



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

■ Tania LANDES

Un maître de conférences possède la double casquette d'enseignant et de chercheur. L'habilitation à diriger les recherches (HDR) est un diplôme auquel il/elle peut candidater après plusieurs années de recherche et d'encadrement. Même si j'ai eu l'occasion de réaliser des enseignements dans d'autres établissements en France et à l'étranger, je les dispense au quotidien à l'INSA Strasbourg en spécialité Topographie. L'équipe de recherche dont je suis membre est l'équipe TRIO (Téledétection, Radiométrie et Imagerie Optique) du Laboratoire ICube (Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, UMR7357).

■ MOTS-CLÉS

Recherche, nuages de points, acquisition, segmentation, modélisation, 3D

La recherche avec des doctorant(e)s et des chercheurs

Au travers des thèses que j'ai eu la chance de co-encadrer (voir tableau 1), j'ai participé à la création et la mise en œuvre de chaînes de traitements de nuages de points acquis par LiDAR aéroportés, LiDAR terrestres 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 segmentations 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 nuages 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 par Georges Najjar et Pierre Kastendeuch, géographes et climatologues. Tous deux sont à l'origine de la création d'un réseau de plus d'une vingtaine de stations

Après 20 années d'activités à l'INSA Strasbourg, j'ai (enfin, diront certain(e)s) présenté mon habilitation à diriger la recherche le 1^{er} décembre 2020. Les membres du jury étaient Christian HEIPKE (*Leibniz Universität Hannover*, Allemagne), Rafika Hajji (Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc), François Goulette (Mines Paris Tech), Nadia Bahlouli (Université de Strasbourg, présidente du jury), Nicolas Paparoditis (ENSG – IGN – Université Gustave Eiffel, France), Laurent Polidori (alors au Centre d'études spatiales de la biosphère), Georges Najjar (Université de Strasbourg) ainsi que Pierre Grussenmeyer, mon garant scientifique. Je renouvelle mes remerciements à leur égard.

Le mémoire est disponible en archive ouverte à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03210034>. Je souhaite saisir l'occasion qui m'est offerte par la revue XYZ d'en reprendre ici quelques extraits.

Comme attendu par l'école doctorale 269 Mathématiques, sciences de l'information et de l'ingénieur (MSII), 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. Les nombreux projets de fin d'études venus nourrir ces travaux prouvent que

nos recherches s'adosent assez 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*). L'article "La formation d'ingénieur géomètre-topographe à l'INSA Strasbourg (2020)" retrace ces évolutions (Landes et al., 2020, XYZ n° 162). Le contenu de mes enseignements en lasergrammétrie a été résumé dans les revues XYZ 128 et XYZ 129 (Landes et al., 2011a et 2011b).

Mes travaux de recherche se focalisent sur la thématique du développement d'outils de segmentation et 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 simultanément 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.



► météorologiques distribuées dans Strasbourg et ses environs et effectuant, en continu, des mesures d'échanges radiatifs et de chaleur depuis bientôt dix ans. L'article "modélisation 3D d'arbres pour comprendre le climat urbain – Un projet multidisciplinaire ambitieux" (Landes et al., 2014 XYZ n° 141) en présente un aperçu. L'ANR COOLTREES (2017-2021) et coordonnée par Marc Saudreau, chercheur à l'INRAE¹ de Clermont-Ferrand (équipe PIAF), a donné naissance à une collaboration très prometteuse.

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

¹ INRA : Institut national de recherche agronomique

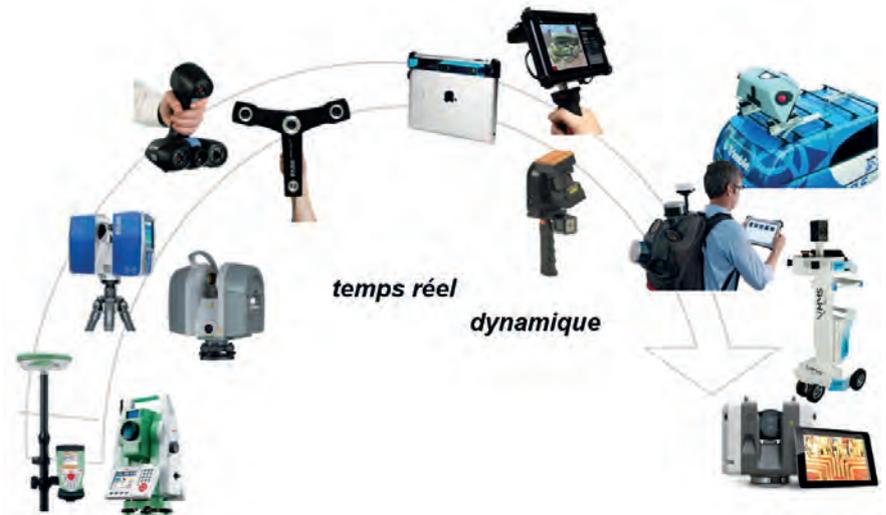


Figure 1. Diversité des instruments de mesures 3D : des instruments conventionnels aux systèmes dynamiques (inspiré de Lachat, 2019).

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 (figure 1), 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. Il nous semble intéressant de faire de la veille technologique non seulement sur des instruments destinés aux topographes (ex : SX10 de Trimble, Lachat et al., 2017a et Lachat et al., 2017b), mais aussi d'étudier la pertinence et la précision d'instruments issus du monde de la vision assistée par ordinateur. C'est ainsi que nous avons évalué des caméras RGB-D en les détournant de leur usage premier (jeux vidéo) quant à leur pertinence pour modéliser de petits objets, à courte portée. Une approche de calibration de l'appareil a dû être mise en place (Lachat et al., 2015). 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. Pour faciliter la reconnaissance, au sein du nuage, des éléments requis par le cahier des charges, plusieurs étapes préliminaires, chronophages (réalisées souvent

Nom Prénom Années	Titre de la thèse (consultables sur theses.fr)
TARSHA-KURDI Fayez (2004-2008)	Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés
BOULAASSAL Hakim (2006-2010)	Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres
HULLO Jean-François (2010-2013)	Consolidation de relevés laser d'intérieurs construits : pour une approche probabiliste initialisée par géolocalisation (CIFRE)
MOHAMED Mostafa (2009-2013)	<i>Quality Assessment of 3D building models in airborne digital photogrammetry</i>
MITTET Marie-Anne (2011-2015)	Caméras 3D pour la localisation d'un système mobile en environnement urbain (CIFRE)
MACHER Hélène (2014-2017)	Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants (CIFRE)
BOURNEZ Elena (2015-2018)	Étude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles
LACHAT Élise (2015-2019)	Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine
PHILIPPS Nathalia (en cours)	Étude 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 (CIFRE)

CIFRE = Conventions industrielles de formation par la recherche

Tableau 1. Les thèses co-encadrées.

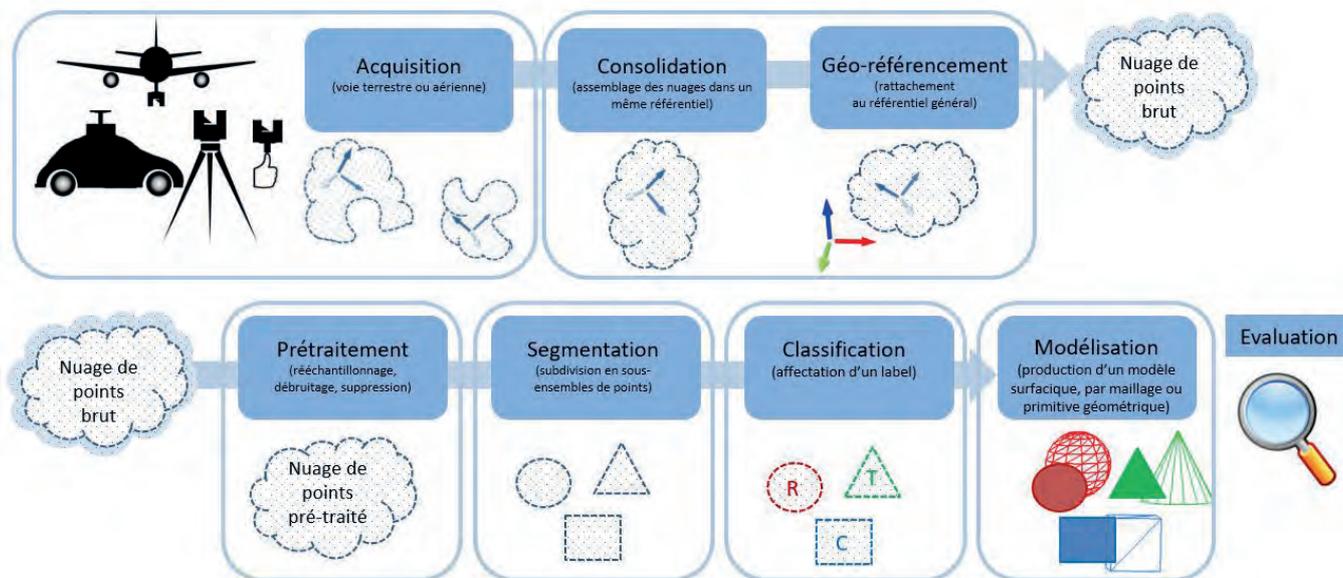


Figure 2. De l'acquisition de nuages de points à la production de modèles 3D : les phases clés.

manuellement), s'avèrent nécessaires. Le traitement de nuages de plusieurs millions de points reste extrêmement chronophage et fortement dépendant de l'objet d'intérêt, c'est pourquoi la recherche de l'automatisation de la chaîne de traitement de ces nuages est au centre des préoccupations dans de nombreux domaines, en plus de celui de la topographie (militaire, médical, industriel, etc.).

Les étapes essentielles dans le processus menant du nuage à un livrable de type plan 2D ou maquette numérique 3D peuvent être déclinées en six phases clés (figure 2) : 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 2, ont constitué les chapitres de mon mémoire et le lecteur retrouvera le détail dans celui-ci.

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. 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 2 est amenée à évoluer : l'étape de consolidation/géoréférencement pourra, à court terme, être intégrée à la phase d'acquisition.

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 manquant de transparence, nous ont incités à nous pencher sur la question de la consolidation de nuages de points (figure 3). Cette étape vise à rassembler, dans un même référentiel, de multiples stations.

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, nos développements ont particulièrement porté sur le volet de la segmentation appliquée à la détection de toits, de façades (figure 4) 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

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

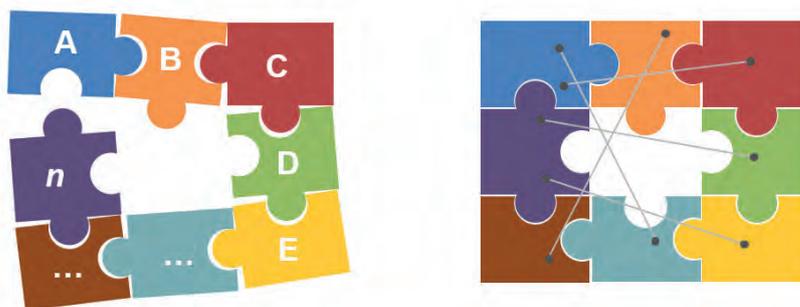


Figure 3. Consolidation de plusieurs nuages de points selon un recalage séquentiel par paires (à gauche) ou un recalage global (à droite), selon Lachat (2019).



Figure 4. Segmentation de façades en plans principaux (à gauche) et détection des points de contours (à droite), (Boulaassal et al., 2009).

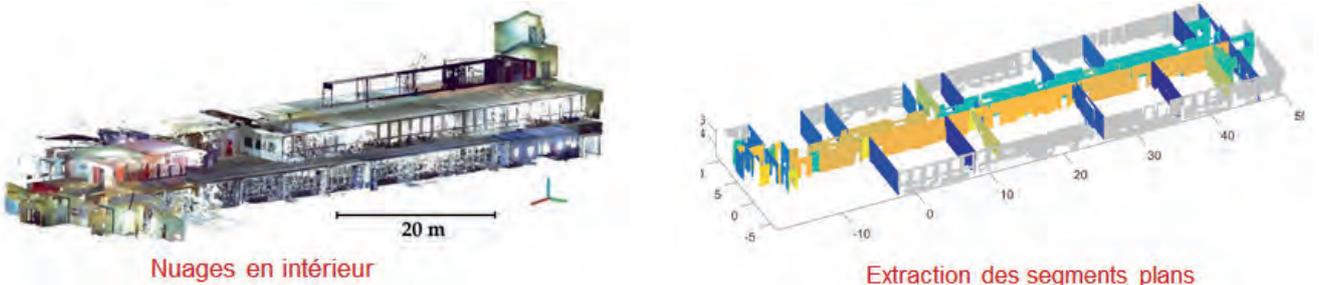


Figure 5. Étapes de la segmentation en étages, pièces, puis sol, plafond et mur (Macher et al., 2017).

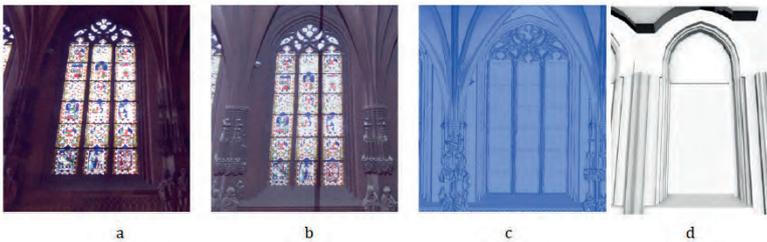


Figure 6. Exemple de modélisation géométrique : a) photographie ; b) nuage de points colorisé ; c) modèle maillé surfacique ; d) modèle basé sur des primitives géométriques (Landes et al., 2015).

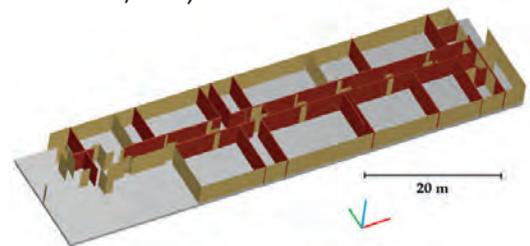


Figure 7. Reconstruction d'éléments en intérieur (sol, murs de façade, cloisons) au format .obj du 1^{er} étage du bâtiment C de l'INSA (Macher et al., 2017).



solutions de segmentation couplant la géométrie à la sémantique. Ainsi, en passant de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment, nous avons étendu les développements à l'extraction de sols, plafonds et murs (figure 5).

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. La modélisation consiste à convertir le nuage de points en un maillage surfacique ou en primitives géométriques (figure 6).

Les opportunités de collaborations m'ont amenée à participer au développement de solutions de modélisation, permettant d'une part de produire des maquettes numériques de bâtiment (figure 7) et dans un contexte de climatologie urbaine, de reconstruire en 3D des arbres urbains (figure 8).

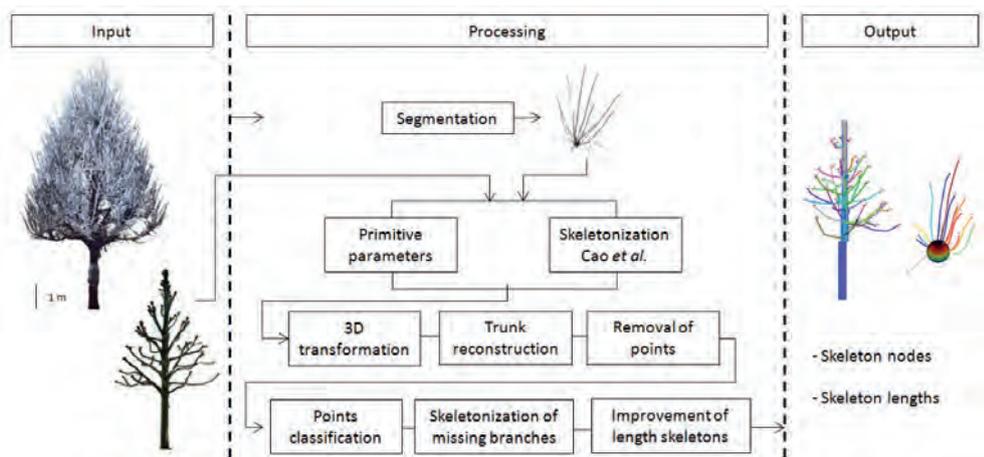


Figure 8. Algorithme de reconstruction 3D d'arbres (Bournez et al., 2016).

Conclusion

Les approches mises en place pour évaluer la qualité des données et des livrables ont fait l'objet d'un chapitre entier qu'il nous semble intéressant de

reprendre dans un prochain numéro d'XYZ.

Dans le processus du "scan-to-BIM", la segmentation essentiellement géométrique méritera d'être enrichie d'informations sémantiques pour



aboutir à une maquette numérique de bâtiment intelligente ou “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, aussi bien des bâtiments que des chaussées et des arbres. 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.

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 également au travers de conférences aux quatre coins du globe.

Mes perspectives de recherche se multiplient en permanence et assez naturellement, d’une part au contact de professionnels, faisant part de leurs besoins dans le cadre de PFE co-encadrés et, d’autre part, au contact de chercheurs avec lesquels la collaboration est enthousiasmante, en particulier sur des problématiques en lien avec la climatologie urbaine et la recherche de réponses au réchauffement climatique.

Mais pour faire avancer la recherche, il faut d’une part des supports financiers (difficiles à décrocher) et aussi et surtout de jeunes étudiant(e)s curieux et motivés, prêts à relever des défis au quotidien !

La recherche nous rappelle tous les jours que nous savons peu de choses. Mais nos petits savoirs mis bout à bout nous enseignent, comme le dit un fameux proverbe, qu’ensemble nous allons plus loin ! ●

Contact

Tania LANDES Maître de conférences
Coordinatrice de la Spécialité Topographie de l’INSA Strasbourg, Groupe Photogrammétrie architecturale et Géomatique / Équipe TRIO / Laboratoire ICube UMR 7357
tania.landes@insa-strasbourg.fr

Bibliographie

- 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>.
- 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*. 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.
- 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.
- 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).
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017a). *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.
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017b). *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>.
- LANDES, T., GRUSSEMEYER, P. (2011). *Les principes fondamentaux de la*

lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2). Revue XYZ de l’Association francophone de topographie (AFT), n° 128, p. 37-49.

LANDES, T., GRUSSEMEYER, 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 francophone de topographie (AFT), n° 129, p. 25-38.

Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., Guillemin, S. (2014). *Modélisation 3D d’arbres pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux*. Revue XYZ de l’Association francophone de topographie (AFT), XYZ n° 141, pp. 61-68, ISSN 0290-9057.

Landes, T., Kuhnle, G., Bruna, R. (2015). *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., Koehl, M., Grussenmeyer, P., Alby, E., Ledig, J., Ferhat, G., Macher, H. (2020). *La formation d’ingénieur géomètre-topographe à l’INSA Strasbourg*, Revue XYZ de l’Association francophone de topographie (AFT), XYZ n° 162, pp. 11-18, ISSN 0290-9057.

ABSTRACT

This is an overview of the book written by the author in order to receive the habilitation, which is a qualification required in order to conduct self-contained university research by the author on December 1st, 2020. It focuses on the theme of the development of segmentation tools and 3D modeling of urban objects from point clouds. By evaluating the quality of the algorithms developed on the basis of data acquired on heritage sites, the author hopes, through this research, to contribute to the influence of surveying, while highlighting the architectural, urban and landscape heritage of our territories. The approaches put in place to assess the quality of data and deliverables will be presented in a future issue of XYZ.