ces surfaces peuvent être plus ou moins complexes (maillages 3D ou primitives) suivant le niveau de simplification autorisé.

Etant donné que la modélisation, rapportée au secteur du bâtiment, vise à reconstruire un objet, que ce soit en passant du réel au virtuel ou en recomposant la surface d'un objet détérioré, **le terme « reconstruction » sera employé dans ce mémoire comme synonyme de « modélisation »**. Cette terminologie est également suggérée par Vallet (2016), dans le sens où « elle regroupe l'ensemble des techniques qui consistent à produire une représentation géométrique d'une scène à partir de données brutes. »

6.1.1 Modélisation par maillage

La modélisation par maillage est utilisée principalement pour représenter des objets difficiles à paramétrer du point de vue mathématique, dont la géométrie est complexe et irrégulière. Les algorithmes sur lesquels ces méthodes s'appuient sont en général des algorithmes de triangulation et des algorithmes basés sur la méthode des éléments finis, générant des maillages polygonaux à partir de nuages de points non structurés. Les algorithmes de maillage les plus courants, comme la triangulation de Delaunay, sont rappelés dans Remondino (2003). Des facettes, dont les côtés relient les différents points du nuage sont ainsi construites, et par leur contiguïté forment une surface. Les modèles qui en découlent sont très fidèles à l'objet relevé, en esquissant son allure réelle au travers de modèles « tels que saisis » (Figure 22).

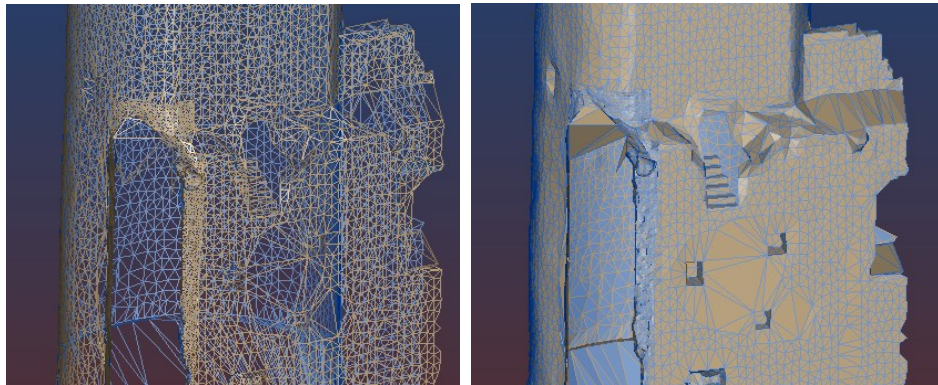


Figure 22 : A gauche : modèle maillé sous forme filaire ; à droite modèle maillé surfacique sur une tour du château d'Andlau (D'Andlau & Landes, 2008 ; Landes, 2008 ; Landes et al., 2007)

Pour répondre à des contraintes de performances d'affichage, de nombreux travaux de recherches portent sur les techniques de maillage dans le domaine de l'informatique, donnant naissance à pléthore d'algorithmes dont Berger et al. (2017) dressent un inventaire exhaustif et argumenté. L'inconvénient de la modélisation par maillage réside en effet dans la **lourdeur des fichiers** produits. Les maillages en sortie des outils ne sont pas toujours optimisés, dans le sens où même une surface d'objets à géométrie simple risque de comporter une densité de points semblable à celle couvrant des surfaces complexes. De plus, des post-traitements souvent manuels visant à combler les trous et simplifier les zones où les facettes sont trop nombreuses plaident en la défaveur de cette solution de modélisation. Ces raisons font que, lorsque la finalité du modèle l'autorise, il est judicieux d'avoir recours aux techniques de modélisation basées sur l'utilisation de primitives géométriques.

6.1.2 Modélisation par primitives géométriques

La modélisation par primitives géométriques est basée sur la construction d'éléments identifiables et descriptibles d'un point de vue mathématique dans le nuage de points. Elle consiste à **décrire l'objet à l'aide de primitives géométriques** (de type plan, cylindre, sphère) ajustées au nuage de points. Les modèles qui résultent de cette méthode sont dits « tels que construits », car ils représentent l'état de l'élément lors de sa conception ou lors de sa construction initiale sans les éventuelles déformations ou dégradations que lui auraient fait subir le temps. Toutefois, le gain esthétique apporté par une modélisation par maillage, comparée à une modélisation par primitives géométriques, est incontestable pour des objets de géométrie irrégulière (voir le vitrail de la Figure 23).

Un avantage certain du modèle construit à l'aide de primitives géométriques vient du fait que l'ensemble du nuage est réduit à de simples formes géométriques décrites par quelques paramètres, ce qui génère des **fichiers plus légers** que ceux d'un modèle maillé.

Il est également envisageable de combiner les deux principes de modélisation, pour aboutir à un modèle hybride, dans lequel les parties de l'objet qui sont définies mathématiquement sont modélisées à l'aide de primitives (tels que les murs, les dalles, les piliers...) et les parties composées de formes complexes (telles que les statues, sculptures...) sont modélisées par maillage.

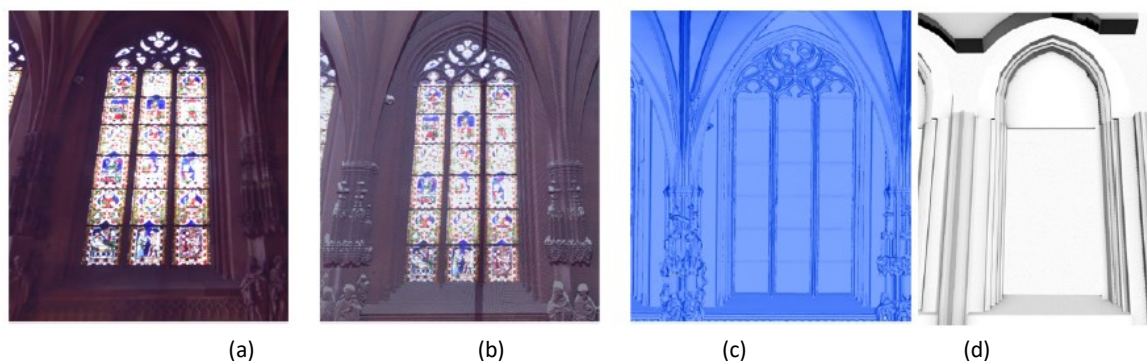


Figure 23 : Exemple de modélisation géométrique : a) photographie ; b) nuage de points colorisé ; c) modèle maillé surfacique ; d) modèle basé sur des primitives géométriques (Landes et al., 2015)

La modélisation géométrique peut se faire selon trois formes de rendus différentes : un modèle **filaire** (ou « fil-de-fer »), **surfacique** ou **volumique**. Les thèses que nous allons mentionner ci-après exploitent l'une ou l'autre forme de rendu, suivant la problématique de reconstruction 3D établie.

6.2 Méthodologie de reconstruction 3D d'arbres

La reconstruction 3D d'arbres trouve un intérêt dans divers domaines : les jeux vidéo pour un rendu réaliste des scènes, dans le domaine forestier pour l'étude de la croissance des plantes et de la biomasse forestière (quantification du volume de bois et de feuilles), dans le domaine urbain, pour la gestion, par les services des espaces verts et de l'urbanisme, de la végétation parsemant la ville, mais aussi dans les études climatologiques étant donné l'effet positif que nul ne conteste aujourd'hui, des arbres sur le climat urbain.

6.2.1 La 3D pour les modèles climatiques

L'un des enjeux de l'étude du climat urbain est la mise au point de modèles numériques permettant de simuler le climat spatialement. En général, trois types de données sont nécessaires en entrée aux modèles de simulations :

- une représentation de la **géométrie** de la zone d'étude,
- la connaissance de la nature des **matériaux** composant cette zone et
- des données de **forçage** météorologique (forçage radiatif (solaire et infrarouge), température de l'air, humidité, vitesse du vent, concentration en CO₂ dans l'air, quantité de précipitation, pression atmosphérique).

A partir de ces informations, le modèle estime les échanges de flux entre chaque objet de l'environnement urbain et ses alentours et simule, suivant un pas de temps défini, une dynamique journalière, hebdomadaire ou mensuelle du climat.

Il existe des modèles de simulation à deux échelles principales :

- les modèles de microclimat : à l'échelle de l'objet, de la rue voire du quartier
- les modèles à méso-échelle : à l'échelle de la ville voire de la région.

Si l'on souhaite se concentrer sur un élément spécifique, comme un bâtiment ou un arbre par exemple, on choisira un modèle de microclimat à l'échelle d'un objet. Par exemple, le **modèle écophysologique**

RATP (*Radiation Absorption, Transpiration and Photosynthesis*) de l'INRA, avec qui nous avons collaboré, fonctionne à l'**échelle de l'arbre** et simule son fonctionnement (Sinoquet et al., 2001).

Si l'on souhaite simuler les interactions entre cet objet et tout son environnement, il faudra utiliser un **modèle de microclimat** capable de simuler une rue ou un quartier. Par exemple, le **modèle LASER/F** (*LAtent, SEnsible and Radiation Fluxes*) développé par des membres de notre équipe considère l'**échelle du quartier** (Kastendeuch & Najjar, 2009). Ce type de modèle permet une simulation sur des zones d'étude plus grandes que ne le permet RATP, mais en réalisant davantage d'approximations.

Pour produire des simulations sur toute une ville ou une région, il faudra utiliser de préférence un modèle à méso-échelle, ce qui engendre une perte de précision supplémentaire dans les simulations (exemple : Méso-NH de Météo-France). Ce genre de modèle ne s'appuie pas sur une reconstruction fine en 3D de l'environnement urbain, mais est tributaire d'une carte qui schématise l'occupation des sols de la ville sous forme de pourcentages.

La qualité des simulations dépend de plusieurs facteurs et en particulier de la qualité du modèle géométrique décrivant l'objet ou la zone d'étude. Quelle que soit l'échelle de simulation choisie, un compromis devra être trouvé entre le niveau de détail (voir paragraphe 7.3.4) de la géométrie des modèles d'arbres et l'exactitude **des simulations climatiques**. Des comparaisons inter-modèles ainsi que des validations ont été réalisées sur la zone du jardin du Palais Universitaire ainsi que sur d'autres quartiers instrumentés. Le lecteur pourra se référer à la thèse d'E. Bournez (2018).

6.2.2 Reconstruction 3D d'arbres en ville

Nous nous sommes penchés sur cette thématique à partir de 2014, en lançant plusieurs projets de recherche technologique et de fin d'études sur la problématique de **la reconstruction 3D d'arbres à partir de données lasergrammétriques**. Nous avons constaté que la littérature ne proposait alors que peu de pistes de reconstruction 3D d'un objet complexe tel qu'un arbre en tant qu'individu isolé. Davantage de travaux traitent de l'extraction de zones végétalisées, voire d'arbres individuels au sein d'un couvert forestier par classification de données de télédétection (images satellites à très haute résolution spatiale ou données LiDAR aéroportées ou photographies aériennes). Les procédés s'attachant à reproduire la géométrie d'arbres individuels depuis le sol comprenaient alors des approches manuelles (souvent descriptives) donc chronophages, des approches basées sur l'exploitation de photographies (souvent limitées à la 2D) et quelques-unes mettant en œuvre des procédés lasergrammétriques. C'est dans ce contexte qu'est né le sujet de thèse d'Elena Bournez.

Pour **reconstruire la géométrie 3D des arbres** tels qu'attendus dans RATP et LASER/F à partir de nuages de points obtenus par balayage laser terrestre, deux algorithmes de reconstruction ont été développés :

- Le premier algorithme, « **TreeArchitecture** », vise à reconstruire l'architecture 3D des arbres par squelettisation des branches et des pousses (Figure 24). Il se décline en une étape de squelettisation, une étape de génération d'un modèle volumique avec l'utilisation de cylindres et enfin une étape de recueil d'autres caractéristiques utiles pour la suite (hiérarchisation des branches, longueur des branches, diamètre du tronc, surface projetée au sol). Le lecteur pourra se référer aux travaux de PFE de Hayot (2014), Bournez (2015), Lempereur (2016) et ([Landes et al., 2014b](#) et [Landes et al., 2015a](#)). Il s'agit d'une **modélisation basée sur des primitives géométriques**. Avec cette maquette, grâce à des relations allométriques (statistiques relatives aux feuilles, leur position, distribution, inclinaison, orientation, etc.) issues de mesures effectuées sur un échantillon de plusieurs pousses feuillées, l'INRA de Clermont-Ferrand est capable de produire un modèle feuillé détaillé (annexe A.7, p. 126).

- Le second algorithme, intitulé « **TreeCrown** » représente l'arbre de façon simplifiée, au travers d'une enveloppe convexe englobant le feuillage. Cette représentation permet d'estimer le volume du houppier à partir du calcul d'une coque convexe (Figure 25). Les expérimentations ont principalement porté sur des tilleuls argentés taillés. Il s'agit ici d'une **modélisation par maillage**.

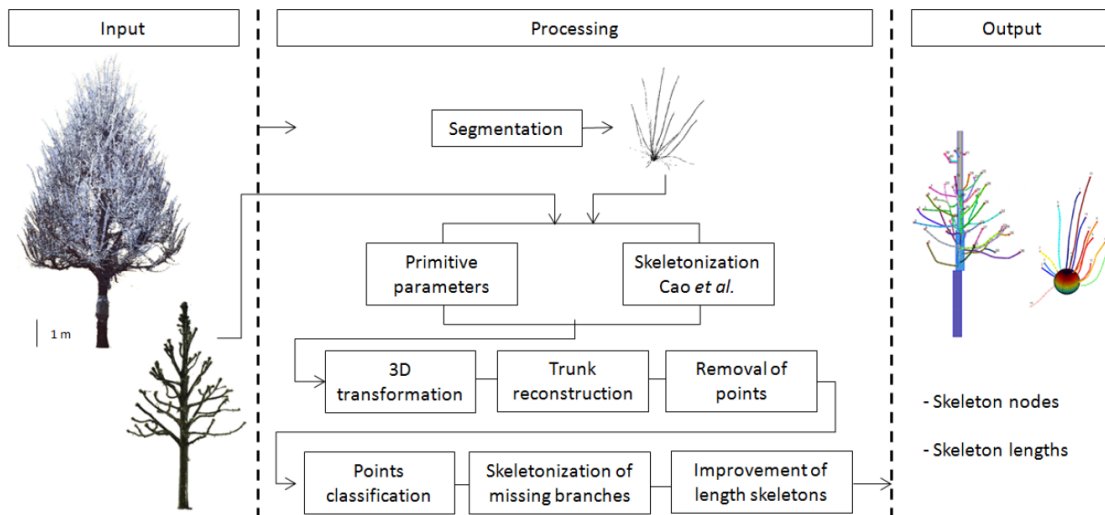


Figure 24 : Algorithme de reconstruction 3D détaillée, baptisé « TreeArchitecture » (Bournez et al., 2016b)

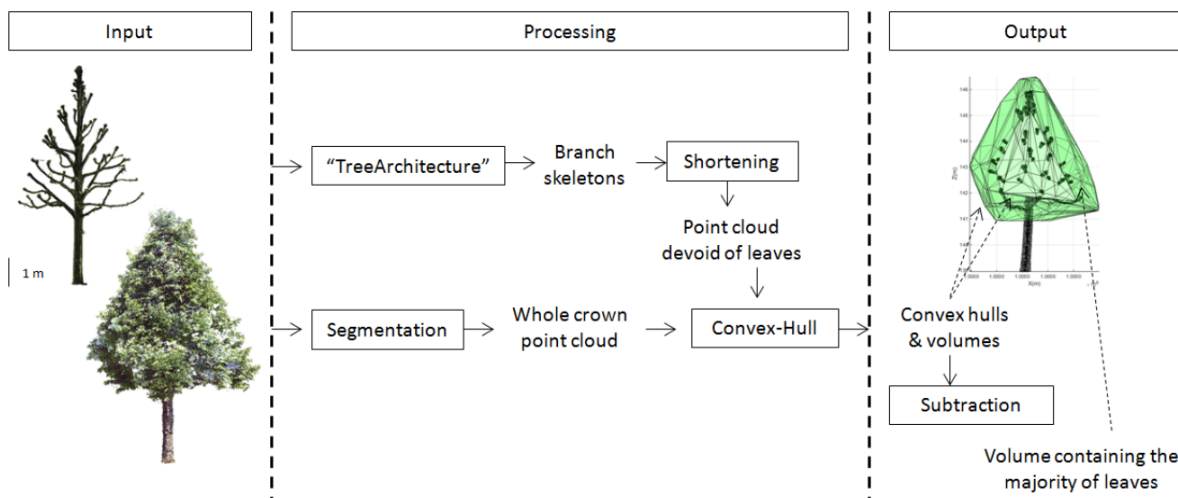


Figure 25 : Algorithme de reconstruction 3D globale, avec enveloppe du houppier, baptisé « TreeCrown » (Bournez, 2018)

L'étape de **segmentation** que nous tenions à scinder de la modélisation dans l'approche de reconstruction 3D de bâtiments à partir de nuages de points ne sera pas abordée dans cette partie consacrée aux arbres, pour deux raisons principales :

- L'arbre que nous allons étudier disposait d'une géométrie très spécifique, du fait de sa taille en « têtes de chats ». Il aurait ainsi exigé une segmentation non transposable à d'autres arbres.
- Développer un algorithme de segmentation retardait l'étape de modélisation géométrique. Or nous souhaitions réaliser une étude de faisabilité avant tout, permettant d'estimer la pertinence de données acquises au scanner laser statique pour la reconstruction d'arbres.

Les seules segmentations mises en œuvre ont consisté à procéder manuellement au découpage de la scène pour isoler le nuage de points couvrant l'arbre étudié et ensuite à décomposer l'arbre en segments de têtes de chats.

Ce choix stratégique s'est révélé judicieux puisque dans l'année qui a suivi nos développements, sont apparus **des outils gratuits de reconstruction 3D d'arbres** à partir de nuages de points n'exigeant pas de segmentation préalable. Une étude comparative a été menée pour confronter nos modélisations à des modélisations produites via ces outils gratuits, comme nous le verrons dans le paragraphe 7.3.2.4 (p. 58). Malgré les résultats prometteurs fournis par nos algorithmes, l'outil « PlantScan3D » a supplanté « TreeArchitecture » et a été adopté par la suite (Bournez et al., 2017).

Nous retiendrons que deux niveaux de reconstructions ont ainsi découlé de ces travaux :

- une « **reconstruction 3D détaillée** », qui préserve la structuration spatiale du feuillage, comme attendu par l'outil RATP. Le modèle 3D correspondant est généré de façon semi-automatique avec utilisation de l'outil « PlantScan3D » et la création du feuillage de l'arbre grâce à la connaissance des relations allométriques (annexe A.7, p. 126).
- une « **reconstruction 3D globale** » faisant intervenir « TreeCrown », pour laquelle le houppier est approximé par une enveloppe dans laquelle le feuillage est uniformément réparti, comme attendu dans LASER/F (Figure 25).

Contrairement aux arbres, étant donné la simplicité géométrique des bâtiments étudiés dans nos projets, leur reconstruction 3D fera davantage intervenir des techniques basées sur l'ajustement de primitives géométriques, comme nous allons le présenter ci-après.

6.3 Méthodologies de reconstruction 3D de bâtiments

Nous distinguerons les approches de modélisations mises en œuvre pour reconstruire les éléments de toits, les éléments de façades et les éléments structuraux en intérieur.

6.3.1 Reconstruction de bâtiments

La question du choix de modélisation, basée sur le nuage de points ou sur un modèle paramétrique de bâtiment, s'est posée. Une approche axée sur un **modèle paramétrique** a pour avantage de fournir, de manière très rapide, des modèles géométriques sans déformations, car elle se base sur un modèle de bâtiment ou de toit prédéfini dans une bibliothèque, mais elle se limite à des bâtiments de géométrie simple. L'approche **non paramétrique**, basée sur le nuage, reste plus fidèle aux données en ajustant le nuage avec un maillage ou localement avec des primitives géométriques, au risque d'aboutir à des modèles avec des déformations visuelles et nécessitant plus de temps de traitement. Une analyse comparative des deux pistes nous a permis de conclure que si le nuage de points est caractérisé par une distribution homogène et que sa densité est en relation avec la dimension des éléments qui sont pertinents à extraire (toit du bâtiment, détails du toit), alors une approche basée sur le nuage est à privilégier (Tarsha-Kurdi et al., 2007c). D'une part, le modèle sera fidèle au bâtiment d'origine et d'autre part, l'approche sera plus facilement transposable à un bâtiment quelconque.

Sur la base du masque de bâtiment extrait lors de l'étape de segmentation (paragraphe 5.3.1, p. 22) et du nuage de points 3D correspondant, la **reconstruction du bâtiment en 3D** s'opère en trois étapes (Figure 26). Après création d'un modèle numérique de surface des bâtiments (MNSb), les façades puis les toits sont détectés et finalement le bâtiment est reconstruit en 3D.

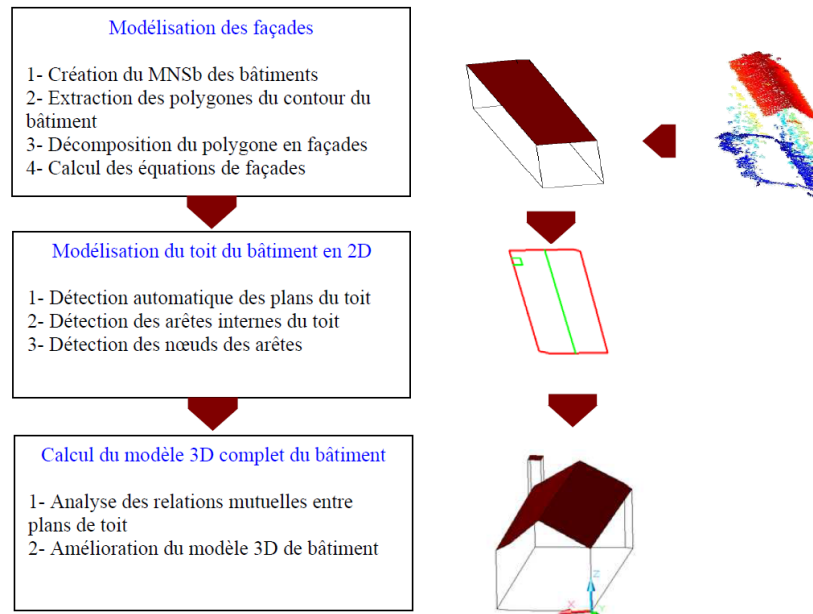


Figure 26 : Méthodologie développée pour modéliser un bâtiment en 3D (Tarsha-Kurdi, 2008)

La section consacrée à l'évaluation de nos algorithmes (paragraphe 7.3.2 p. 52) montrera que l'approche livre des résultats très satisfaisants en détectant correctement les toits, pour différentes formes et niveaux de complexité de bâtiments, malgré une densité de points très faible (Tarsha-Kurdi et al., 2007a ; Tarsha-Kurdi et al., 2008). La densité produite par un scanner laser sur une façade nous a permis d'affiner ensuite le développement de nos algorithmes.

6.3.2 Reconstruction d'éléments de façades

Dans le prolongement de l'approche développée pour extraire les points de contours des segments plans de façades de bâtiments (section 5.3.2), nous avons développé une méthode menant au dessin des **ouvertures sous forme vectorielle**. Du fait de la technologie employée, les coins sont rarement scannés, c'est pourquoi il est nécessaire de calculer en 2D les points d'intersection entre arêtes (segments droits ou arcs). Seuls ceux connectant des segments voisins sont considérés (Figure 27).

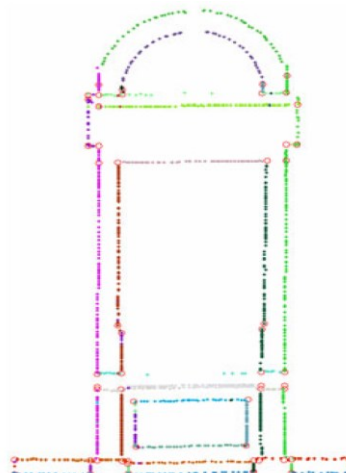


Figure 27 : Création de nœuds (cercles rouges) à l'intersection de segments contenant les points de contours (Boulaassal et al., 2010)

Ensuite, ces segments sont classés en fonction de leurs directions, avant d’être reliés aux segments les plus proches. Enfin, sur la base de la distance calculée entre ces segments, ils sont affectés ou non à la même ouverture selon un critère de voisinage (Figure 28).

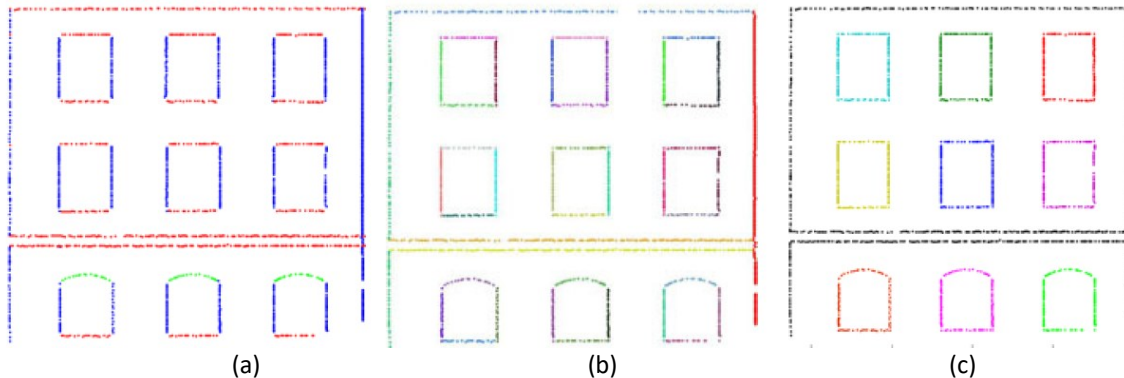


Figure 28 : Points de contour représentant des ouvertures ; a) décomposition et classification des contours suivant leur direction ; b) détection des segments contigus ; c) affectation des segments voisins pour composer l’ouverture (Boulaassal et al., 2010)

Nos recherches se sont concentrées, dans un premier temps, sur des formes géométriques simples. Une reconnaissance automatique des composants architecturaux caractérisant une ouverture à partir des éléments géométriques détectés est difficile. La Figure 29a montre le modèle volumique produit à partir de la façade présentée précédemment, après avoir fixé une largeur et hauteur moyenne pour chaque ouverture.

Sur la base de ces recherches, une **interface graphique interactive** a été développée en collaboration avec C. Chevrier du laboratoire MAP-CRAI de l’école d’architecture de Nancy. Elle aide l’utilisateur à dimensionner les objets paramétriques et à compléter la façade avec des éléments issus d’une bibliothèque de symboles, avant de produire un rendu réaliste comme présenté dans la Figure 29b.

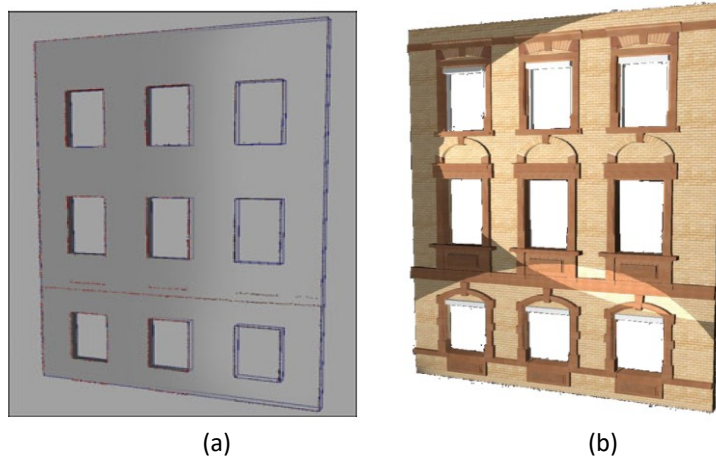


Figure 29 : Modèle 3D d’une façade et de ses ouvertures. a) En bleu, le modèle paramétrique ; en rouge, les éléments géométriques extraits automatiquement b) modèle texturé et éclairé virtuellement (Boulaassal et al., 2010)

Cette approche de reconstruction d’éléments de façades aura également été un support précieux pour plusieurs projets ultérieurs. Par exemple, elle a été intégrée dans une approche semi-automatique de **production de plans de coupe en 2D** à partir de nuages de points acquis en intérieur et en extérieur, dans un édifice d’architecture complexe (comprenant des arcs, des voûtes, des colonnes) situé à Ottmarsheim (Alsace) (travail de PFE de Bidino (Landes et al., 2014a)). Cet algorithme aura ensuite inspiré les travaux de reconstruction en intérieur, que nous allons présenter ci-dessous.

6.3.3 Reconstruction d'éléments en intérieur

Le processus de reconstruction des dalles et des murs de bâtiments a consisté à générer des volumes (pour dalles et cloisons) et des surfaces (pour une seule face de mur) à partir des éléments extraits des nuages de points (segments de murs, de sols et de plafonds).

La Figure 30 présente la reconstruction réalisée à partir de nuages de points acquis au premier étage du bâtiment de l'INSA Strasbourg et met en évidence **le sol, les cloisons et les murs de façades sous forme de volumes**. Le format .obj¹¹ a été choisi pour décrire ces géométries avant d'être converti au format IFC¹², propre aux logiciels BIM.

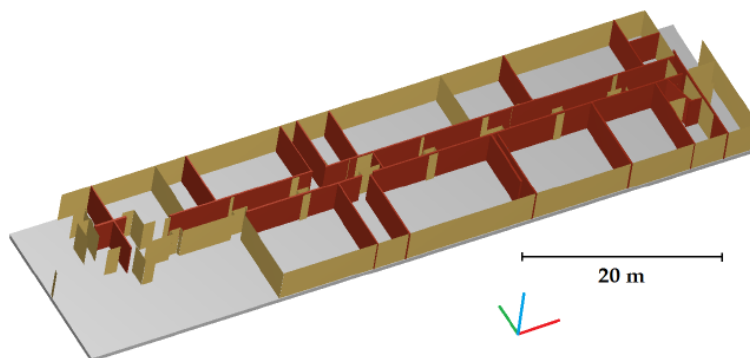


Figure 30 : Reconstruction d'éléments en intérieur (sol, murs de façade, cloisons) au format .obj du 1^{er} étage du bâtiment C de l'INSA (Macher, 2017)

En dehors des progrès atteints en termes de segmentation et modélisation automatiques de nuages de points en intérieur, la thèse en question aura également permis de sensibiliser les acteurs de la topographie, en particulier les géomètres-experts, à l'importance du BIM dans les métiers du bâtiment. Dans ce contexte, il nous a semblé opportun d'intégrer ces notions dans nos enseignements à l'INSA. La première pierre à l'édifice a été apportée par l'organisation de deux modules électifs sur le BIM à l'INSA, en collaboration avec la spécialité architecture et d'autres spécialités d'ingénieurs (voir p. 100).

Les processus développés dans ce chapitre suivent une approche différente suivant l'objet d'étude et le besoin de l'utilisateur en fin de chaîne. Nous avons vu les réponses apportées au besoin d'aboutir à une **maquette numérique de bâtiment** à partir de nuages de points en exploitant majoritairement la connaissance de la géométrie de ses composants. La complexité et l'unicité d'un objet d'étude du vivant, tel que **l'arbre en ville**, appellent toutefois d'autres approches de représentations, qui doivent être en adéquation avec les exigences et les limites des modèles de simulations climatiques considérés. Ainsi, l'évaluation des résultats produits par ces approches constitue une étape majeure et incontournable dans le processus de validation d'une approche. Dans le quotidien de l'ingénieur topographe, cette question est centrale étant donné **l'obligation de produire un résultat accompagné d'un degré de précision**. Elle a été abordée dans chacune des thèses menées et mérite de ce fait un chapitre spécifique.

¹¹ OBJ : format de fichier contenant la description d'une géométrie 3D (Wavefront Technologies), source : Wikipedia.

¹² IFC : *Industry Foundation Classes*. Format de fichier standardisé (norme ISO 16739) orienté objet, utilisé par l'industrie du bâtiment pour échanger et partager des informations entre logiciels.

7. Evaluation de la qualité des résultats

Décomposée en évaluation qualitative (visuelle) et quantitative, l'évaluation d'un résultat fait appel à des connaissances techniques et amène à analyser les erreurs susceptibles d'affecter chaque étape de la chaîne de traitement¹³ mise en place et par voie de conséquence à établir un bilan des erreurs.



Du fait que la technologie des scanners laser ait rapidement été adoptée par des corps de métier de divers horizons et, qu'au travers de leurs interfaces, les instruments ou logiciels transmettent un vocabulaire souvent inapproprié (provenant d'une traduction peu rigoureuse de la version anglaise), la terminologie relative à la lasergrammétrie est fréquemment employée à tort¹⁴. Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, les notions de résolutions ou de pas sont souvent confondues avec l'exactitude ou encore la précision. Il nous semble utile de lever cette confusion.

- **La résolution** : Un instrument TLS est un appareil qui mesure des distances par incréments égaux d'arc et produit une image de distance (Lichti, 2017). Le balayage laser s'effectue selon une trame spécifique dont les paramètres sont à définir par l'utilisateur, qui fixe le pas angulaire vertical et horizontal de son choix. Le plus petit **pas angulaire** disponible correspond à la **résolution angulaire**, et caractérise donc la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes. Si l'on rapporte l'écart angulaire à un déplacement à une certaine portée, on parlera de résolution spatiale d'un scanner laser terrestre. La **résolution spatiale** représente donc le plus petit espacement entre deux points successifs que l'on puisse mesurer à l'aide du scanner laser à une distance objet-scanner fixe.
- **La précision** (*precision* en anglais) décrit la dispersion de mesures autour de la valeur la plus probable de l'échantillon. Le critère statistique correspondant est l'écart-type σ (*standard deviation*, en anglais).
- **L'exactitude** (*accuracy* en anglais) décrit la dispersion de mesures autour de la valeur vraie de la grandeur mesurée et est décrite par l'erreur moyenne quadratique, notée « *emq* » ou encore « *mq* » (*root mean square error*, en anglais). Evidemment, les valeurs vraies ne sont que rarement connues, donc une mesure indépendante, de meilleure qualité, qualifiant la valeur vraie est nécessaire. Des points de contrôle ou des mesures de distances observés par tachéométrie sont couramment utilisés à cette fin. Par exemple, les coordonnées des centres de cibles observées par lasergrammétrie peuvent être comparées aux coordonnées obtenues par tachéométrie pour quantifier les écarts vrais entrant dans le calcul de l'exactitude.

Les formules associées à la précision et l'exactitude d'observations sont rappelées en annexe A.8, p. 126.

Le fait de disposer d'observations surabondantes dans un réseau topométrique permet, non seulement d'améliorer la précision des observations, mais aussi de détecter d'éventuels biais à caractère systématique, ce que révélera l'exactitude. L'exactitude (*emq*) et la précision sont en effet liés par la relation (1), dans laquelle β représente un biais à caractère systématique et σ l'écart-type.

$$emq = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2} \quad (1)$$

¹³ Le cryptogramme de la loupe utilisé pour illustrer l'étude de qualité a été placé en fin de chaîne uniquement (Figure 1). Il est toutefois incontournable de valider chaque étape de la chaîne de traitements avant d'amorcer la suivante.

¹⁴ La création d'un lexique terminologique sur la lasergrammétrie est en cours à l'Association francophone de topographie (AFT)

La Figure 31 illustre les notions d'**exactitude** et de **précision** rapportées à la numérisation d'un bâtiment. La précision du nuage de points est liée à la dispersion des points autour du plan le plus probable (plan moyen) ajusté au nuage. L'exactitude du nuage définit sa fidélité à la réalité, cette réalité étant observée dans un référentiel cartographique spécifique. Elle caractérise la dispersion des points autour du plan de référence.

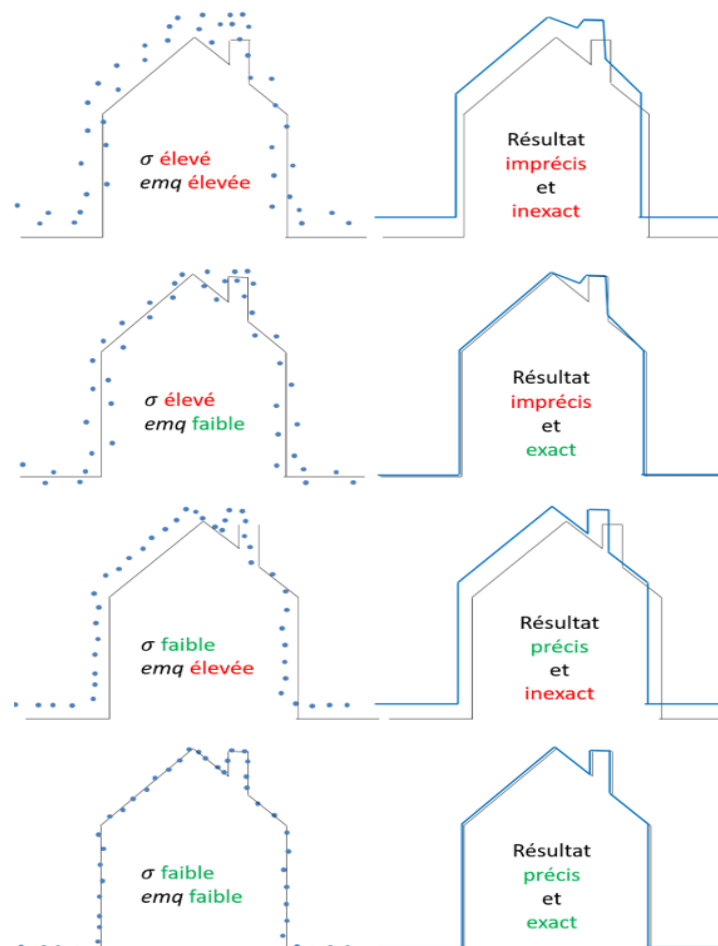


Figure 31 : Critères de précision et d'exactitude rapportées à la modélisation de bâtiments à partir de nuages de points (adaptée de YellowScan@2020); vérité terrain en gris, points du nuage en bleu et modèle calculé en trait bleu continu.

Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire pour quantifier la qualité d'un résultat. Le besoin de qualifier le résultat se fait d'autant plus ressentir avec l'avènement d'outils de traitements rapides mais opaques (Murtiyoso, 2020). Les erreurs affectant un résultat peuvent être classifiées selon quatre catégories (inspiré de Staiger, 2005), que nous reprendrons individuellement dans les paragraphes suivants :

- **Erreurs liées à l'acquisition** des données (erreurs instrumentales, erreurs liées au couplage des composants du système, erreurs liées à la géométrie de prise de vue, à la technologie employée, au mode opératoire mis en œuvre, au choix des paramètres de balayage)
- **Erreurs liées à l'objet numérisé** (étendue, couleur, géométrie, matériaux)
- **Erreurs environnementales** (température ambiante, pression, humidité), affectant l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde
- **Erreurs liées à la chaîne de traitements** et au degré d'intervention humaine ; en d'autres termes, les erreurs susceptibles d'intervenir dans les étapes nécessaires au passage de la donnée brute au modèle 3D final. Le degré d'automatisation du processus sera également évoqué dans cette partie ainsi que la question du niveau de détail.

Hormis les erreurs environnementales que nous n'avons pas eu l'occasion d'analyser, chacune de ces catégories d'erreurs sera mentionnée et illustrée sur la base de travaux menés pour les détecter et les quantifier.

7.1 Erreurs liées à l'acquisition des données

Ces erreurs sont liées aux **instruments** employés, leur couplage, ainsi qu'aux **modes opératoires** mis en œuvre pour numériser le site ou l'objet d'intérêt. Le choix de l'instrument et des paramètres de balayage dépendra du cahier des charges. Bien entendu, les constructeurs annoncent des critères de qualité relatifs aux capacités de l'instrument. Ces documentations techniques restent quelquefois sommaires, sinon à prendre avec précaution, car les chiffres annoncés demandent généralement à être validés ou revus en fonction des conditions d'acquisition et du mode opératoire.

7.1.1 Erreurs liées à l'instrument de mesure

Alors que le réglage des instruments topographiques par l'opérateur était encore envisageable il y a une quinzaine d'années, il devient impensable aujourd'hui, principalement en raison de la complexité des systèmes électroniques venus remplacer ou compléter les composantes mécaniques. Les instruments s'apparentent de plus en plus souvent à des « boîtes noires », dont le seul point d'entrée est l'interface utilisateur. Les travaux traitant du sujet dans la littérature ont montré que les modèles d'erreurs associés à des mesures effectuées à l'aide d'une station totale peuvent être transposés aux scanners laser terrestres. Malgré un contrat de maintenance avec le constructeur incluant un contrôle de **calibration de l'instrument**, il convient suivant les cas, d'effectuer soi-même une calibration de l'appareil afin de modéliser le phénomène perturbateur et de réduire son effet sur les mesures (Lichti, 2017 ; Lichti, 2019). Plusieurs expériences mettant en œuvre différentes configurations de cibles ont été expérimentées dans Abbas et al. (2014) et peuvent servir de point de départ pour procéder à des auto-calibrations. Le dernier scanner commercialisé par Trimble (Trimble_X7@2020) opère une calibration automatique avant balayage, prouvant ainsi que la question est au centre des préoccupations chez certains constructeurs (paragraphe 2.2.2., p. 112).

Sans entrer dans le détail des erreurs liées à toutes les technologies de mesures 3D mentionnées dans ce mémoire, nous nous contenterons de mentionner des travaux liés à un système d'acquisition non dédié initialement à la production de nuages de points 3D : **une caméra RGB-D**. Au cours de la dernière décennie, les caméras RGB-D ont connu un succès certain en raison de leur capacité à fournir simultanément une image en couleurs et une carte de profondeur, moyennant un faible investissement financier. De tels capteurs sont particulièrement appréciés pour des applications en robotique ou en vision par ordinateur (exemple des caméras Kinect développées par Microsoft). Il nous a semblé intéressant d'étudier la pertinence et la précision des caméras RGB-D pour la **modélisation 3D de petits objets, à courte portée**. Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en place une approche de calibration de l'appareil afin d'analyser d'éventuels phénomènes perturbateurs (Lachat et al., 2015c ; Lachat et al., 2015b). Si la précision de mesure a été estimée satisfaisante pour un système développé à des fins de jeux vidéo (à 1 cm pour des portées de 2 m), le protocole d'acquisition et de traitement à mettre en œuvre pour l'atteindre est gourmand en temps. Ainsi, à des fins de modélisation 3D, cette technologie ne supplantera pas les techniques photogrammétriques conventionnelles applicables avec des caméras à bas coût, en particulier depuis l'accès à une large gamme de logiciels robustes et disponibles sur le marché pour générer du nuage de points à partir de photographies.

La caméra 3D Kinect a également été testée du point de vue de sa pertinence pour localiser un système mobile en milieu urbain, sans GNSS (Mittet et al., 2013). Les erreurs liées aux acquisitions dynamiques (positionnement du mobile, calibration, bruit de mesure) ont été détaillées dans la thèse de Mittet (2015), à laquelle nous renverrons le lecteur. Après calibration de la caméra RGB-D, la précision de positionnement fournie par l'algorithme développé sur un ensemble de données simulées atteignait 3.4 cm pour un déplacement d'environ 5 mètres. Appliquée à des données réelles, l'évaluation quantitative a été réalisée en comparant notre résultat à la position réelle de la plate-forme obtenue par mesures tachéométriques (Mittet et al., 2014). La dérive totale à l'extrémité est d'environ 1,3 m après 20 mètres de déplacement. Ce résultat est relativement correct si l'on considère que l'approche proposée est incrémentale et non itérative.

7.1.2 Erreurs liées au mode opératoire

Un mode opératoire adapté permet de réduire les sources d'erreurs provenant soit de l'environnement (courbure de la terre, réfraction atmosphérique, taille ou étendue du chantier) soit de l'instrument (erreurs de collimation). Du fait de son utilisation aisée sans connaissance en mesures topographiques, les scanners laser étaient accueillis par les utilisateurs comme l'instrument idéal qui allait leur permettre de s'affranchir des services d'un géomètre. Toutefois, progressivement, l'importance de choisir convenablement les stations, de prévoir des points de calage, de procéder par boucles, d'effectuer des contrôles, de géoréférencer les nuages, ont permis de recadrer les opérations de numérisations et de rappeler les principes de base à respecter dans des opérations topographiques.

7.1.2.1 Evaluation de la configuration du réseau

Il est de plus en plus courant que seul le nuage de points soit l'élément de jonction entre deux stations successives. La qualité de la consolidation qui en découlera sera dépendante non seulement de la qualité des données acquises par le scanner, mais aussi des paramètres de numérisation (densité de points) et de la configuration du levé. Ainsi, un choix de stations respectant des zones de recouvrement suffisant entre deux stations successives améliorera la qualité du recalage. Un **cheminement fermé sur lui-même** (en boucle) sera à privilégier à un **cheminement en antenne** (Figure 32), comme évoqué dans le processus de consolidation (p. 17). Si le cheminement en antenne est sujet à une transmission d'erreurs causée par un cumul d'erreurs de consolidations successives, dans des cheminements en boucle, la première et dernière station partagent une zone de numérisation commune permettant de mettre en évidence la propagation des erreurs successives de recalage et ainsi de compenser les écarts adéquatement.

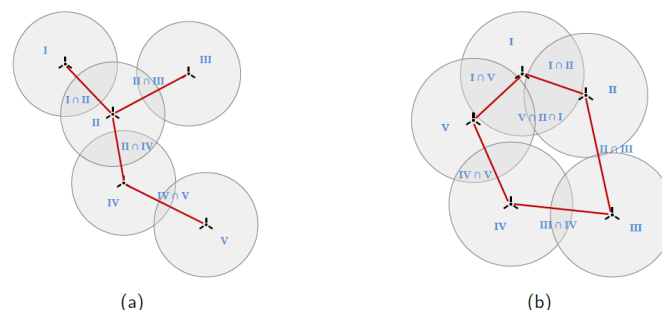


Figure 32 : Configuration d'un réseau de stations : a) en antenne et b) en boucle. En rouge, les côtés du cheminement, en gris, les zones balayées, en bleu, les numéros de nuages (Lachat, 2019)

Ce mode opératoire est préconisé avec l'utilisation d'instruments basés sur les algorithmes de SLAM, en raison de la dérive qui les caractérise. Si la disposition des stations est laissée à l'appréciation de l'opérateur, le processus de consolidation reste toutefois une boîte noire dans la majorité des logiciels associés au scanner. Les travaux menés en ce sens (Salgues et al., 2020) nous ont permis de conclure, en comparant les nuages de points acquis en temps réel avec des nuages de points acquis au scanner statique, que le mode opératoire jouait évidemment un rôle crucial dans la mise en œuvre des systèmes basés sur le principe du SLAM et que ces systèmes ne pouvaient pas garantir la précision acquise avec un système statique.

A l'avenir, nous tenterons de coupler les deux, c'est-à-dire **compenser des portions de nuages de points acquis par des systèmes d'acquisition temps réel sur la base de « nuages d'appui » acquis au scanner statique** à des endroits stratégiques, au même titre que l'on compenserait des observations tachéométriques au sein d'un réseau d'insertions, sur la base d'un réseau de points de canevas.

7.1.2.2 Evaluation de la consolidation

L'algorithme open source MORPHEd dédié à la consolidation de plusieurs nuages de points (voir paragraphe 3.2, p. 17) permet de produire un **rapport d'évaluation de la qualité** de la consolidation opérée. Il a été testé sur plusieurs jeux de données, avec différentes caractéristiques (volume de données, inter-visibilité des stations, recouvrements, encombrement).

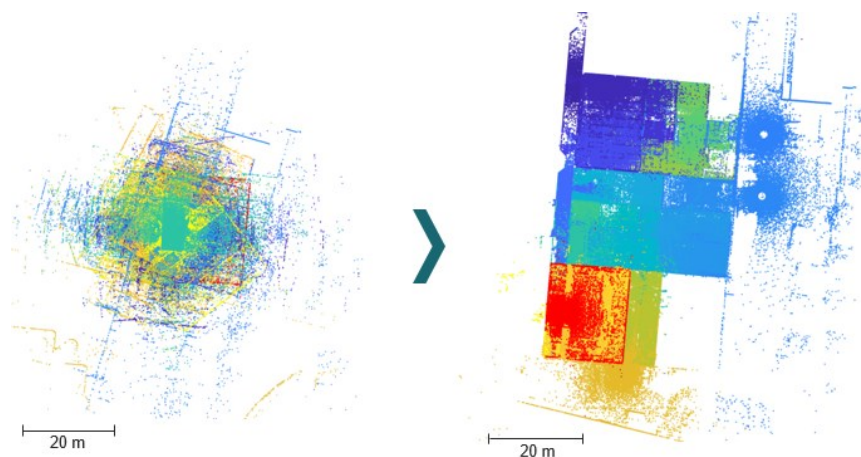


Figure 33 : Recalage global de 52 stations de numérisation (acquises dans les locaux de l'INSA Strasbourg) reliées entre elles par environ 70 cibles de différentes natures (Lachat et al., 2018)

En dehors de l'**évaluation qualitative** du résultat, qui permet de valider visuellement sa cohérence, (illustrée dans la Figure 33), une **évaluation quantitative** a été entreprise en suivant deux pistes (Lachat, 2019) :

- a) constater la **convergence** du calcul de compensation
- b) comparer les **résultats du recalage** à des résultats pris comme références

La convergence du calcul de compensation a été analysée selon le critère des moindres carrés, qui dépend des résidus et doit donc tendre vers un minimum afin d'aboutir à des résidus minimums au niveau des points communs ; à ce stade, les paramètres compensés n'évoluent plus et ont donc atteint leur valeur la plus probable.

Dans un second temps, les résultats obtenus à l'issue du recalage avec la méthode développée ont été comparés à des consolidations « de référence ». Cela implique d'une part de choisir un ou des logiciel(s) courants, dont les performances sont éprouvées et d'autre part de définir ou un plusieurs critères pour la comparaison : les résidus calculés au niveau des points communs. Chacun des logiciels choisis comme « référence », Faro Scene (logiciel constructeur) et 3DVEM (logiciel universitaire), fournissent des critères d'évaluations à l'issue du recalage, mais malheureusement difficilement comparables. C'est pourquoi, en partant des mêmes jeux de données, les résidus et écarts-types ont été recalculés en suivant une approche unique.

Il ressort de cette étude que quel que soit le jeu de données considéré, la solution MORPHED fournit les mêmes valeurs moyennes écarts-types des résidus que les logiciels cités. Ainsi, le recalage en bloc mis en place dans ces travaux a pu être validé. L'approche de consolidation développée de même que le processus d'évaluation ont été publiés dans (Lachat et al., 2018).

7.2 Erreurs liées à l'objet numérisé

En 2007, dans l'optique d'appréhender la sensibilité des mesures lasergrammétriques terrestres aux matériaux présents sur les façades et en vue de reproduire ces tests avec les futurs scanners laser en notre possession, nous avons élaboré une planche à échantillons, telle que présentée Figure 34. Nous nous sommes intéressés à l'analyse de facteurs d'influences tels que la **couleur**, la **rugosité**, l'**orientation**, les **matériaux**, sur la rétrodiffusion laser tant d'un point de vue de la mesure de distance que de la mesure d'intensité.

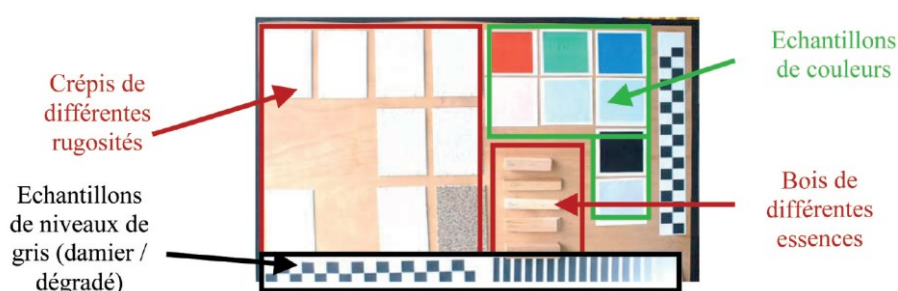


Figure 34 : Planche à échantillons créée pour étudier l'influence des caractéristiques de l'objet sur la mesure effectuée au scanner laser (environ 1.10 x 1.60 m)

Ces analyses ont révélé que la mesure de distance est entachée d'une imprécision qui varie suivant les caractéristiques de la surface et que le critère de la **couleur de l'objet** est prédominant pour des mesures faites à une portée de 15 mètres. Ainsi, des mesures sur **des surfaces claires** produiront des résultats plus précis que sur des surfaces sombres qui ont tendance à absorber le signal. Ces tests permettent de comprendre si l'imprécision sur la mesure de distance ou d'intensité provient du mauvais rapport signal sur bruit caractérisant le type de scanner employé ou s'il est à rapporter uniquement à l'objet et ses caractéristiques physiques (Böhler, 2006). Nos travaux ont été publiés dans Vögtle et al. (2008) et Landes & Vögtle (2009). Par ailleurs, un travail de fin d'études a permis de mettre en lumière la difficulté à scanner des **surfaces très réfléchissantes** (cuves pharmaceutiques en inox) et de proposer un mode opératoire adapté pour contourner le phénomène (Ris, 2011).

L'intensité du signal renvoyé ne dépend pas seulement des caractéristiques de l'objet citées précédemment, mais aussi de sa distance au scanner. Cette distance étant variable suivant la portée à laquelle se situe l'objet, il est assez intuitif de penser que la **qualité du nuage est hétérogène** au sein

d'une scène. Des investigations complémentaires permettront de réfléchir à une solution pour tenir compte de cette hétérogénéité au sein des nuages de points acquis par LiDAR, phénomène souligné dans Polidori et al. (2020).

7.3 Erreurs liées à la chaîne de traitements

Au cours de chaque thèse abordant la génération de modèles 2D ou 3D à partir de nuages de points, une approche d'évaluation de la qualité des modèles 3D produits a été mise en place. Pour cela, il a été nécessaire de considérer l'apport de chaque étape de traitement conduisant à la génération du modèle 3D final, soit les résultats de segmentation ainsi que les résultats de reconstruction.

Les approches développées pour mettre en place une évaluation sont exposées par la suite. Nous ne nous attarderons pas sur l'évaluation **qualitative**, à savoir un contrôle visuel du résultat, réalisé d'office, mais nous concentrerons essentiellement sur les méthodes d'évaluations **quantitatives** mises en œuvre.

7.3.1 Approches mises en place pour évaluer l'étape de segmentation

L'évaluation de la qualité d'une segmentation dépend de la qualité des résultats qu'elle produit, c'est-à-dire en premier lieu des segments détectés, car ils jouent un rôle crucial dans les processus ultérieurs de reconstruction. Ce paragraphe ne fera état que de l'évaluation de la segmentation de nuages de points de bâtiments, car la reconstruction d'arbres s'est appuyée sur une segmentation réalisée manuellement.

7.3.1.1 Bâtiments entiers

L'évaluation des résultats que produit l'outil de segmentation de bâtiments développé dans Tarsha-Kurdi (2008) est basée sur **l'analyse de la précision de l'extraction de bâtiments** et est menée en deux temps.

Tout d'abord, une méthode manuelle consiste à compter la proportion de bâtiments détectés par rapport au nombre total de bâtiments présents. Les **pourcentages de détection** des bâtiments pour deux sites d'études ont atteint plus de 93%. Les limites de l'algorithme se révèlent en présence de bâtiments de taille comparable à celle des arbres environnants ou en présence de bâtiments adjacents de taille similaire. Ses forces résident dans son efficacité à produire des segments de bâtiments à partir de données LiDAR à un seul écho, même en présence de discontinuités de terrain ou des densités de points différentes et relativement faibles (1.3 pts/m² et 7 pts/m²).

Dans un second temps, le résultat de l'approche de segmentation étant une image binaire présentant le masque de bâtiments, **une matrice de confusion** a pu être établie. Elle confronte, pixel à pixel, un masque de référence au masque produit par l'étape de segmentation développée (Figure 35). Le masque de référence a été produit par digitalisation manuelle des contours de segments dans le nuage de points, avant transformation en image. L'interprétation de cette matrice conduit ensuite à distinguer des erreurs de type I, II et erreur totale, inspirées des travaux de (Sithole et Vosselman, 2004).

Référence	Résultat			Somme
		Bâtiments	Non-bâtiments	
	Bâtiments	a	b	a+b
	Non-bâtiments	c	d	c+d
	Somme	a+c	b+d	e=a+b+c+d

Site	Erreur I %	Erreur II %	Erreur totale %	Mention affectée à l'extraction
Hermanni	0.22	0.01	0.01	Excellent
Campus de Strasbourg	1.57	0.34	0.55	Excellent
Centre ville de Strasbourg	1.46	0.97	1.12	Très bien

- L'erreur de type I, qui est égale à $\frac{b}{a+b}$ et représente la proportion de pixels qui auraient dû être classés en *bâtiment* dans l'image résultante.
- L'erreur de type II, qui vaut $\frac{c}{c+d}$ et représente la proportion de pixels qui auraient dû être classés en *non-bâtiment* dans l'image résultante.
- L'erreur totale, qui est égale à $\frac{b+c}{e}$, qui représente la proportion de pixels mal classés dans l'image résultante.

Figure 35 : Matrice de confusion (à gauche) et mentions (erreurs de type I et II) qualifiant la segmentation de bâtiments

7.3.1.2 Façades

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation de façades développé dans Boulaassal (2010) est basée sur la comparaison de segments plans obtenus automatiquement sur des façades de bâtiments, avec ceux extraits d'une segmentation de référence générée manuellement (Landes et al., 2012a). Elle s'appuie sur l'analyse **d'indices de qualité** permettant de déterminer le degré de similitude entre les segments plans calculés et ceux de référence. Le degré de similitude tient compte de deux critères :

- la **qualité de détection** des segments plans comparée au résultat issu d'une segmentation manuelle, au travers d'opérateurs booléens (énumérés dans la Figure 36),
- les **paramètres mathématiques des plans ajustés** (analyse des écarts angulaires entre normales des plans extraits et leurs homologues dans la référence).

$A(i)$: segment plan extrait automatiquement
 $SR(i)$: segment plan de référence
 $Card(A)$: cardinal du segment, c'est-à-dire le nombre de points composant le segment
 $I(i) = A(i) \cap SR(i)$: points du segment i correctement extraits; il s'agit du nombre de points communs aux deux segments comparés
 $D^-(i) = SR(i) \setminus A(i)$: points affectés de manière erronée à un autre segment que $A(i)$
 $D^+(i) = A(i) \setminus SR(i)$: points devant appartenir à un autre segment que $A(i)$
 $TDA(i)$: taux de points correctement détectés dans $A(i)$
 $TDR(i)$: taux de points correctement détectés par rapport aux $SR(i)$

$$TDA(i) = \frac{I(i)}{Card(A(i))} \quad TDR(i) = \frac{I(i)}{card(SR(i))}$$

Figure 36 : Indices de qualité pour évaluer la segmentation en plans, de façades de bâtiments

La Figure 37 présente, en image, un exemple d'application de l'approche d'évaluation mise en place. Le résultat de la segmentation automatique appliquée à un nuage couvrant une façade de l'INSA est comparé à une segmentation de référence issue d'un traitement manuel et le tableau recensant les indices de qualité est reporté en Figure 37c.

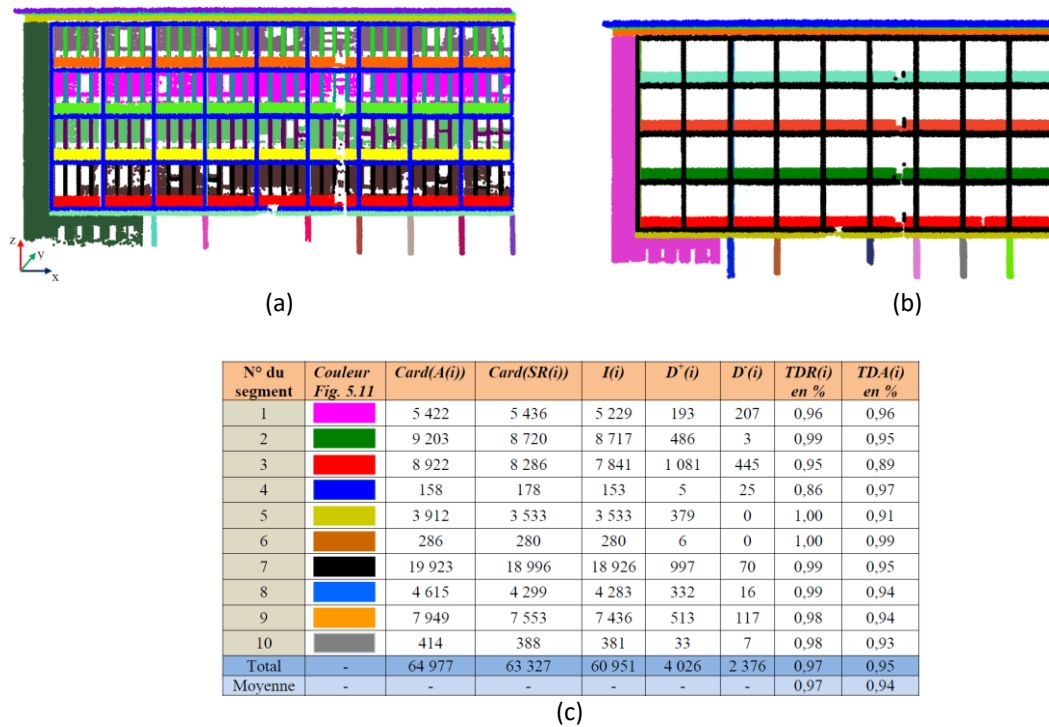


Figure 37 : Evaluation de l'étape de segmentation de façades appliquée au nuage de l'INSA ; a) résultat de la segmentation automatique ; b) segmentation de référence ; c) tableau d'évaluation pour un échantillon de 10 segments plans

Une mesure globale de la qualité de la segmentation consiste à **diviser le nombre de points extraits correctement par le nombre de points contenus** dans l'ensemble des segments de référence (indice TDR(i)). Dans l'exemple précédent, ce taux s'élève à 0,97, ce qui signifie qu'en moyenne 97% des points ont été extraits conformément à la référence.

7.3.1.3 Eléments d'intérieurs de bâtiments : plafonds, dalles, murs

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation d'intérieurs de bâtiments développée dans la thèse de Macher (2017) s'appuie sur **l'analyse de la classification des segments plans**. Dans les travaux précédemment cités, la géométrie des segments plans de façade avait une importance primordiale puisque les contours des segments plans allaient décrire le contour des objets recherchés (toits, façades). Donc les indices de qualité basés sur la comparaison de surfaces couvertes par les segments calculés et de référence prenaient tout leur sens. En intérieur, les obstacles situés entre le scanner et les objets sont tellement nombreux, qu'il est utopique d'en tirer des contours directement exploitables. Les indices de qualité basés sur les surfaces que couvrent les segments plans sont donc inappropriés. En revanche, la capacité à classifier les segments en classes d'objets est primordiale ici. C'est pourquoi, **la précision de la classification des points** en sol, mur, plafond a été placée au centre de cette évaluation.

Des métriques semblent s'imposer progressivement comme métriques standards pour évaluer les performances d'approches de segmentations sémantiques. On peut citer notamment la « précision » (*correctness* ou *precision*, en anglais), le « rappel » (*completeness* ou *recall*, en anglais) ou encore le « score F1 » qui est une fonction des deux métriques précédentes (voir Heipke et al., 1997, Roynard et al., 2018). Elles se calculent à partir de « vrais positifs (VP) », « faux positifs (FP) », « vrais négatifs (VN) », « faux négatifs (FN) », qui supposent l'existence d'une segmentation de référence.

Ainsi, une segmentation manuelle effectuée sur un nuage de points d'intérieur de bâtiment et distinguant les classes d'intérêt (plafonds et sols, murs, objets) a été comparée au résultat de la segmentation développée. La comparaison de ces nuages de points a permis de déterminer le **pourcentage de vrais positifs et le pourcentage de faux négatifs** pour chacune des catégories et pour deux jeux de données (Tableau 5).

		Plafonds et sols	Murs	Objets
Maison individuelle	VP	99 %	89 %	94 %
	FN	3 %	1 %	21 %
Bâtiment de bureaux	VP	99,5 %	93 %	81 %
	FN	4,5 %	9 %	8 %

VP = vrais positifs ; FN = faux négatifs

Tableau 5 : Évaluation de la classification des points en plafonds et sols, murs et autres (Macher, 2017)

Nous pouvons conclure, sans grande surprise, que les segments « plafonds et sols » sont mieux extraits (VP élevés et FN faibles) que les murs ou objets de la scène et qu'un **contrôle visuel** reste de mise.

Les livrables issus des algorithmes de segmentation ont été évalués. Nous pouvons nous pencher à présent sur les approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation.

7.3.2 Approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation

Nous considérerons dans cette partie, les approches développées en vue d'évaluer la qualité des modèles 3D de bâtiments, de façades, d'intérieurs de bâtiments et des modèles d'arbres.

7.3.2.1 Bâtiment entier

Un des volets de la thèse de Mohamed (2013) a consisté à proposer une approche multidimensionnelle standard pour évaluer la qualité de modèles 3D simples de bâtiments produits par technique lasergrammétrique (Landes et al., 2012b), photogrammétrique (stéréo-restitution) ou par combinaison des deux (Mohamed et al., 2013). Les modèles 3D de bâtiments considérés ici sont vectoriels, de géométrie très simple (Figure 38). L'approche d'évaluation exige toutefois de posséder, pour chaque modèle de bâtiment à évaluer, **un modèle de référence**.

L'évaluation 1D se base sur l'analyse de l'exactitude des **points** décrivant la géométrie du bâtiment, selon chaque direction (erreur moyenne quadratique en X, Y et Z), calculée à partir **des écarts** entre les deux modèles (référence et test). Elle peut également s'appuyer sur le contrôle du respect d'une **classe de précision**, suivant le modèle standard proposé dans le Journal Officiel du 30 octobre 2003.

L'approche **d'évaluation 2D** qualifie, au travers de **facteurs de qualité**, le degré de superposition des **faces** (contours de façades ou de pans de toits en 2D) du modèle test et du modèle de référence. Ces indices font intervenir des opérations booléennes (Figure 39 :). Une évaluation 2D satisfaisante ne valide toutefois pas encore le modèle reconstruit, en raison de sa sensibilité à la taille des polygones étudiés et du fait que deux plans parfaitement superposés dans le système d'axes parallèles au plan sont susceptibles d'être décalés en profondeur. Ce défaut ressort au plus tard dans l'étape de l'évaluation 3D.

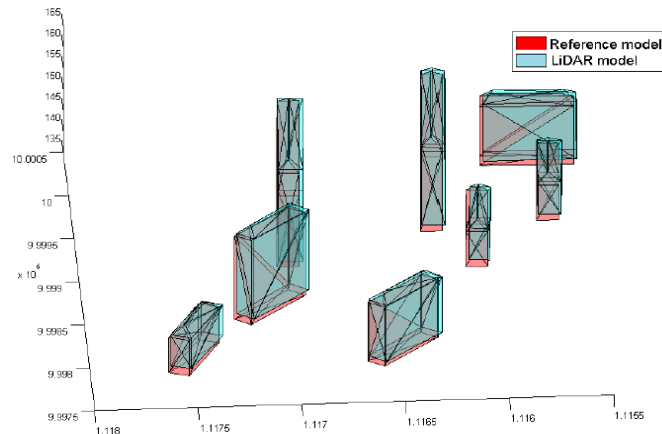


Figure 38 : Modèles 3D obtenus sur la base de données LiDAR exclusivement et comparés à leur référence (Mohamed et al., 2013)

L'évaluation 3D analyse les bâtiments en tant qu'objets à part entière en estimant le degré de superposition entre **volumes** à comparer (Figure 39 :b et c). Les **indices de qualité**, déduits de ceux définis en 2D, se rapportent, dans ce cas, au degré de superposition du volume testé et du volume de référence. Ces indices avaient déjà été développés antérieurement à ce projet (Landes et al., 2012a) pour répondre au besoin de reconstruction des façades (nous les verrons dans le Tableau 6, p. 55). Pour évaluer les vecteurs 3D, les critères statistiques classiques (erreur moyenne quadratique et écart-type) étant quelque peu restrictifs, ils ont été complétés par des **cartes d'erreurs**. Bien entendu, l'inspection visuelle reste indispensable.

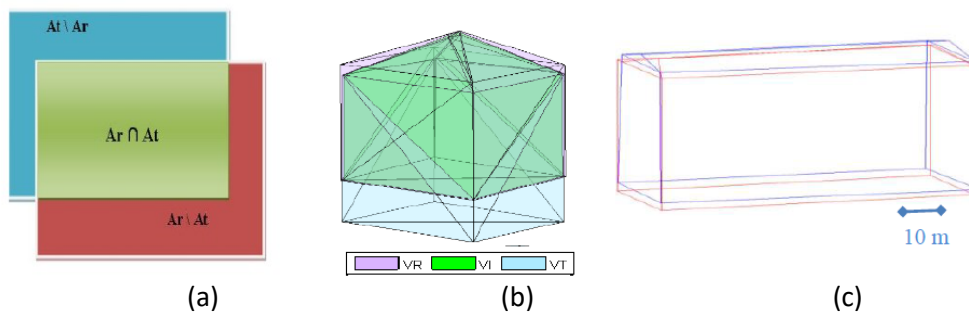


Figure 39 : Comparaison du modèle testé à sa référence ; a) en 2D par analyse de surfaces ; b) en 3D par analyse de volumes entre modèles de référence (VR) et testé (VT) et volume d'intersection désigné par $VI = VR \cap VT$; c) superposition d'un modèle 3D du modèle extrait (en bleu) et de référence (rouge) (Landes et al., 2012b et Mohamed et al., 2013)

Les statistiques sur les indices de qualité 2D et 3D calculées sur plusieurs jeux de données ont révélé que les modèles reconstruits à partir des données LiDAR ou de la combinaison des données LiDAR et d'images aériennes¹⁵ (produites selon Zhang et al., 2011) sont moins exacts que les modèles 3D de bâtiments extraits à partir des couples d'images stéréoscopiques.

¹⁵ Travaux issus d'une collaboration avec Wuming Zhang, université de Pékin, co-auteur du papier (Mohamed et al., 2013)

L'originalité de cette approche d'évaluation réside dans le fait qu'elle est applicable aussi bien à des modèles vectoriels qu'à des modèles sous forme de voxels. Cette approche doit toutefois être approfondie et étendue à des modèles 3D plus complexes de bâtiments.

Dans la continuité de l'évaluation 3D, lorsque le bâtiment à évaluer a été construit par ajustement de primitives géométriques, comme mis en œuvre dans Tarsha-Kurdi (2008), il est intéressant de **confronter le modèle calculé au nuage brut** ayant servi à le produire. Ainsi, par exemple, l'évaluation portant sur la qualité de reconstruction de plans décrivant les toits scannés par LiDAR aéroporté couvre deux volets :

- Analyse de la **précision des plans** composant les toits, par analyse de **critères statistiques** tels que l'écart-type en distance (dispersion des points couvrant le toit autour du plan moyen calculé à partir de ces points)
- Analyse des **erreurs de modélisation** au travers d'une « **carte des erreurs** », dans laquelle sont reportés les écarts entre chaque point et son plan moyen (ci-dessous).

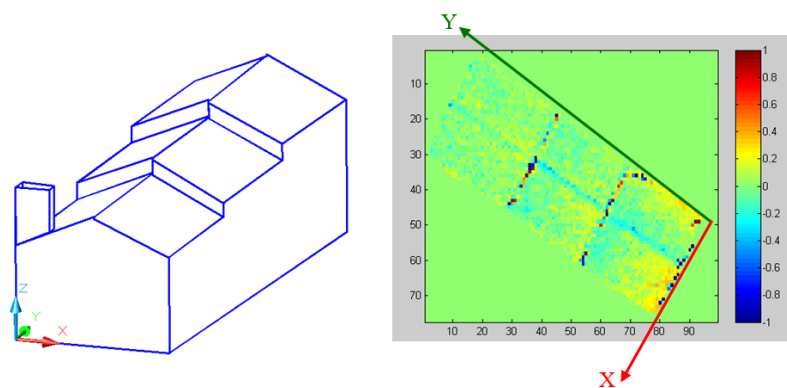


Figure 40 : Modèle 3D d'un bâtiment et carte des erreurs de modélisation du toit associé (Tarsha-Kurdi, 2008)

Globalement, les résultats obtenus à l'issue de la longue chaîne de traitements semi-automatique menant du nuage de points LiDAR aéroporté au modèle 3D reconstruit du bâtiment sont très satisfaisants au regard de tous les facteurs d'influence que sont, entre autres, le bruit de mesure, les détails non modélisables ou encore la densité de points. Ces facteurs sont susceptibles de fausser l'équation mathématique de chaque plan composant le bâtiment et de générer par voie de conséquence des déformations dans sa géométrie.

7.3.2.2 Façades acquises par SLT

Dans le processus de reconstruction de façades à partir de nuages de points, les segments plans évalués préalablement servent de base à la création de contours d'ouvertures notamment. Pour évaluer de façon quantitative les résultats de la reconstruction géométrique, **des indices de qualité 2D** sont proposés pour comparer le contour calculé et sa référence, non pas à l'échelle des points constituant le contour, mais en termes de **surfaces de polygones** (Figure 41).

Une question importante dans l'évaluation des résultats est le choix du **modèle de référence**, qui sera généré différemment suivant le critère statistique que nous souhaitons analyser. Ainsi, pour évaluer la **précision** du résultat, les polygones de référence sont digitalisés sur la base du nuage de points. Pour évaluer **l'exactitude** du résultat, les polygones de référence sont obtenus par mesures tachéométriques. En comparant les coins levés à ceux détectés par traitement automatique des données laser, l'effet de toutes les erreurs intervenant depuis l'acquisition jusqu'à la modélisation de la façade peut être mis en évidence.

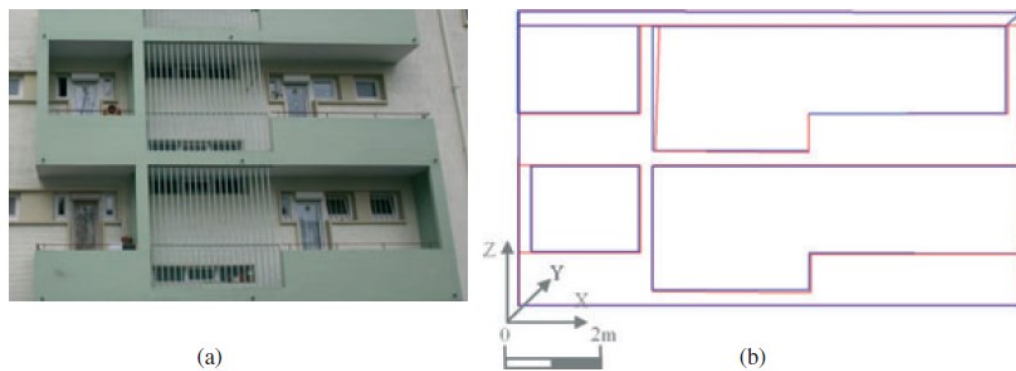


Figure 41 : Evaluation de la qualité de détection de contours sur un façade d'un immeuble à Strasbourg ; a) photographie ; b) superposition de polygones modélisés (en rouge) et de référence (en bleu) (Landes et al., 2012a)

Les indices de qualité employés sont en grande partie inspirés de la littérature et s'appuient sur des **opérations booléennes d'analyses spatiales** basées sur des ensembles constitués par les surfaces des polygones étudiés (Tableau 6). Si la **comparaison des surfaces couvertes** par les polygones calculés et de référence est un premier indicateur, il reste toutefois insuffisant, car la surface commune ne garantit pas l'exactitude de la géométrie des polygones. Par conséquent, cette évaluation quantitative a été complétée par des **calculs d'écarts 3D** entre polygones homologues (Landes et al., 2012a). L'écart moyen en distance s'élevait à 4 cm avec un écart-type de 2 cm, ce qui est satisfaisant vu l'état de la façade et bien sûr les erreurs potentielles attribuables à la chaîne de traitements (calcul de points d'intersection de contours construits sur la base d'un nuage de points, utilisation de seuils, etc.).

Indice	Formule	Signification
Taux de détection	$\rho d = \frac{ SR \cap SA }{ SR }$	ρd exprime le rapport entre la surface d'intersection des deux modèles et la surface de référence. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρd est proche de 1, plus le modèle est proche du modèle de référence.
Indice de qualité	$\rho q = \frac{ SR \cap SA }{ SR \cup SA }$	ρq exprime le rapport entre les parties communes aux deux modèles et l'union des deux modèles. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρq est proche de 1, plus le modèle obtenu sera de bonne qualité.
Facteur d'excédent	$\rho b = \frac{ SR \setminus SA }{ SR \cap SA }$	ρb exprime le rapport entre la partie du modèle qui n'appartient pas au modèle de référence et l'intersection des deux modèles. Sa valeur peut être supérieure à 1, mais elle est toujours positive. Si ρb est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Facteur de déficit	$\rho m = \frac{ SA \setminus SR }{ SR \cap SA }$	ρm exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et l'intersection des deux modèles. Il peut avoir une valeur supérieure à 1 mais il est toujours supérieur à 0. Si ρm est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Indice d'échec	$\rho f = \frac{ SA \setminus SR }{ SR }$	ρf exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et la superficie du modèle de référence. ρf est compris entre 0 et 1. Si ρf est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.

Tableau 6 : Indices de qualité utilisés pour quantifier la qualité de polygones produits par l'approche de modélisation de façade, avec SR : Surface du modèle de référence ; SA : Surface du modèle obtenu automatiquement ; $|X|$: surface du polygone X (Boulaassal, 2010)

L'analyse des indices de qualité et des écarts 3D a montré que la précision des polygones est systématiquement supérieure à leur exactitude. Ce constat permet de valider le fonctionnement de l'algorithme et de rappeler l'influence de la qualité des données brutes sur la qualité des modèles 3D finaux de façades.

7.3.2.3 Éléments d'intérieurs de bâtiments : murs, dalles

Nous nous intéressons ici à la qualité géométrique des résultats de la reconstruction 3D des murs. L'approche d'évaluation, qui a porté sur plusieurs jeux de données, s'attache à procéder en 2 temps :

- inspection des murs reconstruits
- analyse, à la fois, des écarts-types associés aux murs et des écarts points-murs

Inspection des murs reconstruits

Les plans d'intérieurs en 2D réalisés par **digitalisation** sur les nuages de points constituent une référence intéressante pour évaluer la performance de l'algorithme de reconstruction. La superposition des fichiers *.obj* produits par l'algorithme (en rouge sur la Figure 42) avec les plans 2D des bâtiments permet d'inspecter les murs reconstruits et de repérer les erreurs de reconstruction.

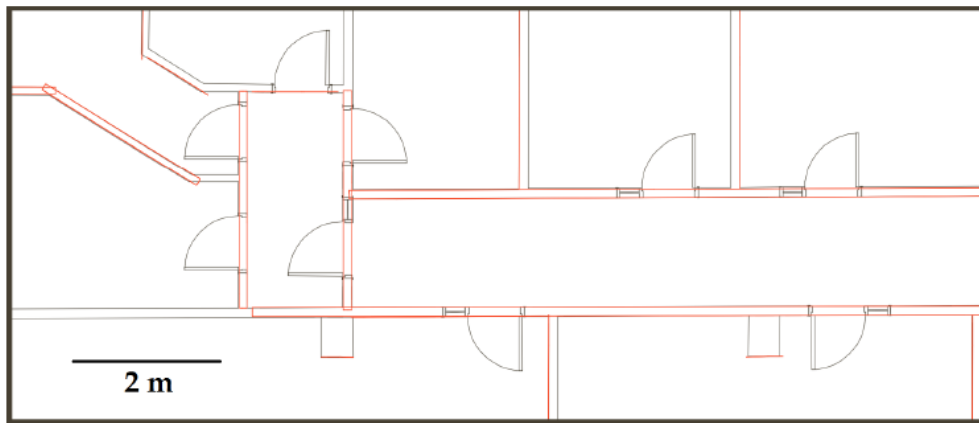


Figure 42 : Superposition du modèle créé (en rouge) avec le modèle de référence (plan 2D, en noir), sur un étage de bâtiment composé de bureaux (Macher et al., 2017)

Sur les jeux de données employés, plus de 88 % des objets sont correctement positionnés ; les éléments mal positionnés ou orientés sont majoritairement des portions de murs de façades. Pour les éléments correctement positionnés, des écarts en distance de 2 cm maximum ont été constatés, ce qui nous autorise à valider la reconstruction.

Analyse de la précision de reconstruction des murs

Pour estimer la qualité de reconstruction de chaque mur constituant le modèle 3D de l'intérieur du bâtiment, un écart-type a été affecté à chacun d'eux. Cet écart-type est calculé à partir des distances non signées qui séparent les points composant le segment « mur » de son modèle (Figure 43). La visualisation des écarts-types à l'aide d'une palette de couleurs permet de repérer rapidement les murs ou portions de murs qui ont été définis de façon imprécise sur un étage.

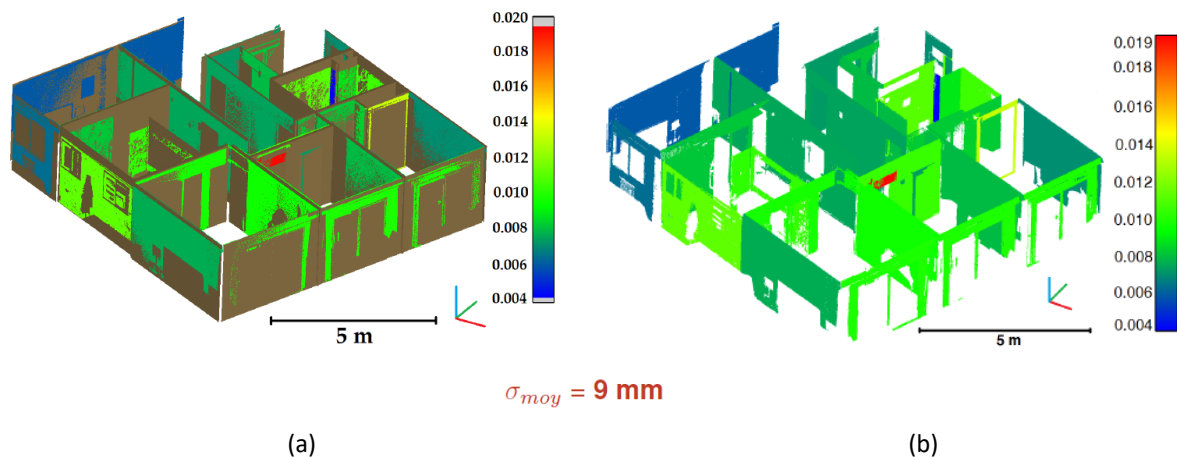


Figure 43 : Résultats de la reconstruction des murs et dalles et visualisation des écart-types associés aux murs ; a) superposition des murs reconstruits et des points ayant servi à les construire ; b) nuage de points seul, avec représentation en pseudocouleurs des imprécisions associées

L'analyse de **l'écart-type associé à un mur** reste néanmoins insuffisante pour juger de la qualité de reconstruction, car un mur peut présenter un écart-type important tout en étant correctement reconstruit (objets situés de part et d'autre du mur, par exemple). C'est pourquoi, il est intéressant de compléter l'étude par l'analyse des **écarts entre points de nuage et mur reconstruit** (Figure 44). Cette analyse met clairement en évidence les éléments trop proches du mur pour pouvoir être écartés au moment de la segmentation (stores, radiateurs, tableaux, coffres de volets).

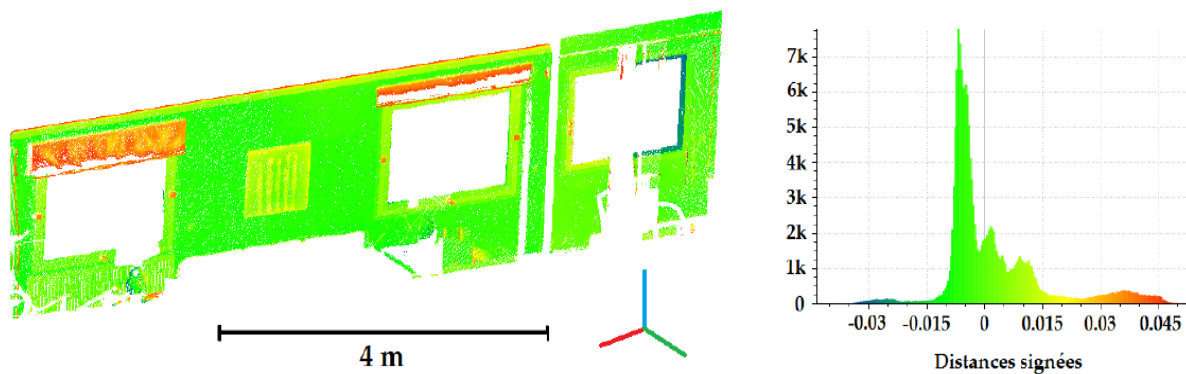


Figure 44 : Nuages de points colorisés en fonction des distances signées entre points et modèle pour une face de mur

Durant son post-doc réalisé au printemps 2017 au sein du laboratoire CIMS de Carlton University à Ottawa, Hélène Macher a intégré cette approche d'évaluation de reconstruction, sous forme de plug-in, dans un logiciel commercial (Revit d'Autodesk) (Macher et al., 2019).

7.3.2.4 Reconstruction 3D d'arbres

Comme expliqué dans le paragraphe 6.2.2 (p. 37), la chaîne de reconstruction 3D d'arbres propose une reconstruction 3D détaillée et une reconstruction 3D globale. Les résultats produits par chacune de ces chaînes de traitements méritent d'être évalués indépendamment.

Evaluation de la reconstruction 3D détaillée

Pour rappel, la maquette détaillée comme attendue dans RATP est obtenue semi-automatiquement en deux étapes importantes :

- a) une squelettisation et reconstruction du volume du bois,
- b) l'ajout du feuillage de l'arbre grâce à des relations allométriques (Figure 45).

Seule l'évaluation du processus de squelettisation sera considérée, n'ayant pas les compétences pour évaluer les incertitudes liées à la reconstruction du feuillage.

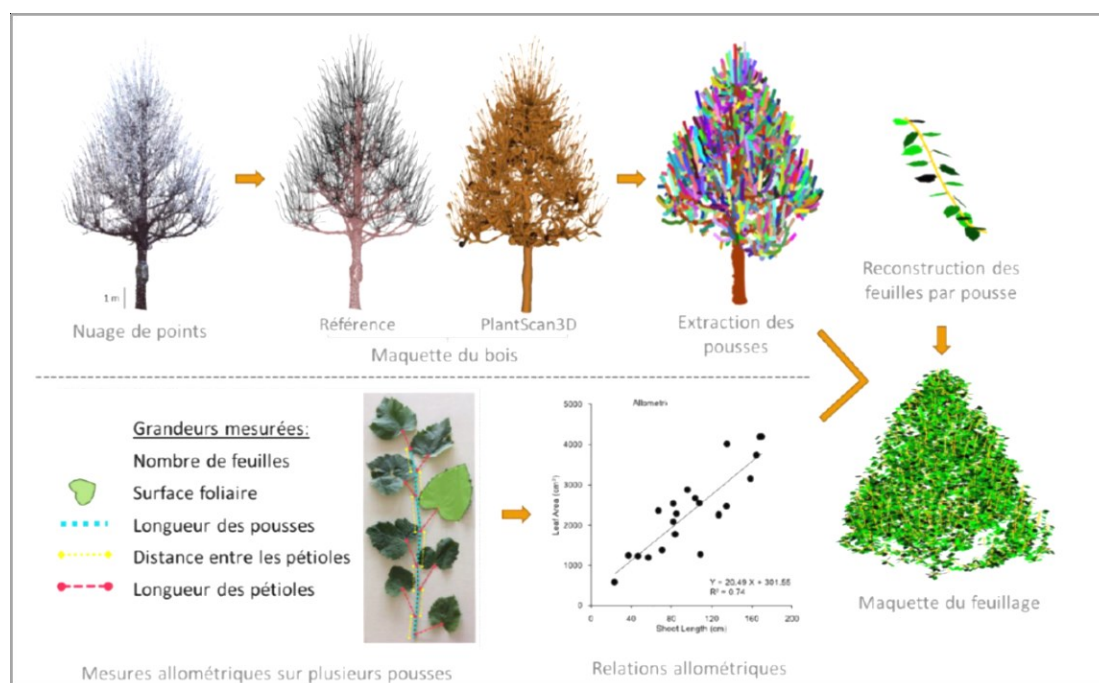


Figure 45 : Processus de reconstruction mis en place pour aboutir à une maquette détaillée d'un arbre adaptée à l'utilisation du modèle RATP

Dans un premier temps, l'évaluation de l'algorithme « TreeArchitecture » a été réalisée en comparant les **maquettes produites (squelettes) à des maquettes de référence**, construites par digitalisation dans le nuage ou par correction de maquette générée automatiquement (Figure 46).

Dans un second temps, les résultats de notre algorithme ont été confrontés à ceux produits par des **algorithmes de reconstruction open source** : « SimpleTree », développé par l'université de Freiburg en Allemagne (Hackenberg et al., 2015) et « PlantScan3D », développé par l'INRIA Montpellier (Boudon et al., 2014), comme l'illustre l'annexe A.9, p. 129. Il est ressorti de cette phase d'évaluation qualitative et quantitative que l'outil « TreeArchitecture » fournissait de moins bons résultats que « PlantScan3D » en termes de **nombre de branches détectées et longueur des branches**, avec une hiérarchisation des branches plus efficace. Par ailleurs, cet outil est simple d'utilisation et le temps de traitement par arbre est très rapide. Les résultats de ces évaluations ont été publiés dans (Bournez et al., 2017).

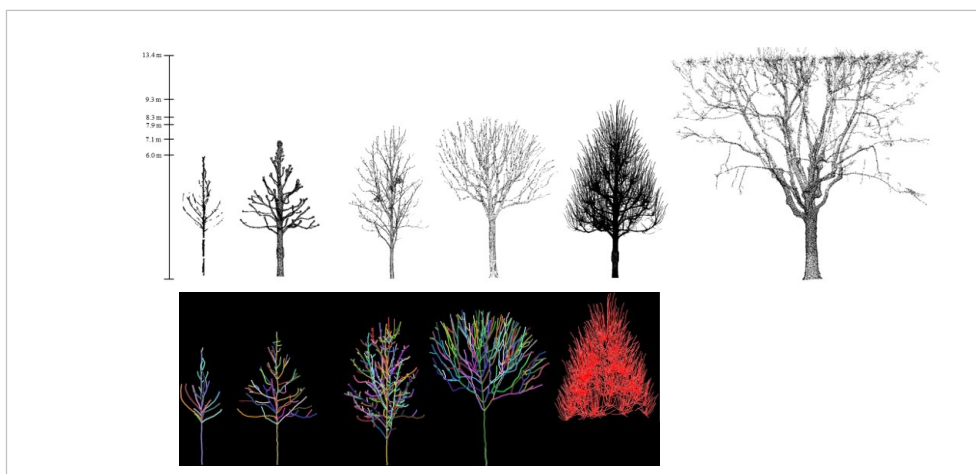


Figure 46 : Nuages de points et maquettes de références pour 6 arbres de géométries différentes

Evaluation de la reconstruction 3D globale

La maquette globale d'un arbre attendue dans LASER/F est définie par une enveloppe convexe de la couronne foliaire (Figure 47) à laquelle on associe une valeur de LAI¹⁶ (indice foliaire obtenu expérimentalement grâce à la maquette détaillée de l'arbre). L'enveloppe convexe est produite en sortie de l'algorithme « TreeCrown ». Le tronc est représenté par un cylindre allant du sol jusqu'aux premières faces de l'enveloppe convexe.

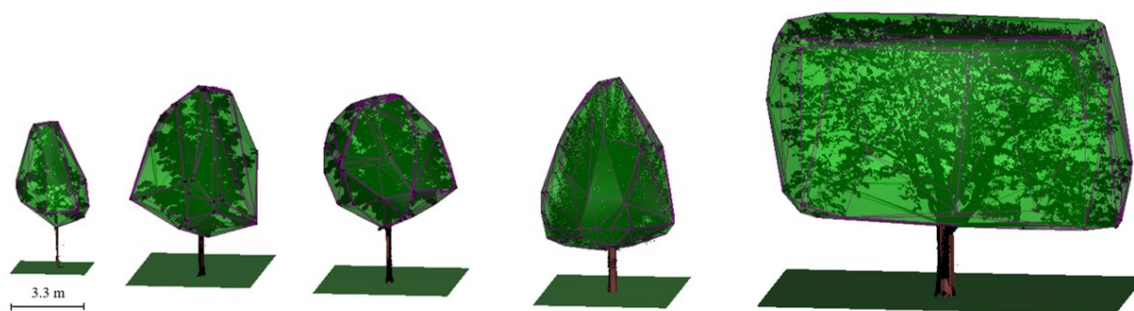


Figure 47 : Maquettes 3D globales (couronne, tronc et surface de sol) réalisées à partir des nuages de points d'arbres feuillus (points noirs au sein des enveloppes)

La géométrie de la maquette produite n'a pas été évaluée, en raison de la difficulté de produire une référence valable. Une simple **analyse visuelle** montre toutefois que l'enveloppe convexe surestime le volume de la couronne foliaire comparée à une enveloppe concave. Toutefois, elle a été privilégiée à l'enveloppe concave, car le nombre de facettes la composant est réduite et convient davantage à son exploitation dans LASER/F.

En plus de permettre l'estimation du volume de la couronne foliaire, cette maquette permet également l'extraction d'informations telles que le **DBH**¹⁷ (diamètre du tronc à hauteur de poitrine, soit à 1,3 m) et la **PEA**¹⁸ (emprise de la couronne foliaire projetée perpendiculairement au sol). La comparaison des valeurs extraites à des valeurs de référence a pu être effectuée pour le DBH mais pas pour le volume de la couronne foliaire et sa surface projetée au sol.

Le processus de reconstruction d'une maquette globale se montre efficace pour reconstruire un arbre avec un feuillage homogène et clairsemé, mais aussi avec feuillage caduc. Par ailleurs, il permettra de

¹⁶ LAI : Leaf Area Index

¹⁷ DBH : Diameter at Breast Height

¹⁸ PEA : Projected Envelope Area

créer des maquettes de plusieurs arbres en même temps et beaucoup plus rapidement qu'avec le processus de reconstruction détaillée. Ce type de maquette globale semble a priori adéquat pour une simulation des échanges entre plusieurs éléments de l'environnement urbain. Les travaux relatifs à l'étude de ces échanges se poursuivent dans le cadre de la thèse de Nathalia Philipps. Nos travaux ont également permis d'envisager la possibilité d'extraire le LAI directement à partir du nuage de points de l'arbre, avec la méthode développée récemment par Hu Ronghai alors doctorant au sein de l'équipe TRIO (Hu et al., 2018).

Les approches présentées se sont concentrées sur l'évaluation des résultats produits par les algorithmes développés. Un critère d'évaluation de la performance de l'algorithme tient en l'analyse de son degré d'automatisation.

7.3.3 Degré d'automatisation des chaînes de traitements

Le degré d'automatisation des chaînes de traitements passe par l'estimation du **temps requis** par l'ensemble de la chaîne ainsi que par le bilan des **interventions humaines** nécessaires (seuils à renseigner, traitements manuels intermédiaires et étapes de contrôles visuels).

Bien que l'optimisation des temps de traitements reste secondaire par rapport au but premier de nos travaux, qui est d'établir **une méthodologie**, le temps requis entre l'import des données jusqu'à la visualisation du résultat produit en sortie, a été mesuré au regard du processeur utilisé à l'époque. Par ailleurs, le langage de programmation utilisé généralement dans les travaux mentionnés n'est pas adapté pour optimiser le temps d'exécution (Matlab de MathWorks). Le temps de traitement dépend aussi du volume de données à traiter. Or, comme les performances informatiques ne cessent de s'améliorer, le temps de traitement requis ne constitue que rarement un frein au vu de la masse de données utilisées en entrée de nos algorithmes.

Dans chacune des thèses aboutissant à une chaîne de traitements semi-automatique, **des seuils définis de façon empirique** et exigeant de ce fait une intervention humaine jalonnent la chaîne de traitements. Ils ont été clairement mis en avant dans chacun des mémoires avant d'être reconsidérés du point de vue de leur degré d'automatisation. Des valeurs par défaut ont été proposées pour les seuils non automatisables. Un processus **totalement automatique** menant à une maquette numérique à partir d'un nuage de points acquis sur le terrain n'est pas concevable à ce jour, en raison des nombreuses sources d'erreurs affectant la chaîne de traitements, mentionnées plus haut. Des **solutions semi-automatiques** alternant des portions de traitements automatiques et des étapes de validation paraissent plus réalistes et plus raisonnables, du moins dans le domaine de la modélisation du patrimoine.

La question de la qualité ayant déjà été abordée, il nous semble intéressant de nous pencher sur la notion de niveau de détail et de mettre en lumière celui ou ceux que nous avons réussi à atteindre en sortie de nos chaînes de traitements, tant pour les bâtiments que pour les arbres.

7.3.4 Qualité et niveau de détail

La **qualité** d'un modèle est parfois et à tort confondue avec le **niveau de détail** d'un modèle, comme on peut le constater sur un site se présentant comme un site de référence dans la transition numérique du bâtiment. On peut y lire, à tort, que « *Le niveau de détail (...) correspond à la précision géométrique d'une maquette numérique, caractérisée par la précision des objets 3D qui la constituent* ».

Comme le soulignent Oude Elberink & Vosselman (2011), le fait de spécifier le niveau de détail associé à un modèle ne signifie pas que la précision géométrique du modèle a été déterminée. **Le niveau de détail est un critère visant à quantifier l'information minimale nécessaire** pour un certain usage, ce qui ne détermine aucunement **le niveau de précision associé au modèle**. Bien qu'il existe un lien entre les deux (les représentations à des échelles plus fines ont tendance à être de meilleure qualité), il s'agit de deux concepts indépendants (Chrisman, 1991). Par exemple, deux objets géographiques peuvent avoir le même niveau de détail, mais une précision spatiale (précision de positionnement) différente. En outre, dans certains cas, des bâtiments peuvent être caractérisés par un niveau de détail élevé, tandis que leur géométrie peut considérablement s'écarter de la réalité.

Le niveau de détail appelé communément LOD, de l'anglais « *Level of Detail* » est un concept employé dans diverses disciplines. Intimement lié au concept d'échelle en cartographie et très étudié en infographie, il s'est fortement développé avec l'avènement des SIG et plus précisément la modélisation 3D des villes. Le standard CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012) fournit un mécanisme standard pour décrire les objets 3D du point de vue de leur géométrie, leur topologie, leur sémantique et leur apparence, selon 5 niveaux de détail différents (annexe A.10, p. 129). Le même objet peut être analysé, visualisé et représenté selon différents niveaux de détail.

Le niveau de détail associé au modèle à produire dépend évidemment du **cahier des charges**, car il influence la façon d'approcher l'objet à étudier. Lorsque le niveau de détail concerne la géométrie du livrable, il influencera d'une part le protocole d'acquisition (choix des technologies et méthodes, de la densité des données, de la précision de mesure) mais aussi le processus de traitement des données (nuages ou autres). Evidemment, ce choix impactera le budget à allouer au projet.

7.3.4.1 A l'échelle d'un bâtiment

Dans le contexte du BIM et du processus de construction, le niveau de détail associé au processus est parfois employé comme synonyme de « niveau de développement » (ND) et décrit chacune des phases d'étude. Il concerne dans ce cas le niveau de précision et le type d'informations devant être contenu dans la maquette numérique à chaque phase de développement d'un projet, en partant de la conceptualisation, la construction et jusqu'à l'exploitation au sens de la maintenance du bâtiment au travers de sa maquette numérique.

A ce jour, il n'existe pas de définition normalisée en France, et, en général, dans tous les pays, ce sujet est, de par sa complexité, en pleine évolution (De Maestri, 2017). Dans la littérature sont souvent mentionnées les normes britannique et américaine qui toutefois se rejoignent (annexe A.10, p. 129). Elles subdivisent les LOD en niveaux de développement des attributs graphiques (**géométriques**, LOG) et non graphiques (**informationnels**, LOI).

D'après Objectif BIM¹⁹, les niveaux de détails américains (LOD 100 à LOD 500) se sont imposés en France. Dans le contexte du BIM « tel que construit » dans lequel nous évoluons, seul le LOD 500, qualifié d'« avatar numérique » semble correspondre à notre préoccupation première. Toutefois, au stade de reconstruction que nous avons atteint, **aucun de ces LOD ne convient à la description de nos modèles 3D**, mis à part si nous envisageons une combinaison de plusieurs LOD. Nos modèles sont fiables géométriquement, mais ne fournissent pas le niveau de détail requis, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, ni du point de vue sémantique, pour être validé en LOD 500 (thèse Yang, 2018). Même si un objet peut être décrit par des LOD distincts (bâtiments en LOD 2 et intérieur en LOD 4), cette nomenclature manque de flexibilité. En effet, les éléments graphiques et sémantiques associés à nos modèles sont hétérogènes au niveau de leur **présence** (ouvertures de type fenêtres mais sans portes),

¹⁹ Objectif BIM, www.objectif-BIM.com

de leur **complexité géométrique** (bâtiments cubiques ou avec toits à deux pans ; arbres sous forme détaillée ou globale) et de leur **dimensionnalité** (fenêtres sous forme de contours simples 2D ou de modèles 3D issus d'une bibliothèque de symboles). Nous constatons ainsi que les métriques de Biljecki (2017), en particulier les trois premières, qui caractérisent l'aspect géométrique du LOD, seraient pertinentes pour décrire nos modèles de bâtiments et d'arbres (annexe A.10, p. 129).

A l'ère du numérique, où les modèles produits sont amenés à être fusionnés avec des bases de données existantes, la question du niveau de détails de nos modèles mérite d'être approfondie dans un futur proche, en particulier lorsque se pose la question de la **mise à jour de la maquette HBIM** (*Heritage Building Information Modeling*), pendant du BIM appliqué au patrimoine culturel (Fai et Rafeiro, 2014).

7.3.4.2 A l'échelle d'un arbre

Les standards actuels sont davantage focalisés sur les bâtiments que sur les autres « objets » urbains, tels que les arbres par exemple. Tant que les bâtiments n'étaient pas modélisés de façon satisfaisante, les arbres apparaissaient sur les scènes 3D urbaines proposées par les services de l'information géographique des communes, de façon symbolique (modèle générique). Le niveau de détail des arbres était un sujet qui préoccupait essentiellement les infographistes dans le contexte de la gestion du graphisme et de la fluidité de mouvement au sein de scènes urbaines virtuelles.

Les modèles 3D d'arbres produits pour répondre aux besoins de deux modèles de simulation climatique (modèle 3D détaillé et modèle 3D global) peuvent être vus comme deux LOD. Ils ont ensuite été déclinés en sous-niveaux de détails dans l'objectif d'étudier l'influence des simplifications sur l'évapotranspiration simulée. Cette subdivision en niveaux de détails ne suit aucun standard particulier et est née du besoin exprimé au fil des recherches. Les 15 maquettes 3D produites pour le même arbre, allant du LOD détaillé pris en compte dans RATP au LOD global pris en compte dans LASER/F, sont rangées en trois groupes selon la méthode de reconstruction utilisée (Figure 48) :

- **groupe I** : maquettes **très détaillées**, pour lesquelles la **surface foliaire** a été reconstruite à partir de la structure des branches et le feuillage à partir des relations allométriques,
- **groupe II** : maquettes **moins détaillées**, basées sur des **reconstructions d'enveloppes** telles que les enveloppes 3D convexes/concaves,
- **groupe III** : maquettes **encore moins détaillées**, basées sur des **reconstructions de voxels**.

Pour les groupes II et III, les feuilles sont spatialisées aléatoirement dans les enveloppes ou les voxels.

Une maquette de référence appelée LOD réf_(i) a été réalisée par digitalisation manuelle de chacune des pousses à l'intérieur du nuage de points. Ces travaux ont été mentionnés initialement dans (Bournez et al., 2016a) et détaillés plus tard dans (Bournez et al., 2019).

L'étude de la sensibilité de l'évapotranspiration simulée au niveau de détail de la maquette (LOD) a permis de déterminer la **maquette la « plus appropriée »**, c'est-à-dire présentant le meilleur rapport temps de traitement sur évapotranspiration simulée, en entrée au modèle climatique. Pour estimer **l'impact du LOD sur le taux d'évapotranspiration total** de l'arbre, les taux horaires pour chaque LOD ont été comparés aux taux horaires calculés avec le cas de référence (LOD réf_(i)). La Figure 49 présente le pourcentage d'écarts entre l'évapotranspiration simulée à partir de chaque LOD (histogramme) ou groupe (ligne pointillée) et celle simulée à partir de la maquette de référence. Nous pouvons en déduire que le groupe I a moins d'impact sur cet écart que le groupe II, qui a lui-même moins d'impact que le groupe III.

Le grand intérêt des maquettes du groupe II (LOD 0,8 et LOD 0,6) est qu'elles sont plus faciles et rapides à reconstruire que ne l'est une maquette produite avec notre chaîne de traitements de reconstruction

détaillée et sans perte significative. Par conséquent elles pourraient être employées en entrée à RATP pour pouvoir plus rapidement simuler le fonctionnement d'un arbre.

Vu le peu de littérature traitant de la question du LOD dans la représentation des arbres, tant géométrique que sémantique, les niveaux de détail proposés dans les travaux de Bournez (2018) sont de ce point de vue avant-gardistes. Toutefois, comme ils sont nés du besoin dicté par des modèles climatiques spécifiques, la question de la transposabilité de ces LOD spécifiques à d'autres espèces d'arbres et d'autres applications que la climatologie reste un sujet à aborder dans nos futures recherches.

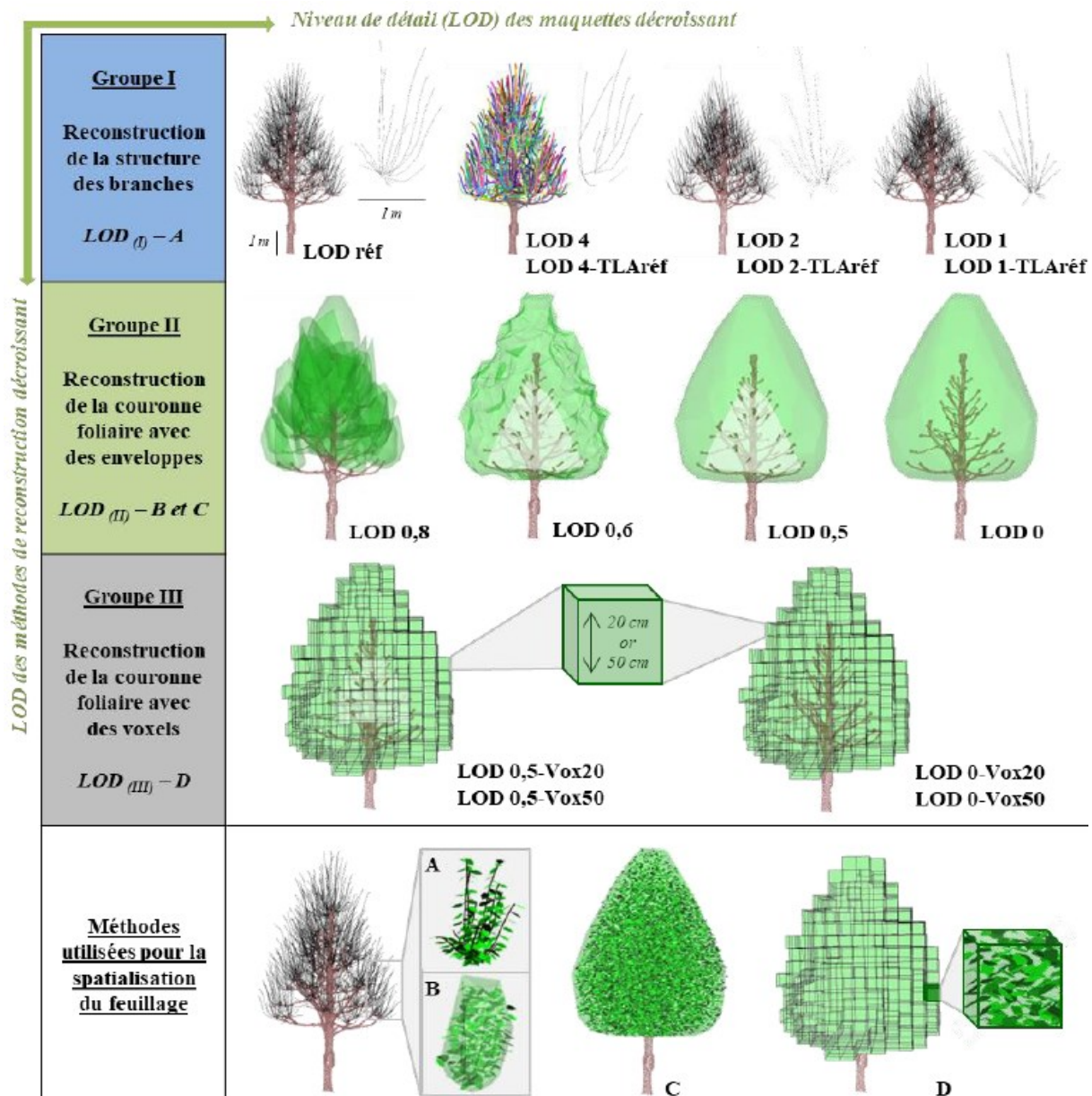


Figure 48 : Maquettes produites selon trois groupes de méthodes de reconstruction basées sur : la structure des branches (groupe I), les enveloppes (groupe II) et les voxels (groupe III). Illustration de la spatialisation du feuillage : à partir de relations allométriques autour des pousses (A), uniforme par tête de chat (B) et par enveloppe de la couronne (C)

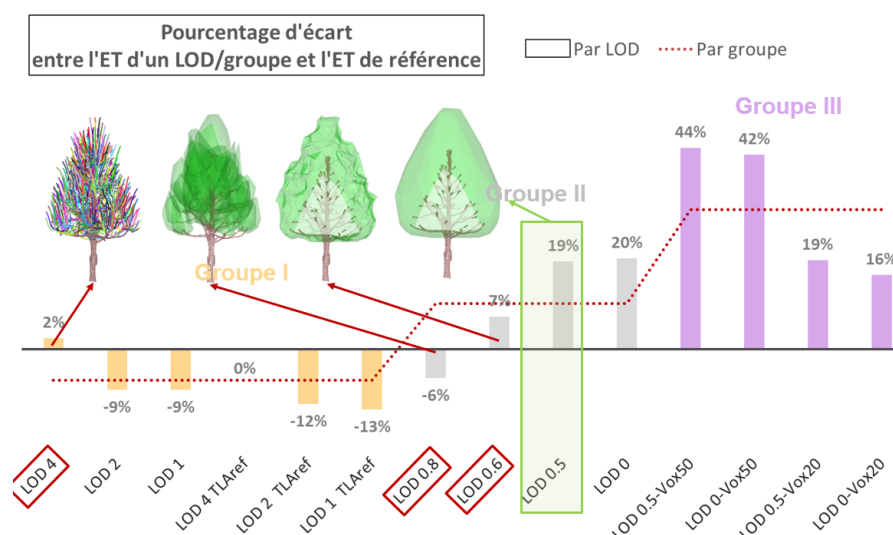


Figure 49 : Evapotranspiration simulée en fonction des LOD considérés (Bournez, 2018)

La question de la qualité d'un algorithme ou du niveau de détail le plus approprié devient secondaire lorsque l'existence même de l'objet d'étude est hypothétique. Il est intéressant d'aborder la question de l'évaluation de la qualité de modèles virtuels construits sur la base d'hypothèses archéologiques.

7.3.5 Evaluation de modèles restitués

Dans le domaine du patrimoine culturel, plusieurs spécialistes comme les archéologues, les architectes, les géomaticiens, les historiens sont amenés à collaborer sur un même site ou vestige, ce qui justifie l'intérêt de travailler sur une maquette numérique commune. Il va de soi que le modèle 3D ne peut pas être réduit à un simple moule reproduisant la forme de l'objet étudié, c'est-à-dire en se limitant à sa géométrie, que cette dernière soit sous forme de volume ou de surface. Il devrait être, au travers de l'analyse de l'objet, le reflet de sa complexité suivant différents aspects, dont les aspects géométriques, les caractéristiques historiques, esthétiques et architecturales du bâtiment. L'intégration d'informations dans le HBIM provenant de sources diverses a été analysée dans [Yang et al. \(2014\)](#).

La fidélité du modèle virtuel à sa réalité est une question de première importance dans la modélisation du patrimoine culturel. Afin de maîtriser la fiabilité du modèle 3D reconstruit à partir de données souvent hétérogènes (relevés précis, fouilles, informations tangibles et intangibles, hypothèses archéologiques), il est d'une importance cruciale d'intégrer le niveau d'incertitude associé au modèle 3D reconstruit. Une approche permettant non seulement de **quantifier mais aussi de visualiser les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques** a été abordée dans le cadre de travaux de fin d'études (Benazzi, 2018 et Nivola, 2018) et a donné lieu à une publication ([Landes et al., 2019](#)). D'un point de vue géométrique, l'incertitude est souvent définie, quantifiée et exprimée à l'aide de mesures statistiques. Cependant, pour les objets reconstruits sur la base d'hypothèses archéologiques et aboutissant à un modèle « restitué », les critères de qualité du type mesures statistiques ne sont pas appropriés.

Nous avons mené une réflexion sur l'idée de **décomposer les modèles 3D en niveaux d'incertitudes (LoU pour Level of Uncertainty)** et sur la meilleure façon de les visualiser à travers deux études de cas situées en Alsace : le château de Kagenfels (XIII^{ème} siècle) et le Castellum d'Horbourg-Wihr (XVI^{ème} siècle). Tandis que le premier site est très bien documenté au travers de relevés et de fouilles toujours en cours, le second site a disparu avec l'urbanisation de la ville et n'a laissé que peu de traces tangibles.

Concernant le château du Kagenfels, pour évaluer le **degré d'incertitude des éléments restitués**, nous avons réalisé un tableau à double entrée confrontant la nature de l'élément évalué (mur, toiture, encadrement, etc...) au niveau de connaissance qui lui est associé. L'annexe A.11 (p. 132) présente le tableau établi pour un mur spécifique du château.

Nous avons fait le choix de fusionner les incertitudes géométriques et les incertitudes de positionnement, du fait de leur forte corrélation, en proposant une classification hiérarchique permettant d'organiser les données en fonction de leur **niveau d'incertitude (LoU)**. Il prend en compte cinq niveaux d'incertitudes allant de **simples suppositions** (LoU le plus élevé) à un **niveau de connaissance très élevé** (LoU le plus bas). Afin de visualiser ces LoU, nous avons appliqué au modèle 3D dénué de texture, **une palette de couleurs** allant du vert pour les éléments mesurés sur le terrain (LoU bas) au rouge pour les éléments les plus incertains (LoU élevé), comme suggéré par Dell'Unto et al. (2013) et illustré dans la Figure 50.

Concernant le Castellum, les données disponibles se limitent à quelques rares plans et croquis réalisés au 19ème siècle, de rapports de fouilles, d'un travail de restitution en 2016 et des nuages de points issus de l'acquisition de quelques blocs récupérés. La décomposition en niveaux d'incertitudes n'a pas pu utiliser les mêmes échelles de connaissances que celles employées pour le Kagenfels. Pour ce dernier, les éléments représentés en 3D ont tous effectivement existé. Le niveau d'incertitude le plus élevé pour le Kagenfels concernait la forme de l'objet mais en aucun cas son existence (Figure 50a). Tandis que le niveau d'incertitude le plus élevé du modèle de Castellum concernait l'existence même des éléments, comme les bâtiments du camp militaire (Figure 50b).

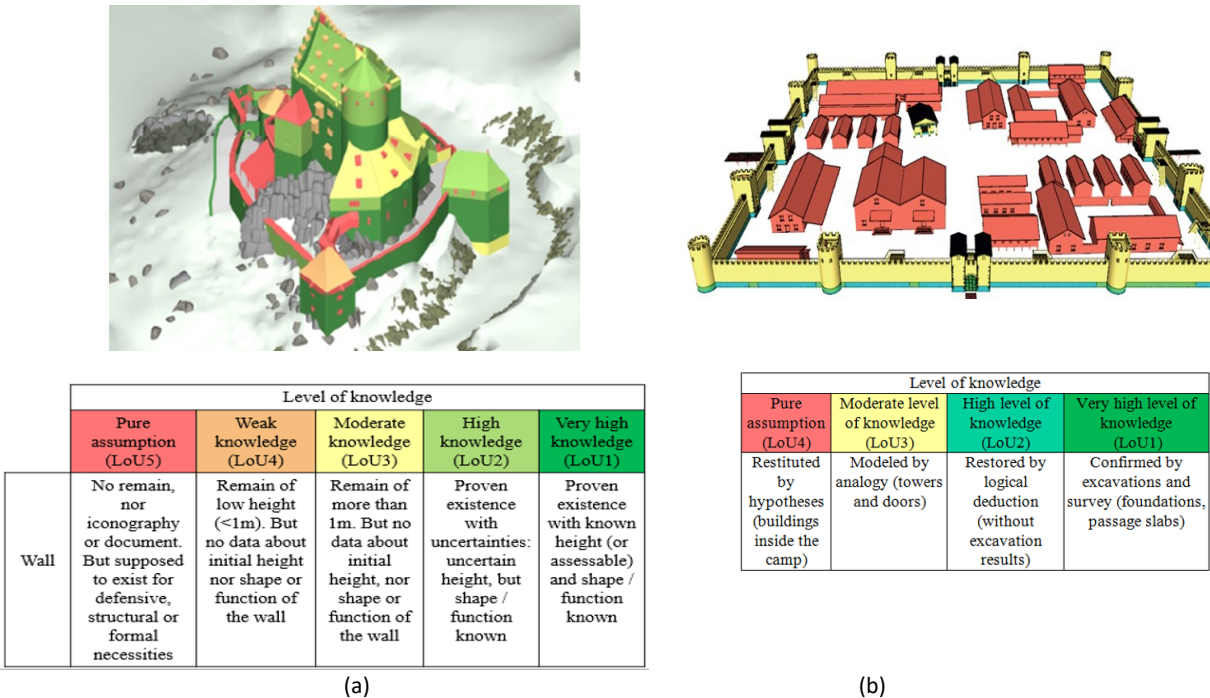


Figure 50 : Décomposition du modèle 3D reconstruit en niveaux d'incertitudes (LoU pour Level of Uncertainty);
a) château du Kagenfels ; b) Castellum d'Horbouurg-Wihr (Landes et al., 2019)

Si la décomposition en niveaux d'incertitudes reste dépendante du site, la visualisation de l'incertitude dans un gradient de **LoU coloré est une solution efficace, que nous retiendrons à l'avenir**. Les modèles 3D ainsi colorisés peuvent être considérés comme un outil de synthèse archéologique permettant d'identifier directement la fiabilité des éléments reconstruits. Cette approche peut être appliquée à chaque château ou monument historique à condition que le tableau décrivant le niveau de

connaissances ou d'incertitudes (LoU) soit clairement explicité. Un travail similaire paru en 2019 traite de la transparence (déclaration des sources d'informations) et de la fiabilité (déviation du modèle par rapport à la réalité) de la représentation numérique de modèles tels que construits (Maiezza, 2019).

Le souci d'être transparent au sujet des étapes menant au modèle créé ainsi que le souhait de maintenir une forme de traçabilité du raisonnement ayant guidé la modélisation sont deux facteurs essentiels dans **un processus de restitution archéologique**. Les modèles représentant les niveaux d'incertitudes de restitutions fournissent également une base solide pour les mises à jour à venir. En tout état de cause, les modèles numériques produits ne sont jamais définitifs et de nouvelles fouilles pourraient amener les archéologues à revoir certaines hypothèses.

Ce chapitre consacré à l'évaluation de la qualité des résultats issus de nos algorithmes de segmentation et de modélisation nous a amenés à réaliser **un bilan des erreurs** liées à l'acquisition, à l'objet numérisé et à la chaîne de traitements. Pour évaluer les résultats issus de nos chaînes de traitements, nous avons proposé des **critères de qualité adaptés** à notre problématique suivant que nous souhaitions comparer des segments, des surfaces, des volumes ou des points.

Ces critères de qualité s'appuient sur des comparaisons entre une entité détectée et une entité de référence, cette dernière jouant un rôle crucial de « vérité terrain » qu'il n'est pourtant pas toujours trivial de produire. Dans le cas de la modélisation de sites archéologiques en partie détériorés ou disparus, cette vérité terrain est dans certains cas perdue à jamais. C'est pourquoi l'idée de quantifier les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques au travers **modèles 3D décomposés en niveaux d'incertitudes** nous semblait être une piste intéressante à explorer.

A ce stade de rédaction, nous sommes en mesure de dresser un bilan des travaux effectués et des enjeux auxquels ils font écho dans la conclusion qui va suivre. Sur la base des états de l'art réalisés et des opportunités de développement qu'offrent certains sujets d'actualité, nous pourrions proposer également quelques perspectives de recherche pour les années à venir.

8. Conclusion générale et perspectives

Le nuage de points acquis par lasergrammétrie statique ou mobile, terrestre ou dynamique, représente un ensemble discret de points non connectés. Pour arriver à un modèle 3D du milieu urbain représentant fidèlement la réalité à partir de ce jeu de données, de nombreuses questions se posent avant, pendant et après le processus mis en place pour y aboutir.

- ✓ **Quel système d'acquisition** choisir ? L'établissement du cahier des charges est une étape cruciale avant de se lancer tête baissée dans le traitement d'un volume potentiellement très grand de données tridimensionnelles. Nous avons réalisé diverses expériences pour tenter de mettre en place un protocole d'évaluation de la qualité des mesures acquises par des systèmes à vocation topographique tout comme des systèmes « *low cost* » non destinés initialement à la numérisation. Des réponses ont été apportées, celles-ci étant fortement dépendantes du besoin exprimé. De ce fait, une attention particulière doit être portée au cahier des charges établi en amont.
- ✓ Les systèmes d'acquisition tendant à devenir multi-capteurs, **comment consolider les nuages** issus parfois de diverses sources ? Les solutions logicielles et matérielles tendent à automatiser le processus et à fournir en temps réel, le nuage de points consolidé voire géoréférencé. Face à cette automatisation des calculs, nous avons constaté une perte de transparence des calculs sous-jacents, mais surtout une analyse des résultats produite par ces outils « presse-bouton » encore trop légère. De plus, le mode opératoire, en particulier avec les systèmes basés sur le SLAM, doit être soigneusement étudié avant la séquence d'acquisition.
- ✓ **Pourquoi segmenter ou classifier** un nuage de points et ne pas directement le modéliser ? pour faciliter le travail fastidieux d'un opérateur amené à modéliser ou simplement produire du plan à partir du nuage de points. Même de grande qualité, le nuage de points est un ensemble de données tridimensionnelles non structuré ni classé. **Comment segmenter ?** Nous nous sommes principalement concentrés sur la segmentation géométrique, par la recherche prioritaire de plans dans les nuages, notre objet d'étude principal étant le bâtiment. En approchant le bâtiment de l'extérieur vers l'intérieur, nous avons abordé la segmentation des toits, des façades puis des nuages en intérieur, pour aboutir à des algorithmes ayant fait leurs preuves pour les applications de documentation du patrimoine et du BIM. La segmentation géométrique a progressivement été enrichie par des connaissances sémantiques pour aujourd'hui fournir des segments caractérisant des murs, des dalles et bientôt des ouvertures de type fenêtres et portes.
- ✓ **Pourquoi modéliser ?** pour répondre aux nombreux enjeux du BIM et du développement durable. Que ce soit dans le domaine bâti ou végétal, l'utilité d'une maquette numérique n'est plus à discuter. **Comment ?** en définissant une méthodologie de modélisation adéquate, qui fournisse la précision, le niveau de détail et l'information géométrique et sémantique attendue dans le cahier des charges. Avec nos algorithmes, nous sommes en mesure de produire une maquette numérique de bâtiment en 3D fiable et qualifiée d'un point de vue géométrique. Elle présente les éléments structurels principaux (dalles, murs, plafonds) et va progressivement s'enrichir avec des éléments issus de la segmentation préalable. Un premier pas aura également été effectué dans la problématique de modéliser des arbres en milieu urbain pour permettre leur prise en compte dans des modèles de climatologie urbaine.
- ✓ **Comment être sûre de la qualité du livrable ?** Excellente question qu'il ne faut pas perdre de vue ! Nous l'aurons abordée dans chaque travail de thèse et auront proposé des pistes d'évaluations basées sur des indices de qualité et des méthodologies de comparaisons. Des représentations visuelles des incertitudes associées aux modèles 3D ont été suggérées sur le thème du BIM et du HBIM.

Grâce aux travaux réalisés en collaboration avec des doctorants et étudiants en master, nous sommes parvenus à l'établissement d'une chaîne de traitements semi-automatique satisfaisante, mais aussi et surtout à l'acquisition de connaissances et compétences, partagées au gré des congrès qui auront jalonné ces années de recherche.

Les développements menés jusqu'à ce jour, grâce aux nombreux projets de recherches cités dans ce mémoire, constituent une colonne vertébrale importante, qui mérite toutefois d'être consolidée et étendue selon plusieurs aspects : toujours participer à l'**automatisation** du processus scan-to-BIM par ajout de l'information sémantique (détection de points d'intérêts, apprentissage machine), exploiter la **combinaison de capteurs** (imageurs, drone et IRT) notamment pour nos applications environnementales, tous deux alimentant la problématique du **jumeau numérique pour le suivi en temps réel** (processus BIM, suivi de grands chantiers), garantir l'appropriation des modèles créés par les utilisateurs en fin de chaîne au travers du **rapprochement et de l'interaction utilisateur-modèle** 3D (réalité virtuelle, réalité augmentée), tout en garantissant la **qualité du modèle 3D reconstruit** (maîtrise de l'ensemble de la chaîne, de la donnée jusqu'à celle du modèle final). Les cinq parties suivantes détaillent chacun de ces aspects, susceptibles d'alimenter de futurs sujets de thèse, surlignés en couleur.

8.1 Processus scan-to-BIM : considérer la segmentation sémantique

Si l'automatisation peut être perçue comme une perte de maîtrise de l'opération (sentiment que l'on peut légitimement éprouver en observant la facilité d'utilisation des capteurs de mesure actuelle, mais qui est faussé du fait de l'importance du mode opératoire qui exige des compétences en mesure), j'y vois un dénouement favorable. En effet, les travaux chronophages exigés pour traiter les nuages de points et actuellement sous-traités à l'étranger pour raison économique pourront, grâce à des algorithmes produisant automatiquement des résultats fiables, être rapatriés et réalisés par les mêmes équipes que celles ayant effectué le levé. Toutefois, même si le tout automatique reste utopique, des marges de progression du point de vue de l'automatisation des méthodologies proposées sont envisageables au cœur et à l'issue de la chaîne de traitements développée dans notre équipe. L'objectif à moyen terme est d'obtenir une représentation 3D complète, géométriquement précise, renseignée du point de vue sémantique, des bâtiments voire des objets qu'ils contiennent sous la forme d'un système d'information du bâtiment (BIM).

Les verrous principaux à lever, hormis le mode opératoire le plus adapté, sont le couplage de données parfois hétérogènes du point de vue de leur origine (photogrammétrie, lasergrammétrie, image), leur recalage géométrique (consolidation) et radiométrique (si l'information de couleur est disponible), l'extraction des éléments structurels (murs, plafonds, sols, ouvertures), leur modélisation (par maillage, par primitive géométrique) et leur export dans une base de données spécifique pour la gestion de l'information attributaire (maquette numérique intelligente).

Les approches de segmentation que nous avons développées jusqu'ici se sont davantage focalisées sur la géométrie (détection de segments plans) que sur la sémantique, même si cette dernière a été approchée en attribuant un label « mur, dalle, plafond » aux segments plans détectés en intérieur. La façon d'associer la sémantique et la géométrie dans la chaîne de traitements présentée dans la Figure 1 (p.4) est une discussion importante à mener. Nous souhaitons ainsi développer **une segmentation sémantique en exploitant des informations spectrales pour la détection d'ouvertures (portes, fenêtres)**, conjointement au nuage de points. Cette piste est cohérente avec le développement de **systèmes multi-capteurs**, produisant de la donnée plus riche en dimension spectrale. En plus de l'information de l'intensité laser déjà abordée (Macher et al., 2016), l'information spectrale que nous

pourrons exploiter est produite par des capteurs multispectraux devenus « low cost » et disposant de bandes dans le domaine du visible au proche infrarouge. Fixés sur des drones, ils laissent entrevoir une multitude d'applications dans le domaine de la construction et surtout dans le milieu environnemental, freinées jusqu'ici par la résolution spatiale inadaptée d'images prises depuis les satellites d'observation de la terre.

L'analyse de critères 3D déduits de la prise en compte du voisinage des points, puis leur intégration dans un processus de **classification automatique du nuage de points** participe à l'automatisation de la **détection d'objets d'intérêt** qui peuvent servir aussi bien d'éléments de jonctions entre nuages (étape de consolidation), que d'objets mis en correspondance avec des catalogues existants (étape de segmentation et de modélisation). Parmi les processus de classification, nous assistons au retour des classificateurs classiques éprouvés en traitement d'image et à une tendance forte à **l'adoption d'algorithmes d'apprentissage profond** (voir paragraphe 5.4). Sans être des experts en informatique, nous pourrions profiter des implémentations open source pour réseaux de neurones convolutifs, mais il ne faut pas oublier qu'une approche par apprentissage profond est un classificateur et en présente donc les mêmes limitations générales : il a besoin de données d'apprentissage caractérisant les classes recherchées, « il ne peut pas apprendre l'invisible », il est difficile de mesurer sa robustesse, il n'est pas intuitif et reste en grande partie une boîte noire. Bien qu'il puisse livrer de très bons résultats, le raisonnement suivi pour y aboutir reste un mystère, ce qui laisse planer le doute que ces méthodes puissent être utilisées de façon autonome dans des domaines réels liés à la sécurité (Heipke & Rottensteiner, 2020).

Il est probablement plus prudent de ne pas accueillir ces méthodes comme la solution, non maîtrisée, à toutes nos problématiques de classifications, mais plutôt de les considérer comme un outil complémentaire aux différentes méthodes de classification déjà éprouvées. Les travaux amorcés dans cette thématique seront poursuivis en post-doc et nous permettront d'**étudier l'apport des réseaux de neurones pour l'extraction de fenêtres à partir de nuages de points**. Leur point faible réside pour le moment dans le recueil de données d'apprentissage, mais le croisement de bases de données dont la taille augmente de façon exponentielle à l'ère du numérique laisse espérer des avancées prometteuses, au moins dans le domaine du bâtiment, plus doucement dans le domaine des monuments historiques (Matrone et al., 2020). La question de la génération de bases de données d'apprentissage sera au cœur de chaque problématique de détection, c'est pourquoi il est intéressant de réfléchir à la possibilité de simuler des jeux de données virtuelles d'apprentissage à partir de modèles existants.

En dehors du bâtiment, les solutions de détection d'objets basées sur l'apprentissage profond font l'objet d'expérimentations dans beaucoup d'autres domaines : dans le domaine médical (aide au diagnostic), militaire (détection de drones), dans la vie quotidienne (détection de visages, de piétons) et évidemment dans le domaine des transports (véhicule autonome). Dans ce dernier domaine, nous gagnons en expertise au travers de projets de recherches technologiques (PRT Picard 2018/2019 ; PRT Barçon 2019/2020 ; PRT Brossard & Roy 2015/2016) et de projets de fin d'études conventionnés (PFE Rouillon 2019/2020), qui nous amènent à collaborer avec des entreprises du secteur public (SNCF) et privé (entreprises de topographie). Nous souhaitons poursuivre nos travaux sur la **problématique de détection d'objets dans le domaine des transports** à partir de nuages de points et d'images. Ces objets sont de types ponctuels (éléments de voirie, tels que candélabres, feux de signalisation, panneaux) et linéaires (glissières de sécurité, marquages au sol, lignes de chemins de fer).

8.2 Du multi-capteurs aux multi-applications environnementales

En complément de l'objectif du « tout automatique », l'évolution du matériel topographique ces dix dernières années prouve que la tendance est à la combinaison de capteurs. La miniaturisation des composants électroniques, la performance croissante des processeurs et les avancées en télécommunication et solutions de connexions à distance sont tant d'avancées qui permettent le développement de systèmes d'acquisition assez légers pour être portés à la main. Cette miniaturisation, dont profite aussi un domaine de recherche dynamique qu'est celui du véhicule autonome, libère de la place au montage de capteurs supplémentaires, tels que des capteurs imageurs (caméras accompagnant les scanners laser) dans le domaine du visible (caméras 360°) ou de l'infrarouge (proche ou thermique). Une veille technologique dans le domaine de la mesure et de la robotique est de ce fait indispensable. Une conséquence de l'association de capteurs est la nécessité de savoir **coupler des données hétérogènes, multi-résolutions et multi-précisions**. Des expérimentations réalisées à l'aide de capteurs divers non destinés initialement à être couplés dans un même système, favorisent l'innovation tant du point de vue de la conception de nouveaux appareils que de nouvelles applications.

D'autre part, comme évoqué précédemment, il est évident que l'analyse de données 3D est plus difficile dans des nuages de points que dans les images. Les images sont caractérisées par un volume de données moins important, ces données étant structurées en 2D (matrices), de couverture ininterrompue, comparées aux nuages de points, de densités et précision variables. **L'exploitation combinée des images et des nuages de points pour la détection d'objets** devrait aider à la description des objets recherchés. Jongler entre la 3D et la 2D, en créant des ortho-images à partir de nuages de points bruts ou maillés ou des images panoramiques (Tabkha et al., 2019), permet de tirer profit de l'information de voisinage (dans une matrice 2D) et de profondeur (dans un nuage de points 3D), ce qui pourrait en sus alimenter le réseau de neurones (Boulch, et al., 2017).

Dans un contexte de développement durable, la question de la déperdition énergétique des bâtiments est un sujet d'actualité. Les prochains systèmes de numérisation disposant de capteurs fonctionnant dans l'infrarouge thermique méritent donc une attention particulière. Dans la suite des étapes de reconstruction 3D de bâtiments à partir de nuages de points, et en collaboration avec des collègues climaticiens sur des études amorcées en intérieur (Macher et al., 2019 ; Macher et al., 2020), nous envisageons d'étudier l'intégration d'**indicateurs de déperditions énergétiques dans la maquette numérique de bâtiment existant**. Les ponts thermiques étant localisés aux jonctions entre matériaux différents, ils se situent généralement au niveau des fenêtres et portes. Le développement de nos algorithmes de segmentation et de modélisation se poursuivra en intégrant ces connaissances.

Dans la nécessité de mieux préparer les villes aux changements climatiques annoncés par de nombreux scientifiques, la question environnementale doit être au cœur de nos préoccupations. A l'échelle de la ville à présent, toujours dans le contexte de la climatologie urbaine, nous envisageons de poursuivre nos travaux sur **la problématique de l'îlot de chaleur urbain (ICU) strasbourgeois**. L'étude de l'ICU et ses conséquences permettra de proposer des solutions concrètes pour améliorer les conditions de vie et de confort des citoyens lors de paroxysmes climatiques et à plus long terme de fournir aux aménageurs et urbanistes des prescriptions opérationnelles adaptées à divers scénarii de construction. Une thèse en cours menée par N. Philipps (géographe) avec l'Eurométropole de Strasbourg, vise à étudier l'impact de la végétation et de la morphologie urbaine sur l'ICU strasbourgeois en se concentrant principalement sur l'utilisation de modèles climatiques conçus à l'échelle de la région.

Du point de vue cartographique, nous avons commencé à explorer la pertinence d'utiliser des images infrarouge thermique acquises par les satellites ASTER et MODIS pour la détection et le suivi d'ICU au travers d'une collaboration avec l'Université de Salamanca, Espagne (Del Pozo et al., 2020). Une

première étape a consisté à confronter les mesures au sol (température de l'air) à celles acquises par satellite (température de surface) et à produire une première carte d'ICU à Strasbourg. Le lancement probable de futurs satellites permettant des acquisitions en IRT à haute résolution spatiale laisse présager des avancées dans ce domaine. Afin de valider les estimations avancées par traitement d'images satellites, nous envisageons prochainement d'exploiter **des mesures IRT acquises par drone pour la détection d'îlots de chaleur urbains à Strasbourg**. Une campagne d'acquisition est prévue début 2021 au cours de laquelle nous comptons réaliser des mesures de températures de surfaces au sol et des acquisitions d'images IRT par drone. De cette façon, nous espérons observer une corrélation d'une part entre des acquisitions à deux échelles différentes (drone/satellite) et d'autre part entre ces images et les mesures effectuées au sol avec des caméras thermiques.

Dans la thématique de l'apport des arbres à l'atténuation des ICU, et pour faire écho aux perspectives mentionnées dans la thèse de Bournez (2018), nous souhaitons poursuivre la collaboration avec G. Najjar et P. Kastendeuch, à l'origine de l'outil LASER/F destiné à **simuler le fonctionnement des arbres et le microclimat alentour**. Le développement de ce modèle climatique suscite des interrogations que nous pouvons formuler selon plusieurs pistes d'amélioration :

- **La représentation et caractérisation des modèles 3D de bâtiments** : les modèles de bâtiments sont définis actuellement par des maillages, auxquels il est nécessaire à présent d'associer des matériaux. Se pose la question des critères de surface essentiels à considérer, de la façon de les associer aux modèles, du niveau de détail exigé pour décrire les façades ainsi que de la sensibilité des prédictions à ces critères. Des avancées dans la production de maquette numérique intelligente au travers du processus « scan-to-BIM » viendront forcément alimenter cet axe. Cette question laisse entrevoir un travail de recherche portant **sur l'association de matériaux de façades à des maquettes numériques de bâtiments**.
- **La représentation 3D des arbres et groupements d'arbres** : si le choix de considérer un modèle d'arbre sous forme de voxels au lieu de maillage est adopté, il faudra repenser la question de la reconstruction 3D d'arbres en ville, en tirant profit des avancées d'ores et déjà réalisées sur les tilleuls. **Une extension de la reconstruction 3D d'arbres à d'autres espèces et géométries d'arbres** est à envisager ; la méthode de modélisation de groupements d'arbres devra également être étudiée ; enfin se pose la question du LOD exigé pour simuler le fonctionnement des arbres à l'échelle du quartier.
- **La prise en compte de zones climatiques types** : Un défaut majeur de la majorité des études sur le sujet des ICU est qu'elles manquent de métadonnées quantitatives qui influencent le climat (l'exposition, la rugosité, la couverture du sol, la hauteur des bâtiments, la densité, la typologie urbaine, etc.). Stewart et Oke (2012) ont mis en place une classification en zones climatiques locales ou **"Local Climate Zone"** (LCZ) dont la méthodologie a été adoptée internationalement par la communauté des climatologues. Une LCZ est une unité de surface décrivant le paysage en liant le principe d'homogénéité de composition urbaine à celui d'homogénéité climatique. L'établissement d'une carte de LCZ constitue une étape fondamentale, mais toutefois complexe. Pour analyser spatialement la dynamique de l'îlot de chaleur strasbourgeois, nous avons mis en place une **cartographie des zones climatiques locales du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg** au travers d'une approche image et d'une approche vectorielle (PRT de Gourguechon en 2017/2018 et PRT/PFE de Montauban en 2018/2019 et publiée dans [Landes et al. \(2020\)](#)). En parallèle à nos travaux, des cartes LCZ ont été produites sur plusieurs communes de France dans le cadre de projets nationaux impliquant notamment Météo-France. Dans un futur proche, il sera intéressant de confronter nos résultats et de comparer les approches mises en place respectivement en collaboration avec Météo-France. Ainsi, **la prise en compte de cartes de LCZ dans des modèles climatiques à l'échelle du quartier (LASER/F) et à l'échelle de la ville** fait partie de nos perspectives d'études.

Au-delà de la participation au développement de LASER/F, le processus de reconstruction d'arbres en 3D mis en œuvre jusqu'ici avec des opérateurs de segmentation et de modélisation mérite d'être reconsidéré avec l'emploi de **classificateurs de type CNN**. Les données acquises par satellites serviront à l'individualisation des arbres. D'autre part, nous envisageons la reconstruction avec des données multispectrales voire hyperspectrales acquises par cartographie mobile (depuis un véhicule, un drone ou tenus à la main) en vue d'associer des informations attributaires au modèles 3D d'arbres. Notamment **le couplage de l'information IRT à la segmentation sémantique et à la modélisation 3D d'arbres** sera utile dans le contexte du suivi des ICU. Les reconstructions détaillée et globale réalisées jusqu'ici constitueront une référence utile. A long terme, il serait intéressant de **mettre en place un véritable processus « scan-to-TIM », l'acronyme TIM pour Tree Information Modeling** pourrait alors désigner une maquette numérique intelligente de l'arbre. Il viendra rejoindre le BIM (bâtiment) et enrichir les bases de données de villes dans leur transformation digitale. Grâce aux outils de simulation du climat urbain, il sera envisageable de prédire et corriger les projets d'aménagement au regard du respect des enjeux environnementaux.

8.3 Modèles 3D comme jumeaux numériques

La génération de modèles numériques intelligents du bâtiment (BIM) à partir de nuages de points 3D devient une pratique courante. Cependant, la génération de tels modèles est actuellement un processus chronophage, partiellement subjectif et de ce fait source d'erreurs. Il en va de même pour l'extraction supplémentaire d'informations utiles aux applications clés, telles que la documentation des éléments de type menuiseries extérieures (fenêtres, portes) ou mobilier, ou encore, dans le cas d'un BIM « tel que conçu », la surveillance de l'avancement du chantier, le contrôle de la qualité et de la sécurité, et enfin la gestion du temps et des coûts.

A l'ère du numérique, plusieurs défis sont à relever pour adopter ce qui constitue la base de la **construction de « jumeaux numériques »** (*Digital Twins*), ou répliques virtuelles, dans le milieu industriel et du bâtiment. Tout d'abord, une **combinaison appropriée** de données 2D (imagerie) et 3D (nuages de points) **acquises en temps réel**, de façon précise et rapide, doit permettre de minimiser la quantité de données à traiter et d'optimiser le contenu informationnel inhérent aux données. L'acquisition des données sur chantier de construction doit pouvoir être envisagée avec des systèmes autonomes, tels que des robots ou des drones, de même que la planification de leur parcours d'inspection. Par détection de changement, la reconnaissance des éléments ayant subi des transformations devra permettre de mettre à jour la maquette numérique. Cette **mise à jour** impliquera l'ajout d'informations sémantiques à la géométrie mesurée et de critères de qualité associés aux éléments venant d'être construits. Enfin, la comparaison, idéalement **en temps réel**, de la maquette obtenue « tel que construite » avec la maquette « telle que conçue » permettra de suivre l'avancement des travaux tant du point de vue de la fidélité aux plans que du planning (améliorer la gestion du temps et des coûts) et du respect du cahier des charges. A nouveau, les algorithmes récents **d'apprentissage automatique** et de reconnaissance de formes tiendront une place importante dans l'analyse et la manipulation des données acquises, l'objectif étant de produire rapidement un **bilan de l'avancement des phases de construction de l'édifice**. La segmentation et modélisation 3D des ouvertures que nous menons servira d'une part à la localisation du capteur et d'autre part à une inspection approfondie de ces composantes (contrôle qualité). L'intervention successive de plusieurs corps de métier et parfois leur manque de coordination peut être source de retards et de reprises, que la gestion d'une maquette numérique mise à jour peut indéniablement aider à optimiser. Un sujet de thèse pourrait ainsi porter sur **l'optimisation des phases de construction par suivi en temps réel du jumeau numérique du bâtiment**. Un appel à projet européen, coordonné par le centre de recherche allemand pour l'intelligence artificielle (*deutsches Forschungszentrum für künstliche Intelligenz*,

Kaiserslautern et dans lequel nous étions impliqués n'a pas été retenu, mais mérite d'être soumis à un futur appel à projet. Nous avons une carte à jouer sur ce terrain en collaborant avec des chercheurs de notre institut (mécatroniciens, génie civil, architectes), également impliqués dans la création de jumeaux numériques en milieu industriel.

Le jumeau numérique fait également parler de lui dans le domaine archéologique et se place au centre de congrès futurs, à l'instar du congrès '*Digital Twins for Advanced Cultural Heritage Semantic Digitization*', événement commun à ARQUEOLÓGICA 2.0 et GEORES 'GEOmatics and pREServation prévu en avril 2021. Les sujets attendus couvrent la documentation du patrimoine culturel au sens large, de l'acquisition à la numérisation pour la conservation et la restauration virtuelles de vestiges archéologiques et d'ouvrages architecturaux. Les travaux de notre équipe vont dans ce sens avec par exemple, la problématique de reconstruction 3D d'édifices partiellement disparus, de numérisation de sites historiques inaccessibles au grand public, de galeries souterraines. A nouveau, les approches d'apprentissage machine sont intéressantes pour automatiser le processus et coupler l'information géométrique à une labellisation sémantique.

Que ce soit dans le domaine industriel ou dans le domaine particulier du patrimoine culturel, le suivi en temps réel des reconstructions ou des fouilles, les questions de recalage de modèles produits à des dates différentes, de mise à jour de la maquette numérique avec de nouveaux éléments découverts, l'évaluation des modèles 3D produits à partir d'hypothèses et les niveaux de détail à prendre en compte dans ces maquettes, sont autant de questions à étudier dans de futurs projets de recherche.

8.4 Rapprochement et interaction utilisateur-modèle 3D (RV, RA)

Parmi les technologies fortement médiatisées actuellement se trouvent les solutions de réalité virtuelle (RV) et réalité augmentée (RA). En explorant les diverses applications concrètes qui en sont faites dans l'éducation, la culture, le monde industriel ou médical, nous rendons compte que les limites et les conséquences des usages de ces nouvelles réalités sont difficiles à cerner. Alors que la RV voit le jour dans les années 1930 en s'appuyant sur les principes de la stéréoscopie, les premières solutions apparaissent dans les années 1960 et ne profitent qu'au domaine militaire. Aujourd'hui, tout un chacun peut se procurer un casque de réalité virtuelle à moindre coût que l'on soit attiré ou non par les jeux vidéo, domaine dans lequel ces casques sont apparus. La RA relève d'une amplification de la perception de l'utilisateur en gardant un ancrage dans le monde réel. Elle superpose des données numériques au monde réel. Le domaine médical a déjà entamé le processus d'intégration de ces nouvelles technologies au travers d'applications de RA, réels atouts en chirurgie notamment. Les atouts de la RV et de la RA sont devenus de plus en plus évidents dans notre vie quotidienne. Il n'est donc pas surprenant que le développement d'applications de RV/RA basées sur des données acquises sur site soit un nouveau défi à relever pour la communauté des géomaticiens. Un numéro spécial supervisé par Kersten et Edler (2020) donne un aperçu de la recherche de pointe et des applications en RV/RA menée au sein de la communauté des sciences de la géomatique et disciplines voisines. Il est né de l'impulsion de la commission "*Virtual and Augmented Reality*", composée de sociétés allemandes de photogrammétrie, de télédétection et de cartographie, créée en mars 2019, ce qui atteste de la fraîcheur du sujet dans nos métiers.

Dans le processus BIM, des réunions de chantier et de travail collaboratif à distance deviennent envisageables grâce à ces systèmes. Même si nous n'atteignons que difficilement le niveau 2 du BIM en France (une seule maquette, mais échangée entre les acteurs du projet), le niveau 3, vu comme un niveau de collaboration totale, reste un objectif en ligne de mire. A ce niveau-ci, tous les acteurs du projet peuvent intervenir en même temps et en temps réel sur une maquette unique et partagée sur

un serveur centralisé. De toute évidence, ces systèmes de RV, RA trouveront une place certaine, en permettant des visites de chantier à distance ou des superpositions de projets à l'existant.

Les monuments ou sites historiques subissent des altérations au fil du temps (rénovations, maintenances, érosion, destruction...) et sont parfois inaccessibles au public (localisation géographique, instabilité politique...). La nécessité de documenter des sites du patrimoine culturel est évidente, mais la communication autour de cette documentation au sens large du terme est primordiale. Les dessins, plans, nuages de points, maquettes numériques constituent une réplique de la géométrie ou de l'aspect du site ou du bâtiment. Des vidéos de visites virtuelles et des immersions dans les modèles à partir de systèmes de RV et des visites interactives sont un début intéressant, permettant au visiteur d'évoluer dans le lieu et de le découvrir de façon plus ludique. Un premier pas a été fait en ce sens au travers de travaux d'étudiants (PFE Bruna ; [Landes et al., 2015b](#) ; Thorlet, 2020 ; PFE Durieux).

Les solutions mentionnées précédemment ouvrent une voie inespérée vers de nouvelles formes d'apprentissage et de transmission culturelle, de même qu'une exploitation plus accessible des modèles 3D produits. Un travail approfondi devra porter sur **l'exploitation de la RV/RA pour la documentation du patrimoine et pour l'éducation**. Le besoin d'outils d'enseignement à distance est particulièrement accentué par la crise sanitaire que nous vivons. Dans ce contexte, nous envisageons de déposer un projet encourageant la coopération innovante et les échanges de bonnes pratiques entre universités, en collaboration avec des entreprises du secteur du patrimoine culturel. Le partage d'une plateforme d'enseignement à distance pour la documentation et la préservation du patrimoine culturel pourrait constituer un objectif commun.

8.5 Qualification des modèles 3D

Si les mondes de la géomatique et de la vision assistée par ordinateur se rejoignent, une différence majeure entre les deux réside dans l'importance portée à la question du géoréférencement et de la maîtrise de la précision. En robotique, l'objectif premier est le **positionnement relatif du robot** par rapport à son environnement ; le souci de la précision est occulté à partir du moment où l'erreur de déplacement est inférieure à la taille du robot pour lui permettre d'évoluer dans un espace sans encombre. En géomatique, le **géoréférencement** est un prérequis évident, du fait de l'intégration quasi-systématique des relevés dans les couches cartographiques (cadastrales) existantes. Ces deux mondes collaborent au travers de l'ANR BIOM (2017-2020), projet dans lequel la modélisation des bâtiments intérieurs et extérieurs est considérée comme un processus conjoint où les approches de modélisation coopèrent fructueusement et se profitent mutuellement en termes de sémantique et de géométrie. Le souci de la précision s'explique par le besoin de qualifier le modèle final afin de pouvoir garantir le respect du niveau de précision exigé.

Aucune norme n'a été définie, à ce jour, pour évaluer les modèles 3D de bâtiments reconstruits. Des recherches doivent être poursuivies en ce sens, vu l'accélération du développement des maquettes numériques du bâtiment « tel que conçu » et « tel que construit ». Des recherches devront porter sur l'étude d'une **méthodologie d'évaluation**, aidant l'utilisateur final à porter un jugement sur le niveau de précision de la maquette numérique, au regard des exigences fixées par le cahier des charges. Ce besoin est d'autant plus urgent que des entreprises non qualifiées gagnent des marchés sans être en mesure de garantir la qualité du modèle produit. Ce manquement peut engendrer des conséquences graves puisque la maquette constitue, comme le gros œuvre, un socle commun pour tous les acteurs intervenants sur le chantier.

Des progrès restent aussi à faire pour **automatiser l'évaluation de la qualité** des livrables intermédiaires. Si des critères de qualité sont produits à chaque phase clé de la chaîne de traitement, ils permettront de guider la suite du processus. Par exemple, la modélisation automatique des murs à partir des segments plans détectés pourrait être déclenchée dès lors que les écarts-types associés aux segments plans de murs sont inférieurs à un seuil fixé. Simultanément, nous réduisons les zones de retouches soumises au contrôle qualité de l'opérateur. Dans ce contexte, un sujet de thèse pourrait porter sur la **mise en place d'un processus séquentiel d'évaluation des étapes de la chaîne de traitements menant de l'acquisition du nuage de points à un modèle 3D**. La question de la qualification d'un livrable restant notre cœur de métier, il me paraît opportun de clore, avec l'énoncé de ce thème, le volet de mes perspectives de recherches.

9. Références citées dans le mémoire

Les références *en bleu* sont celles publiées dans le cadre de mes travaux et mentionnées en partie 1 de ce mémoire.

- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z. (2014). An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner. *Measurement*, vol. 52, pp. 111–123 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.009>
- Alshawwa, M., Smigiel, E., Grussenmeyer, P., Landes, T. (2007). Integration of a Terrestrial LiDAR on a Mobile Mapping Platform: first experiences. *5th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'07*, 29-31 may, 2007, Padua, Italy. 6 pages.
- Alshawwa, M., Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2009). Acquisition and automatic extraction of facade elements on large sites acquired by low cost mobile mapping systems. 3rd International Workshop 3D ARCH 2009. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Comm. V, ISSN 1682-1777, Vol. XXXVIII-5/W1, (CDROM).
- Assi, R., Landes, T., Macher, H., Grussenmeyer, P. (2019a). Energy function algorithm for detection of openings in indoor point clouds. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, pp. 747-752, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-747-20>
- Assi, R., Landes, T., Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P. (2019b). Assessment of a keypoints detector for the registration of indoor and outdoor heritage point clouds, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 133–138, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-133-2019>
- Ballouch, Z., Hajji, R., Ettarid, M (2020). The contribution of deep learning to the semantic segmentation of 3D point-clouds in urban areas. *In 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo)*, pp. 1-6.
- Benazzi, T. (2018) *Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site*. Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Berger, M., Tagliasacchi, A., Seversky, L. M., Alliez, P., Guennebaud, G., Levine, J. A., Sharf, A. et Silva, C. T. (2017). A survey of surface reconstruction from point clouds. *Computer Graphics Forum*, 36(1): pp. 301–329.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256. DOI: 10.1109/34.121791
- Biljecki, F., 2017. *Level of details in 3D City models*, PhD at Delft University, 368 pages. <https://filipbiljecki.com/phd/dissertationFilipBiljecki.pdf>
- Biljecki, F., 2013. *The concept of level of detail in 3D city models. The concept of level of detail in 3D city models*. PhD Research Proposal. GIST Report No. 62. 70 pages
- Boardman, C. et Bryan, P. (2018). 3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance on the use of laser scanning in archaeology and architecture. *Historic England*. <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/heag155-3d-laser-scanning/>
- Böhler, W., 2006. Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques. In *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*; Baltsavias, E., Grün, A., Van Gool, L., Pateraki, M., Eds.; Taylor & Francis Group: London, UK, 2006; pp. 89–99.
- Boudon, F., Preuksakarn, C., Ferraro, P., Diener, J., Nacry, P., Nikinmaa, E., & Godin, C. (2014). Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems obtained from laser scanning. *Annals of Botany*, 114(4), 853–862.
- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., Tarsha-Kurdi, F. (2007). Automatic segmentation of building facades using Terrestrial Laser Data. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISSN 1682-1750 Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007, pp. 65-70.
- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2009). Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. In *Special issue of the International Journal of Architectural Computing IJAC*, Issue 07, Vol. 01, ISSN 14780771, pp. 1-20. <http://dx.doi.org/10.1260/147807709788549411>

Boulaassal, H., Chevrier, C., Landes, T., (2010). From laser data to parametric models: towards an automatic method for building façade modelling. *EuroMed 2010, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 6436 pages : 42–55. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16873-4_4

Boulaassal, H. (2010). *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Boulch, A., Houllier, S., Marlet, R., Tournaire, O. (2013). Semantizing Complex 3D Scenes using Constrained Attribute Grammars. *Computer Graphics Forum*, Wiley, 2013, 32 (5), pp.33-42. 10.1111/cgf.12170. hal-00864707

Boulch, A., Guerry, J., Le Saux, B., Audebert, N. (2018). SnapNet: 3D point cloud semantic labelling with 2D deep segmentation networks. *Computers & Graphics* 71(2018), pp.189–198 <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.11.010>

Bournez, E. (2015). *Reconstruction d'arbres en milieu urbain à partir de nuages de points*. Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA de Strasbourg.

Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G. (2016a). Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B8, pp. 257-264. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B8-257-2016.

Bournez, E., Landes, T., Najjar, G., Ngao, J., Saudreau, M., Kastendeuch, P. (2016b). From LiDAR acquisition to FSPM application to 3D urban tree transpiration modeling. *IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)* (2016-11-07-2016-11-11) Qingdao (CHN). In: FSPMA 2016. 1 page.

Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G. (2017). From TLS point clouds to 3D models of trees: a comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W3, pp. 113-120, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-113-2017>

Bournez, E. (2018). *Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Bournez, E., Landes, T., Najjar, G., Kastendeuch, P., Ngao, J., Saudreau, M. (2019). Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, pp. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.016>

Bruna, R. (2014). *Modélisation 3D de la chapelle Saint-Laurent et de la place du Château (secteur 3) pour extraction de données archéologiques et visite virtuelle*. Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA de Strasbourg.

Caloz, R., Collet, C. (2001). *Précis de télédétection, vol. 3, traitements numériques d'images de télédétection*, Presses de l'université du Québec, Agence universitaire de la Francophonie, ISBN 2-7605-1145-6(v-3). 386 pages.

Caraffa, L., Brédif, M., Vallet, B. (2016). 3D watertight mesh generation with uncertainties from ubiquitous data. *Asian conference on Computer Vision*, Taipei, Taiwan, November 2016, 16 pages.

Castillo, E., Zhao, H. (2013). Point Cloud Segmentation via Constrained Non-linear Least Squares Surface Normal Estimates, *Reports of UCLA Computational Applied Mathematics Publications*, 6 pages.

Celnik, O., Lebègue, E., Guersendré, N. (2014). *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*, Ed. Eyrolles, 156 pages.

Chaperon, T. (2002). *Segmentation de nuage de points 3D pour la modélisation automatique d'environnements industriels numérisés*. Modélisation et simulation. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002. NNT: 2002ENMP1090.

Chrisman, NR. (1991). *The error component in spatial data*. PA Longley, MF Goodchild, DJ Maguire, DW Rhind, eds., Geographical Information Systems, John Wiley & Sons, New-York, pp. 165–174.

Cocquerez, J.-P., Philipp, S. (1995). Analyse d'images : Filtrage et segmentation, Ouvrage collectif publié avec le soutien du Groupement de Recherche 134 : *Traitement Du Signal et Images (CNRS)*, publié chez MASSON (EAN13 : 9782225849237). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00706168/document>

Comaniciu, D. et Meer, P. (2002). Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24(5), pp. 603-619.

D'Andlau, G., Landes, T. (2008). Le château d'Andlau renaît numériquement en trois dimensions. *Revue de la société d'histoire et d'archéologie Dambach Barr Obernai*. Gyss Imprimeur, p.7-11.

Del Giudice, M.; Osello, A. (2013). BIM for cultural heritage. In *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5/W2, pp. 225–229.

Del Pozo, S., Landes, T., Nerry, F., Kastendeuch, P., Najjar, G., Philipps, N., Lagüela, S. (2020). UHI estimation based on ASTER and MODIS satellite imagery: first results on Strasbourg city, France. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event.

Dell'Unto, N., Leander, A. M. Dellepiane, M. Callieri, M., Ferdani, D. and Lindgren, S. (2013). Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project, *2013 Digital Heritage International Congress*, pp. 621-628, doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804.

De Maestri, A. (2017). *Premiers pas en BIM. L'essentiel en 100 pages*. Editions Eyrolles, ISBN 978-2-212-67372-2 et Afnor Editions, ISBN 978-2-12-465591-5, 95 pages.

Descoteaux, M. (2013). *Reconstruction et analyses d'images médicales – segmentation*. IMN-530. Support de cours de l'université de Sherbrooke, 2013. http://scil.dinf.usherbrooke.ca/?page_id=778&lang=fr

Douillard, B., Underwood, J., Kuntz, N., and Vlaskine, V., Quadros, A., Morton, P., Frenkel, A. (2011). On the segmentation of 3D LIDAR point clouds, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, 2011, pp. 2798-2805, doi: 10.1109/ICRA.2011.5979818.

Fai, S., Rafeiro, J. (2014). Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information Model (BIM) : West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sensing Spat. Inf. Sci.* II-5, 123-130. Doi :10.5194/isprsannals-II-5-123-2014

FARO_X330@2020 : Documentation technique sur le Faro Focus3D X330 : <https://www.faro.com/fr-fr/news/le-nouveau-scanner-laser-focus3d-x-330-de-faro-loutil-parfait-pour-la-documentation-3d-et-le-releve-topographique/>

Li, F. F., Johnson, J., Yeung, S. (2017). Course Convolutional Neural Networks for Visual Recognition; Lecture 11: Detection and Segmentation, Stanford University, 2017 http://cs231n.stanford.edu/slides/2017/cs231n_2017_lecture11.pdf

Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with application to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, vol. 24 n°6, pp. 381-395.

Girardeau-Montaut, D. (2006). *Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles*. Thèse à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications p.60-100. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001745>

Goulette, F., Nashashibi, F., Abuhadrous, I., Ammoun, S., Lurgeau, C. (2006). An integrated on-board laser range sensing system for on-the-way city and road modelling. *The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol 34 (part A), 6 pages

Grilli, E., Menna, F., Remondino, F. (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms. In *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, pages 339–344. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017

Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., Ringle, K., (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. In: the XXIIth ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Comm. V, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVII, part B5, pp. 213-218.

- Grussenmeyer, P., Alby, E., Landes, T., Koehl, M., Guillemin, S., Hullo, J.-F., Assali, P., Smigiel, E. (2012). Recording Approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and terrestrial laser scanning. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B2, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Guo, Y., Wang, H., Hu, Q., Liu, H., Liu, L., Bennamoun, M. (2019). Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- Hackenberg, J., Spiecker, H., Calders, K., Disney, M., & Raunonen, P. (2015). SimpleTree —An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. *Forests*, 6(11), 4245–4294.
- Hayot, C. (2014). *Etude des solutions de modélisation d'un arbre en milieu urbain, en vue de son intégration dans les modèles météorologiques*. Mémoire de Master 2, INSA de Strasbourg spécialité topographie.
- Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O. (1997). Evaluation of automatic road extraction. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, pp.47-56.
- Heipke, C., Rottensteiner, F. (2020) Deep learning for geometric and semantic tasks in photogrammetry and remote sensing, *Geo-spatial Information Science*, 23:1, 10-19, DOI: [10.1080/10095020.2020.1718003](https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1718003)
- Heritage, G., Hetherington, D. (2007). Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Process. Landf.* 2007, 32, 66–74.
- Hough, P.V.C., 1962. *Method and Means for Recognizing Complex Patterns*. U.S. Patent 3.069.654.
- Hu, R., Bournez, E., Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G., Ngao, J., Colin, J. (2018). Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 357–368.
- Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., Landes, T., Thibault, G. (2011). Georeferencing of TLS Data for Industrial Complex Scenes: Beyond Current Solutions. In *ISPRS Laser Scanning Workshop*, vol. XXXVIII, p. 1-6, ISBN: 2194-9034
- Hullo, J.-F., Thibault, G., Grussenmeyer, P., Landes, T., Bennequin, D. (2012). Probabilistic Feature Matching Applied to Primitive Based Registration of TLS Data, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. I-3, pp. 221-226, ISBN: 2194-9042.
- Hullo, J.-F. (2013). *Consolidation de relevés laser d'intérieurs construits : pour une approche probabiliste initialisée par géolocalisation*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg en collaboration avec EDF R&D
- Jiao, L., Zhang, F., Liu, F., Yang, S., Li, L., Feng, Z., Qu, R. (2019). Survey of Deep Learning-Based Object Detection, *IEEE Access*, Vol. 7, 31 pages; DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2939201
- Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2009). Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar Energy*, 83(3), 333–341.
- Kersten, T.P., Edler, D. (2020). Special Issue “Methods and Applications of Virtual and Augmented Reality in Geo-Information Sciences”. *PFG* 88, 119–120. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00109-w>
- Khoshelham, K., Tran, H., and Acharya, D. (2019). Indoor mapping Eyewear: geometric evaluation of spatial mapping capability of Hololens, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 805–810, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-805-2019>, 2019.
- Lachat, E., Macher, H., Mittet, M.-A., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2015a). First experiences with Kinect V2 sensor for Close Range 3D Modelling, *Proceedings of the 6th 3D-ARCH International Conference on "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"*, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, pp. 93-100. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-93-2015.
- Lachat, E., Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2015b). Assessment of the accuracy of 3D models obtained with DSLR (Digital Single-Lens Reflex) camera and Kinect v2, *Proc. SPIE 9528, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII*, Munich, Vol. 9528, 14 pages. doi:10.1117/12.2184866.

- Lachat, E., Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2015c). Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor)- Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling, *Remote Sensing*, MDPI, Vol. 7(10); pp. 13070-13097 (IF: 3.036, SNIP: 1.498, SJR: 1.269).
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2016). Combination of TLS point clouds and 3D data from Kinect V2 sensor to complete indoor models, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B5, pp. 659-666. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-659-2016.
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017a). First experiences with the Trimble SX10 scanning total station for building façade survey, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W3, 405-412, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-405-2017>
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017b). Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small artefact 3D modeling, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W5, 427-434, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-427-2017>
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2018). Comparison of point cloud registration algorithms for better result assessment - Towards an open-source solution. *ISPRS Technical Commission II "Photogrammetry"*, 3-7 juin 2018, Riva del Garda, pp. 551-558. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-551-2018
- Lachat, E. (2019). *Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg. <http://www.theses.fr/2019STRAD012>
- Landes, T., Grussenmeyer, P., Vögtle, T., Ringle, K. (2007). Combination of Terrestrial Recording Techniques for 3D Object Modelling regarding topographic constraints. Example of the Castle of Haut-Andlau, Alsace, France. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-5/C53 ISSN 1682-1750 & CIPA Int. Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XXI-2007 ISSN 0256-1840, pp. 435-440.
- Landes, T. (2008). Le château d'Andlau passé au scanner 3D. *Revue Arts et Industries* n°261, pp. 21-23.
- Landes, T., Vögtle, T. (2009). Influence de différents matériaux sur des mesures effectuées par scanner laser terrestre. *Revue Contrôles Essais Mesures*, Numéro Spécial Colloque CMOI, pp.43-46.
- Landes, T., Grussenmeyer, P., Boulaassal, H. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2). *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, n°129, p.25-38.
- Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P. (2012a) Quality assessment of geometric façade models reconstructed from TLS Data. *The Photogrammetric Record*, 27(138): 137–154 (June 2012): 10.1111/j.1477-9730.2012.00674.x, 18 pages.
- Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P., Mohamed, M. (2012b). Assessment of three-dimensional models derived from LiDAR and TLS data. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B2, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Landes, T., Waton, M.D., Alby, E., Gourvez, S., Lopes, B. (2013). 3D modeling of headstones of the 2nd and 3rd century by low cost photogrammetric techniques. 24e Symposium du CIPA, Strasbourg, 2-6 September 2013. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, pp. 397-402. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-397-2013
- Landes, T., Bidino, S., Guild, R. (2014a). Semi-automatic extraction of sectional view from point clouds. The case of Ottmarsheim's abbey church, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, 2014, pp. 343-348. doi:10.5194/isprsannals-II-5-89-2014.
- Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., Guillemin, S. (2014b). Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, XYZ n°141, pp. 61-68, ISSN 0290-9057.
- Landes, T., Saudreau, M., Najjar, G., Kastendeuch, P., Guillemin, S., Colin, J., Luhahe, R. (2015a). 3D tree architecture modeling from laser scanning for urban microclimate study, In *9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment (ICUC9)*, Toulouse, France, juillet 2015, 6 pages. doi: 10.3390/f5051069

- Landes, T., Kuhnle, G., Bruna, R. (2015b). 3D modeling of the Strasbourg's Cathedral basements for interdisciplinary research and virtual visits, In: 25th CIPA International Symposium, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Taipei, Taiwan, août 2015, Vol. XL-5/W7, pp. 263-270. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-263-2015
- Landes, T., Heissler, M., Koehl, M., Benazzi, T., Nivola, T. (2019). Uncertainty visualization approaches for 3d models of castles restituted from archeological knowledge. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 409–416, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-409-2019>, 2019.
- Landes, T., Najjar, G., Koehl, M., Montauban, O., Gourguechon, C., Kastendeuch, P., Slisse, P. (2020). Création de cartes de zones climatiques locales pour le suivi des îlots de chaleur urbains à Strasbourg. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, XYZ n°163 – 2^{ème} trimestre, p.53-61.
- Lavoué, G., Dupont, F. and Baskurt, A., 2005. A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis. *Computer-Aided Design*, Vol. 37(10), pp. 975-987.
- Leica_MS60@2020 : documentation technique sur la station totale Leica Nova MS60 <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/total-stations/multistation/leica-nova-ms60>
- Leica_RTC360@2020 : documentation technique sur Leica RTC360 : <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>
- Leica_C10@2020@2020 : documentation technique sur Leica ScanStation C10 : http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation%20C10/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C10_DS_fr.pdf
- Lempereur, M. (2016). *Etude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres*. Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Lerma Garcia, J. L., Van Genechten, B., Heine, E., Quintero, M. S. (2008). *3D RiskMapping – Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. Editor: Universidad Politecnica De Valencia, ISBN:978-84-8363-312-0, 261 p.
- Lichti, D. (2017). Ray-Tracing Method for Deriving Terrestrial Laser Scanner Systematic Errors. *J. Surv. Eng.*, 2017, 143(2): 06016005
- Lichti, D. (2019). Geometric point cloud quality. In “*Laser Scanning: An Emerging Technology in Structural Engineering*”; Ed. Belén Riveiro and Roderik Lindenbergh, pp. 79-92. DOI: 10.1201/9781351018869-6
- Lu, X., Yao, J., Tu, J., Li, K., Li, L., & Liu, Y. (2016). Pairwise Linkage for Point Cloud Segmentation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.III(3), pp. 201-208
- Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., Alby E. (2014a). Semi-automatic segmentation and modelling from point clouds towards historical building information modelling, In: *EuroMed 2014, Digital Heritage: Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8740, pp. 115-120. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_11; Best paper Award.
- Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., Alby, E. (2014b). Boundaries Extraction from Segmented Point Clouds as Input for Historical Building Information Modelling. *Int. Journal of Heritage in the Digital Era*, Multi-Science Publishing, Vol. 3(4), ISSN 2047-4970, pp. 669-682.
- Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2015). Point clouds segmentation as base for as-built BIM creation, 25th CIPA International Symposium, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, CIPA (Eds.), Taipei, Taiwan, août 2015, Vol. II-5/W3, pp. 191-197. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W3-191-2015
- Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2016). Validation of point clouds segmentation algorithms through their application to several case studies for indoor building modeling, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B5, pp. 667-674. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-667-2016.

Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017) From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied Sciences* 2017, 7(10), 1030; doi:10.3390/app7101030

Macher, H., Boudhaim, M., Grussenmeyer, P., Siroux, M., Landes, T. (2019). Combination of thermal and geometric information for BIM enrichment, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 719–725, 2019 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-719-2019>

Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2020). Automation of thermal point clouds analysis for the extraction of windows and thermal bridges of building facades. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event.

Macher, H. (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Macher, H., Chow, L., Fai, S. (2019). Automating the verification of heritage building information models created from point cloud data. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6–8 February 2019, Bergamo, Italy.

Maiezza, P. (2019). As-built reliability in architectural HBIM Modeling. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6–8 February 2019, Bergamo, Italy, pp. 461-466.

Matrone, F., Lingua, A., Pierdicca, R., Malinverni, E-S, Paolanti, M., Grilli, E., Remondino, F., Landes, T., Murtiyoso, A. (2020). A benchmark for large-scale heritage point cloud classification *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event - <http://archdataset.polito.it/>

Mikhail, E.M., 1982. *Observations And Least Squares*, University Press of America, ISBN 10 0819123978.

Mittet, M.-A., Grussenmeyer, P., Landes, T., Yang, Y., Bernard, N. (2013). Mobile outdoor relative localization using calibrated RGB-D Cameras, *8th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'13*, May 1st-3rd, 2013, Tainan, Taiwan, 6 pages.

Mittet, M.-A., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2014) Localization using RGB-D cameras ortho-images. *In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy, pp. 425-432. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-5-425-2014.

Mittet, M.-A. (2015). *Caméras 3D pour la localisation d'un système mobile en environnement urbain*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Mohamed, M., Landes, T., Grussenmeyer, P., Zhang, W. (2013). Multi-dimensional quality assessment of photogrammetric and LiDAR datasets based on a vector approach, *In: 8th International Symposium on Spatial Data Quality, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, B. Wu, E. Guilbert, and J. Shi (Eds.), Hong-Kong, China, Vol. XL-2/W1, pp. 93-98. doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-93-2013

Mohamed, M. (2013). *Quality Assessment of 3D building models in airborne digital photogrammetry. Evaluation de la qualité des modèles 3D de bâtiments en photogrammétrie numérique aérienne*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Murtiyoso, A. D. (2020). *Relevé 3D et classification de nuages de points du patrimoine bâti*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P., Ngao, J., Saudreau, M., Landes, T., Améglio, T., Luhahe, R., Guillemin, S., Schreider, G., Kleinpeter, K., Nerry, F. (2015). A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg. *In 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment (ICUC9)*, Toulouse, France, 6 pages. <http://prodinra.inra.fr/record/309894>

- Neusch, T., Grussenmeyer P., Najjar, G. (2003) Télédétection et photogrammétrie au service de la climatologie urbaine à Strasbourg : Le projet RECIUS 3. *Colloque « Pixels et Cités », Actes du colloque Télédétection et photogrammétrie pour le développement en milieu urbain. Marne-la-Vallée (France), 26 - 28 novembre 2003.*
- Niemeyer, J., Rottensteiner, F. and Soergel, U. (2014). Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, pp. 152–165.
- Nivola, T. (2018). *Modélisation 3D du castellum et du château disparus de Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine.* Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Oude Elberink, S., Vosselman G. (2011). Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2): 157–165
- 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, pp. 69-79.
- Polidori, L., Landes, T., Verdun, J., Kasser, M. (2020). Hétérogénéité des distances : quel impact sur la qualité des relevés LiDAR aériens et terrestres. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, XYZ n°163 – 2^{ème} trimestre, p.37-43.
- Poux, F. (2019). *The smart Point Cloud. Structuring 3D intelligent point data.* Thesis of Liege University. 268 pages.
- Rabbani, T., Van de Heuvel, F.A., Vosselman, G. (2006). Segmentation of point clouds using smoothness constraint. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol 36, pages 248–253.
- Ramos, M. M. et Remondino, F. (2015). Data fusion in Cultural Heritage - A review. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol XL-5, pages 359–363.
- Remondino, F. (2003). From point cloud to surface: the modeling and visualization problem. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5.
- Ris, P.-O. (2011). *Etude des solutions de contournement des effets de réflexion sur surfaces métalliques relevées par scanner laser.* Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Roy, L. (2020). *Apport des informations thermiques, de couleur et d'intensité pour la détection automatique d'ouvertures dans des nuages de points.* Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Roynard, X., Deschaud, J.-E., Goulette, F. (2018). Paris-Lille-3D: a large and high-quality ground truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification. *The International Journal of Robotics Research*, 37(6):545–557, 2018.<http://npm3d.fr>
- Salgues, H., Macher, H., Landes, T. (2020). Evaluation of mobile mapping systems for indoor surveys. *3DGeoInfo, The Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44, pp. 119-125
- Sappa, A., Restrepo-Specht, A., Devy, M., 2001. *Range Image Registration by using an Edge-based Representation.* In *Proc. of the 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, (SIRS '01), 10 pages.
- Scherer, M. (2002). Advantages of the Integration of Image Processing and Direct Coordinate Measurement for Architectural Surveying—Development of the System TOTAL. In *Proceedings of the XXII FIG International Congress*, Washington, DC, USA, 19–26 April 2002.
- Scherer, M., Lerma, J.L. (2009). From the Conventional Total Station to the Prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review. *J. Surv. Eng.* 2009, 135, 173–178.
- Serna, A. et Marcotegui, B (2014). Detection, segmentation and classification of 3D urban objects using mathematical morphology and supervised learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, 2014, 93, pp.243-255. 10.1016/j.isprs.2014.03.015 ; hal-01010012
- Sinoquet, H., Le Roux, X., Adam, B., Ameglio, T., & Daudet, F. A. (2001). RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. *Plant, Cell & Environment*, 24(4), 395–406.

- Sithole, G. et Vosselmann, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*; Vol.59, issues 1-2, August 2004, pp. 85-101.
- Slob, S., Hack, R., 2004. 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. In *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*; Hack, R., Azzam, R., Charlier, R., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2004; Vol. 104, pp. 179–189.
- Soni, A., Robson, S., Gleeson, B., 2015. Structural monitoring for the rail industry using conventional survey, laser scanning and photogrammetry. *Appl. Geomat.* 2015, 7, 123–138.
- Staiger, R., 2005. The geometrical quality of Terrestrial Laser Scanner. *FIG Working Week*, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005.
- Tabkha, A., Hajji, R., Billen, R., Poux, F. (2019). Semantic enrichment of point cloud by automatic extraction and enhancement of 360° panoramas. *The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W17, pp. 355-362
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2007a). Joint combination of point cloud and DSM for 3D building reconstruction using airborne laser scanner data. 4th IEEE GRSS, April 2007, Paris ; ISSN: 2334-0932; doi: 10.1109/URS.2007.371843
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2007b). Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3D Building Roof Planes from LiDAR Data. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007, pp. 407-412.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., Koehl, M. (2007c). Model-driven and data-driven approaches using LiDAR data: analysis and comparison. ISPRS Workshop, Photogrammetric Image Analysis (PIA07), September 19-21, 2007, Munich, Germany. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI Part3 W49A / ISSN 1682-1750, pp. 87-92.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2008). Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data. *The Photogrammetric Journal of Finland*. Vol. 21, n°1, 2008, pp. 97-109.
- Tarsha-Kurdi, F. (2008). *Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.
- Theiler, P. W., Schindler, K. (2012). Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 3, pp. 173–178.
- Thierry, J. (2019). *Détection de fenêtres dans un nuage de points d'un mur de façade et positionnement semi-automatique dans un logiciel BIM*. Mémoire de Master 2, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg.
- Thorlet, Q. (2020). Imagerie 3D et réalité virtuelle de la carrière Saingt de Fleury-sur-Orne. *Revue XYZ de l'Association Francophone de Topographie*, XYZ n° 163, 2^{ème} trimestre 2020.
- Torr, P. H. et Zisserman, A. (2000). Mlesac: A new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1):138–156.
- Trimble_SX10@2020. Documentation technique sur Trimble SX10 scanning total station information and datasheet: <https://fr.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-sx10>
- Trimble_X7@2020. Documentation technique sur Trimble X7 : <https://geospatialx7.trimble.com/>
- Vallet, B., Brédif, M., Serna, A., Marcotegui, B., Paparoditis, N. (2015). TerraMobilita/IQmulus urban point cloud analysis benchmark. *Computer Graphics* 49, pp. 126-133.
- Vallet, B. (2016). *Analyse et reconstruction de scènes urbaines*. Habilitation à diriger la recherche de l'Université Paris-Est, Marne La Vallée.
- Vallet, B., Mallet, C. (2016). Urban Scene Analysis with Mobile Mapping Technology. Ed. BAGHDADI, N. et ZRIBI, M.; *Land Surface Remote Sensing in Urban and Coastal Areas*, pp. 63-100.

- Verdie, Y., Lafarge, F., Alliez, P. (2015). LOD Generation for Urban Scenes. *Association for Computing ACM Transactions on Graphics Machinery*, vol. 34 n°3, 30 pages DOI : [10.1145/2732527](https://doi.org/10.1145/2732527)
- Vieira, M., & Shimada, K. (2005). Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. *Computer aided geometric design*, Vol. 22(8), pp. 771-792.
- Vo, A.V., Truong-Hong, L.; Laefer, D.F.; Bertolotto, M. (2015). Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2015, 104, 88–100. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011.
- Vögtle, T., Schwab, I., Landes, T. (2008). Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS). In: the XXIIth ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Comm. V, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVII, part B5, p.1061-1066.
- Vosselman, G., Gorte, B., Sithole, G., Rabbani, T. (2004). Recognising structure in laser scanner point clouds. *Int. Archives of the Photogramm., Remote Sensing and Spatial Information Sci.*, (36), Freiburg, Germany, pp. 33-38.
- Weinmann, M., Schmidt, A., Mallet, C., Hinz, S., Rottensteiner, F., Jutzi, B. (2015). Contextual classification of point cloud data by exploiting individual 3D neighborhoods. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, PIA'15, Munich, Germany, 2015.
- Weinmann, M. (2016). Preliminaries of 3D Point Cloud Processing. In: *Reconstruction and Analysis of 3D Scenes*. Springer, Cham. Online ISBN 978-3-319-29246-5 https://doi.org/10.1007/978-3-319-29246-5_2
- Weinmann, M. (2019). Semantic Segmentation of Dense Point Clouds, 2nd International Workshop *Point Cloud Processing*, 4-5 dec. 2019, Stuttgart (oral presentation) http://pcp2019.ifp.uni-stuttgart.de/presentations/05-2019-12-04_Presentation_PCP_Workshop_Weinmann.pdf
- Weinmann, M., Weinmann, M., Mallet, C., Brédif, M. (2017): A classification-segmentation framework for the detection of individual trees in dense MMS point cloud data acquired in urban areas. *Remote Sensing*, Vol.9, No.3, pp.1-28.
- Xu, S., Vosselman, G. and Oude Elberink, S. (2014). Multiple-entity based classification of airborne laser scanning data in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 88, pp. 1–15
- Yang, X. (2018). *3D modeling of built heritage: from geometric models to HBIM*. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.
- Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., Landes, T. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information Techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 11 pages, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>
- YellowScan@2020 : Pourquoi parle-t-on de précision et d'exactitude avec le LiDAR, quelle est la différence. <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/knowledge/wait-accuracy-vs-precision-isnt-rockets-science/>
- Z+F_5016@2020 : Documentation technique sur Z+F Imager 5016: <https://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5016.184.0.html?&L=1>
- Zhang, W., Grussenmeyer, P., Yan, G. and Mohamed, M., 2011. Primitive-based building reconstruction by integration of LiDAR data and optical imagery. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Calgary, Canada. Vol. 38(5/W12), 6 pages.

10. Liste complète des travaux publiés depuis 1999

Les travaux énumérés ci-dessous sont rangés par type de publication. Les noms soulignés sont ceux des étudiants ou doctorants que j'ai (co-)encadrés. Les références citées dans le corps de ce mémoire sont *en bleu*. Le nombre de citations mesuré par *Google Scholar* (au 31 août 2020) est précisé en rouge en (uniquement si ce nombre dépasse vingt).

[AICL] - Articles dans revues internationales avec comité de lecture

- [AICL-1] **NEUSCH, T.**, STIES, M. (1999). Application of the DUBOIS-Model Using E-SAR Data for the Determination of Soil Moisture and Surface Roughness. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing - Special Issue on Women's Activities in ISPRS*, August 1999. Cité 34 fois
- [AICL-2] **NEUSCH, T.** (2000). Multi-Frequency and Multi-Polarization Synthetic Aperture Radar Data for Modelling Hydrological Parameters, PhD thesis, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe, *Shaker Verlag*, Aachen. ISBN 3-8265-7322-6.
- [AICL-3] TROUVE E., VASILE G., GAY M., BOMBRUN L., GRUSSENMEYER P., **LANDES, T.**, NICOLAS J.M., BOLON Ph., PETILLOT I., JULEA A., VALET L., CHANUSSOT J., KOEHL M. (2007). Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers: Potentials and limits. *IEEE-Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 45, n°4, April 2007, pp.905-924. Cité 80 fois
- [AICL-4] VASILE, G., TROUVE, PETILLOT, E., BOLON, Ph., NICOLAS, J.M., GAY, M., CHANUSSOT, J., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., BUZULOIU, V., HAJNSEK, I., ANDRES, C., KELLER, M., HORN, R. (2008). High resolution SAR interferometry: estimation of local frequencies in the context of Alpine glaciers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 46, Issue 4, April 2008, pp. 1079 – 1090. Cité 33 fois
- [AICL-5] TARSHA-KURDI, F., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2008). Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data. *The Photogrammetric Journal of Finland*. Vol. 21, n°1, 2008, pp. 97-109. Cité 98 fois
- [AICL-6] REHOR, M., BAEHR, H.-P., TARSHA-KURDI, F., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2008). Contribution of two plane detection algorithms to recognition of intact and damaged buildings in lidar data. *The Photogrammetric Record*, Volume 23, Issue 124, December 2008, Pages: 441-456. Cité 36 fois
- [AICL-7] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2009). Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. In *Special issue of the Int. Journal of Architectural Computing (IJAC)*, Issue 07, Vol. 01, pp. 1-20. <http://dx.doi.org/10.1260/147807709788549411> Cité 76 fois
- [AICL-8] **LANDES, T.**, BOULAASSAL, H., GRUSSENMEYER, P. (2012) Quality assessment of geometric façade models reconstructed from TLS Data. *The Photogrammetric Record*, 27(138): 137–154 (June 2012): 10.1111/j.1477-9730.2012.00674.x, 18 pages.
- [AICL-9] MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., ALBY, E. (2014). Boundaries Extraction from Segmented Point Clouds as Input for Historical Building Information Modelling. *Int. Journal of Heritage in the Digital Era*, Multi-Science Publishing, Vol. 3(4), ISSN 2047-4970, pp. 669-682.
- [AICL-10] LACHAT, E., MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2015). Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor)- Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling, *Remote Sensing*, MDPI, Vol. 7(10); pp. 13070-13097 (IF: 3.036, SNIP: 1.498, SJR: 1.269). Cité 145 fois
- [AICL-11] MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2017) From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied Sciences* 2017, 7(10), 1030; doi:10.3390/app7101030 Cité 83 fois
- [AICL-12] LACHAT, E., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2017). Investigation of a combined surveying and scanning device: The Trimble SX10 scanning total station, *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International (MDPI) (IF : 3.031, SNIP : 1.576, SJR : 0.592), Volume 17, n° 4, 2017, doi:DOI:10.3390/s17040730

- [AI-13] HU, R., BOURNEZ, E., CHENG, S., JIANG, H., NERRY, F., LANDES, T., SAUDREAU, M., KASTENDEUCH, P., NAJJAR, G., NGAO, J., COLIN, J. (2018). Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 357–368.
- [AI-14] BOURNEZ, E., LANDES, T., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P., NGAO, J., SAUDREAU, M. (2019). Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, pp. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.016>
- [AI-15] YANG, X., GRUSSENMEYER, P., KOEHL, M., MACHER, H., MURTIYOSO, A., LANDES, T. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information Techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 11 pages, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>

[ANCL] - Articles dans revues nationales avec comité de lecture

- [ANCL-1] KOEHL, M., BOMBRUN, L., GAY, M., TROUVE, E., BOLON, Ph., NICOLAS, J.-M., VASILE, G., PETILLOT, I., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2009). Interférométrie radar satellitaire et mesures GPS à la surface du glacier d'Argentière : comparaisons et validations. *Revue traitement du signal* 2009, volume 26, numéro spécial « Télédétection pour la surveillance », 18 pages.
- [ANCL-2] BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2010). Reconstruction de façades par des primitives géométriques à partir de données laser terrestres. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*. Numéro spécial « Techniques Laser pour l'étude des environnements naturels et urbains », pp. 9-18.
- [ANCL-3] GRUSSENMEYER, P., LANDES, T. (2011). Lasergrammétrie terrestre. Chapitre dans « *Images et modèles 3D en milieux naturels* », Stéphane Jaillet ; Estelle Ployon ; Thierry Villemin (Eds.), Collection EDYTEM, n° 12, année 2011, ISSN 1762-4304, ISBN : 978-2-918435-04-4, EAN : 9782918435044, pp.11-28.

[CO] - Contribution à ouvrage édité (chapitres d'ouvrage)

- [CO-1] NEUSCH, T. (1998). Bestimmung hydrologischer Parameter. In *Digitale Bildverarbeitung*. Hrsg.: H- P Bähr und T. Vögtle, Wichmann Verlag Heidelberg, pp. 328-347. ISBN 3-87907-270-1
- [CO-2] GRUSSENMEYER, P., LANDES, T., DONEUS, M., LERMA, J.-L. (2016). Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage (Chapter 6, pp. 305-368). In: *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*, Publisher: Whittles Publishing, Editors: Efstratios STYLIANIDIS, Fabio REMONDINO, 388 pages, ISBN 978-184995-168-5

[ACLN] - Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales

- [ACLN-1] NEUSCH, T. (2000). La télédétection radar appliquée à une étude hydrologique. Revue d'information des anciens élèves de l'ENSAIS, *Revue Arts et Industries* n°248, pp.32-36. ISSN 0004-3982, janvier 2000.
- [ACLN-1] NEUSCH, T. (2001). InterGEO vers InterGIS ?, *Revue Géomètre* n°11, ISSN 00167967- nov.2001, p.54-55.
- [ACLN-2] NEUSCH, T. (2002). Le géo-carrefour international et interdisciplinaire, *Revue Géomètre* n°11, ISSN 00167967- nov.2002, p.48-49.
- [ACLN-3] NEUSCH, T. (2002). Site Internet de l'AFT nouvelle formule : <http://www.aftopo.org/>. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* ISSN 0290-9057, 4e trim. 2002 N°93, p. 64-65.
- [ACLN-4] NEUSCH, T., GUILLEMIN, S. (2002). COPTOS ou les ruines d'un passé prestigieux. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* ISSN 0290-9057, 4e trim. 2002 N°93, p. 59-62.
- [ACLN-5] NEUSCH, T. (2003). L'INSA Strasbourg lance ses Journées de la topographie. *Revue Géomètre* n°6, ISSN 00167967- juin 2003, p.28
- [ACLN-6] NEUSCH, T., BÄHR, H.P. (2004). Géomatique, la chenille ou l'imago ? Question de définition. *Revue de l'Association Française de Topographie*, XYZ n°100, ISSN 0290-9057, 3^{ème} trimestre 2004, pp.85-91.

- [ACLN-7] BOULAASSAL, H., **NEUSCH**, T. (2004). Analyse orientée-objet pour la détection de bâtiments à partir d'une image satellitaire à très haute résolution spatiale. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie*, XYZ n°101, ISSN 0290-9057, 4^{ème} trimestre 2004, pp.25-28.
- [ACLN-8] **LANDES**, T., GRUSSENMEYER, P., NAJJAR, G. (2005). Télédétection et photogrammétrie, chaînons dans la détermination du climat urbain à Strasbourg, *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), XYZ n°103, ISSN 0290-9057, 2^{ème} trimestre 2005, pp. 27-34.
- [ACLN-9] **LANDES**, T., LEDIG, J. (2007). Nouvelles technologies : quelles (r)évolutions pour la topographie ? *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), n°110, p.11-15.
- [ACLN-10] GAY, M., **LANDES**, T., TROUVE, E., NICOLAS, J.-M., HAJNSEK, I., BOMBRUN, L., VASILE, G., MOREAU, L. (2007). Suivi des glaciers tempérés à partir de données Pol-InSAR haute résolution spatiale : premières analyses d'acquisitions E-SAR couplées à des mesures in-situ sur le glacier d'Argentière. *Société Hydrotechnique de France Section de Glaciologie-Nivologie*, Grenoble France
- [ACLN-11] D'ANDLAU, G., **LANDES**, T. (2008). Le château d'Andlau renaît numériquement en trois dimensions. *Revue de la société d'histoire et d'archéologie Dambach Barr Obernai*. Gyss Imprimeur, p.7-11.
- [ACLN-12] **LANDES**, T. (2008). Le château d'Andlau passé au scanner 3D. *Revue Arts et Industries* n°261, août 2008, pp. 21-23.
- [ACLN-13] GRUSSENMEYER, P., **LANDES**, T., KOEHL, M., SMIGIEL, E., ALBY, E., DEGRAIN, M., TOUBOIS, A., (2009). Sauvegarde et mise en valeur du patrimoine : apport d'une modélisation en 3D d'un château. *Colloque Frédéric II de Hohenstaufen (1194-1250)*, Ville de Kayersberg, 19-20 novembre 2009.
- [ACLN-14] GRUSSENMEYER, P., **LANDES**, T., KOEHL, M., SMIGIEL, E., ALBY, E. (2009). Modèles 3D urbains et patrimoniaux. *Rencontres Connectus, Les Sciences de l'ingénieur : du capteur à l'exploitation des données*. Maison de la Région Alsace, 24 juin 2009.
- [ACLN-15] **LANDES**, T., VOEGTLE, T. (2009). Influence de différents matériaux sur des mesures effectuées par scanner laser terrestre. *Revue Contrôles Essais Mesures*, Numéro Spécial Colloque CMOI, pp.43-46.
- [ACLN-16] GRUSSENMEYER, P., **LANDES**, T., ALBY, E., KOEHL, M., LEDIG, J., SMIGIEL, E. (2010). La recherche en Topographie à l'INSA de Strasbourg, la 3D plus que jamais. *Revue Arts et Industries*, n°263, mars 2010, p.12- 15.
- [ACLN-17] BOULAASSAL, H., **LANDES**, T., GRUSSENMEYER, P. (2010). Reconstruction de façades par des primitives géométriques à partir de données laser terrestres, *Revue Française de photogrammétrie et de télédétection*, Société française de photogrammétrie et de télédétection, pp. 9--18, May 2010.
- [ACLN-18] **LANDES**, T., BOULAASSAL, H., GRUSSENMEYER, P. (2011). Fassadenmodellierung ausschließlich mittels Laserscanner-Daten. 16. *Internationalen Geodätischen Woche 2009*, 13 - 19 février 2011, Obergurgl, Autriche, pp. 75-80.
- [ACLN-19] **LANDES**, T., GRUSSENMEYER, P. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2). *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), n°128, p.37-49.
- [ACLN-20] **LANDES**, T., GRUSSENMEYER, P., BOULAASSAL, H. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2). *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), n°129, p.25-38.
- [ACLN-21] **LANDES**, T., GRUSSENMEYER, P. (2013). Texturierung von 3D Modellen aus Laserdaten im Bereich des Kulturerbes; 17. *Internationalen Geodätischen Woche 2013*; 17 - 23 février 2013, Obergurgl, Autriche, pp. 116-124, ISBN 978-3-87907-526-3.
- [ACLN-22] **LANDES**, T., HAYOT, C., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P., SAUDREAU, M., COLIN, J., LUHAHE, R., GUILLEMIN, S. (2014). Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), XYZ n°141, pp. 61-68, ISSN 0290-9057.
- [ACLN-23] **LANDES**, T. (2015). Un mois de novembre fort en émotions à l'INSA de Strasbourg. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie* (AFT), n°145, pp. 23-24.

- [ACLN-24] **LANDES, T.** (2016). Le 12e Forum de la topographie Topographie et BIM. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, n°147, pp. 21-23
- [ACLN-25] **LANDES, T., POLIDORI, L.** (2017). Process BIM : Etat des lieux en trois temps, *Revue Géomètre* n°2146 (avril 2017), pp. 29-34.
- [ACLN-26] **LANDES, T., NAJJAR, G., KOEHL, M., MONTAUBAN, O., GOURGUECHON, C., KASTENDEUCH, P., SLISSE, P.** (2020). Création de cartes de zones climatiques locales pour le suivi des îlots de chaleur urbains à Strasbourg. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, XYZ n°163, p.53-61.
- [ACLN-27] **POLIDORI, L., LANDES, T., VERDUN, J., KASSER, M.** (2020). Hétérogénéité des distances : quel impact sur la qualité des relevés LiDAR aériens et terrestres. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, XYZ n°163 – 2^{ème} trimestre, p. 37-43.

[INVI] - Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès international

- [INVI-1] **NEUSCH, T.** (2001). *Télédétection et applications*. Dispense de cours et de travaux pratiques de télédétection aux étudiants ingénieurs Topographes de 5^{ème} année de la Filière Topographie de l'IAV Hassan II (conférence invitée). Rabat, Maroc, 12-22 février 2001.
- [INVI-2] **NEUSCH, T.** (2002). *Télédétection et applications*. Dispense de cours et de travaux pratiques de télédétection aux étudiants ingénieurs Topographes de 5^{ème} année de la Filière Topographie de l'IAV Hassan II. Rabat, Maroc, 4-14 février 2002.
- [INVI-3] **LANDES, T.** (2006). *Présentation de la spécialité Topographie* ; Conférence invitée. DVW à Landau. Fachwissenschaftliche Tagung des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) am 16. Mai 2006 in Landau in der Pfalz. (publication dans DVW Zeitschrift)
- [INVI-4] **LANDES, T.** (2017). « *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment existant : un pas vers le BIM / Von der Punktwolke zum digitalen Bestandsmodell : ein Schritt zum BIM* », Conférence invitée à la 3DGI 2017, Olten, Suisse, 13 juin 2017. <http://www.3dgi.ch/3dgi2017/>

[INVN] - Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national

- [INVN-1] **NEUSCH, T.** (2003-2007). *La télédétection et ses applications*. Dispense de cours et de travaux pratiques à l'Ecole Spéciale des Travaux Publics. Paris, 19-20 décembre 2002. Volume : env. 10 h éq. TD (9hC+2hTP) de 2003/2004 à 2006/2007 (4 ans)
- [INVN-2] **LANDES, T.** (2006). *Lasergrammétrie et modèles tridimensionnels urbains*. Forum de l'électronique – Mesurexpo-opto - Visionshow 2006. Session Mesures 3D et réalité virtuelle. Paris Expo, Porte de Versailles.
- [INVN-3] **LANDES, T.** et GRUSSENMEYER, P. (2011). *Lasergrammétrie et photogrammétrie : deux méthodes d'acquisition de données sur les maçonneries médiévales*. Séminaire d'histoire et d'archéologie médiévale, Master archéologie. Palais universitaire, Université de Strasbourg, 2 avril 2011.
- [INVN-4] **LANDES, T.** (2016). *Numérisation du patrimoine culturel par technique photogrammétrique et lasergrammétrie* ; Conférence invitée dans le cadre de la Journée CercleGéo organisée par l'ESGT (Ecole Supérieure des Géomètres Topographes), Le Mans, 9 décembre 2016.
- [INVN-5] **LANDES, T.** (2017). Colloque « *BIM : aux confluences de la technique et du droit* », École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 2 février 2017.

[ACTI] - Communications avec actes dans un congrès international à comité de lecture

- [ACTI-1] **NEUSCH, T.**, (1996). Evolution de l'occupation des sols entre 1984 et 1991 sur le domaine Haguenau-Karlsruhe, à l'aide d'images LANDSAT-TM. In *Proceedings of the 18th ISPRS Congress*, Commission VII, 9-19 July, Vienna, Austria.
- [ACTI-2] **NEUSCH, T., STIES, M.** (1998). Experiments with Multi-Frequency and Multi-Polarization SAR Data for Hydrological Parameter Modelling. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Symposium*

- on Resource and Environmental Monitoring. ISPRS, Commission VII, Vol. 32, Part 7, pp.549-554, September 1-4, Budapest, Hungary.
- [ACTI-3] **NEUSCH, T.** AND STIES, M. (1999a). Soil Moisture and Surface Roughness Retrieval in an Agricultural Test Site using Multifrequency and Multipolarization SAR Data. In *Journal of Conference, European Union of Geosciences*, Vol.4, N°1, Cambridge Publications, March 28th-April 1st, Strasbourg, France.
- [ACTI-4] **NEUSCH, T.** AND STIES, M. (1999b). Experimenting with Radar Backscattering Models using E-SAR Imagery. In *IGARSS'99, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, June 27-July 2, Hamburg, Germany.
- [ACTI-5] **NEUSCH, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2002). Urban imagery combining photogrammetric and remote sensing techniques: a new training course at ENSAIS Strasbourg. ISPRS Comm. VI Symposium, Sao José Dos Campos, Sept. 16-20, Brazil. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISSN 1682-1750, Vol. XXXIV, part 6, pp. 53-57.
- [ACTI-6] **NEUSCH, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2003). Remote sensing object-oriented image analysis applied to half-timbered houses. In XIXth CIPA International Symposium, Antalya, Turkey, Sept. 30-Oct. 4, 2003. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISSN: 1682-1750, Vol. XXXIV, Part 5/C15, pp. 298-301.
- [ACTI-7] TROUVÉ, E., VASILE, G., GAY, M., GRUSSENMEYER, P., NICOLAS, J.M., **LANDES, T.**, KOEHL, M., CHANUSSOT, J., JULEA, A. (2005). Combining Optical and SAR Data to Monitor Temperate Glaciers, *IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS 05)*, Vol. IV, Seoul, Korea, July 2005, pp. 2637-2640
- [ACTI-8] TARSHA-KURDI, F., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., SMIGIEL, E. (2006). New approach for automatic detection of buildings in airborne laser scanner data using first echo only. ISPRS Comm. III Symposium, Photogrammetric Computer Vision, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISSN: 1682-1750, Vol. XXXVI, Part 3, pp. 25-30. Cité 40 fois
- [ACTI-9] VASILE, G., PETILLOT, I., JULEA, A., TROUVE E., BOLON, PH., BOMBRUN, L., GAY, M., **LANDES, T.** GRUSSENMEYER, P., NICOLAS, J-M. (2006). High resolution SAR interferometry: influence of topography in the context of glacier monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 06)*, Denver, Colorado, July 31 – August 04, 2006, pp. 4008-4011.
- [ACTI-10] PATIAS, P., SYLAIIOU, S., SECHIDIS, L., SPARTALIS, I., GRUSSENMEYER, P., MEYER, E., **LANDES, T.**, ALBY, E. (2006). A proposed low-cost system for 3D archaeological documentation. Project paper from the joint event CIPA / VAST / EG / EuroMed 2006. Edited by M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania, *EPOCH Publication*, ISBN-10: 963 8046 75 9, pp. 145-149.
- [ACTI-11] BOLON, Ph., TROUVE, E., PETILLOT, I., VASILE, G., GAY, M., BOMBRUN, L., NICOLAS, J.M., TUPIN, F., **LANDES, T.**, KOEHL, M., GRUSSENMEYER, P. (2007). Monitoring Alpine Glaciers with ALOS SAR and Optical data, *First Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program*, CD-ROM, Kyoto, Japan, November 2007, 4 pages.
- [ACTI-12] **LANDES, T.**, GAY, M., TROUVE, E., NICOLAS, JM, BOMBRUN, L., VASILE, G., HAJNSEK, I. (2007). Monitoring temperate glaciers by high resolution Pol-InSAR data: First analysis of Argentière E-SAR acquisitions and in-situ measurements. *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, CD-ROM, Barcelona, Spain, July 2007, 4 pages. Cité 21 fois
- [ACTI-13] BOMBRUN, L., VASILE, G., TROUVE, E., GAY M., NICOLAS J.M., **LANDES, T.** (2007), Multi-date ERS tandem interferogram analysis: application to alpine glaciers, *Fourth Int. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MULTITEMP'2007)*, CD-ROM, Leuven, Belgium, July 2007, 6 pages.
- [ACTI-14] **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., VÖGTLE, T., RINGLE, K. (2007). Combination of Terrestrial Recording Techniques for 3D Object Modelling regarding topographic constraints. Example of the Castle of Haut-Andlau, Alsace, France. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI-5/C53 ISSN 1682-1750 & CIPA Int. Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XXI-2007 ISSN 0256-1840, pp. 435-440.
- [ACTI-15] TARSHA-KURDI, F., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2007). Joint combination of point cloud and DSM for 3D building reconstruction using airborne laser scanner data. *2007 Urban Remote Sensing Joint*

- Event*, April 11-13th, Paris. ISPRS Workshop. 4th IEEE GRSS / WG III/2+5, VIII/1, VII/4 Joint Workshop on Remote Sensing & Data Fusion over Urban Areas and 6th Int. Symposium on Remote Sensing of Urban Areas; ISSN: 2334-0932; doi: 10.1109/URS.2007.371843
- [ACTI-16] BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., TARSHA-KURDI, F. (2007). Automatic segmentation of building facades using Terrestrial Laser Data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, Sept. 12-14th. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISSN 1682-1750 Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007, pp. 65-70. Cité 92 fois
- [ACTI-17] TARSHA-KURDI, F., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2007). Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3D Building Roof Planes from LiDAR Data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, Sept. 12-14th. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007, pp. 407-412. Cité 299 fois
- [ACTI-18] TARSHA-KURDI, F., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., KOEHL, M. (2007). Model-driven and data-driven approaches using LiDAR data: analysis and comparison. *ISPRS Workshop, Photogrammetric Image Analysis (PIA07)*, September 19-21, 2007, Munich, Germany. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVI Part3 W49A / ISSN 1682-1750, pp. 87-92. Cité 70 fois
- [ACTI-19] BOMBRUN, L., GAY, M., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., NICOLAS, J.M., TROUVE, E., VASILE, G. (2007). Three-dimensional surface velocities of Argentière and Mer de Glace glaciers, France, derived from radar interferometry: Analysis and comparison with in-situ measurements. *European Geosciences Union*, Austria.
- [ACTI-20] ALSHAWA, M., SMIGIEL, E., GRUSSENMEYER, P., LANDES, T. (2007). Integration of a Terrestrial LiDAR on a Mobile Mapping Platform: first experiences. *5th Int. Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'07*, 29-31 may, 2007, Padua, Italy. 6 pages
- [ACTI-21] TARSHA-KURDI, F., REHOR, M., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., BAEHR, H.P. (2007). Extension of an automatic building extraction technique to airborne laser scanner data containing damaged buildings. ISPRS Hannover Workshop, In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISSN 1682-1750 Vol.XXXVI-1/W51, 6 pages.
- [ACTI-22] LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., KOEHL, M. (2007). When glaciers break the ice between several scientific horizons. PSIP'2007. *Fifth workshop on Physics in Signal and Image Processing*, Jan. 31 – Feb. 2, 2007. University of Haute-Alsace, Mulhouse, France. 6 pages
- [ACTI-23] BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2008). Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner, In *Proceedings of the 14th Int. Conference on Virtual Systems and Multimedia: VSMM 2008*, Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage, Limassol, Cyprus, October 20th-25th, pp.8-15.
- [ACTI-24] VOEGTLE, T., SCHWAB, I., LANDES, T. (2008). Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS). In: the XXith ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comm. V, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVII, part B5, p.1061-1066. Cité 106 fois
- [ACTI-25] GRUSSENMEYER, P., LANDES, T., VOEGTLE, T., RINGLE, K., (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comm. V, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVII, part B5, pp. 213-218. Cité 164 fois
- [ACTI-26] KUCEROVA, E., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., NAJJAR, G. (2009). From multi-echo to full waveform LiDAR systems in urban areas. JUNIORSTAV 2009. *11th professional Conference of Postgraduate Students. Practical Aspects of Geodesy and Cartography*, CD-ROM, 9 pages.
- [ACTI-27] ALSHAWA, M., BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2009). Acquisition and automatic extraction of facade elements on large sites acquired by low cost mobile mapping systems. 3rd Int. Workshop 3D ARCH 2009. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comm. V, ISSN 1682-1777, Volume XXXVIII-5/W1, (CDROM).

- [ACTI-28] KOEHL, M., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.** (2009). Dokumentation und Denkmalpflege. Von der Kombination von Messungstechniken zum interaktiven 3D-Modell. 15. *Internationalen Geodätischen Woche* 2009, 8. - 14. Februar 2009, Obergurgl, Österreich, pp. 48-57, ISBN 978-3-87907-485-3.
- [ACTI-29] GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, ALBY, E., CAROZZA, L. (2010). High Resolution 3D Recording and Modeling of the Bronze Age Cave "Les Fraux" in Périgord (France). In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010, ISSN 1682-1777, pp. 262-267. Cité 32 fois
- [ACTI-30] BOULAASSAL, H., CHEVRIER, C., **LANDES, T.**, (2010). From laser data to parametric models: towards an automatic method for building façade modelling. EuroMed 2010, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 6436 pp. 42-55. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16873-4_4 Cité 29 fois
- [ACTI-31] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2011). 3D Modelling of facade features on large sites acquired by vehicle based laser scanning, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing* published by Association of Polish Surveyors, Vol. 22, 2011, ISSN 2083-2214, pp. 75-89. <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit/>
- [ACTI-32] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2011) Reconstruction of 3D Vector Models of Buildings by Combination of ALS, TLS and VLS Data. 4th 3D-ARCH Int. Conference on "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", ISPRS Workshop, WG V/4; Vol. XXXVIII-5/W16, Trento (Italy), 2-4 March 2011, In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5/W16, ISSN 1682-1777, 6 pages (on CD-ROM).
- [ACTI-33] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2011) Segmentation and Reconstruction of facade elements on large sites using laser mobile mapping data. *Symposium on Mobile Mapping Technology* (MMT), Cracow, Poland, June 2011, 6 pages.
- [ACTI-34] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2011) 3D modeling of façade features on large sites acquired by vehicle based laser scanning. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing (APCRS)*, Vol. 22, pp. 75-89, ISSN 2083-2214
- [ACTI-35] **LANDES, T.**, SCHWIEN J.-J., BERGER S., PETER N., ALBY, E., GRUSSENMEYER, P. (2011). Finding a suitable model for archaeologists. Application to the documentation of the compound wall of Ribeauvillé (Alsace). Proceedings of the XXIII CIPA Symposium - Prague, Czech Republic - 12/16 September 2011. In: *Int. Archives for Documentation of Cultural Heritage*, Vol. XXIII-2011, 7 pages, (on CD-ROM).
- [ACTI-36] HULLO, J.-F., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, THIBAUT, G. (2011). Georeferencing of TLS Data for Industrial Complex Scenes: Beyond Current Solutions. In *ISPRS Laser Scanning Workshop*, volume XXXVIII, Calgary. p. 1-6, ISBN: 2194-9034 **Best Poster Presentation Award**
- [ACTI-37] HULLO, J.-F., THIBAUT, G., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, BENNEQUIN, D. (2012). Probabilistic Feature Matching Applied to Primitive Based Registration of TLS Data, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3, pp. 221-226, ISBN: 2194-9042.
- [ACTI-38] **LANDES, T.**, BOULAASSAL, H., GRUSSENMEYER, P., MOHAMED, M. (2012). Assessment of three-dimensional models derived from LiDAR and TLS data. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B2, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- [ACTI-39] GRUSSENMEYER, P., ALBY, E., **LANDES, T.**, KOEHL, M., GUILLEMIN, S., HULLO, J.-F., ASSALI, P., SMIGIEL, E. (2012). Recording Approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and terrestrial laser scanning. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B2, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia. Cité 40 fois
- [ACTI-40] MITTET, M.-A., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, YANG, Y., BERNARD, N. (2013). Mobile outdoor relative localization using calibrated RGB-D Cameras, 8th Int. Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'13, May 1st-3rd, 2013, Tainan, Taiwan, 6 pages.

- [ACTI-41] **LANDES, T.**, WATON, M.D., ALBY E., GOURVEZ S., LOPES B. (2013). 3D modeling of headstones of the 2nd and 3rd century by low cost photogrammetric techniques. 24e Symposium du CIPA, Strasbourg, 2-6 September 2013. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, 397-402, 2013.
- [ACTI-42] MOHAMED, M., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., ZHANG, W. (2013). Multi-dimensional quality assessment of photogrammetric and LiDAR datasets based on a vector approach, In: 8th Int.Symposium on Spatial Data Quality, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, B. Wu, E. Guilbert, and J. Shi (Eds.), Hong-Kong, China, Vol. XL-2/W1, pp. 93-98. doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-93-2013
- [ACTI-43] **LANDES, T.**, BIDINO, S., GUILD, R. (2014). Semi-automatic extraction of sectional view from point clouds. The case of Ottmarsheim's abbey church, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, 2014, pp. 343-348. doi:10.5194/isprsannals-II-5-89-2014.
- [ACTI-44] MITTET, M-A., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2014) Localization using RGB-D cameras orthoimages. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5, ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy, pp. 425-432. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-5-425-2014.
- [ACTI-45] MACHER H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., ALBY E. (2014). Semi-automatic segmentation and modelling from point clouds towards historical building information modelling, In: EuroMed 2014, Digital Heritage: Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8740, pp. 115-120. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_11; **Best paper Award.**
- [ACTI-46] LACHAT, E., MACHER, H., MITTET, M.-A., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2015). First experiences with Kinect V2 sensor for Close Range 3D Modelling, Proceedings of the 6th 3D-ARCH Int. Conference on "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Avila (Spain), 25-27 February 2015, *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, pp. 93-100. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-93-2015. **Best Young Author Paper Award. Cité 192 fois**
- [ACTI-47] LACHAT, E., MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2015). Assessment of the accuracy of 3D models obtained with DSLR (Digital Single-Lens Reflex) camera and Kinect v2, *Proc. SPIE* 9528, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII, Munich, Volume: 9528, 14 pages. doi:10.1117/12.2184866.
- [ACTI-48] NAJJAR, G., COLIN, J., KASTENDEUCH, P., NGAO, J., SAUDREAU, M., **LANDES, T.**, AMÉGLIO, T., LUHAHE, R., GUILLEMIN, S., SCHREIDER, G., KLEINPETER, K., NERRY, F. (2015). A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg. In *9th Int. Conference on Urban Climate & 12th Symposium on the Urban Environment (ICUC9)*, Toulouse, France, 6 pages. <http://prodinra.inra.fr/record/309894>
- [ACTI-49] **LANDES, T.**, SAUDREAU, M., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P., GUILLEMIN, S., COLIN, J., LUHAHE, R. (2015). 3D tree architecture modeling from laser scanning for urban microclimate study, In *9th Int. Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment (ICUC9)*, Toulouse, France, juillet 2015, 6 pages. doi: 10.3390/f5051069
- [ACTI-50] MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2015). Point clouds segmentation as base for as-built BIM creation, 25th CIPA Int. Symposium, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, CIPA (Eds.), Taipei, Taiwan, août 2015, Vol. II-5/W3, pp. 191-197. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W3-191-2015. **Cité 24 fois**
- [ACTI-51] **LANDES, T.**, KUHNLE, G., BRUNA, R. (2015). 3D modeling of the Strasbourg's Cathedral basements for interdisciplinary research and virtual visits, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Taipei, Taiwan, août 2015, Vol. XL-5/W7, pp. 263-270. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-263-2015

- [ACTI-52] [MACHER, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. \(2016\).](#) Validation of point clouds segmentation algorithms through their application to several case studies for indoor building modeling, In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B5, pp. 667-674. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-667-2016.
- [ACTI-53] [LACHAT, E., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. \(2016\).](#) Combination of TLS point clouds and 3D data from Kinect V2 sensor to complete indoor models, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B5, pp. 659-666. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-659-2016.
- [ACTI-54] [BOURNEZ, E., LANDES, T., SAUDREAU, M., KASTENDEUCH, P., NAJJAR, G. \(2016\).](#) Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Vol. XLI-B8, pp. 257-264. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B8-257-2016.
- [ACTI-55] [BOURNEZ, E., LANDES, T., NAJJAR, G., NGAO, J., SAUDREAU, M., KASTENDEUCH, P. \(2016\).](#) From LiDAR acquisition to FSPM application to 3D urban tree transpiration modeling. *2016 IEEE Int. Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)* (2016-11-07-2016-11-11) Qingdao (CHN). 1 page
- [ACTI-56] ROUPIOZ, L., KASTENDEUCH, P., NAJJAR, G., **LANDES, T.**, NERRY, F. J. COLIN, R. LUHAHE (2016). Validation du Modèle LASER/F par des Images Thermiques dans le Cadre de la Campagne Bio-Climatologique sur Strasbourg, *29^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, Besançon, juillet 2016, 6 pages.
- [ACTI-57] [BOURNEZ, E., LANDES, T., SAUDREAU, M., KASTENDEUCH, P., NAJJAR, G. \(2017\).](#) From TLS point clouds to 3D models of trees: a comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W3, 113-120, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-113-2017>
- [ACTI-58] [LACHAT, E., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. \(2017\).](#) First experiences with the Trimble SX10 scanning total station for building façade survey, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W3, 405-412, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-405-2017>
- [ACTI-59] [LACHAT, E., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. \(2017\).](#) Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small artefact 3D modeling, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W5, 427-434, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-427-2017>
- [ACTI-60] [MACHER, H., GRUSSENMEYER, P., LANDES, T., HALIN, G., CHEVRIER, C., HUYGHE, O. \(2017\).](#) Photogrammetric recording and reconstruction of town scale models – The case of the plan-relief of Strasbourg, *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W5, 489 -495, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-489-2017>, 2017
- [ACTI-61] [BOURNEZ, E., KASTENDEUCH, P., LANDES, T., NAJJAR, G., SAUDREAU, M., COLIN, J., & NGAO, J. \(2018\).](#) Simulation du rôle de la végétation d'un parc urbain à partir du modèle microclimatique LASER/F : cas d'un parc urbain à Strasbourg. In *Association Int. de Climatologie (AIC)*, July 4th-7th, Nice, France, 7 p.
- [ACTI-62] [LACHAT, E., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. \(2018\).](#) Comparison of point cloud registration algorithms for better result assessment - Towards an open-source solution. *ISPRS Technical Commission II "Photogrammetry"*, 3-7 juin 2018, Riva del Garda, pp. 551-558. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-551-2018
- [ACTI-63] [ASSI, R., LANDES, T., MACHER, H., GRUSSENMEYER, P. \(2019\).](#) Energy function algorithm for detection of openings in indoor point clouds. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 747-752, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-747-2019>, 2019
- [ACTI-64] [ASSI, R., LANDES, T., MURTIYOSO, A., GRUSSENMEYER, P. \(2019\).](#) Assessment of a keypoints detector for the registration of indoor and outdoor heritage point clouds, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 133-138, 2019 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-133-2019>

- [ACTI-65] MACHER, H., BOUDHAÏM, M., GRUSSENMEYER, P., SIROUX, M., **LANDES, T.** (2019). Combination of thermal and geometric information for BIM enrichment, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 719–725, 2019 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-719-2019>
- [ACTI-66] **LANDES, T.**, HEISSLER, M., KOEHL, M., BENAZZI, T., NIVOLA, T. (2019). Uncertainty visualization approaches for 3d models of castles restituted from archeological knowledge. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 409–416, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-409-2019>, 2019.
- [ACTI-67] MATRONE, F., LINGUA, A., PIERDICCA, R., MALINVERNI, E-S, PAOLANTI, M., GRILLI, E., REMONDINO, F., **LANDES, T.**, MURTIYOSO, A. (2020). A benchmark for large-scale heritage point cloud classification, In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event - <http://archdataset.polito.it/>
- [ACTI-68] MACHER, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2020). Automation of thermal point clouds analysis for the extraction of windows and thermal bridges of building facades In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event.
- [ACTI-69] DEL POZO, S., **LANDES, T.**, NERRY, F., KASTENDEUCH, P., NAJJAR, G., PHILIPPS, N., LAGÜELA, S. (2020). UHI estimation based on ASTER and MODIS satellite imagery: first results on Strasbourg city, France. In: *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS 2020, Virtual Event.
- [ACTI-70] SALGUES, H., MACHER, H., **LANDES, T.** (2020). Evaluation of mobile mapping systems for indoor surveys. *3DGeoInfo*, Virtual Event, September 2020.

[ACTN] - Communications avec actes dans un congrès national

- [ACTN-1] **NEUSCH, T.**, GRUSSENMEYER P., NAJJAR, G. (2003) Télédétection et photogrammétrie au service de la climatologie urbaine à Strasbourg : Le projet RECIUS 3. Colloque « Pixels et Cités », *Actes du colloque Télédétection et photogrammétrie pour le développement en milieu urbain*. Marne-la-Vallée (France), 26 - 28 novembre 2003.
- [ACTN-2] KOEHL, M., TROUVE, E., VASILE, G., GAY, M., GRUSSENMEYER, P., NICOLAS, J.-M., **LANDES, T.** (2006). SIG pour la gestion cartographique des données du projet MEGATOR. *Conférences SIG2006*, 11&12 Octobre 2006, Issy-les-Moulineaux, France, 10 pages. http://www.esrfrance.fr/sig2006/insa1_megator.html
- [ACTN-3] TARSHA-KURDI, F., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2007). Extraction automatique et modélisation tridimensionnelle de bâtiments à partir de données LIDAR. *Atelier du Programme National de Télédétection Spatiale sur la Très Haute Résolution Spatiale en Télédétection Urbaine*, 25-26 sept. 2007, Ecole Centrale de Nantes (poster).
- [ACTN-4] **LANDES, T.**, VOEGTLE, T. (2008). Influence de différents matériaux sur des mesures effectuées par scanner laser terrestre. SFO/CMOI - 9^{ème} Colloque international francophone, *Méthodes et Techniques optiques pour l'industrie*, 17 – 21 Novembre 2008, Nantes, France.
- [ACTN-5] BOULAASSAL, H., **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P. (2009). Reconstruction de façades par des primitives géométriques à partir de données laser terrestres. *Colloque techniques laser pour l'étude des environnements naturels et urbains*. ESGT Le Mans, 20-21 janvier 2009.
- [ACTN-6] **LANDES, T.** (2014). « Acquisition et modélisation 3D – Applications de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie », *Journée technique CEREMA*, 17 juin 2014. Document de 66 pages.
- [ACTN-7] **LANDES, T.** (2016). « La modélisation de la 3D : les enjeux de l'automatisation », intervention dans le cadre du 43^{ème} Congrès national de l'Ordre des Géomètres Experts, Nancy, 21-23 juin 2016. *Actes du CONGRES*, p. 26-28 : http://www.geometre-expert.fr/upload/docs/application/pdf/2016-07/actescongresnancy2016_web.pdf

[COM] - Communications sans actes dans un congrès international ou national

- [COM-1] **NEUSCH, T.** (2002) Applications et potentiels de la télédétection à l'étude du paysage et du milieu urbain. *Séminaire interne de l'UMR MAP CNRS/MCC 694*. Sousse (Tunisie), 19-21 avril 2002, 6 pages
- [COM-2] TROUVE, E., GAY, M., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, NICOLAS, J.-M., et l'ensemble des participants au projet MEGATOR. (2006). MEGATOR - ACI Masse de Données 2004. De ERS à E-SAR: développement d'une méthodologie de traitement des images haute résolution appliquée à l'observation des glaciers tempérés. *Journées PaRI-STIC*, (Panorama des Recherches Incitatives en STIC), Nancy, 23 Novembre 2006
- [COM-3] TROUVE, E., NICOLAS, J.-M., GAY, M., **LANDES, T.**, VASILE, G., HAJNSEK, I., (2006) MEGATOR 2004-2007 (ACI Masse de Données). Mesures de l'Evolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar. *Journées PaRI-STIC*, (Panorama des Recherches Incitatives en STIC), Nancy, 23 Novembre 2006 (poster).
- [COM-4] KOEHL, M., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, FERHAT G., LEDIG J. (2008). Ingénieur en Topographie, une formation en phase avec des technologies et des besoins toujours plus exigeants. *39^{ème} Congrès National des Géomètres-Experts*, 17 – 19 Septembre 2008, Strasbourg, France, 15 pages.
- [COM-5] **LANDES, T.** (2008). Le château d'Andlau passé au scanner 3D. *Présentation orale des résultats de fin de projet à l'Association des Amis du château d'Andlau*. INSA de Strasbourg, 16 mai 2008.
- [COM-6] GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.**, KOEHL, M., SMIGIEL, E., ALBY, E., (2009). Nouvelles technologies et numérisation 3D du patrimoine. *Symposium « Gestion et mise en public des collections universitaires »*, Strasbourg, 26-27 février 2009.
- [COM-7] **LANDES, T.** (2013). Interventions dans le cadre des Journées de l'archéologie, *Exposition « Cent mille ans et quelques minutes ; La topographie au service du patrimoine »*, du 7 au 11 juin 2013 à l'Insa de Strasbourg.
- [COM-8] **LANDES, T.**, GRUSSENMEYER, P., (2015). « *Notions de base en imagerie pour la topographie* ». Universités d'été de l'Ordre des Géomètres-Experts, Le Mans, 25 juin 2015.
- [COM-9] NAJJAR, G., COLIN, J., KASTENDEUCH, P.P., NGAO J., SAUDREAU M., **LANDES, T.**, AMEGLIO T., BOURNEZ E., LUHAHE R., NERRY F., KLEINPETER J., ROUPIOZ L., BRUCKMANN F., OBRECHT P., GUILLEMIN, S. (2016). Campagne de mesures pour l'étude du rôle du végétal, en particulier les arbres, dans la création de microclimats en milieu urbain. In *Atelier Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains* (TEMU2017), Toulouse, France, 5 pages.
- [COM-10] BOURNEZ, E., **LANDES, T.**, SAUDREAU, M., KASTENDEUCH, M.P. AND NAJJAR, G. (2017). Reconstruction 3D d'arbre à partir de données acquises au scanner laser terrestre pour la simulation de l'évapotranspiration d'un arbre, In *Atelier Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains* (TEMU2017), Toulouse, France.
- [COM-11] KASTENDEUCH, P., GEORGES, N., BOURNEZ, E., **LANDES, T.**, COLIN, J., NERRY, F., NGAO, J., AMÉGLIO, T., & SAUDREAU, M. (2018). Characterizing and modeling the cooling effect of trees on the urban microclimate. In *the 2nd annual UrbanMycoServe meeting*. January 1st, 2018, Porto, Portugal (Présenté par Marc Saudreau)
- [COM-12] BOURNEZ, E., **LANDES, T.**, KASTENDEUCH, P., GEORGES, N. & SAUDREAU, M. (2018). Reconstruction 3D d'un environnement urbain à partir de données photogrammétriques et lasergrammétriques acquises par voies aériennes pour la simulation du microclimat d'un parc urbain. Dans : *2^{ème} Atelier de Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains*. Strasbourg, France.
- [COM-13] BOURNEZ, E., KASTENDEUCH, P., **LANDES, T.**, GEORGES, N., SAUDREAU, M., COLIN, J., NGAO, J., (2018). Simulation of urban vegetation impact based on the microclimate model LASER/F: the case study of a park in Strasbourg. In *10th Int. Conference on Urban Climate/ 14th Symposium on the Urban Environment*. New-York, Etats-Unis.

[SGP] - Séminaires grand public et autres

- [SGP-1] Passage télévisé en mars 2011, sur France 3, dans l'émission "*Des Racines et des Ailes : Châteaux d'Alsace, Trésors basques*". Tournage : 26 mai 2010. Diffusion le 9 mars 2011 ; rediffusions le 8 août 2012, été 2015, etc.
- [SGP-2] Passage télévisé sur France 2, au journal télévisé de 13h du mercredi 8 octobre 2014 (à 30 minutes et 30 secondes). – Thème : *Cathédrale de Strasbourg* ; http://www.francetvinfo.fr/replay-jt/france-2/13-heures/jt-de-13h-du-mercredi-8-octobre-2014_708113.html
- [SGP-3] KUHNLE, G., **LANDES, T.**, BENGEL, S., POTIER, S. (2015) La cathédrale de Werner dans son contexte archéologique : réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent. *Colloque « Millénaire de la Cathédrale »*, le 20 mars 2015, dans le cadre du Colloque International organisé par la société des Amis de la Cathédrale, pour le Millénaire de la cathédrale de Strasbourg. Titre : "L'évêché de Strasbourg à l'époque ottonienne ; L'évêque Werner et la fondation de la cathédrale romane".
- [SGP-4] KUHNLE, G., **LANDES, T.**, BENGEL, S., POTIER, S. (2015). Présentation des travaux INRAP/INSA/OND/Inventive Studio sur les fondations de la cathédrale, suite aux recherches effectuées dans le sous-sol de la Chapelle Saint-Laurent, *Cycle de conférences de l'OND*, organisé pendant l'année des festivités du millénaire des fondations ; 8 septembre 2015 au Münsterhof.

[RA] - Rapports d'activités et autres communications

- [RA-1] SCHWIEN, J.-J., **LANDES, T.**, SEILLER, M., WERLÉ, M. (2011). Ribeauvillé (Haut-Rhin)– Systèmes défensifs et urbanisation (XIII^{ème}-XVII^{ème} siècles). *Rapport de Prospection thématique 2010*. Ministère de la Culture et de la Communication – Région Alsace ; Université de Strasbourg – UMR 7044. 160 pages.
- [RA-2] BOULAASSAL, H., GRUSSENMEYER, P., **LANDES, T.** (2012). Etat d'avancement du projet de thermographie mobile 3D. *Rapport post-doctoral*, INSA de Strasbourg, Groupe PAGE, 36 pages.
- [RA-3] Rapport d'activités TOSCA (2015). Financement CNES sur le Projet AvENue (L'Arbre en ENvironnement Urbain), mené par l'équipe TRIO du laboratoire ICube et l'UMR PIAF de l'INRA Clermont Ferrand, 39 pages. Participation à l'écriture du rapport.

[OV] - Ouvrages de vulgarisation

- [OV-1] KUHNLE G., avec la collaboration de BENGEL S., GASTON C., KELLER M., **LANDES T.**, POTIER S., RISTOW S. (2015). Réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent : un panorama exceptionnel du camp romain à l'actuelle cathédrale. In : *MISTLER A. (éd.), Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg 100 ans de travaux, Strasbourg : I.D. L'Édition, 2015, p. 34-43.*
- [OV-2] Participation à la rédaction d'un dépliant sur le "Réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent" dans le cadre de la fête du Patrimoine en septembre 2015.
- [OV-3] HEINRICH, P., KELLER, M., KUHNLE, G., **LANDES, T.** (2017). Un moule de balsamaire zoomorphe trouvé à Sarre-Union (Bas-Rhin). Dans : *Cahiers alsaciens d'archéologie, d'art et d'histoire ; Tome LX*. Société pour la conservation des monuments historiques d'Alsace. ISBN 85773, p. 55-70.

PARTIE II :

Curriculum Vitae

et

Synthèse des activités de maître de conférences

1. Curriculum vitae

Tania LANDES, née NEUSCH

Date de naissance : 24/02/1972 (48 ans)

Grade : Maître de conférences hors classe, titularisée le 1er septembre 2002

NUMEN : 15S0112665FWM

Établissement d'affectation : Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg ; Département Génie Civil et Topographie ; Spécialité Topographie

Section de CNU : 60^{ème} section : mécanique, génie mécanique, génie civil

Unité de recherche d'appartenance : Laboratoire ICube, UMR 7357 (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie), Equipe TRIO (Télédétection, Radiométrie et Imagerie Optique), groupe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et Géomatique) de l'INSA de Strasbourg.

Le groupe PAGE de l'INSA de Strasbourg a été créé en 1996. Rattaché initialement, de 2002 à 2009, à l'UMR multi-sites CNRS MAP 694 (Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage), le groupe a rejoint le 1er janvier 2010 l'équipe TRIO de l'UMR CNRS 7005 LSIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection) de Strasbourg. Ce laboratoire a été intégré ensuite au Laboratoire ICube (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie) UMR 7357, le 1er janvier 2013. En août 2020, notre groupe TRIO à l'INSA est composé de 5 enseignants-chercheurs (1PR, 4 MCF), 1 ingénieur d'études, 2 doctorants INSA, 1 doctorant invité (Italie) et 5 stagiaires (M2).

Formation et parcours professionnel

Depuis septembre 2001 :

- **Maître de Conférences** à l'INSA Strasbourg (Institut National des Sciences Appliquées) en spécialité Topographie, titularisée en 2002.
- **Membre du Groupe PAGE** (Photogrammétrie Architecturale et Géomatique), rattaché à l'équipe TRIO du laboratoire ICube, UMR 7357 (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie).

De 1999 à 2001 :

Chef de travaux pratiques de l'ENSAM à l'ENSAIS (384 h éq TD en topométrie, compensation, cartographie, télédétection, DAO).

De 1996 à 1999 :

Chargée d'enseignement vacataire à l'ENSAIS (14h éq. TD en télédétection)

Avril 1996 à août 1999 ; soutenance en janvier 2000 :

Thèse de doctorat de l'Université Technique de Karlsruhe (KIT). Titre : *Multi-Frequency and Multi-Polarization Synthetic Aperture Radar Data for Hydrological Parameter Modelling*. Réalisée au sein de l'institut de photogrammétrie et de télédétection (*Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung*, IPF). Mention : Très honorable avec félicitations du jury.

De 1995 à 1996 :

Salariée dans le cabinet de Géomètre-Expert GRAFF à Strasbourg.

Octobre 1995 :

- Diplôme **d'études approfondies** intitulé « Systèmes spatiaux et aménagements régionaux » à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Mention : Très bien.
- Diplôme **d'ingénieur Topographe** de l'ENSAIS (ENSAIS devenu INSA en 2003)

2. Activités d'ENSEIGNEMENT

Les principaux enseignements que je dispense s'adressent aux étudiants de la **Spécialité Topographie de l'INSA de Strasbourg** et concernent les thématiques liées :

- aux techniques d'acquisitions, allant des techniques conventionnelles aux techniques plus récentes de mesures 3D par balayage laser ou d'acquisition d'images par satellite
- aux calculs topométriques classiques
- aux calculs d'erreurs et de compensation
- aux reports de plans 2D et à la réalisation de modèles 3D à l'aide de logiciels de calculs topométriques, de dessin assisté par ordinateur, de traitement de nuages de points et de traitements d'images.

Certains de ces enseignements sont également à destination des étudiants de **master II « IRIV »** (Imagerie, Robotique et Ingénierie pour le Vivant), parcours Topographie et Photogrammétrie, monté en collaboration avec l'Université de Strasbourg. J'ai en outre eu l'opportunité de dispenser des cours dans **d'autres établissements**, tels que l'IAV Hassan II au Maroc (2000-2002), l'ESTP à Paris (2003 – 2007), à l'Université Nancy 2 (2005-2007) et à l'université de Strasbourg (2005-20013), comme détaillé en annexe A.13 (p. 134).

2.1 Créations de nouveaux modules d'enseignements

J'ai créé **5 nouveaux modules d'enseignement**, dont quatre modules destinés aux étudiants de la spécialité topographie (Télédétection 1, 2 3 et BIM) et un module destiné à plusieurs spécialités d'ingénieurs du bâtiment (initiation au BIM).

a) Création et responsabilité de trois modules d'enseignement de télédétection (34hC+34hTP) :

A partir de 1999, j'ai introduit, dans les grilles de la spécialité topographie, les notions de bases de la télédétection (**Télédétection 1**, 14hC, 14hTP) en 4^{ème} année ingénieur et un module dédié au LiDAR aéroporté et au radar ainsi qu'à la classification d'images multispectrales (**Télédétection 3**, 14hC, 14hTP) en 5^{ème} année. Le cours de **Télédétection 2** (6hC, 6hP) a été ajouté plus récemment en 2010/2011 au parcours des élèves ingénieurs topographes, dans l'objectif de leur fournir des notions essentielles en **lasergrammétrie** et autres nouveaux systèmes d'acquisition 3D.

b) Création et responsabilité d'un module électif « Initiation au processus BIM 1 » destiné à toutes les spécialités d'ingénieurs et architectes (24h TD)

En 2016, avec la place grandissante que prend le BIM (*Building Information Modeling*) dans les métiers de la construction, la multiplication des conférences et fora traitant de ce sujet ([INVI-4], [INVN-5]) et suite à la thèse que j'ai co-encadrée sur ce thème (Macher, 2017), j'ai mis en

place un **enseignement électif à l'INSA** de Strasbourg avec le soutien de 3 autres spécialités d'ingénieurs du bâtiment (génie climatique, génie électrique, génie civil) et des architectes. Effectif : 2x24 étudiants sur 24h d'enseignement.

- c) Ajout d'un module « BIM » à la grille des 4^{èmes} années ingénieurs topographes en 2019/2020 ; module pris en charge par Hélène Macher.

2.2 Charge d'enseignement au fil des années

Plusieurs facteurs sont à l'origine de l'évolution de ma charge d'enseignement de ces dernières années. D'une part, pour pouvoir me consacrer davantage à l'encadrement de mes doctorants et étudiants, à la création de nouveaux enseignements et parcours, à mes tâches administratives, ainsi que pour assurer mon rôle de coordinatrice de la spécialité, j'ai décidé de déléguer des modules à des chargés de cours ou à mes collègues. D'autre part, plusieurs réformes pédagogiques (et budgétaires), notamment la réforme de 2013, ont engendré une diminution globale du nombre d'heures de face à face associées à chaque enseignement. Le tableau ci-dessous présente les charges d'enseignement effectuées ces dix dernières années.

Année scolaire	Heures équivalent TD	Année scolaire	Heures équivalent TD
2009/2010	382	2015/2016	171
2010/2011	334	2016/2017	204
2011/2012	328	2017/2018	290
2012/2013	302	2018/2019	288
2013/2014	256	2019/2020	288
2014/2015	248	Moyenne : 281 heures éq. TD	

A titre d'exemple, le tableau en annexe A.12 (p. 133) recense les enseignements dispensés en 2019/2020.

A ces heures dispensées à l'INSA Strasbourg s'ajoutent des enseignements (env. 14 heures/an) effectués dans d'autres établissements entre 2000 et 2013 (annexe A.13, p. 134), ainsi que quelques heures de formation continue dispensées ponctuellement à des ingénieurs, techniciens ou géomètres experts entre 2011 et 2015 (voir annexe A.14, p. 134).

2.3 Activités et responsabilités liées à l'enseignement

- **Responsable du cursus à double diplôme franco-allemand INSA/KIT** soutenu par l'Université Franco-Allemande UFA et liant le « Karlsruher Institut für Technologie » (KIT) et l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA) depuis 2006. Ce programme d'études intégrées commun donne la possibilité aux étudiants (1 à 2 par an), d'obtenir le diplôme d'ingénieur de chacun des deux établissements partenaires au bout de 6 semestres d'études et d'un stage de Master 2.

- **Responsable de la Spécialité Topographie** de l'INSA de Strasbourg depuis septembre 2015. Gestion de la formation de 4 classes d'étudiants géomètres topographes, de 3 groupes d'architectes ingénieurs, quelques étudiants du Master IRIV et étrangers :
 - 2^{ème} année de formation ingénieur, niveau Bac + 2 (18 étudiants)
 - 3^{ème} année de formation ingénieur, niveau Bachelor (36 étudiants)
 - 4^{ème} année de formation ingénieur, niveau Master 1 (36 étudiants)
 - 5^{ème} année de formation ingénieur, à Bac + 5, Master 2 (36 étudiants)
 - Architectes-ingénieurs topographes en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année (18 étudiants)
 - Etudiants du master IRIV et étudiants étrangers en semestre d'études
 Total : env. 145 étudiants

Missions associées : suivi des étudiants, participation au montage et aux modifications des grilles de formation, au montage des emplois du temps, à la recherche de vacataires, au recrutement des étudiants, aux Comités de direction élargis, aux pré-jurys et jurys de classe, gestion des supports de communication (site web, blog, page LinkedIn, flyers), animation des conseils de spécialité, participation à l'application des réformes pédagogiques, à l'établissement du profil de compétences, aux relations étudiants-entreprises, en collaboration avec l'équipe pédagogique.

- Participation à la **création du parcours Architecte-Ingénieur topographe (AI-Topo)** de l'INSA de Strasbourg ouvert en septembre 2017 en collaboration avec le département Architecture. Intégration de modules de topographie à la maquette existante du double cursus architecte-ingénieur (env. 60 étudiants). Obtention d'un Bachelor en architecture et ingénierie au bout de 3 ans et les diplômes d'architecte et d'ingénieur dans une spécialité d'ingénieur (GC, G ou GCE) au bout de 7 ans. Responsable pédagogique : T. Landes
- Participation au montage d'un **parcours Topographie et Photogrammétrie au sein du Master 2 « IRIV »** (Imagerie, Robotique et Ingénierie pour le Vivant) en collaboration avec l'Université de Strasbourg, mis en place en septembre 2018. Il accueille 5 à 6 étudiants ingénieurs topographes de 5^{ème} année et jusque 4 étudiants issus du Master 1 IRIV. Le master IRIV est porté par Télécom Physique Strasbourg (Télécom-PS) de l'Université de Strasbourg (UdS). Responsable pédagogique : P. Grussenmeyer
- **Responsable de l'évènement annuel « Journées de la Topographie »** de 2003 à 2019. Evènement sur 3 jours, autour des soutenances de Master 2 de l'année en cours, de conférences et d'une exposition de matériels et solutions logicielles comptant entre 15 et 30 entreprises. Manifestation tenue à l'INSA de Strasbourg et adressée aux professionnels et étudiants du domaine de la topographie au sens général, avec la participation du Conseil Supérieur de l'Ordre des Géomètres Experts (OGE) et des écoles d'ingénieurs ESGT, ESTP, ENSG, ESITC (env. 200 participants sur les 3 jours).

3. Activités de RECHERCHE

Les activités de recherche ont été développées dans la première partie de ce mémoire, à laquelle je renvoie le lecteur souhaitant davantage d'informations. Cette section se concentre sur le nombre de publications, les encadrements réalisés, la diffusion des travaux et enfin, les responsabilités scientifiques.

3.1 Publications et production scientifique

Synthèse des publications : un total **156 publications dont 53** sur ces 5 dernières années (voir liste complète p. 86).

Type de publication	Nombre total	de 2015 à 2020
[AICL] Articles dans des revues internationales avec Comité de Lecture	15	6
[ANCL] Articles dans des revues nationales avec Comité de Lecture	3	0
[CO] Contribution à ouvrage édité (chapitres d'ouvrage)	2	1
[ACLN] Articles dans des revues avec comité de lecture, non répertoriées dans des bases de données internationales	27	5
[INVI] Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès international	4	1
[INVN] Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national	5	2
[ACTI] Communications avec actes dans un congrès international à comité de lecture	70	25
[ACTN] Communications avec actes dans un congrès national	7	1
[COM] Communications sans actes dans un congrès international ou national.	13	6
[SGP] Séminaires grand public et autres	4	2
[RA] Rapports d'activités et autres communications	3	1
[OV] Ouvrages de vulgarisation	3	3
TOTAL	156	53

Nombre de **citations par an** d'après Google Scholar : voir Figure 51 ci-après.

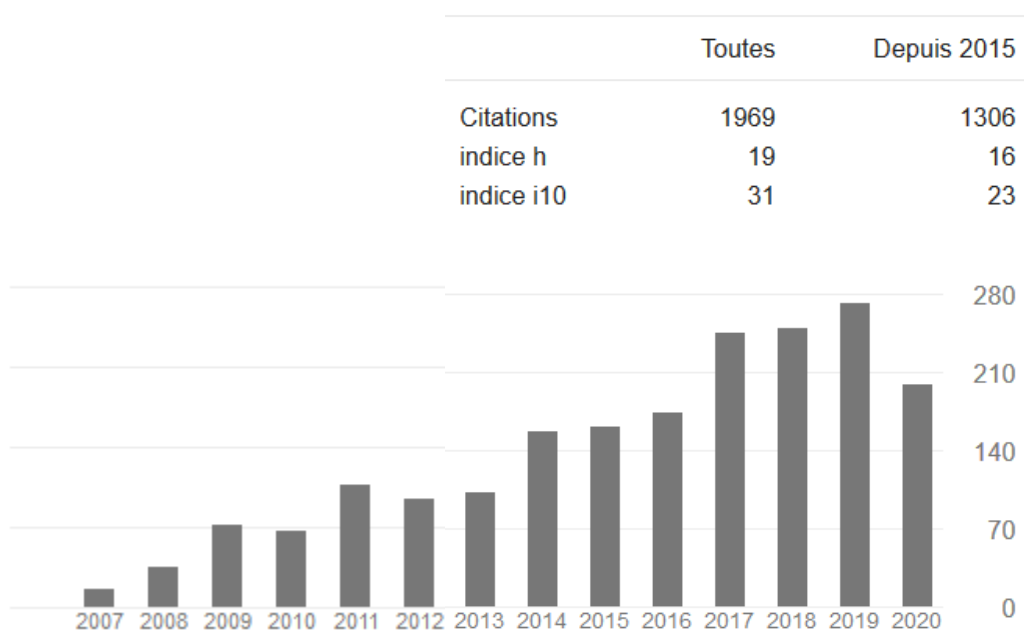


Figure 51 : Nombre de citations par an (Google Scholar) et indices (indice h = number de papiers (h) cités plus de h fois ; indice i10 = nombre de publications avec au moins 10 citations (histogramme réalisé le 31 août 2020)

3.2 Co-encadrement de thèses

Depuis 2004, je co-encadre des thèses, dans la majorité des cas avec P. Grussenmeyer, responsable de notre groupe, ce qui représente à ce jour 440 % d'encadrements réalisés.

Nom Prénom	Début thèse	Fin thèse	Co-encadrants (% encadrement)	Nombre de publications (p. 86)	Devenir des doctorants
TARSHA-KURDI Fayez	11/2004	11/2008	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	9	Chercheur à Griffith University (Australie)
BOULAASSAL Hakim	11/2006	02/2010	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	18	MCF à l'Université de Tanger (Maroc)
HULLO Jean-François	01/2010	01/2013	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	3	Ingénieur R&D, EDF Clamart – actuellement en poste en Angleterre
MOHAMED Mostafa	09/2009	09/2013	P. Grussenmeyer (70%) T. Landes (30%)	2	MCF à l'Université Al Azhar (Cairo)
MITTET Marie-Anne	12/2011	06/2015	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	3	Ingénieur chez Renault (Guyancourt)
MACHER Hélène	02/2014	01/2017	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	11	MCF à l'INSA Strasbourg
BOURNEZ Elena	09/2015	11/2018	G. Najjar (20%) T. Landes (40%) P. Kastendeuch (40%)	11	Salariée d'un cabinet de géomètre-expert

Nom Prénom	Début thèse	Fin thèse	Co-encadrants (% encadrement)	Nombre de publications (p. 86)	Devenir des doctorants
LACHAT Elise	09/2015	06/2019	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	8	En recherche d'emploi dans la médiation scientifique
ASSI Rami	10/2018	<i>Juin 2020 (abandon)</i>	P. Grussenmeyer (50%) T. Landes (50%)	2	
PHILIPPS Nathalia	10/2018		G. Najjar (40%) P. Kastendeuch (40%), T. Landes (20%)	1	

Détails des thèses :

TARSHA-KURDI Fayez (2008)

Thèse de l'Université de Strasbourg

Bourse du gouvernement syrien

Titre : « **Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés** »

Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; co-encadrante : **T. LANDES**

Soutenue le 6 novembre 2008 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :

E. HIRSCH, Président et rapporteur interne

L. POLIDORI, Rapporteur externe

M. PAPARODITIS, Rapporteur externe

H.-P. BAEHR

T. LANDES, Co-encadrante

P. GRUSSENMEYER Directeur de thèse

BOULAASSAL Hakim (2010)

Thèse de l'Université de Strasbourg

Bourse de la Région Alsace

Titre : « **Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres** »

Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; co-encadrante : **T. LANDES**

Soutenue le 3 février 2010 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :

L. POLIDORI, Président et rapporteur externe

F. GOULETTE, Rapporteur externe

T. LANDES, Co-encadrante

P. GRUSSENMEYER Directeur de thèse

HULLO Jean-François (2013)

Thèse de l'Université de Strasbourg

Bourse CIFRE²⁰ EDF R&D / INSA sur 36 mois

Titre : « **Consolidation de relevés laser d'intérieurs construits : pour une approche probabiliste initialisée par géolocalisation** »

Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; co-encadrante : **T. LANDES**

Soutenue le 10 janvier 2013 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :

D. BENNEQUIN, Président

²⁰ Conventions Industrielles de Formation par la Recherche

B. MERMINOD, rapporteur externe
 J. DROULEZ, Rapporteur externe
 T. CHAPERON, Examineur
 G. THIBAUT, Examineur
 T. LANDES, Co-encadrante
 P. GRUSSENMEYER Directeur de thèse

MOHAMED Mostafa (2013)

Thèse de l'Université de Strasbourg
 Bourse du gouvernement égyptien
 Titre : ***“Quality Assessment of 3D building models in airborne digital photogrammetry”*** ;
 Evaluation de la qualité des modèles 3D de bâtiments en photogrammétrie numérique aérienne.
 Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; Co-encadrante : **T. LANDES**
 Soutenue le 30 septembre 2013 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :
 P. CHARBONNIER, Président
 M. KASSER, rapporteur externe
 L. POLIDORI, Rapporteur externe
 T. LANDES, Co-encadrante
 P. GRUSSENMEYER Directeur de thèse

MITTET Marie-Anne (2015)

Bourse CIFRE Mensi-Trimble / Insa Strasbourg
 Titre : « ***Caméras 3D pour la localisation d'un système mobile en environnement urbain*** »
 Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; Co-encadrante : **T. LANDES**
 Soutenue le 15 juin 2015 à INSA Strasbourg devant le jury composé de :
 P. CHARBONNIER, Président et examinateur
 F. GOULETTE, Rapporteur externe
 L. POLIDORI, Rapporteur externe
 T. LANDES, Co-encadrante
 P. GRUSSENMEYER Directeur de thèse

MACHER Hélène (2017)

Bourse CIFRE Ordre des Géomètres Experts / Insa Strasbourg
 Titre : « ***Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*** »
 Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; Co-encadrante : **T. LANDES**
 Soutenue le 30 janvier 2017 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :
 L. POLIDORI, Président et Rapporteur externe
 N. PAPARODITIS, Rapporteur externe
 R. EL MEOUCHE, examinateur
 T. LANDES, Co-encadrante
 P. GRUSSENMEYER, Directeur de thèse

BOURNEZ Elena (2018)

Bourse ICUBE (UDS) – allocation recherche
 Titre : « ***Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles.*** »
 Directeur de thèse : G. NAJJAR ; Co-encadrants : **T. LANDES**, P. KASTENDEUCH

Soutenue le 19 novembre 2018 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :

A. LEMONSU, Rapporteur externe
 L. POLIDORI, Rapporteur externe
 A. CLAPPIER, Examineur
 P. GRUSSENMEYER, Président et examinateur
 M. SAUDREAU, Examineur
 T. AMEGLIO, Examineur
 P. KASTENDEUCH, Co-encadrant
 T. LANDES, Co-encadrante
 G. NAJJAR, Directeur de thèse

LACHAT Elise (2019)

Allocation recherche INSA

Titre : « **Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine** »

Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER ; Co-encadrante : **T. LANDES**

Soutenue le 17 juin 2019 à INSA de Strasbourg devant le jury composé de :

P. CHARBONNIER, Président et examinateur
 L. TRASSOUDAIN, Rapporteur externe
 B. VALLET, Rapporteur externe
 T. LANDES, Co-encadrante
 P. GRUSSENMEYER, Directeur de thèse

ASSI Rami (2018-abandon en juin 2020)

Thèse financée sur le budget de l'ANR BIOM

Titre : « **Modélisation conjointe intérieure/extérieure de bâtiments à partir de données LiDAR** »

Directeur de thèse : P. GRUSSENMEYER

Co-encadrante : **T. LANDES**

PHILIPPS Nathalia (2018-...) en cours

Bourse CIFRE avec l'Eurométropole de Strasbourg

Titre : « **Etude de la contribution de la végétation et de la géométrie urbaine à la mitigation de l'îlot de chaleur urbain strasbourgeois : mesures, modélisation et prescriptions.** »

Directeur de thèse : G. NAJJAR ; Co-encadrants : P. KASTENDEUCH, **T. LANDES**

3.3 Encadrement de stages de recherche

L'encadrement scientifique de stages de recherche comprend :

- **l'encadrement de Projets de Fin d'Etudes (PFE) d'étudiants au sein de notre équipe**, sur des thématiques du laboratoire ou des thématiques établies en collaboration avec une entreprise, sur la base généralement d'une convention établie entre l'entreprise et la Plateforme Topographie. Cet encadrement est individuel.
Nombre : 1 à 2 par an depuis 2011 (voir tableau ci-dessous).
Suivi quotidien entre février et août de l'année du stage.
- **l'encadrement d'étudiants en PFE, au sein de l'entreprise** et correction de leur mémoire, avec conventionnement éventuel de l'étude.
Nombre : 7 à 8 étudiants /an depuis 2001 dont 2 ou 3/an dont le PFE est conventionné.
Suivi mensuel et visite sur lieu de stage si possible. Liste non fournie.

- **l'encadrement d'étudiants en Projet de Recherche Technologique (PRT).** Le PRT est un module de 56 heures réparties sur le dernier semestre d'études, permettant à un (ou deux) étudiant(s) de répondre à une problématique établie par une entreprise ou par notre équipe de recherche, avec conventionnement éventuel de l'étude.

Nombre : 52 étudiants encadrés depuis 2008 (voir tableau ci-dessous).

Suivi hebdomadaire.

Les PRT ou PFE ayant fait l'objet d'un conventionnement entre une entreprise et la plateforme Topographie ont été recensés dans le tableau p. 118.

3.3.1 Encadrement de Projets de Fin d'Etudes PFE (stages de Master II)

Menés entre février et septembre de la même année, les PFE sont généralement associés à des contrats industriels. Dans le cas d'un PFE conventionné, l'entreprise verse une subvention à la plateforme topographie et une indemnité de stage à l'étudiant. La liste ci-dessous présente 14 PFE conventionnés et encadrés depuis 2011.

Etudiant en Master II (PFE)	Année	Titre du mémoire [Publications] : voir p. 76 et suivantes	Partenaire et co-encadrement (lieu : INSA)
RIS Pierre-Olivier	2011	Etude des solutions de contournement des effets de réflexion sur des surfaces métalliques relevées par scanner laser	Entreprise Imag'Ing, Lixhausen
BERRU Thibaut	2012	Recommandations à l'attention des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour caractériser les travaux de relevés topographiques par méthodes aéroportées telles que la photogrammétrie, la lasergrammétrie et la thermographie.	Syndicat National des Entreprises Privées de la Photogrammétrie (SNEPPIM)
BIDINO Selma	2013	Etude de l'extraction automatique de coupe à partir de nuages de points. - Application à l'Abbatiale d'Ottmarsheim. (Landes et al., 2014a)	Mairie d'Ottmarsheim.
BRUNA Robin	2014	Modélisation 3D de la chapelle Saint-Laurent et de la place du Château (secteur 3) pour extraction de données archéologiques et visite virtuelle. (Landes et al., 2015b)	Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, INRAP
HAYOT Christelle	2014	Etude des solutions de modélisation d'un arbre en milieu urbain, en vue de son intégration dans les modèles météorologiques.	ICube.
BOURNEZ Elena	2015	Reconstruction d'arbres en milieu urbain à partir de nuages de points.	ICube → poursuivi en thèse
LACHAT Elise	2015	Évaluation de la technologie des caméras 3D (Kinect 2) pour la mesure et la reconstruction d'objets à courte portée (Lachat et al., 2015c), (Lachat et al., 2015a), (Lachat et al., 2015b)	→ poursuivi en thèse
ROY Marion	2015	Apport de l'information radiométrique à la segmentation et à l'extraction de contours à partir de nuages de points. (Macher et al., 2016)	ICube

LEMPEREUR Marine	2016	Etude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres. (Bournez et al., 2016a)	ICube
BENAZZI Théo	2018	Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site. (Landes et al., 2019)	Mathias Heissler et Mairie d'Obernai
THIERRY Julie	2019	Détection de fenêtres dans un nuage de points d'un mur de façade et positionnement semi-automatique dans un logiciel BIM	Co-encadrement avec Hélène MACHER
MONTAUBAN Olivier	2019	Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg (Landes et al., 2020)	Co-encadrement avec collègues de l'équipe TRIO
ROBERT Jules	2019	Étude et mise en place de solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Kœnigsbourg.	Château du Haut-Kœnigsbourg, Département du Bas-Rhin
ROY Leyla	2020	Apport des informations thermiques, de couleur et d'intensité pour la détection automatique d'ouvertures dans des nuages de points.	Co-encadrement avec H. Macher
Nombre d'étudiants encadrés en PFE/Master 2 (depuis 2011)			14 étudiants

3.3.2 Encadrement d'étudiants en Projet de Recherche Technologique (PRT)

Menées entre septembre et janvier, ces études font souvent l'objet de contrats industriels dont la liste détaillée se trouve p. 118.

Etudiants	Année	Titre de l'étude [Publications] : voir p. 76 et suivantes	Collaboration/ Partenaire
MORONVALLE J.-B. et DUFOR V.	2008/2009	Analyse du signal et contrôle géométrique de données lasergrammétriques terrestres	
GEORGANTAS T. et NOIROT T.	2008/2009	Etude des capacités des scanners lasers pour la détection des fissures d'ouvrages d'art	Spécialité Génie Civil de l'INSA de Strasbourg
GAUDRY A. et AVERTY S.	2009/2010	Classification de données LiDAR à retour d'onde complet	
DEGRAIN M. et TOUBOIS A.	2009/2010	Projet de modélisation du château du Haut-Kœnigsbourg (Bas-Rhin) : étude d'opportunités [ACLN-13]	Direction du Château du Haut-Koenigsbourg
GOURAUD, E. et PAIREAU, N.	2010/2011	Etude et simulation d'un local à basse consommation énergétique sur le site du château d'Andlau.	Spécialité GCE et Architecture de l'INSA Strasbourg

CHAPPE F., RIPOCHE C.	2011/ 2012	Relevé lasergrammétrique et modélisation du mur d'enceinte de Ribeauvillé [ACTI-35]	Université de Strasbourg
THOMAS, B., TROCHON, M.- L.	2011/ 2012	Elaboration d'une méthodologie d'extraction automatique de vestiges archéologiques (tumulus) sous couvert forestier, à partir de données LiDAR du PAIR.	Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan
MACHER H., BIDINO, S.	2012/ 2013	Relevés et modélisation 3D de l'Abbatiale d'Ottmarsheim	Commune d'Ottmarsheim
GOURVEZ S., LOPES, B.	2012/ 2013	Levé et modélisation tridimensionnelle de 7 blocs figurés (parties de stèles funéraires) situés au Palais du Rhin à Strasbourg. (Landes et al., 2013)	Direction régionale des affaires culturelles (DRAC)
BRUNA R., CHAMPIER B.	2013/ 2014	Relevés 3D du sous-sol de la chapelle Saint Laurent de la cathédrale de Strasbourg.	G. Kuhnle, archéologue INRAP
HAYOT C.	2013/ 2014	Etude de l'apport de la lasergrammétrie au relevé et à la modélisation d'arbres en ville (Landes et al., 2014b)	G. Najjar, géographe climatologue
BOURNEZ E., SIMERAY L.	2014/ 2015	Modélisation 3D d'arbre en ville, en vue de son intégration dans un modèle climatologique.	G. Najjar, géographe climatologue
MOREL Y.	2014/ 2015	Etude des solutions de valorisation de projets de numérisation réalisés au sein du groupe PAGE et plus spécifiquement du projet de numérisation des fondations de la cathédrale.	Service Communication de l'INSA de Strasbourg
RICHARD A., VOGLIMACCI L.	2014/ 2015	Relevé et modélisation 3D du massif de la spirale Warburg à Strasbourg	Co-encadrement avec P. Grussenmeyer
PRADIER C., WILHELM L.	2015/ 2016	Evaluation de la qualité de données acquises par couplage de données scanner laser et données infrarouge thermique [ACTI-56]	Collègue chargée de cours (L. Roupioz)
BROSSARD Jérémy, ROY Marion	2015/ 2016	Estimation fine de position de rails à partir de coupe dans des nuages de points 3D.	SNCF ; Co-encadrement avec P. Grussenmeyer
FORRLER M., LE BIGOT G.	2016/ 2017	Etudes sur les solutions de recalage de nuages de points acquis par scanner laser mobile.	Entreprise FUTURMAP
DHONT M. A.	2016/ 2017	Etudes comparatives de la qualité des nuages de points acquis avec divers systèmes	Co-encadrement avec E. Lachat (doctorante)
PERRIN L., MARQUES, T.	2016/ 2017	Mise en valeur et classification de données LiDAR acquises par drone dans les emprises ferroviaires	SNCF ; Co-encadrement avec P. Grussenmeyer
THOURY C.	2016/ 2017	Modélisation 3D d'arbres à partir de données LiDAR multi-échos.	Communauté Urbaine de Strasbourg
TADJIAN N.	2017/ 2018	Calcul de surface automatisée dans une maquette numérique Revit	TT GEOMETRES EXPERTS ; Co-encadrement avec E. Alby

BENAZZI T.	2017/ 2018	Levé et modélisation des ruines du château du Kagenfels pour une proposition de reconstitution virtuelle. (Landes et al., 2019)	Mathias Heissler, architecte du Patrimoine, Département du Bas-Rhin.
GOURGUECHON C.	2017/ 2018	Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg	G. Najjar, géographe climatologue ; Co-encadrement avec M. Koehl
CASAURANQ V.	2017/ 2018	Etude des solutions de réalité virtuelle et augmentée pour une immersion dans des modèles 3D réalisés au sein de l'équipe PAGE	Co-encadrement avec E. Alby
HINAUX Marion	2017/ 2018	Automatisation des procédures de contrôle des livrables topographiques issus de données photogrammétriques et LiDAR acquises par drones dans les emprises ferroviaires	ALTAMETRIS, filiale SNCF ; Co-encadrement avec P. Grussenmeyer
PICARD Arthur	2018/ 2019	Recherche automatique de mobilier urbain dans des images 360 (<i>ladybug</i>)	TT Géomètres Experts
ROBERT Jules	2018/ 2019	Solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Koenigsbourg	Département du Bas-Rhin
MONTAUBAN Olivier (MASTER IRIV)	2018/ 2019	Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg (LCZ)	Co-encadrement avec M. Koehl et G. Najjar
MOREL V.	2018/ 2019	Mise à jour des spécifications techniques de TOTAL sur les acquisitions photogrammétriques et LiDAR par moyen aérien	TOTAL
AMZIL Sabine (MASTER IRIV)	2019/ 2020	Détecteurs et descripteurs de points d'intérêt 3D	Co-encadrement avec R. Assi (doctorant)
GRANJON Marion	2019/ 2020	Détection d'îlots de chaleur urbains (ICU) par imagerie satellitaire (Del Pozo et al., 2020)	Co-encadrement avec S. Del Pozo Aguilera (post-doctorante)
SALGUES Hugo	2019/ 2020	Evaluation de systèmes de cartographie dynamique pour le relevé en intérieur et extérieur. (Salgues et al., 2020)	Co-encadrement avec H. Macher
BARÇON Etienne (MASTER IRIV)	2019/ 2020	Détection d'objets linéaires dans un nuage de points de voirie	TT Géomètre Expert ; Co-encadrement avec H. Macher
ROY Leyla	2019/ 2020	Mise à profit de nuages de points intérieur/extérieur pour la détection automatique de fenêtres à partir de nuages de points	Co-encadrement avec H. Macher
DURIEUX F., COMBE J- L.	2019/ 2020	Numérisation et modélisation d'une tour des Ponts-Couverts	Co-encadrement avec H. Macher
Total en nombre d'étudiants encadrés en PRT (depuis 2008) :		52 étudiants encadrés et 35 sujets traités	

3.4 Diffusion des travaux (rayonnement et vulgarisation)

3.4.1 Direction d'Ouvrages

- **Directrice des publications** de la revue trimestrielle nationale XYZ (ISSN 0290-9057), à comité de lecture, de l'Association Francophone de Topographie (www.aftopo.org) depuis 2012 et **Directrice adjointe des publications** de 2009 à 2012.
Revue de 72 pages tirée à 1 600 exemplaires, publiée trimestriellement, reconnue dans les domaines de la topographie, géodésie, télédétection, photogrammétrie. Comité de lecture composé de 37 personnes issues de 5 pays (France, Allemagne, Suisse, Canada, Belgique).

3.4.2 Ouvrages de vulgarisation

- **Participation à l'écriture d'un chapitre d'ouvrage** : P. GRUSSENMEYER, T. LANDES, M. DONEUS, J-L. LERMA (2016). Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage, Chapitre de **64 pages** dont 24 écrites personnellement, dans *3D Recording, Documentation and Management in Cultural Heritage*, Remondino, F., Stylianidis, S. (Eds.), Whittles Publishing, ISBN 978-184995-168-5, 388 pages. Voir référence [C0-2]
- Participation à la rédaction d'un **chapitre d'ouvrage** réalisé par la DRAC, intitulé « *Panorama exceptionnel du camp romain à l'actuelle cathédrale.* » In : MISTLER A. (éd.). Chapitre de KUHNLE G., avec la collaboration de BENGEL S., GASTON C., KELLER M., **LANDES T.**, POTIER S., RISTOW S. — *Réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent : un panorama exceptionnel du camp romain à l'actuelle cathédrale.* In : MISTLER A. (éd.), Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg 100 ans de travaux, Strasbourg : I.D. L'Édition, 2015, p. 34-43. [OV-1]
- Heinrich, P., Keller, M., Kuhnle, G., **Landes, T.**, 2017. *Un moule de balsamaire zoomorphe trouvé à Sarre-Union (Bas-Rhin).* Dans : Cahiers alsaciens d'archéologie, d'art et d'histoire ; Tome LX. Société pour la conservation des monuments historiques d'Alsace. ISBN 85773, p. 55-70. [OV-3]
- Participation à la rédaction d'un **dépliant** sur le "*Réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent*" dans le cadre de la fête du Patrimoine en septembre 2015. [OV-2]

3.4.3 Conférences invitées, séminaires grand public et autres

- **Invitation à dispenser un cours dans le cadre d'un workshop, Programme ORCHID, date à redéfinir en 2021**, "The Bilateral Workshop of Heritage Building Information Modeling and Cultural Heritage Disaster Reduction", à Taipei, **Taiwan** (financement CAMPUS France).
- **Invitation à donner une conférence**, en **2017**, à l'université d'Olten, Fachhochschule Nordwestschweiz, à Olten, en **Suisse**, sur les activités relatives au BIM en France et des formations françaises préparant au processus BIM. « Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment existant : un pas vers le BIM / Von der Punktwolke zum digitalen Bestandsmodell : ein Schritt zum BIM », 3DGI 2017, Olten, Suisse, 13 juin 2017. <http://www.3dgi.ch/3dgi2017/> (voir référence [INVI-4]).

- **Invitation à intervenir dans un Colloque national**, en **2017** et rapporteur de la journée « BIM : aux confluences de la technique et du droit » organisé par l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT), Le Mans, 2 février 2017. [INVN-5]
- **Invitation à donner une conférence** dans un Congrès national de l'Ordre des Géomètres Experts (OGE) en **2016**. « La modélisation de la 3D : les enjeux de l'automatisation », intervention dans le cadre du 43^{ème} Congrès national de l'OGE, Nancy, 21-23 juin 2016. Actes du CONGRES, p. 26-28 : http://www.geometre-expert.fr/upload/docs/application/pdf/201607/actescongresnancy2016_web.pdf [ACTN-7]
- **Conférence invitée**, en **2016**, pour la Journée CercleGéo organisée par l'ESGT au **Mans**, pour y présenter nos travaux de recherche en lasergrammétrie et photogrammétrie. [INVN-4]
- **Conférence invitée** dans un Colloque **International** organisé par la société des Amis de la Cathédrale, dans le cadre du Millénaire de la cathédrale de Strasbourg. "L'évêché de Strasbourg à l'époque ottonienne. L'évêque Werner et la fondation de la cathédrale romane", par Kuhnle, G., **Landes, T.**, Bengel, S., Potier, S. (**2015**). La cathédrale de Werner dans son contexte archéologique : réexamen du sous-sol de la chapelle Saint-Laurent, du 18 au 20 mars 2015 à Strasbourg. [SGP-3]
- **Conférence invitée** dans le Cycle de conférences de l'OND (Œuvre Notre Dame), organisé pendant l'année des festivités du millénaire des fondations. Présentation des travaux INRAP/INSA/OND/Inventive Studio sur les fondations de la cathédrale, suite aux recherches effectuées dans le sous-sol de la Chapelle Saint-Laurent. Kuhnle, G., **Landes, T.**, Bengel, S., Potier, S., le 8 septembre **2015**, à Strasbourg. [SGP-4]
- Diffusion grand public : Passage télévisé en mars 2011, rediffusé en 2012 et **2015**, sur France 3, dans l'émission "**Des Racines et des Ailes** : Châteaux d'Alsace, Trésors basques". Tournage réalisé le 26 mai 2010. [SGP-1]
- **Passage télévisé** sur France 2, au journal télévisé de 13 h du mercredi 8 octobre **2014** – Thème : Cathédrale de Strasbourg : http://www.francetvinfo.fr/replay-jt/france-2/13-heures/jt-de-13h-du-mercredi-8-octobre-2014_708113.html [SGP-2]

3.4.4 Expertises pour instances nationales et étrangères réputées (2014-2020)

- **Expertise** d'un projet ANR sur demande du Comité d'évaluation scientifique (CES), en 2015.
- **Révision d'articles pour revues internationales** :
 - revue internationale « The Photogrammetric Record » (2011 à 2017),
 - revue internationale « IEEE Transactions on Intelligent transportation systems » (2009),
 - revue internationale « IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters » (2009, 2010, 2014),
 - revue internationale « Automation in Construction » (2013, 2014),
 - revue internationale « Journal of photogrammetry, remote sensing and geoinformation processing PFG » (2015),

- revue internationale JSTARS « Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing- 2014 »,
- revue internationale « Remote Sensing » (2016, 2020),
- revue internationale « Sensors » (2008, 2016, 2017)
- revue internationale « Virtual Archeology Review » (2017 à 2020)
- **Révision d'articles pour congrès internationaux :**
 - congrès international « IGARSS » (2009),
 - congrès international « ISAG2019, International Symposium on Applied Geoinformatics » (2019)
 - congrès international « CIPA », tous les 2 ans (2013 à 2019)
 - congrès international « 3D LowCost », tous les 2 ans (2017, 2019)
 - congrès international « ISPRS », tous les 4 ans (2012, 2020)
- **Révision d'articles pour revues nationales :**
 - revue nationale de la « Société Française de Photogrammétrie et Télédétection » RSFPT (2009, 2013, 2014),
 - revue nationale « XYZ » de l'Association Française de Topographie : plusieurs articles tous les 3 mois, depuis 2003.

3.4.5 Membre de jurys de thèses

- **Examinatrice** pour le jury de thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, de Ronghai Hu (27/08/2018) : « Estimation cohérente de l'indice foliaire en utilisant des données terrestres et aéroportées. », sous la direction de Mme Nerry Françoise (Equipe TRIO) ; rapporteurs : J. Sobrino (Valence), J. L. Roujean ; Examineur : **T. Landes**
- **Examinatrice** pour le jury de thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, de David Eschbach (25/09/2017) : « Trajectoire temporelle et monitoring hydro-morphologique d'une anastomose rhénane restaurée », sous la direction de Laurent Schmitt (Faculté de géographie, Strasbourg) ; rapporteurs : F. Petit et E. Gautier ; Examineurs : **T. Landes** et K.M. Wantzen.

3.4.6 Membre de jury de Master extérieur à l'INSA Strasbourg

- **Membre de jury de Master II de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HESSO)** de Salvatore Siciliano Silivestro (07/11/2013) : « Mise en place d'un banc d'étalonnage pour les scanners lasers terrestres, sous la supervision de Vincent Barras (Laboratoire de topométrie, Institut G2C, HEIG-VD). Examineurs : Yannick Peter, ingénieur, géomètre officiel et Tania Landes, Maître de Conférences

3.4.7 Distinctions

- Obtention d'une **prime d'encadrement** doctoral et de recherche (PEDR) de 2014-2017 et de 2019 à 2022.
- Co-auteure d'un **Best paper Award en 2014** (Macher et al., 2014a)
- Co-auteure d'un **Best Young Author Paper Award en 2015** (Lachat et al., 2015a)
- **Prix Jean Kepler**, décerné à Elena Bournez pour sa thèse, en octobre 2019
- **Prix de la Société des Amis des Universités de l'Académie de Strasbourg**, décerné à Elise Lachat pour sa thèse, en juillet 2020.

3.5 Responsabilités scientifiques

3.5.1 Responsabilités dans des sociétés savantes

Responsabilités et mandats locaux ou régionaux :

- 2011 et 2014 : **Membre du Comité de Sélection** du CNAM, pour des postes MCF 0037 à l'ESGT (Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes).

Responsabilités et mandats internationaux :

- 2013 : **Membre du comité d'organisation** du 24^{ème} Symposium du CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) tenu à l'INSA Strasbourg, du 2 au 6 septembre 2013 (www.cipa2013.org, XXIVth CIPA Heritage Documentation Symposium).
- 2014 : **Membre du comité scientifique international (ISC)** de la conférence internationale Euromed 2014
- 2015 : **Membre du comité scientifique** du 25^{ème} symposium du CIPA, congrès international, qui s'est déroulé à Taipei, Taiwan, du 31 août au 4 septembre 2015 (<http://www.cipa2015.org/committees.html>).
- 2016 - 2019 : Membre associé du **Comité Exécutif du CIPA** (Comité International de Photogrammétrie Architecturale, <http://cipa.icomos.org>) de 2016 à 2019, en charge de la mise en place du « Young Emerging Experts Group » du CIPA avec un des membres.
- 2016 : **Chair-woman** d'une session de présentations orales lors de la conférence internationale de l'ISPRS à Prague en 2016
- 2017 : **Chair-woman** d'une **session de présentations orales** et d'une **session posters** lors de la conférence internationale du CIPA à Ottawa, en 2017 (300 participants)
- 2017 : Membre du **comité scientifique** du 5^{ème} workshop international « LowCost3D 2017 : sensors, algorithms, applications » (37 papiers reçus) et du 6^{ème} workshop.
- Depuis fin 2017 : **Membre du comité éditorial** de la revue internationale « Virtual Archaeology Review », journal numérique, publié en ligne, deux numéros par an (e-ISSN: 1989-9947). <https://polipapers.upv.es/index.php/var/about/editorialTeam>
- 2019 : **Chair-woman** d'une session de présentations orales lors de la 6^{ème} édition du Workshop LowCost 3D, tenu les 2 et 3 décembre à l'INSA Strasbourg, (<https://lc3d.fbk.eu/>)

Responsabilités et mandats nationaux

- **Membre du Comité « Techniques de la Mesure » de l'Ordre des Géomètres Experts**, composé d'une dizaine de professionnels. En tant qu'experte universitaire, je suis chargée du prospect en nouvelles technologies depuis 2016/2017.
Durée du mandat : un an, renouvelé chaque année depuis cette date.

- **Représentante INSA** au sein du **Comité scientifique de l'Ordre des Géomètres Experts**, composé de tous les représentants des écoles d'ingénieurs formant des géomètres ou juristes, dont l'ESTP, l'ESGT, l'EIVP, l'ENSG depuis 2016.
- **Membre représentant des enseignants** à la Commission inter-INSA des admissions (nommée pour 3 ans par le conseil d'administration après avis du conseil des études), appelée C5i et renommée CA2i (2003-2006, 2008-2011, 2011-2014 et 2014 à 2017).
- **Membre du Comité de Rédaction** depuis 2003, composé de 12 personnes, de la revue XYZ de l'Association Francophone de Topographie (AFT) ; et membre de son comité de lecture depuis 1999. **Directrice des publications** de cette revue.
- **Membre élu du Conseil de l'Association Francophone de Topographie**, composé de 18 membres, depuis 2012.
- **Responsable, de 2002 à 2018, du site internet** de l'AFT (www.aftopo.org) et de son service de gestion en ligne des adhérents et abonnés (environ 500 personnes).

3.5.2 Organisation de congrès internationaux

- Membre du **comité exécutif** pour le volet « Media Chair » du **24^{ème} congrès international** de l'ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), qui aurait dû se tenir du 14 juin au 20 juin 2020. Directeur du Congrès : Nicolas Paparoditis.
Durée du congrès : 7 jours
[\(http://www.isprs2020-nice.com/\)](http://www.isprs2020-nice.com/)
En raison des risques sanitaires liés à l'épidémie de Covid-19, le congrès a été reporté du 4 au 10 juillet 2021. Un évènement virtuel invitant les présentateurs à présenter leurs travaux par visio-conférences ou vidéos pré-enregistrées s'est tenu avec succès du 31 août au 2 septembre 2020.
- **Membre du comité d'organisation de la 6^{ème} édition du Workshop international LowCost 3D**, tenu les 2 et 3 décembre à l'INSA Strasbourg, avec notre équipe de recherche. Directeur du workshop : P. Grussenmeyer
Durée du congrès : 2 jours.
Nombre de participants : 145 de 26 pays. <https://lc3d.fbk.eu/>

3.5.3 Participation à des programmes nationaux

Ce tableau recense les programmes nationaux auxquels j'ai participé depuis 2002.

Nom du programme et période	Titre	Partenaires	Rôle, implication, budget équipe
Projet RECIUS (2002-2003)	RECIUS 3, « Rayonnement et bilan d'Energie en Climatologie Urbaine à Strasbourg », projet CPER et PNTS	LSIIT UMR 7005, Université de Strasbourg <u>Porteur</u> : G. Najjar	<u>Rôle</u> : géoréférencer les données hyperspectrales du capteur aéroporté DAIS 7915, fournir une cartographie d'occupation des sols
ACI Masse de données MEGATOR (2004-2007)	MEGATOR, « Mesure de l'Evolution des Glaciers Alpains par Télédétection Optique et Radar »	DLR (Oberpfaffenhofen, Allemagne), LISTIC (Université de Savoie), le LTCI (Télécom Paris) LIS (INP Grenoble), PAGE (INSA Strasbourg)	Responsable pour le partenaire Insa : T. Landes Participation à deux missions dans les Alpes en octobre 2006 et février 2007.
Projet AvENUe (2013-2014)	AvENUe « L'Arbre en ENVironnement Urbain », projet TOSCA (CNES)	Equipe TRIO du laboratoire ICube et l'UMR PIAF de l'INRA Clermont Ferrand. <u>Porteur</u> : F. Nerry	<u>Rôle</u> : participation scientifique à une tâche spécifique.
ANR URBANIA (2016-2018)	« Digital valorising of historical scale models of cities for adaptative and innovative uses »	UMR MAP n°3495 (porteur du projet), INSA-ICUBE, INGENIO, MHS, ESRI <u>Porteur</u> : Gilles HALIN (UMR MAP, Nancy), 1 post-doc pour TRIO (12 mois)	<u>Rôle</u> : participation scientifique à une tâche spécifique. <u>Implication</u> personnelle : 2 personnes.mois
ANR COOLTREES (2017-2020)	« Urban Cooling by Trees – Assessing and Modeling for Designing Sustainable Cities »	UMR PIAF, ICUBE/INSA Strasbourg, Plante et Cité, Eurométropole Strasbourg <u>Porteur</u> : Marc SAUDREAU (INRA), Post-doc (2 ans), 1 IE (6 mois)	<u>Rôle</u> : Responsable d'un groupe de travail. <u>Implication</u> personnelle : 6 personnes.mois
ANR BIOM (2017-2020)	« Building Inside/Outside Modeling »	IGN (porteur du projet) ; CSTB, ICUBE/INSA Strasbourg, Eurométropole Strasbourg, INRIA. <u>Porteur</u> Bruno VALLET (IGN), 1 thèse pour TRIO (Rami ASSI)	<u>Rôle</u> : co-encadrante d'une thèse (Rami Assi) <u>Implication</u> personnelle : 7.2 personnes.mois

Sigles employés dans le tableau ci-dessus :

*ACI : Action Concertée Incitative (financement sur 4 ans)

*ANR : Agence Nationale de la Recherche (3 ans)

*PNTS : Programme National de Télédétection Spatiale (2 ans)

*AMI : Appel à manifestation d'intérêt (18 mois)

3.5.4 Responsabilité de contrats de recherche, publics et industriels (PRT ou PFE)

Partenaire (financement industriel ou public)	Dates	Objectif du projet (titre de l'étude)	Financement	Ressources humaines (responsable(s) scientifique(s) ; Etudiant(s))
Conseil Général et Association des amis du château d'Andlau	Septembre 2006 à septembre 2008	Modélisation du château d'Andlau et relevé de ses abords	2 PRT	Porteur : T. Landes Etudiants : J. Baert, J. Maccagnan et E. Kucerova
Entreprise Imag'ing	Octobre 2010 à septembre 2011	Etude de solutions de numérisation de cuves réfléchissantes	1 PRT	Porteur : T. Landes Etudiant : Pierre-Olivier Ris
INSA Strasbourg, via appel à projet BQR	Septembre 2010 à janvier 2011	Modélisation du système défensif de la ville de Ribeauvillé, intitulé « Ribo3D »	1 PRT	Porteur : T. Landes ; Etudiants : F. Chappe et C. Ripoché
Commune d'Ottmarsheim	Septembre 2012 à septembre 2013	Relevé et modélisation de l'abbatiale d'Ottmarsheim	1 PRT + 1 PFE	Porteur : T. Landes ; Etudiante : S. Bidino
DRAC Direction Régionale des Affaires Culturelles	Septembre 2012 à janvier 2013	Levé et modélisation tridimensionnelle de stèles funéraires situées au Palais du Rhin à Strasbourg	1 PRT	Porteur : T. Landes ; Etudiants : V. Lopez et S. Gourvez
Université de Strasbourg	Septembre 2013 à novembre 2013	Modélisation d'éléments du système défensif, secteur II, de Ribeauvillé	1 PRT	Porteur : T. Landes ; Etudiante : T. de Turckheim
INRAP	Septembre 2013 à septembre 2014	Numérisation de la Chapelle Saint Laurent	1 PRT + 1 PFE	Porteur : T. Landes ; Etudiant : R. Bruna
SNCF	Septembre 2015 à janvier 2016	Estimation fine de position de rails à partir de coupe dans des nuages de points 3D.	1 PRT + 1 PFE	Porteurs : T. Landes et P. Grussenmeyer ; Etudiants : J. Brossard et M. Roy
FUTURMAP	Septembre 2016 à janvier 2017	Etudes sur les solutions de recalage de nuages de points acquis par scanner laser mobile.	1 PRT + 1 PFE	Porteur : T. Landes ; Etudiantes : M. Forrlér et G. Le Bigot
SNCF	Septembre 2016 à janvier 2017	Mise en valeur et classification de données LiDAR acquises par drone dans les emprises ferroviaires	1 PRT + 1 PFE	Porteurs : T. Landes et P. Grussenmeyer ;

				Etudiants : L. Perrin et T. Marques
TT GEOMETRES EXPERTS	Septembre 2017 à janvier 2018	Calcul de surface automatisée dans une maquette numérique Revit	1 PRT	Porteurs : T. Landes et E. Alby ; Etudiant : N. Tadjian
Association pour la Conservation du Patrimoine Obernois	Septembre 2017 à janvier 2018	Levé et modélisation des ruines du château du Kagenfels pour une proposition de reconstitution virtuelle.	1 PRT + 1 PFE	Porteur : T. Landes Etudiant : T. Benazzi
ALTAMETRIS, filiale de SNCF	Septembre 2017 à janvier 2018	Automatisation des procédures de contrôle des livrables topographiques issus de données acquises par drones dans les emprises ferroviaires	1 PRT + 1 PFE	Porteurs : T. Landes et P. Grussenmeyer ; Etudiante : M. Hinaux
TT Géomètres Experts	Septembre 2018 à janvier 2019	Recherche automatique de mobilier urbain dans des images 360 (<i>ladybug</i>)	1 PRT	Porteurs : T. Landes et H. Macher Etudiant : A. Picard
TOTAL	Septembre 2018 à janvier 2019	Mise à jour des spécifications techniques de TOTAL sur les acquisitions photogrammétriques et LiDAR par moyen aérien	1 PRT	Porteurs : T. Landes et P. Grussenmeyer Etudiant : V. Morel
PARERA	Février 2019 à septembre 2019	Recherche et développement d'outils automatiques/semi-automatiques pour la digitalisation sur du nuage de points	1 PFE	Porteurs : T. Landes et M. Koehl Etudiant : S.Vergnol
PARERA	Février 2019 à septembre 2019	Développement des processus de production et d'évaluation de maquettes numériques pour la rétro- conception, issues de nuages de points d'acquisitions mixtes (bâtiment).	1 PFE	Porteurs : T. Landes et M. Koehl Etudiante : M. Billiard
HAMEL Géomètres- experts	Février 2019 à septembre 2019	Optimisation des modes et méthodes d'acquisition et de traitement de levés de bâtiments par scanner 3D et valorisation de la donnée par maquette numérique	1 PFE	Porteurs : T. Landes et E. Alby Etudiant : V. Morel
Département du Bas-Rhin (château du Haut- Koenigsbourg)	Février 2019 à septembre 2019	Étude et mise en place de solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Koenigsbourg.	1 PFE	Porteur : T. Landes Etudiant : J. Robert
TT Géomètres Experts	Septembre 2019 à janvier 2020	Détection d'objets linéaires dans un nuage de points de voirie	1 PRT	Porteurs : T. Landes et H. Macher Etudiant : E. Barçon

DRAC Direction Régionale des Affaires Culturelles	Septembre 2019 à janvier 2020	Numérisation et modélisation d'une tour des Ponts-Couverts	1 PRT + 1 PFE	Porteurs : T. Landes et H. Macher Etudiants : Durieux F. et Combe J.-L.
TOTAL des montants issus de contrats de R&D de PRT ou PFE (depuis 2006) :			29 contrats	Porteur : T. Landes + étudiants Insa

4. Activités ADMINISTRATIVES au sein de l'INSA Strasbourg

Les responsabilités citées ici concernent la période depuis ma titularisation :

- **Responsable de la Plateforme Topographie de l'INSA** de Strasbourg de 2012 à 2015. La plateforme met à disposition des ressources pour la formation initiale des élèves ingénieurs topographes de l'INSA de Strasbourg (ou des étudiants en Masters co-habilités avec l'INSA), la formation continue, la réalisation avec accord de co-encadrement de Projets de Fin d'Etudes (PFE) ou de Projets de Recherche Technologique (PRT), la conduite d'études R&D, le conseil/expertise. Elle favorise les transferts et la réalisation de prestations de R&D vers le milieu industriel ou d'autres entités internes ou externes à l'INSA. Elle gère les recettes provenant de conventions de PFE ou PRT signées (par l'ensemble des enseignants de la spécialité) avec des entreprises, en échange d'une collaboration scientifique.
- **Responsable de la Spécialité Topographie** de l'INSA de Strasbourg (depuis 2015) : gestion niveau pédagogique et administratif de la formation de 145 étudiants environ, en Bachelor, Master 1, Master 2 et master IRIV
- **Responsable du budget de la Spécialité Topographie** depuis 2015 (pour déplacements d'étudiants, d'enseignants).
- **Référent** pédagogique du nouveau parcours Architecte -Ingénieur Topographe depuis septembre 2017
- **Responsable de la Plateforme Topographie** de l'INSA de Strasbourg de 2012 à 2015. La plateforme met à disposition des ressources pour la formation initiale des élèves ingénieurs topographes de l'INSA de Strasbourg (ou des étudiants en Masters co-habilités avec l'INSA)
- **Membre élu du Conseil Scientifique** de l'INSA de Strasbourg (de 2015 à 2019)
- **Membre élu du Conseil des études** de l'INSA de Strasbourg (06/2003 à 05/2007 et de 06/2011 à 05/2015). Représentante du corps des maîtres de conférences.

ANNEXES

A.1. Systèmes de lasergrammétrie et domaines d'utilisation

Scanning System		Usage	Typical Accuracies (mm)	Typical Range (m)
Triangulation	Rotation stage	Small objects taken to scanner. Replica production	0.05	0.1 – 1
	Arm mounted	Small objects. Lab or field. Replica production	0.05	0.1 – 3
	Tripod mounted	Small objects in the field. Replica production	0.1 – 1	0.1 – 2.5
	Close range handheld	Small objects. Lab. Replica production	0.03 – 1	0.2 – 0.3
	Mobile (handheld, backpack)	Awkward locations eg building interiors, caves	0.03 – 30	0.3 – 20
Pulse (TOF)	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawings, analysis, 3D models	1 – 6	0.5 – 1000
	Mobile (vehicle)	Streetscapes, highways, railways. Drawings, analysis, 3D models	10 – 50	10 – 200
	UAS	Building roofscapes, archaeological sites. Mapping and 3D models	20 – 200	10 – 125
	Aerial	Large site prospecting and mapping	50 – 300	100 – 3500
Phase	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawing, analysis, 3D models	2 – 10	1 – 300

Tableau 7 : Principaux systèmes de lasergrammétrie, domaines d'utilisation et précision de mesure attendue dans l'intervalle de portée indiquée (Boardman & Bryan, 2018)

A.2. Géoréférencement direct et indirect

Deux approches de géoréférencement sont envisageables : le géoréférencement **direct** et **indirect** (voir Figure 52 ci-dessous).

- Le géoréférencement **direct** permet de produire directement à l'issue de l'acquisition, sans post-traitement, les coordonnées des points du nuage exprimées dans le référentiel général choisi. Il n'est possible qu'avec des scanners laser conçus pour être centrés sur un point connu et orientés à partir de cibles placées sur des repères. Le scanner peut ainsi prendre la place d'un tachéomètre au sein d'un cheminement polygonal. Ces scanners sont adaptés aux habitudes des géomètres. Cette approche exige un minimum de compétences en topographie.
- Lorsque le nuage est transformé dans le référentiel général en fin d'acquisition, on procède au géoréférencement **indirect**, à l'issue de l'étape de consolidation. Un réseau de points connus en coordonnées dans les deux référentiels est toutefois indispensable afin de procéder au levé des points permettant de calculer les paramètres de transformation du système local au système général. Ces points « homologues » peuvent être des éléments remarquables de la scène numérisée, ou plus communément des cibles réfléchissantes (cibles planes, sphériques) aux caractéristiques physiques bien identifiées par le logiciel de traitement des données.

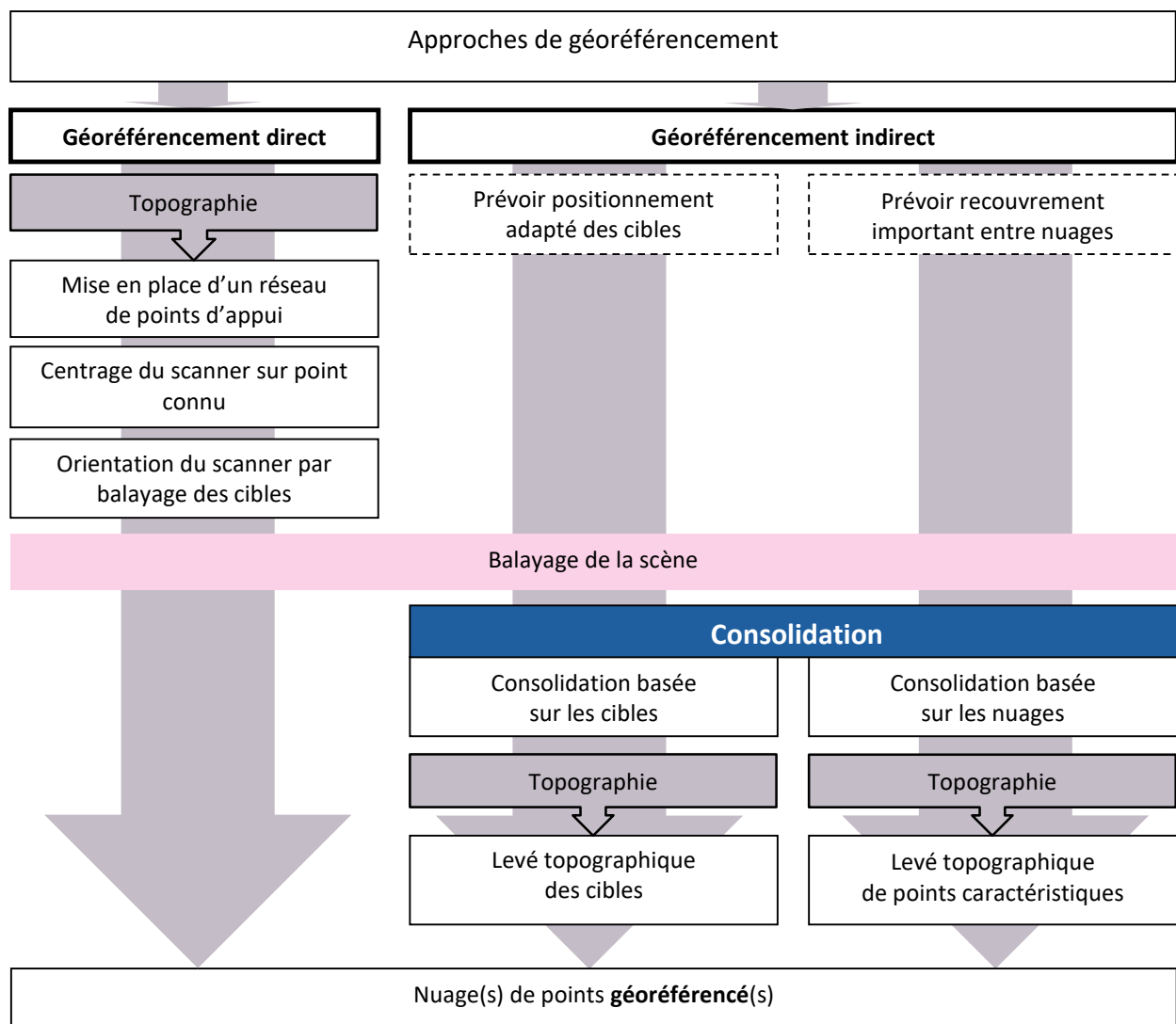


Figure 52 : Approches de géoréférencement de nuages de points acquis par scanner laser terrestre (inspiré de Lerma Garcia et al., 2008)

A.3. Approche de recalage global de nuages de points hétérogènes

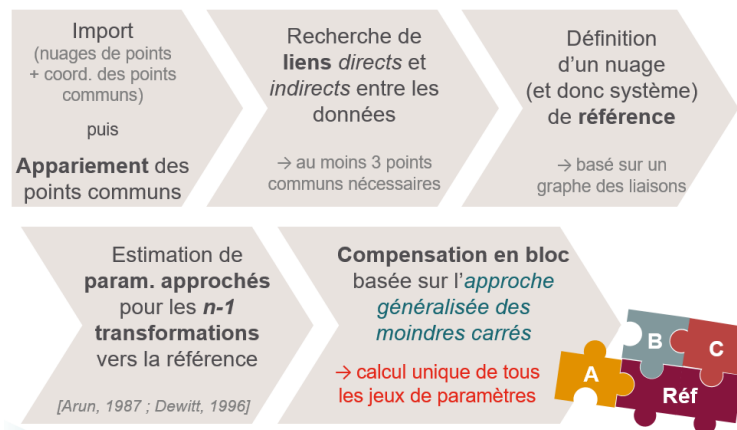


Figure 53 : Approche de recalage global mise en place dans le cadre de la thèse (Lachat, 2019)

A.4. Approches frontières et approches régions

Alors que certains auteurs distinguent les approches **globales** (seuillages d'histogrammes, K-means, clustering), des approches par **régions** (croissance de région, markoviennes) et par **frontières** (contours actifs) comme par exemple Caloz et Collet (2001) ou encore Descoteaux (2013), Coquerez et Philipp (1995) rassemblent toutes les méthodes en deux catégories : **une approche « frontières »** (extraction de contours, c'est-à-dire de discontinuités) et **une approche « régions »** (recherche de similitudes).

- La notion de « **frontière** » est associée à une discontinuité entre les propriétés de deux ensembles connexes de points ou à une variation d'intensité. *A nouveau, cette discontinuité, souvent spectrale, en imagerie, peut être étendue au niveau spatial ou temporel.* L'approche « frontière » regroupe les techniques de détection de contours, puisqu'elle met en évidence des « sauts d'amplitude » ou des variations locales d'intensité. Avec les filtres entrant dans cette famille de méthodes, une étape de fermeture de contours est à considérer.
- La notion de « **région** » fait référence à des groupements de points ayant des propriétés communes. Les méthodes de l'approche région appliquées à l'image numérique aboutissent directement à une partition de l'image, chaque pixel étant affecté à une région unique.

Coquerez et Philipp (1995) classent dans **l'approche frontière** :

- les méthodes dérivatives (opérateurs de Prewitt et de Sobel, laplacien, Canny),
- les méthodes surfaciques (Haralick),
- les méthodes morphologiques (gradient morphologique),
- les méthodes markoviennes (utilisation de champs de Markov en vision par ordinateur);

et dans **l'approche région** :

- les méthodes de classification préalables à une segmentation (seuillages, classificateur bayésien, classification supervisée ou non supervisée, etc.)

Les approches frontières, qui ont pour but d'extraire des contours, sont comparables aux approches visant à extraire des arêtes ou des contours sur la base du nuage, dans lequel le calcul des normales

aux points a préalablement été opéré. Les méthodes de l'approche « région », quant à elles, viseront à associer les points suivant leur similarité, c'est-à-dire suivant des caractéristiques similaires en terme de géométrie, voire d'intensité ou autre attribut associé au point.

A.5. Segmentations basées sur l'image

La segmentation d'image a pour but de regrouper les pixels entre eux suivant des critères spécifiques. Une fois agrégés, les pixels constituent des régions qui partitionnent ainsi l'image en groupes homogènes de pixels.

- **Approches de segmentations basées sur les régions** : croissance de régions, algorithmes de décomposition/fusion de régions (*split-and-merge*), morphologie mathématique
- **Approches de segmentations basées sur les contours ou frontières** de régions : qui s'appuient sur des opérateurs de convolution généralement (filtres de Canny, Deriche, Laplace, Prewitt, Sobel, etc.)
- **Approches de segmentations basées sur une agrégation** (de pixels ou de régions) sur un seuillage d'histogrammes ou agrégation par K-moyennes ; elles visent à construire n classes de caractéristiques similaires (classes d'intensité, de couleurs).
- **Approches hybrides** combinant une ou plusieurs approches déjà citées.

La recherche d'un état de l'art sur les méthodes de **segmentation de points 3D** ouvre un vaste champ d'investigations, car la catégorisation de très nombreuses méthodes est différente suivant le domaine d'application, les objectifs recherchés, le domaine d'activité des auteurs, etc. Les travaux de thèse de Chaperon (2002) ou de Girardeau (2006) présentent de façon exhaustive les solutions de segmentation de nuages de points.

A.6. Approches de classification supervisée

Learning principle	Involved classifiers
<i>Instance-based learning</i>	- <i>Nearest Neighbor (NN) classifier</i>
<i>Rule-based learning</i>	- <i>Decision Tree (DT)</i>
<i>Probabilistic learning</i>	- <i>Naïve Bayesian (NB) classifier</i> - <i>Linear Discriminant Analysis (LDA)</i> - <i>Quadratic Discriminant Analysis (QDA)</i>
<i>Max-margin learning</i>	- <i>Support Vector Machine (SVM)</i>
<i>Ensemble learning</i>	- <i>Random Forest (RF)</i> - <i>Random Fern (RFe)</i> - <i>AdaBoost (AB)</i>
<i>Deep learning</i>	- <i>Multi-Layer Perceptron (MLP)</i>

Figure 54 : Exemples de classificateurs supervisés (Weinmann, 2019)

A.7. Reconstruction 3D détaillée du feuillage d'un arbre

Sur la base d'une maquette présentant le tronc et les branches d'un arbre, grâce à des relations allométriques (statistiques relatives aux feuilles, leur position, distribution, inclinaison, orientation, etc.) issue de mesures effectuées sur un échantillon de plusieurs pousses feuillées, l'INRA de Clermont-Ferrand est capable de produire un modèle feuillé détaillé (Figure 55). L'investissement en temps exigé par la mise en place des relations allométriques freine la généralisation de cette approche et la limite à des arbres isolés, sans aucun objet alentour, car la présence de détails supplémentaires impacterait trop fortement le nombre d'échanges dans la simulation et par conséquent les temps de calculs. Toutefois, il est évident qu'une maquette détaillée permet d'obtenir des résultats plus réalistes sur le fonctionnement d'un arbre qu'une maquette globale (Bournez, 2017).

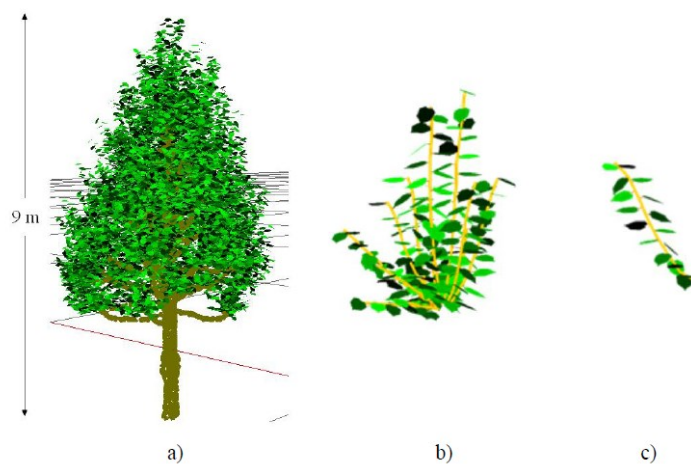


Figure 55 : Reconstruction 3D détaillée du feuillage sur la base des pousses modélisés précédemment pour un tilleul argenté sur : a) l'arbre entier ; b) une extrémité de branche et c) une pousse

A.8. Résolution, pas, exactitude et précision : quelques rappels

Résolution et pas

Un scanner laser terrestre est un appareil qui collecte des mesures de distance par incréments égaux d'arc et produit une image de distance (Lichti, 2019). La **résolution angulaire** caractérise la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes.

Le balayage laser s'effectue selon une trame spécifique à définir au moment de l'acquisition. L'utilisateur fixe le **pas angulaire** vertical et horizontal de son choix (généralement identique dans les deux plans). Le plus petit pas angulaire disponible est appelé **résolution angulaire**.

Par exemple, si un scanner dispose d'une résolution angulaire de 0.01° , soit $\phi_{i+1} - \phi_i = 0.01^\circ$ avec $\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ et $\theta_{i+1} - \theta_i = 0.01^\circ$ avec $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, à la surface de l'objet, ce pas angulaire se traduira par 100 points par degré. Dans la pratique, l'utilisateur a plus de facilité à apprécier des écarts en termes de distances qu'en termes d'angles. L'exemple précédent se traduit ainsi par un espacement entre points de 2 cm à 100 m. Cela nous amène à définir la notion de résolution spatiale. La **résolution spatiale d'un scanner laser terrestre** représente le plus petit espacement entre deux points successifs que l'on puisse mesurer à l'aide du scanner laser à une distance objet-scanner fixe.

Concrètement, pour acquérir un nuage de points, l'utilisateur fixe un pas de balayage spécifique, soit

en termes de pas angulaire, soit en termes d'un nombre de points/cm, à une certaine distance du scanner. Au-delà de cette distance, le pas sera évidemment plus grand et en-deçà, plus petit. Par exemple, si l'utilisateur souhaite disposer d'un nuage de points présentant 1 point/cm à une portée de 10 m, le nuage de points sera moins dense sur les objets situés au-delà de 10 m.

Notion de précision

L'écart-type d'une variable aléatoire l s'écrit : $\sigma = \sqrt{E\{(l - E(l))^2\}}$

Il représente la dispersion des mesures l autour de leur espérance et est habituellement utilisé comme **critère de précision** (*precision* en anglais). Donc un écart-type qualifie la **précision** d'une série de mesures par rapport à sa valeur la plus probable. Si on note L l'espérance de l ou encore la valeur la plus probable de l , l'écart-type s'écrit aussi :

$$\sigma = \sqrt{E\{(l - L)^2\}}$$

On considère souvent l'espérance mathématique comme le centre de la variable aléatoire, c'est-à-dire la valeur autour de laquelle se dispersent les autres valeurs. Si la loi de probabilité est symétrique par rapport à M , alors $E(X) = M$ donc $E(l) = L$ où L est la moyenne arithmétique dans le cas d'observations directes de même précision (valeur la plus probable).

Si la valeur de L est calculée par moyenne d'observations directes, on dira que les v_i sont des écarts apparents et l'écart-type se calcule alors par la formule de Bessel :

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Dans les expressions précédentes, n représente le nombre de mesures de l .

Cette grandeur, au carré, caractérise la variance et intervient dans la propagation de la variance (Mikhail, 1982), lorsque l'on souhaite par exemple analyser l'effet d'imprécisions de mesures (angles et distances) sur le résultat que sont les coordonnées des points du nuage.

Notion d'exactitude

L'erreur moyenne quadratique d'une mesure représente la dispersion des mesures l autour de leur valeur vraie et est habituellement utilisée comme **critère d'exactitude** (« *accuracy* » en anglais). Donc une erreur moyenne quadratique (*emq*) qualifie l'**exactitude** d'une série de mesures par rapport à une valeur vraie $\bar{L}$. Elle se calcule à partir d'écarts vrais (e_i) et d'un nombre d'observations noté n :

$$mq_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$$

Donc : « Un résultat / instrument peut être précis sans pour autant être exact ! »

L'emq peut comporter une composante systématique ($e_i - v_i = a$), ce qui n'est pas le cas de σ . Les écarts individuels e_i peuvent en effet être composés d'erreurs systématiques et accidentelles $e_i = a + v_i$. On peut donc écrire la relation suivante :

$$emq = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2}$$

où β représente un biais à caractère systématique

La Figure 56 : Ecart entrant dans les calculs d'écart-type et d'erreur moyenne quadratique illustre les écarts apparents ou écarts à la valeur la plus probable (v_i) et les écarts vrais (e_i) dans le cas de points ajustés par une droite.

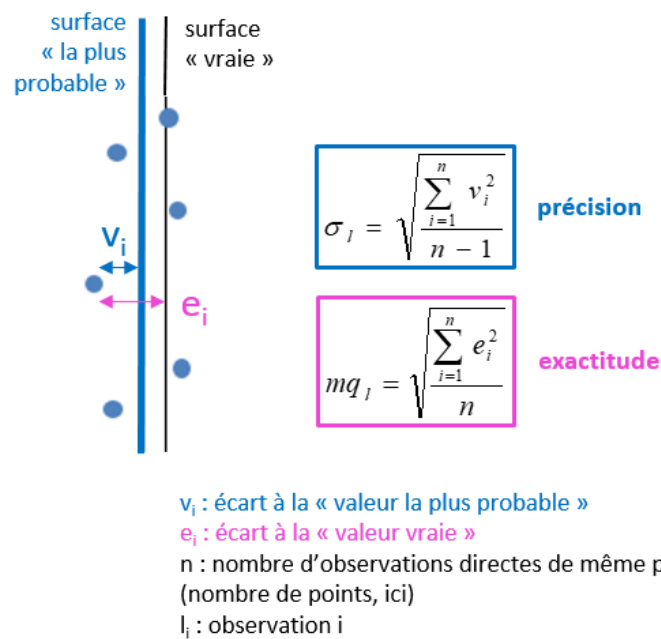


Figure 56 : Ecart entrant dans les calculs d'écart-type et d'erreur moyenne quadratique

En l'absence de systématismes (corrélations entre observations), **écart type** et **erreur moyenne quadratique** sont sensiblement identiques et l'emq pourra se calculer comme l'écart-type à condition de disposer d'un échantillon d'observations de taille significative.

A.9. Comparaison d'outils de reconstruction 3D d'arbres

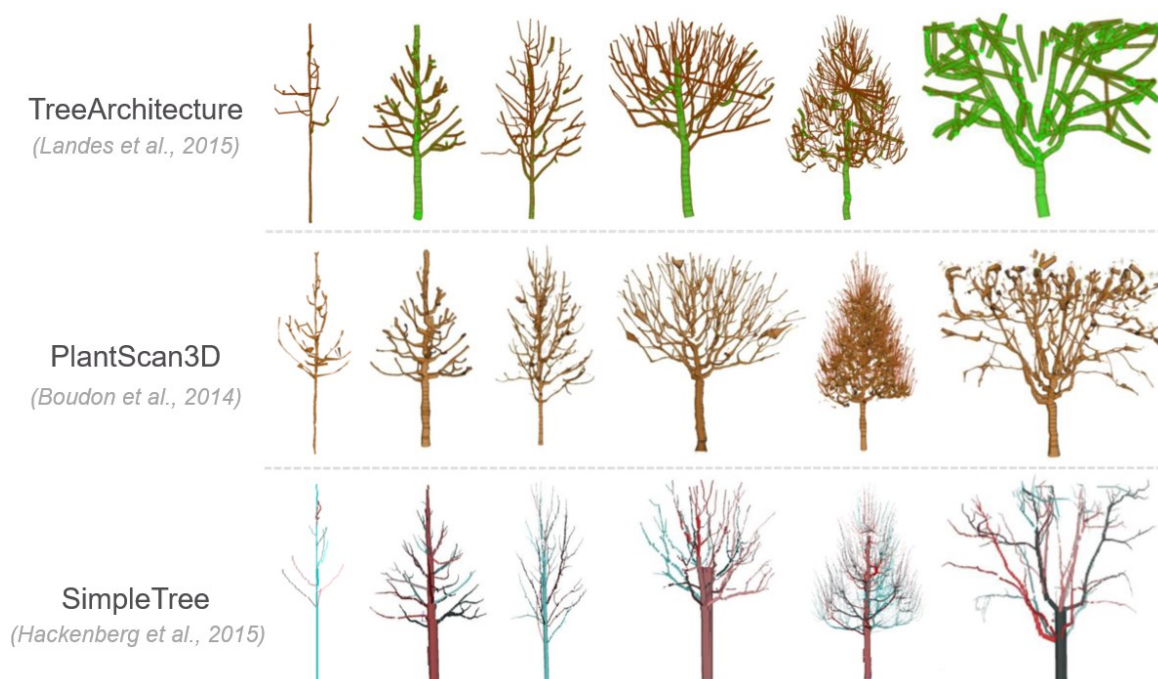


Figure 57 : Maquettes 3D produites par TreeArchitecture (développé en interne) et deux outils disponibles en open source, PlantScan3D et SimpleTree

A.10. Niveaux de détails, norme britannique et américaine

Niveaux de détail proposés par le standard CityGML :



Figure 58 : Les cinq LODs de CityGML 2.0. Le détail géométrique et la complexité sémantique augmentent avec chaque niveau (Biljecki, F., 2017)

Bien que les LOD, tels que proposés par le standard CityGML, répondent aux exigences de nombreuses applications, des lacunes ont été soulevées, entre autres que les niveaux sont discrets, leur nombre est limité alors qu'ils devraient prendre en compte les besoins de l'application et de l'utilisateur (Biljecki, F., 2017).

Normes britanniques et américaines

Dans la littérature sont souvent mentionnés deux documents ou normes :

- le PAS 1192-2, convention britannique de 2013, qui définit des LoD de 1 à 5
- l'AIA G202-2013, convention américaine, de l'*American Institute of Architects*, qui définit des LOD de 100 à 500.

Les deux standards se rejoignent, comme le montre le tableau ci-dessous, et subdivisent les LOD en niveaux de développement des attributs graphiques (niveau de développement d'objet/attributs géométriques (LOG)) et non graphiques (niveau de développement d'objet/attributs d'information (LOI)). Sources : Maiezza (2019) et (De Maestri, 2017).

CONVENTION UK = PAS 1192-2	CONVENTION US = AIA G202-2013
LOD 1	---
LOD 2	LOD 100
LOD 3	LOD 200
LOD 4	LOD 300
LOD 5-6	LOD 400
LOD 7	LOD 500

1 Le texte intégral (en anglais) est disponible gratuitement à l'adresse <http://shop.bsigroup.com/forms/PASs/PAS-1192-2/>.

Tableau A.10 : Comparaison des conventions britannique et américaine

D'après Objectif BIM²¹, les niveaux de détails américains (LOD 100 à LOD 500) se sont imposés en France (Figure 59). Ils reflètent une définition générique du contenu du modèle ainsi que les utilisations prévues du modèle pour le LOD concerné. Des informations non graphiques peuvent être attachées aux éléments à tous les niveaux. Ainsi, les éléments du modèle peuvent être représentés par un symbole ou de manière générique (LOD 100), représentés graphiquement d'une manière générique en tant qu'objet avec dimensions, quantités, formes, positions et orientations approximatives (LOD 200), représentés graphiquement d'une manière spécifique en tant qu'objet avec dimensions, quantités, formes, positions et orientations spécifiques aux éléments (LOD 300), ou encore en y ajoutant des informations sur le détail, la fabrication, l'assemblage et l'installation contenues dans les éléments (LOD 400). Enfin, le LOD 500 correspond au modèle « tel que construit » et vérifié sur place, qualifié d'« avatar numérique » (bimftp.com).

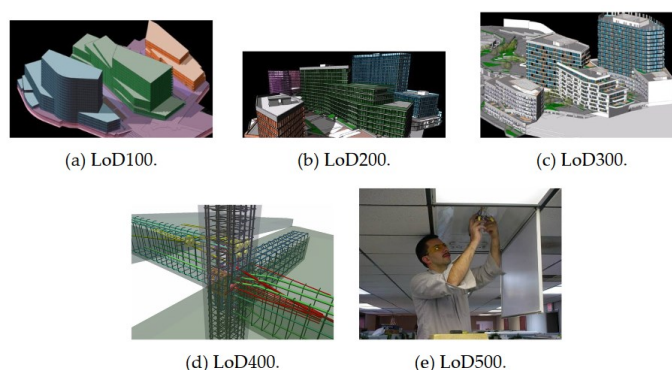


Figure 59 : Exemples de niveaux de développement en BIM (Biljecki, F., 2013)

²¹ Objectif BIM, www.objectif-BIM.com

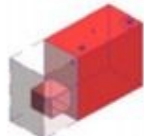
LOD 100 Conceptual	LOD 200 Approximate geometry	LOD 300 Precise geometry	LOD 400 Fabrication	LOD 500 As-built
				
The Model Element may be graphically represented in the Model with a symbol or other generic representation , but does not satisfy the requirements for LOD 200. Information related to the Model Element (i.e. cost per square metre, etc.) can be derived from other Model Elements.	The Model Element is graphically represented in the Model as a generic system, object, or assembly with approximate quantities, size, shape, location, and orientation.	The Model Element is graphically represented in the Model as a specific system, object, or assembly accurate in terms of quantity, size, shape, location, and orientation.	The Model Element is graphically represented in the Model as a specific system, object, or assembly that is accurate in terms of quantity, size, shape, location, and orientation with detailed, fabrication, assembly, and installation information .	The Model Element is a field verified representation accurate in terms of size, shape, location, quantity, and orientation.
	Non-graphic information may also be attached to the Model Element.	Non-graphic information may also be attached to the Model Element.	Non-graphic information may also be attached to the Model Element.	Non-graphic information may also be attached to the Model Element.

Figure 60 : LOD 100 à LOD 500 suggérés par Objectif BIM

Des recherches sont menées sur une révision de ces LOD, comme par exemple dans les travaux de Verdi et al. (2015). À partir d'ensembles de données brutes telles que des maillages de surface, ils classent la scène urbaine 3D en quatre classes significatives : bâtiments, arbres, toits et façades, effectuent un filtrage et une simplification pour la génération de LOD. De façon plus générale, indépendamment des données en entrée, Biljecki (2017) s'attache dans sa thèse à améliorer les spécifications décrivant les LOD. Il propose une liste de 6 métriques (quantifiables) pour décrire les modèles 3D de bâtiments. Ces mesures peuvent être appliquées séparément à chaque objet dans une étendue spatiale (ou un ensemble d'objets) ou à une classe d'objets de la ville (classe thématique). Ces six métriques sont :

1. La **présence** ou non des objets ou éléments : propriété binaire, ce critère est exprimé par une liste d'objets à modéliser (bâtiments seuls ou arbres seuls ou bâtiments et arbres)
2. La **complexité géométrique** de l'objet (ou sa finesse ou encore sa résolution) relativement à l'objet réel.
3. La **dimensionnalité** : les modèles 3D impliquent une description en volumes, or des primitives de dimensions inférieures peuvent être considérées également (par exemple, un modèle 3D de bâtiment sous forme de volume peut contenir des fenêtres modélisées comme des polygones et des cheminées comme des droites verticales).
4. La **texture** (« *appearance* ») : particulièrement appréciée en archéologie, le texturage d'un modèle 3D est réalisé par placage d'images sur le modèle géométrique et vient compléter ce dernier par des éléments graphiques qui n'ont pas été acquis géométriquement ou sémantiquement.
5. La **cohérence spatio-sémantique** : décrit la granularité des sémantiques dans un modèle et sa correspondance avec la géométrie, vu qu'il est possible d'avoir différents LOD de sémantiques pour la même géométrie. Par exemple, un modèle d'arbre, décrit par deux entités géométriques que sont le bois et la canopée, peut être affecté à la classe « arbre » ou à deux classes « bois » et « canopée ».
6. Les **données attributaires** : dépendantes de l'application (année de construction, usage des pièces de bâtiment, matériau du toit et des façades, etc.)

Ces métriques sont exprimées au travers de fonctions discrètes (présence ou non d'éléments) ou continues (résolution d'une image utilisée pour le texturage). Comme le souligne l'auteur, son approche de LOD a été jugée intéressante pour spécifier les exigences en matière de données, par exemple dans le cadre de cadastre 3D et BIM pour les tâches d'aménagement du territoire.

A.11. Niveau de connaissance versus nature de l'élément restitué

Niveau de connaissance	Simple supposition	faible	modéré	fort	très fort
Nature de l'élément					
Mur d'un étage donné (exemple mur L5, niveau 3)	Aucun élément conservé ni iconographie/document existant, mais supposé pour des nécessités défensives, structurelles ou formelles Existence supposée, pour des nécessités ou évidences : - défensives, - structurelles, - formelles (cohérence du plan, de la coupe...), - au regard de comparaisons avec des éléments contemporains (ex : tous les pans de bois et structures légères, pignon logis ...)	Trace d'élévation de faible hauteur (inférieure à 1m) conservée, ne donnant : - Aucune donnée sur sa hauteur initiale - Aucune donnée sur la forme/fonction du mur On considère ici une élévation faible, inférieure à 1m, ne permettant pas de différencier une base de pan de bois maçonnée d'un simple parapet ou d'un mur plus élevé.	Existence de l'étage est avérée en élévation à plus de 1m, mais : - ni sa hauteur initiale - ni sa forme - ni fonction ne sont connues mais le mur apparaît avoir eu une probable hauteur d'étage complète permettant de masquer/abriter un homme des tirs ennemis	Existence avérée avec des incertitudes: hauteur incertaine mais forme/fonction connue (exemples :- pignon ouest L1 donné par schéma des gouttières - tous les murs d'enceintes ou parapets, ayant du avoir au moins une hauteur d'homme ; leur sommet avec tuiles ou meurtrières serait quant à lui plus aléatoire)	Existence avérée avec hauteur connue ou bien estimable et forme/fonction connue existence éventuelle d'une iconographie ou documents attestant de l'existence de cet élément ou mur conservé (exemples : Murs Logis RDC)

Figure 61 : Aperçu du tableau d'évaluation des incertitudes de restitution constitué pour un élément de type mur (château du Kagenfels)

Au travers de cette démarche, nous avons été confrontés à la difficulté, pour chacun des éléments inventoriés de représenter d'une part une incertitude relative à sa géométrie (dimensionnement) et d'autre part une incertitude relative à son positionnement sur la structure (ex : taille de l'encadrement de fenêtre et son positionnement sur le modèle reconstruit). L'idée de jouer sur un code couleur pour représenter l'incertitude géométrique et sur l'opacité pour représenter l'incertitude de position réduisait la facilité de lecture.

Nous avons finalement fait le choix de fusionner les incertitudes géométriques et les incertitudes de positionnement, du fait de leur forte corrélation, en proposant une classification hiérarchique permettant d'organiser les données en fonction de leur **niveau d'incertitude (LoU)**. Il prend en compte cinq niveaux d'incertitudes allant de simples suppositions (LoU le plus élevé) à un niveau de connaissance très élevé (LoU le plus bas). Afin de visualiser ces LoU, nous avons appliqué au modèle 3D dénué de texture, une palette de couleurs allant du vert pour les éléments mesurés sur le terrain (LoU bas) au rouge pour les éléments les plus incertains (LoU élevé), comme suggéré par Dell'Unto et al. (2013).

A.12. Enseignements dispensés en 2019/2020

Le tableau ci-dessous recense les enseignements dispensés en 2019/2020, à titre indicatif.

Enseignements dispensés en 2019/2020	Niveau	Type de formation	Nature (h éq. TD)
Topométrie 2	Licence (3 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	6h C + 7.5h TD (16.5 h éq. TD)
Topométrie 3	Licence (3 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	7.5h C + 6h TD (17.25h éq. TD)
DAO 2 (applicatif métier)	Licence (3 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	24 h TD (24h éq. TD)
Calculs d'erreurs et compensation 1	Master I (4 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	19.5hC+10.5hTD+12h P (64h éq. TD)
Calculs d'erreurs et compensation 2	Master I (4 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	10.5h C+4.5h TD (20,25h éq. TD)
Calculs d'erreurs et compensation 3	Master II (5 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	7.5h C+6h TD (17.25h éq. TD)
Télédétection 2/ Laser et Radar	Master I (4 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	6h C+6h P (21h éq. TD)
Initiation au processus BIM	Master I (4 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	19h TD (19h éq. TD)
Imagerie et Modèles virtuels	Master II (5 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	10h P+14h TP (39h éq. TD)
Initiation à la recherche	Master II (5 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	1.5 h TD (1.5 h éq. TD)
Projets de recherche technologique (PRT)	Master II (5 ^{ème} année ingénieur)	Formation initiale	20h TD (20h éq. TD)
Projets de fin d'études (PFE) / stages de master II	Master II (stage)	Encadrement de PFE	28h TD (28h éq. TD)
TOTAL des heures d'enseignement dispensées en 2019/2020 à l'INSA			288 h éq. TD

A.13. Enseignements dispensés dans d'autres établissements

Enseignements	Année(s) scolaire(s)	Lieu, établissement	Niveau	Type de formation	Nature	Effectifs (nbre d'étudiants)	Volume en h. de face à face
Télédétection spatiale	2000/2001 2001/2002 (1 semaine / an)	IAV Hassan II (Institut Agronomique et Vétérinaire), Rabat, Maroc	Master II	Formation initiale	20h C + 8h TP	30	36h x 2
Télédétection	2003/2004 2004/2005 2005/2006 2006/2007	ESTP (Ecole Spéciale des Travaux Publics), Paris	Master II	Formation initiale	9h C + 4h TP	45	17h x 4
Image scientifique	2005/2006 2006/2007	Université Nancy 2 – IUT Nancy-Charlemagne	Licence professionnelle	Formation initiale	6h C	30	6h x 2
Photogrammétrie - Lidar – lasergrammétrie	2009/2010 2010/2011 2011/2012 2012/2013	Faculté de Géographie et d'aménagement, Université de Strasbourg	Master I, Observation de la Terre et Géomatique	Formation initiale	3h C + 4h TD	17	7h x 4
Classification d'images	2005/2006 2006/2007	Faculté de Géographie et d'aménagement, Université de Strasbourg	Master II	Formation initiale	6h C/TD	15	6h x 2
TOTAL des heures d'enseignement dispensées dans une autre université :				193 heures			

A.14. Formations continues dispensées en imagerie, lasergrammétrie, mesures topographiques

Financier	Dates	Public concerné
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées	août 2011 (une demi-journée)	10 personnes (ingénieurs et techniciens)
Union Nationale des Géomètres Experts	décembre 2012 (une demi-journée)	12 géomètres experts de diverses régions françaises
Ordre des Géomètres Experts – Région Auvergne-Rhône-Alpes	mai 2017 (une journée)	15 techniciens topographes et géomètres experts de la Région d'Auvergne-Rhône-Alpes
Ordre des Géomètres Experts national	25 juin 2015 (une journée)	25 géomètres experts , dans le cadre des Universités d'été de l'Ordre des Géomètres-Experts, à l'ESGT, Le Mans
TOTAL des heures de formation continue		24 heures