

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Clément DOCEUL

Caractérisation de la végétation de Rennes Métropole par relevé LiDAR en
vue de sa modélisation

Soutenu le 30 Juin 2017

JURY

PRESIDENT :	M. Stéphane DURAND	Maître de conférences
MEMBRES :	M. Jean-Michel FOLLIN Mme Christelle GIBON	Professeur référent Maître de stage

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier Christelle Gibon, maître de stage, pour son incroyable motivation dans le développement de la 3D pour Rennes Métropole et pour m'avoir transmis cette envie de mener à bien notre projet. Son suivi sans faille de mon travail et ses conseils toujours très bien avisés auront été un moteur durant toute la période de TFE.

Je remercie également les autres agents de l'unité données 3D, Stéphane Andru, Vincent Commandoux et Laurence Porpé, pour leurs explications concernant la conception et la mise à jour de la maquette, Gaëtan Danet pour son aide technique sur l'analyse des données, Ludovic Hamard pour ses apports en langage Python, ainsi que l'ensemble des agents du Service Information Géographique de Rennes Métropole pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur continuelle.

Le prochain remerciement est pour Jean Nabucet, ingénieur d'étude CNRS au laboratoire COSTEL, qui y est pour beaucoup dans la réussite de ce TFE. Il a su m'orienter dans les bonnes directions, et me donner des réponses concrètes et précises aux différentes étapes du projet. Je le remercie également ainsi que son laboratoire et la plate-forme LIDAR topo-bathymétrique Nantes-Rennes pour le prêt des données qui ont été utilisées durant ce stage.



Je ne voudrais pas oublier Alexandre Moine, agent de la Direction des Jardins et de la Biodiversité de Rennes Métropole, qui a pris tout le temps nécessaire pour que je m'imprègne des bases de la dendrologie et pour répondre à mes nombreuses questions dans un domaine où je suis novice.

Je poursuis avec mes différents interlocuteurs dans les services techniques des villes de Cannes et Monaco, qui ont répondu à mes demandes et m'ont permis de comparer les maquettes 3D de ces villes avec celle de Rennes Métropole.

Et je tiens à remercier Jean-Michel Follin, professeur référent, pour son suivi de mon travail tout au long de cette période et pour la relecture de ce mémoire. Les derniers remerciements vont aussi aux différents relecteurs et à toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces années d'études à l'ESGT.

Liste des abréviations

- API** : Application Programming Interface – *Interface de programmation applicative*
- MNT** : Modèle Numérique de Terrain
- MNC** : Modèle Numérique de Canopée
- OGC** : Open Geospatial Consortium
- IDE** : Integrated Development Environment– *Environnement de développement intégré*
- DS** : Dassault Systèmes
- CAO** : Conception Assistée par Ordinateur
- SIG** : Système d'Information Géographique
- LoD**: Level of Detail– *Niveau de détail*
- DJB** : Direction des Jardins et de la Biodiversité de la Ville de Rennes
- ASPRS**: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
- SCoT** : Schéma de Cohérence Territoriale
- PLU(i)** : Plan Local d'Urbanisme (intercommunal)
- PLH** : Programme Local de l'Habitat
- MIN** : Marché d'Intérêt National
- BDR** : Base de Données Référentiel
- TFE** : Travail de Fin d'Études

Glossaire

Approche systémique : "Discipline qui regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques, relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste, et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structure, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel, ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe"¹

ASCII : American Standard Code for Information Interchange, code adopté comme standard dans les années 1960, permet de coder 256 caractères (8 bits)

BIM : Vient de l'anglais Building Information Modeling; ensemble des logiciels, méthodes et données permettant l'intégration, la production et la gestion de la modélisation 3D d'un bâtiment et de faire coopérer les différents acteurs sur une maquette unique

Client lourd : "Ordinateur en réseau dont la plupart des ressources sont installées en local, contrairement au client léger dont les ressources sont distribuées en réseau"²

Corrélation automatique : Technique permettant de remplacer la vision stéréoscopique humaine et ainsi d'estimer la distance entre la prise de vue et l'objet photographié

Couronne ou houppier : Partie d'un arbre allant de la branche la plus basse à la cime

FME : Ou Feature Manipulation Engine, Logiciel développé par SAFE Software permettant la transformation, l'extraction et le chargement de données géographiques

GDAL/OGR : Bibliothèque de traitements de données géographiques en raster ou vecteur sous licence ouverte développé par l'Open Source Geospatial Foundation

Orthophotographies : Images aériennes ou satellitaires de la surface de la terre rectifiées géométriquement et radiométriquement

PostGIS : Logiciel permettant la gestion de bases de données géographiques

Raster : "Données images où l'espace est divisé de manière régulière (en petits rectangles); à chaque petit rectangle (pixel) sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace"³

TopStation : Logiciel développé par Jsinfo pour les géomètres-topographes

Végétation arborée/arbustive : Composée d'arbres de plus de 8 mètres de hauteur pour la première et d'arbustes ou buissons généralement entre 30 centimètres et 8 mètres pour la seconde

Voxel : Pixel caractérisé par une position image et un vecteur d'attributs

¹ Définition Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques Cognitifs Et Techniques

² Définition "LEMAGIT" (<http://www.lemagit.fr/definition/Client-lourd-Client-leger>)

³ Définition IGN

Table des matières

I	LA MAQUETTE NUMÉRIQUE URBAINE	7
I.1	Présentation du lieu du stage	7
I.1.1	Rennes Métropole	7
I.1.2	Le Service Information Géographique.....	8
I.1.3	L'Unité Cartographie Diffusion 2D/3D.....	9
I.2	Présentation de la maquette numérique urbaine	11
I.2.1	Qu'est-ce qu'une maquette numérique urbaine ?	11
I.2.2	Les formats utilisés.....	12
I.3	Les maquettes 3D de Rennes Métropole	15
I.3.1	La conception de la maquette.....	15
I.3.2	Usages généraux et outils	17
I.3.3	Focus sur les utilités de la modélisation de la végétation	19
II	CONTEXTE TECHNIQUE	21
II.1	Une donnée principale : le LiDAR	21
II.1.1	Qu'est-ce que le LiDAR ?	21
II.1.2	Les mesures utilisées.....	23
II.2	État de l'art : les mesures LiDAR et la végétation	26
II.2.1	Approche "nuage" (<i>cloud-based</i>)	26
II.2.2	Approche "MNC" classique (<i>raster</i>).....	28
II.2.3	Des approches plus complètes.....	32
II.2.4	L'identification des espèces.....	33
II.3	Une base de données géographique unique.....	35
III	CARACTÉRISATION DE LA VÉGÉTATION EN VUE DE SA MODÉLISATION.....	37
III.1	Phase préparatoire : application sur une zone test	37
III.1.1	Présentation de la zone.....	37
III.1.2	Préparation du nuage de points.....	38
III.1.3	MNT.....	40
III.1.4	MNC.....	41
III.1.5	Utilisation des pentes.....	43
III.1.6	Détection des sommets et segmentation	44
III.1.7	Partition en zones ouvertes/fermées.....	47
III.1.8	Non-verticalité des arbres	48
III.2	Le processus définitif	51
III.2.1	La réalisation d'un processus unique et automatique	52
III.2.2	La validation des résultats.....	55
III.2.3	Préparation à la modélisation	58

Introduction

Depuis près d'une vingtaine d'années, les données sont de plus en plus représentées en trois dimensions grâce à des maquettes numériques. Les grandes villes mondiales et françaises ont progressivement créé et complété des maquettes en trois dimensions pour représenter leur territoire, en partie ou en totalité. Rennes Métropole est très dynamique dans ce domaine, et a un objectif ambitieux bien défini : la réalisation d'un véritable jumeau digital de la métropole. Celui-ci permettra la création et la gestion d'une base de données systémique croisant différents types d'informations, dans le but de concevoir, gérer et simuler la ville dans toute sa complexité de façon transversale et pluridisciplinaire (concept des *smart cities*, ou villes intelligentes). Les *smart cities* sont en effet l'avenir des villes et de leur aménagement : elles utilisent les avancées technologiques modernes, et notamment la modélisation en trois dimensions et ses applications, pour construire un espace urbain respectant les piliers sociaux, culturels et environnementaux.

Après avoir déterminé un processus de modélisation des bâtiments fiable et durable, le Service Information Géographique de Rennes Métropole souhaite désormais faire de même avec l'ensemble de la végétation du territoire métropolitain. Les intérêts sont nombreux, tout comme les méthodes existantes pour atteindre ce but.

En effet, les usages de la végétation au sein de la maquette numérique urbaine, allant de la communication à l'aide à la conception, nécessitent une modélisation en trois dimensions au plus proche de la réalité, tant en termes d'esthétisme qu'en termes de géométrie. Les moyens pour identifier et caractériser la végétation font l'objet d'une littérature abondante en particulier ceux s'appuyant sur les relevés LiDAR (technologie retenue dans le cadre du TFE).

Le présent mémoire tentera donc de répondre à la problématique suivante : Comment automatiser sous la forme d'une chaîne de traitement l'extraction et la caractérisation des arbres à partir d'un nuage de points LiDAR afin de les modéliser en trois dimensions sur tout le territoire de Rennes Métropole via la plateforme de production de la maquette 3D ?

La première partie présentera le cadre du Travail de Fin d'Études, avec la structure d'accueil et sa maquette numérique urbaine. Cette première partie exposera aussi les usages de la maquette et plus particulièrement ceux de la végétation modélisée en trois dimensions, afin d'expliquer l'intérêt de ce TFE.

La deuxième partie précisera quant à elle le contexte technique de ce travail, avec comme base principale un relevé LiDAR. Nous y verrons l'intérêt de ce type de mesure pour notre finalité et un état de l'art de ses utilisations pour la caractérisation de la végétation. Pour finir, les autres données disponibles seront brièvement présentées.

Et la troisième et dernière partie constituera le véritable compte-rendu de la méthodologie mise en œuvre et des résultats obtenus. Nous y verrons premièrement la phase préparatoire, avec différents essais réalisés sur un secteur restreint représentatif de l'ensemble du territoire métropolitain, et secondement le processus complet, avec notamment son automatisation et sa validation.

I La maquette numérique urbaine

I.1 Présentation du lieu du stage

La partie suivante donnera une brève description de la structure d'accueil du stage. Elle présentera pour commencer Rennes Métropole, puis le Service Information Géographique et pour finir l'Unité Cartographie Diffusion 2D/3D.

I.1.1 Rennes Métropole

I.1.1.1 Présentation

Cette collectivité territoriale est devenue une métropole au 1er janvier 2015. Elle compte quasiment 420 000habitants⁴ au premier janvier 2013 et rassemble 48communes dont la ville centre, Rennes, qui à elle seule dénombre plus de 211 000 habitants⁵ à cette même date.

Elle est située dans l'ouest de la France, et est le chef-lieu du département d'Ille-et-Vilaine et la capitale de la région Bretagne.



Figure 1 : Logo Rennes Métropole

Avec ses 122 élus et plus de 1000 agents, Rennes Métropole est la métropole française qui obtient le troisième rang au classement des PIB les plus élevés. Elle a un budget de 880 Millions d'euros⁶ pour l'année 2017, stable depuis 2015, qui lui permet de rester une ville dynamique et moderne. En effet, elle a su se donner une image de leader dans les domaines des technologies et de la communication tout en restant proche de ses habitants et de sa culture. Rennes est par ailleurs élue deuxième meilleure ville étudiante de France en 2017⁷. Une brève présentation historique de la ville de Rennes et de sa structure intercommunale a été réalisée et est présentée en annexe 1.

I.1.1.2 Compétences

La structure intercommunale a donc beaucoup évolué depuis 1970. En modifiant son statut, ses compétences se sont développées, en se substituant à celles des communes, du département, de la région et de l'état.

Les actions de la métropole sont désormais importantes et variées. Les principaux domaines de compétences sont les suivants :

- Développement et aménagement économique, social et culturel : zones d'activités, équipements publics, promotion du tourisme, aide à la recherche, etc.

- Aménagement de l'espace métropolitain : réalisation des documents d'urbanisme comme le SCoT ou le PLUi, organisation de la mobilité, gestion des espaces publics dédiés aux déplacements urbains, participation à la gouvernance et à l'aménagement des gares, gestion des infrastructures et réseaux de télécommunications, etc.

⁴ Source : INSEE

⁵ Source : INSEE

⁶ Source : Rennes Métropole

⁷ Source : Palmarès annuel l'Etudiant

- Politique locale de l'habitat : réalisation du PLH, politique du logement, amélioration du parc immobilier bâti, accueil des gens du voyage, etc.

- Politique de la ville : diagnostic du territoire, contrat de ville, dispositifs contractuels de développement, prévention de la délinquance, etc.

- Gestion des services d'intérêt collectif : assainissement et eau, cimetières, abattoirs, MIN, service d'incendie et de secours, défense extérieure contre l'incendie, etc.

- Protection et mise en valeur de l'environnement et politique du cadre de vie : gestion des déchets, lutte contre la pollution et les nuisances sonores, transition énergétique, concession de la distribution d'électricité et de gaz, réseaux de chaleur et de froid, gestion des milieux aquatiques, etc.

Rennes Métropole a une directrice générale des services, Laurence Quinaut, chargée de répartir les différentes compétences présentées ci-dessus, ainsi que celles propres à la ville de Rennes, entre quatre pôles et de coordonner ceux-ci. Les pôles sont les suivants : "Ressources", "Solidarité, Citoyenneté, Culture", "Stratégie, Développement, Aménagement" et "Ingénierie et Services Urbains".

I.1.2 Le Service Information Géographique

I.1.2.1 Missions et interventions principales

Au sein du pôle "Stratégie, Développement, Aménagement" se trouve le Service Information Géographique, dirigé par Cécile Tamoudi. C'est un service mutualisé, c'est-à-dire qu'il assume des missions pour deux personnes publiques : la métropole et la ville de Rennes. Le SIG a des missions variées, qui concernent les domaines suivants :

- Données géographiques : mise à disposition de la BDR, assistance sur les bases de données métiers des différents services, identification et reconnaissance des gestionnaires de données
- Outils : outils d'accueil et de sauvegarde des données, maintenance des outils de gestion, outils de consultation
- Coordination des projets transversaux : demandes de plusieurs communes, métropole et commune, métropole et agence d'urbanisme, etc.
- Organismes et partenaires externes : partage de données et promotion de l'échange
- Exploitation des données : diffusion des données SIG et assistance des autres services

Le service Information Géographique est divisé en quatre pôles, avec chacun leurs missions propres. Le pôle Administratif (2 agents) est chargé des ressources humaines et de la gestion des marchés et des conventions passés par le service. Le pôle Études et Développements (6 agents) assure la gestion de l'architecture de la base de données SIG, la création et la gestion des outils en lien avec les données. Le pôle Données Topographiques (11 agents) acquiert et gère les données topographiques du sol et du sous-sol (surface et réseaux enterrés) et assure le suivi de chantier et les relevés plus spécifiques. Pour finir, le pôle Cartographie et Diffusion 2D/3D (10 agents) gère, exploite et diffuse les données géographiques. C'est dans ce dernier pôle qu'a eu lieu mon stage de fin d'études.

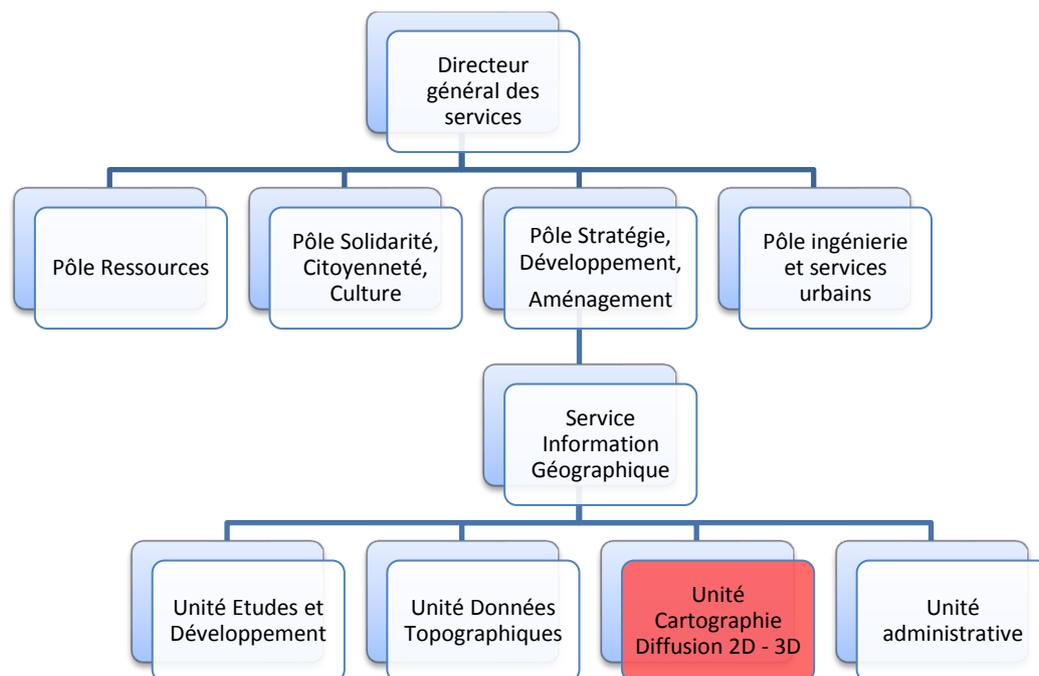


Figure 2: Organigramme de la structure de stage

I.1.2.2 Indicateurs d'activité

Le service information géographique est donc transversal et répond à des demandes très variées. Voici quelques chiffres représentatifs de l'activité des unités techniques du SIG au sein de Rennes Métropole :

Le pôle Données Topographiques assure par jour en moyenne près de 200 exports ou consultations des données Ville de Rennes. Elle entretient 11 000 stations de référence et près de 1200 repères de nivellement sur la Ville de Rennes. Elle reçoit 130 dossiers de relevés terrain par an.

Le pôle Études et Développement a permis l'installation de plus logiciels SIG sur plus de 350 postes d'agents de la collectivité. Elle est aussi à l'origine de plus de trente applications grand public et applications métiers dont GéoRennesMétropole (consultation grand public, entre 15 000 et 20 000 connexions par mois en 2014), GéoJardins (application interne géographique de gestion des espaces verts, plus de 19 000 connexions entre 2012 et 2013) et Urbavue(consultation des PLU et droits des sols, 1300 connexions en moyenne par mois).

Le pôle Cartographie Diffusion 2D/3D est aussi très productif : il a par exemple diffusé plus de 23 000 jeux de données via le site OpenData (décrit en partie I-1.3.2.) en 2014, et a produit plus de 700 plans pour le compte des services de Rennes Métropole toujours sur l'année 2014.

I.1.3 L'Unité Cartographie Diffusion 2D/3D

I.1.3.1 Les missions

L'Unité Cartographie Diffusion 2D/3D est au croisement des autres unités du Service Information Géographique. En effet, elle valorise les données de l'unité Données Topographiques et les solutions développées par l'unité Études et Développements. Elle est composée de 10 agents : un responsable de pôle, un chargé de mission diffusion, un animateur de bases de données

partagées, trois agents pour l'unité GéoCarto (réalisation de cartographies ou d'exploitations cartographiques à la demande) et quatre agents pour l'unité Données Générales 2D/3D (gestion de la base de données générale 2D/3D, production et exploitation de la maquette 3D urbaine).

Les missions de l'unité Données Générales 2D/3D que j'ai rejointes dans le cadre du TFE, sont réparties en 2 sous-unités. La première gère l'acquisition et la gestion de la base de données générale (base de données référentielle au 1/2000 en 2D et 3D) à l'origine de cartographies référentielles et fonds de plans divers (comme le Plan de Ville de Rennes) ainsi que la production et la gestion de la maquette 3D urbaine métropolitaine. La seconde sous-unité valorise et exploite la maquette 3D urbaine de la métropole et met en place des dispositifs d'aide à la décision, à la concertation et à la communication à destination des élus et du grand public.

I.1.3.2 Politique de diffusion des données

Le pôle Cartographie Diffusion 2D/3D applique la politique de diffusion des données géographiques de la métropole, issue principalement de la directive INSPIRE. Ce partage de données avec différents publics se fait principalement par deux moyens : le catalogue des métadonnées et l'open data.

Le premier est un service en ligne accessible par tous les agents de la métropole et des communes de la métropole. Il permet de télécharger des données comme par exemple le MNT sur tout le territoire ou encore les orthophotographies mais permet surtout de connaître leurs métadonnées (procédé d'acquisition ou de création, précision, contact du responsable de la donnée, date, etc.). Les différents services sont donc fortement sensibilisés à cet outil.

Le service SIG est aussi l'un des plus importants contributeurs en matière de données sur le site open data de Rennes Métropole. Ce site, accessible par le grand public, permet de diffuser ouvertement et librement les données géographiques et ainsi de répondre à la convention Aarhus (signée en 1998 par 39 états, elle développe l'idée de "démocratie environnementale" : accès à l'information, implication du public dans les décisions et droit d'exercer un recours en matière d'environnement) et à la directive Inspire (2007, établir en Europe une infrastructure de données géographiques afin de les publier et de les partager). Rennes est une ville et une métropole reconnue au niveau national pour son ouverture des données publiques, et continue ses efforts dans ce sens.



Figure 3: Catégories des données disponibles sur <https://data.rennesmetropole.fr/page/home/>

Comme cela est visible sur la figure 3, la métropole diffuse librement des données dans de nombreux domaines grâce à plusieurs producteurs de données : la ville de Rennes, la métropole, Keolis (gestionnaire des transports publics), Citédia (gestionnaire d'équipements publics), l'Association Transmusicales (promotion de la diversité culturelle), les Champs Libres (regroupement des lieux d'exposition, de documentation et de conférence) ainsi que le Musée des Beaux-Arts de Rennes.

I.2 Présentation de la maquette numérique urbaine

La partie suivante amène le cœur de la problématique du Travail de Fin d'Études : la maquette numérique urbaine. Nous en verrons tout d'abord sa définition puis les différents formats de données utilisés dans ce domaine. Plusieurs exemples sont présentés en annexe 2, pour les villes de Cannes, Monaco et Lyon. Les informations proviennent pour la plupart de discussions avec les agents de ces villes dédiés à la conception et à la gestion de ces maquettes 3D.

I.2.1 Qu'est-ce qu'une maquette numérique urbaine ?

La maquette numérique urbaine n'a pas de définition unique et acceptée de tous. Nous nous attarderons, dans ce mémoire, sur le dispositif communément appelé "maquette 3D" (intégrant données, logiciel et interface/support), généralement réalisé et utilisé par les grandes agglomérations françaises comme aide à la décision et à la conception ainsi qu'à diverses fins de communication. Les données qui constituent une maquette 3D représentent le territoire en 3D dans ses diverses composantes topographiques : le terrain, les éléments bâtis, les ouvrages et la végétation.

Les données de base des maquettes des collectivités peuvent être de tous types mais sont principalement issus de relevés photogrammétriques et, dans une moindre mesure, de relevés LiDAR et de relevés topographiques plus traditionnels (tachéomètre, GPS, etc.). Pour traiter ces données, des logiciels se sont développés avec parfois des modules très spécifiques. Trois seront ici cités comme exemples :

- Skyline Software Systems, Inc est une société américaine éditrice de logiciels de visualisation 3D, de gestion de données et de modélisation. Ses logiciels permettent la lecture des données, la construction 3D (comme par exemple PhotoMesh qui crée des MNT à partir de photographies), la visualisation 3D en ligne par streaming (Skyline en est l'inventeur ce qui permet une navigation 3D temps réel extrêmement rapide et fluide même avec une volumétrie de données importante) et les applications Terra Explorer multiplateformes(PC, web, mobile) d'analyse, gestion et visualisation de données 3D
- LandSim3D est une suite de logiciels développée par Bionatics, éditeur spécialisé dans la génération et la visualisation 3D temps-réel et la simulation d'évolution temporelle. LandSim3D Editor permet la modélisation 3D du territoire, des bâtiments en formes géométriques simples (LoD1, voir partie I-2.2.2.) de la végétation à partir d'une bibliothèque de modèles très fournie, et des réseaux de transport. Il permet aussi la simulation et la comparaison de projets en 3D pour des usages d'aide à la décision. LandSim3D Studio permet de réaliser des applications de navigation 3D dans la maquette pour des usages de communication. Et LandWeb3D qui permet d'importer la maquette 3D sur internet afin de la visualiser ou de l'intégrer sur d'autres plateformes grand public comme Google Earth
- Rhinocéros, qui sera présenté en partie I-2.2.3.

Jusqu'à la fin des années 2000, les maquettes étaient produites de façon déconnectée du SIG: un prestataire se chargeait de la restitution photogrammétrique et de la modélisation en 3D du bâti. On parlait de "maquettes jetables". Cette technique rendait cependant la mise à jour des données difficile, de même que le suivi de l'évolution du territoire. En 2004, Rennes Métropole a été la pionnière d'une nouvelle forme de modélisation paramétrée en développant en interne une solution pour modéliser en 3D le bâti à partir de ses données SIG. Depuis, cette méthode de modélisation à

partir d'un SIG s'est démocratisée. C'est une évolution positive au vu de la volonté des collectivités territoriales de gagner en autonomie.

I.2.2 Les formats utilisés

Il existe actuellement de nombreux formats de stockage de maquettes numériques ou tout simplement de données en trois dimensions. Les deux formats abordés au cours du stage seront ici présentés. Pour une étude approfondie des formats existants on pourra se référer à Dalstein T., 2014.

I.2.2.1 Rhinocéros 3D et son format 3DM

Le Three Dimensional Modeling ou 3DM est un format propriétaire natif du logiciel Rhinocéros 3D, communément appelé "Rhino 3D". Ce logiciel de CAO est développé par Robert McNeel & Associates et sa version 5 (la plus aboutie) est sortie en 2012. Il est décrit par ses développeurs comme "le modèleur surfacique et volumique le plus souple, le plus puissant et le plus rapide du marché". Il permet la gestion de courbes, de surface NURBS (pour Non-Uniform Rational B-Splines ou splines rationnelles non uniformes, soit une représentation mathématique pouvant décrire précisément toute forme en deux ou trois dimensions) mais aussi de solides, de nuages de points et de maillages.

Pour le service Informations Géographiques de Rennes Métropole, Rhinocéros est utilisé pour ses deux modules propres à la conception d'une maquette numérique urbaine : RhinoTerrain et RhinoCity. Ces deux plug-ins de géomodélisation ont été développés par la société Rhinoterrain, partenaire régulier de la métropole depuis plusieurs années. Le plugin Rhinoterrain permet de traiter, produire et visualiser des modèles numériques de terrain à partir d'un volume de données important. RhinoCity est une solution permettant la création et la texturation de maquettes 3D et leur export au format CityGML

I.2.2.2 CityGML

Avec la démocratisation de la donnée en trois dimensions et de sa modélisation au cours des deux dernières décennies, le problème du format d'échange de données s'est posé. En effet, de nombreux formats libres ou propriétaires existent avec chacun leurs logiciels, leurs clients, leur domaine technique, etc. mais pour pouvoir faire collaborer ces acteurs et inter-opérer les logiciels et méthodes, un standard se doit d'être instauré. L'OGC a donc développé un format dédié aux maquettes urbaines, nommé CityGML, pour répondre à ce besoin. Ce format est inspiré du langage GML, lui-même dérivé du XML, tous deux créés pour l'encodage, la manipulation et l'échange des données géographiques. Le CityGML est un format d'échange et de stockage de modèles 3D de villes et de paysages. Il permet de décrire la plupart des objets présents dans les villes comme les bâtiments, les routes, les cours d'eau, la végétation, le mobilier urbain ou encore les ponts.

Une des particularités du standard est qu'il propose une gestion multi-échelles, c'est-à-dire une modélisation à différents niveaux de détails (LoD). Cela signifie qu'une représentation en 3D peut avoir différentes géométries et résolutions. Un même objet peut être représenté à différents niveaux, pour simplifier l'affichage et les analyses, et ainsi gagner un temps "machine" considérable. Il existe 5 LoD :

- LoD0 : Représentation à petite échelle, avec une simple représentation du terrain par un MNT (drapé par une carte ou une orthoimage)

- LoD1 : Échelle d'une ville, les bâtiments sont modélisés avec des formes géométriques simples (des blocs) et les toits sont plats
- LoD2 : Échelle d'un quartier ou d'un projet, les toits sont modélisés et des éléments comme la végétation ou le mobilier urbain peuvent être ajoutés
- LoD3 : Échelle d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments, les détails extérieurs de l'architecture sont ajoutés (balcons, fenêtres, etc.) et les autres éléments sont aussi plus détaillés, avec une texturation de haute résolution
- LoD4 : Représentation d'un bâtiment et de son architecture intérieure (portes, escaliers, etc.)

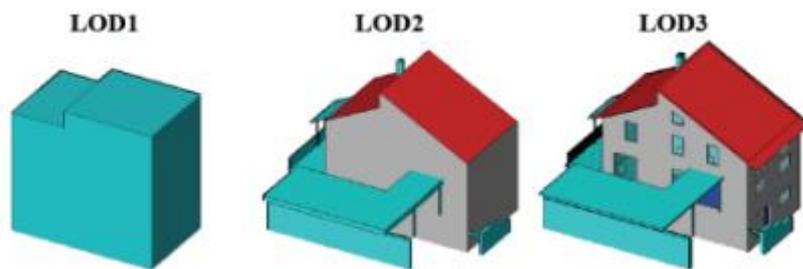


Figure 4: Différents niveaux de détail du CityGML (source : SimStadt)

La maquette urbaine de Rennes Métropole entre dans le LoD2, suffisant pour la plupart des usages de la métropole. Dans certains cas particuliers et pour des besoins spécifiques, une partie de la maquette peut être modélisée en LoD3. Malgré l'avantage de cette partition en niveaux, la précision et la qualité des données ne sont pas prises en compte : une maquette peut par exemple être modélisée en LoD3 ou LoD4 même en ayant une exhaustivité très mauvaise. En outre, une difficulté réside dans la souplesse du format laissant place à différentes implémentations, à l'origine de problèmes d'imports/exports entre plateformes logicielles.

En plus de sa capacité d'échelonnage en niveaux de détails, un des grands atouts du CityGML est sa standardisation internationale. L'OGC est une organisation reconnue mondialement, ce qui rend son standard puissant et amène les développeurs de logiciels à accepter ce format en entrée et en sortie. L'interopérabilité est aussi facilitée par le caractère "ouvert" du standard, qui le rend utilisable par tous. Malgré une mise en place difficile depuis 2008, il s'impose de plus en plus dans le monde des maquettes urbaines. Rennes Métropole, comme la majorité des collectivités territoriales concernées, a très rapidement fait le choix de ce format, qui lui permet en outre d'échanger aisément avec ses partenaires et prestataires français : l'IGN, Dassault Systèmes, RhinoTerrain et internationaux.

Le CityGML a aussi un intérêt pour ce stage, car il permet une définition suffisante de la végétation et notamment en distinguant la végétation isolée (classe "SolitaryVegetationObject") des zones végétalisées (classe "PlantCover") selon l'OGC *City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard* (voir annexe 3). Ces dernières se soumettent à une seconde distinction suivant leur géométrie : "MultiSurface" pour les surfaces

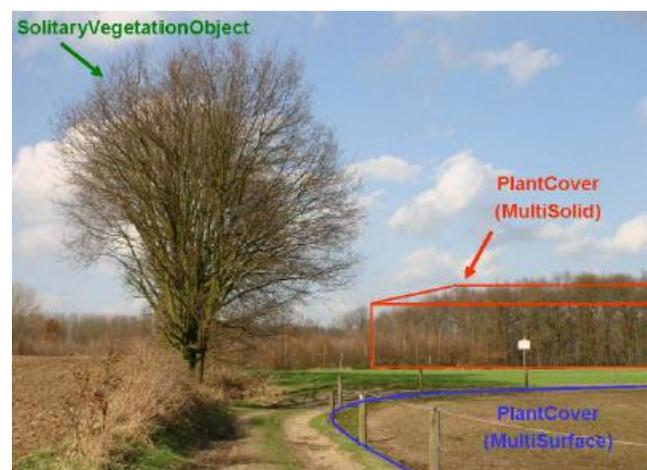


Figure 5: Distinction des objets en CityGML suivant leur géométrie

végétalisées et "MultiSolid" pour les volumes végétalisés (comme par exemple une forêt). La figure 4 présente ces distinctions.

La classe "SolitaryVegetationObject" possède plusieurs attributs déjà prévus dans le standard afin de caractériser la végétation :

- "class" contient la classification du type de végétation (arbre, herbe, buisson, conifère, plante aquatique, etc.)
- "species" contient l'espèce en latin (plus de 600 noms d'espèces)
- "height" pour la hauteur de l'arbre
- "trunkDiameter" pour le diamètre du tronc
- "crownDiameter" pour le diamètre de la couronne
- "function" et "usage" sont optionnels et contiennent respectivement la fonction et l'usage de l'élément

La classe "PlantCover" possède aussi des attributs prévus par le CityGML :

- "class" contient la composition de la communauté végétale modélisée (types de plantes)
- "averageHeight" est la hauteur moyenne du couvert forestier
- "function" et "usage" ont la même définition que pour la classe "SolitaryVegetationObject"

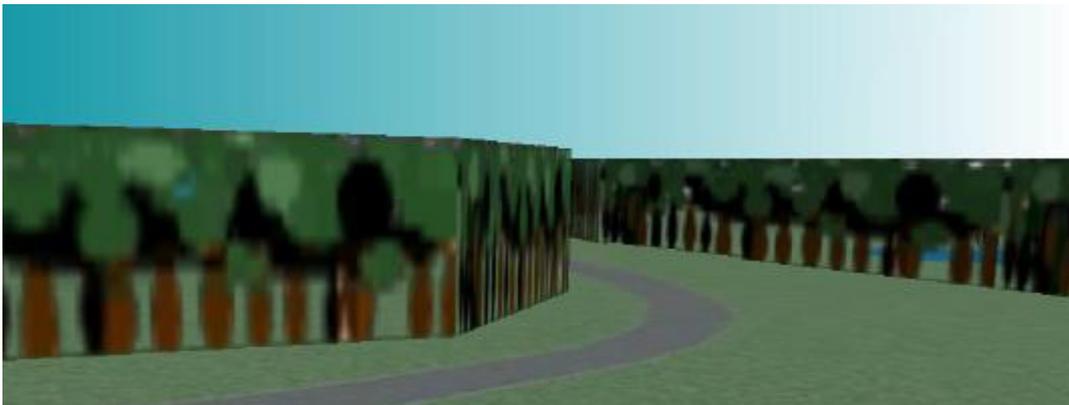


Figure 6: Exemple d'un objet de type "MultiSolid" en CityGML

Les deux différentes classes définissent des objets de type "_VegetationObject", héritant des "_CityObject" dont ils prennent les attributs comme le nom ("gml:name") ou une correspondance avec un objet d'un système d'information externe ("ExternalReference"). Comme précisé précédemment, le CityGML permet une gestion multi-échelles. Cela signifie que pour la végétation aussi, quatre niveaux de modélisation sont prévus (LoD1 à LoD4). Il permet également des "implicitgeomtry" ou géométries implicites, parfaitement adaptées à la modélisation de la végétation. Ce concept est similaire à celui des instances primitives et crée un gain important en terme d'espace de stockage : il se base sur un modèle prototype et répète le même modèle pour toutes les fois où cela est nécessaire (par exemple dans notre cas un arbre d'une certaine espèce peut être modélisé une fois et répété à chaque même objet à modéliser). Chaque modèle de base est assimilé à un niveau de détail.

I.3 Les maquettes 3D de Rennes Métropole

Pour terminer cette première grande partie, la maquette numérique urbaine de Rennes Métropole sera ici présentée. Nous verrons premièrement sa conception, ensuite ses usages et les outils disponibles et enfin nous nous concentrerons sur les utilités de la modélisation en trois dimensions de la végétation, afin de montrer l'intérêt de ce TFE.

I.3.1 La conception de la maquette

I.3.1.1 Présentation générale

Rennes a été l'une des premières villes à travailler dans le domaine de la 3D. Dès 1998, elle entame la modélisation de la maquette de la ville, pour une présentation grand public fin 1999. En 2012, la maquette change d'échelle et l'acquisition est faite sur l'ensemble du territoire de la métropole.

Cette maquette a été réalisée à l'initiative d'élus rennais puis métropolitains et grâce à la collaboration de spécialistes rennais de la modélisation 3D et de la donnée géographique comme la société Archividéo aujourd'hui rachetée par Dassault Systèmes. Une présentation plus approfondie de la conception de la maquette et notamment des outils Rhinocéros est réalisée par Anne-Laure Regnard (2015).

I.3.1.2 Le terrain, le bâti et les ouvrages d'art

La base de la maquette de la métropole est constituée grâce aux modules RhinoCity et RhinoTerrain. Celle-ci comprend le terrain, les bâtiments, les ouvrages d'art et la végétation de toute la métropole. Dans le futur, la maquette comprendra aussi le mobilier urbain.

Le terrain est modélisé grâce à un MNT, lui-même calculé à partir d'un semis de points obtenu par corrélation automatique sur les prises de vues aériennes et amélioré grâce à l'ajout des lignes de rupture de pente. Il est ensuite modélisé grâce au module RhinoTerrain et texturé par les photographies aériennes.

Quant aux bâtiments, une distinction est à faire entre ceux situés sur le territoire de la ville de Rennes et ceux situés sur toutes les autres communes de la métropole. Sur la ville de Rennes, les bâtiments ont été restitués en 2005 sous la forme de lignes de toitures (arêtes et faitages) et d'emprises au sol. Depuis cette date, une mise à jour se fait continuellement par l'intervention d'un agent du SIG dédié à cette mission : pour chaque permis de construire, il se base sur les plans (généralement des plans de masse numérisés par l'intermédiaire d'une table à digitalisation) utilisés pour l'instruction du permis et parfois sur des orthophotographies ou des levés topographiques. Il saisit, via un logiciel topographique (Topstation), quatre types d'objets (appelées "primitives") au moment de l'ouverture du chantier : les emprises au sol (polygone), les lignes de découpe des toitures, les lignes d'arêtes et les faitages (point, ligne ou polygone). Ces primitives sont créées

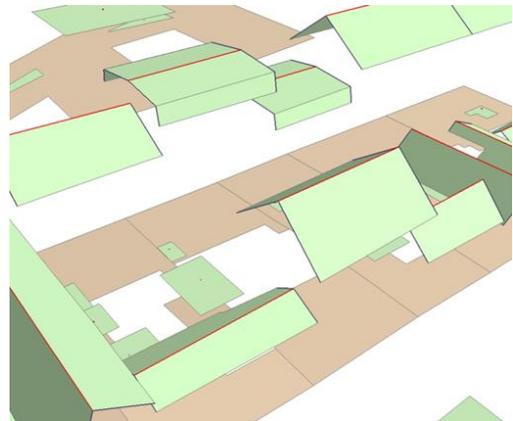


Figure 7: "Primitives" de bâtiments avant modélisation 3D

grâce au logiciel TopStation avec un module développé par l'unité Études et Développements du SIG. À partir de ces éléments, un autre agent intervient pour la modélisation automatique en CityGML grâce au module RhinoCity. La texturation des bâtiments se fait automatiquement par ce même module à partir des dernières photographies aériennes (réalisées tous les trois ans), avec la possibilité de les reprendre de façon semi-automatique. RhinoCity propose un classement automatique des photographies à appliquer pour la texturation de chaque bâtiment basé sur l'angle et la position des prises de vue, et en l'absence de choix par l'utilisateur la photographie la mieux "classée" est utilisée automatiquement.

Pour les autres communes de Rennes Métropole, le service fait appel à un prestataire via une procédure de marché public, qui doit remettre à jour tous les trois ans (depuis 2011, première modélisation des bâtiments sur l'intégralité de la métropole) par photogrammétrie et complément manuel des lignes de toitures de tous les bâtiments. Ces primitives sont ensuite projetées au sol pour arriver à la modélisation, toujours par le module RhinoCity. Cette modélisation à partir uniquement des toitures est donc actualisée en totalité tous les 3 ans. Si besoin, elle peut être mise à jour manuellement sur des secteurs à enjeux (travail sur un bâtiment spécifique, projet d'aménagement modélisé, etc.).

Pour les ponts, la modélisation se fait aussi en CityGML grâce au module RhinoCity. Ces ouvrages ont été modélisés en 2014 à partir des prises de vue aériennes, avec en entrée dans le module deux types de lignes : les tabliers et les bas de ponts. Tout comme les bâtiments des communes autres que la ville centre et les texturations, les données sur les ponts sont mises à jour tous les trois ans par restitution photogrammétrique à partir de prises de vue acquises dans le cadre d'un partenariat avec l'IGN.

I.3.1.3 La végétation

Les données concernant la végétation sur le territoire de Rennes Métropole sont de qualité moyenne en termes de précision, d'exhaustivité et de fréquence de mise à jour. Une modélisation a été effectuée, selon un processus automatique par l'IGN en 2014 à partir d'une prise de vue aérienne. La donnée de base est une couche Shapefile de points représentant les arbres avec les attributs "hauteur" et "envergure" (diamètre du houppier). Un complément de cette couche a aussi été réalisé en interne pour des secteurs particuliers où des utilisations nécessitaient une bonne modélisation des arbres. Mais ces quelques compléments ne suffisent pas pour obtenir une couche exhaustive : de nombreux manquements apparaissent. Les zones à forte densité d'arbres sont sous-quantifiées (moins d'arbres sur la couche que dans la réalité) et plusieurs arbres isolés sont parfois indiqués pour un seul présent dans la réalité. La modélisation des arbres en trois dimensions est faite grâce à un script utilisant les logiciels FME et Rhinocéros, où chaque arbre est modélisé à partir de son centre (chaque point de la couche Shapefile présentée ci-dessus) avec sa hauteur et son envergure comme paramètres. Une texture est ensuite appliquée aléatoirement à partir d'une bibliothèque recensant une vingtaine de modèles de texture. Le partenaire Dassault Systèmes (qui a fait l'acquisition de la société Archividéo, anciennement partenaire et prestataire de Rennes) a lui aussi créé un script de modélisation des arbres suivant les mêmes paramètres et le même type de modélisation pour son logiciel Urban, qui sera présenté en partie I-3.2.5.

La modélisation 3D réalisée en interne et celle réalisée par DS ont le même rendu : un "billboard" texturé. Ce type de modélisation, aussi appelé "en croisillons" permet d'alléger grandement le fichier de données en comparaison d'une modélisation géométrique ou "en volumes" plus proche de la réalité. Chaque arbre est donc représenté par 2 faces perpendiculaires,



Figure 8: Exemple de modélisation "en croisillons"

avec des dimensions différentes suivant la hauteur et l'envergure de l'arbre, qui sont ensuite texturées aléatoirement à partir de la bibliothèque interne. Vue du dessus, un arbre en 3D est représenté par une croix, d'où le terme de modélisation "en croisillons".

On voit donc que la modélisation de la végétation n'est pas aussi structurée et suivie que celle d'autres éléments comme les bâtiments. En plus de la nécessité de structurer une procédure d'acquisition, de mise à jour et de modélisation de la végétation, un rendu plus esthétique et surtout un volume plus proche de la réalité s'imposent pour les usages calculatoires, qui seront présentés ultérieurement.

I.3.2 Usages généraux et outils

I.3.2.1 La communication territoriale

À ses débuts, la maquette 3D avait principalement un but de communication territoriale. Elle perpétue cet usage de différentes manières notamment par la création de maquettes 3D visualisables en ligne et ouvertes au grand public.

C'est le cas du site <http://3d.rennes2030.fr>, qui présente les grands projets urbains prévus d'ici 2030. L'opération Rennes 2030 a pour but d'informer et d'impliquer les Rennais dans la mise en œuvre du prochain projet urbain de la ville. Elle s'appuie, notamment, sur cette maquette 3D virtuelle en ligne, qui reprend la base de la maquette numérique de Rennes Métropole (Bâtiments, végétation, orthophotographies, etc.) et y intègre les différents projets en 3D déjà programmés et les secteurs faisant l'objet de réflexions ainsi que des informations les concernant. Cette publication en ligne de la maquette 3D est le fruit d'une convention de partenariat entre Rennes Métropole, la Ville de Rennes et Dassault Systèmes, qui vise à développer "la ville intelligente" et qui sera décrit en partie I-3.2.5.

Une autre maquette 3D est aussi visualisable en ligne, il s'agit de la maquette "De Condate à Rennes". *Condate* est l'ancien nom de la ville de Rennes, et cette maquette est en fait composée de plusieurs représentations de la ville, à différentes dates. Elle permet de visualiser Rennes du 18^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui, avec en plus des informations patrimoniales : des événements marquants, des monuments, des photos, des visites à 360°, des liens internet, des visites guidées historiques, des vidéos, etc. Cinq grandes périodes sont représentées : le XVIII^{ème} siècle (modélisé de façon schématique à partir de recherches iconographiques et cartographiques), le XIX^{ème} siècle (modélisé à partir du cadastre napoléonien), 1900-1950 (modélisé à partir d'orthophotographies prises à la fin de la seconde guerre mondiale par les américains), 1950-2000 (modélisé à partir de données diverses plus précises, généralement des prises de vue aériennes) et aujourd'hui (à partir des données présentes sur la maquette actuelle). Le développement de cette maquette 3D à but de communication historique et patrimoniale a été assuré par Archivideo, société rennaise d'édition de solutions pour la modélisation 3D des villes et des grands territoires, grâce aux données collectées par le service Information Géographique de la ville de Rennes. "De Condate à Rennes" est aussi disponible sur mobile par le biais d'une application Android.

I.3.2.2 La médiation urbaine

Le second objectif de la maquette 3D de Rennes Métropole est la médiation urbaine. En effet, l'appréhension par le grand public de la ville dans son ensemble et de ses projets est facilitée grâce à la maquette : elle est lisible, évolutive et surtout interactive. Cette interactivité est très importante pour les élus et les agents de la métropole, et la participation des habitants est de plus en plus encouragée dans divers domaines (d'où le projet Rennes 2030 décrit plus haut).

Dans cet optique, la maquette sert de support lors des réunions publiques et autres réunions de concertation mais aussi lors d'évènements plus spécifiques parfois ludiques adressés à des publics habituellement exclus de la concertation, comme la chasse au trésor 3D Festimômes ou encore le jeu vidéo RennesCraft. Festimômes est un festival jeune public, qui a permis, au travers de la maquette 3D, de sensibiliser les plus jeunes à l'urbanisme de façon générale et au projet d'aménagement de leur quartier. Un support tactile a été mis en place et le jeune public a pu participer à une chasse au trésor virtuelle en trois dimensions : des coffres étaient "cachés" dans la maquette, avec à l'intérieur une pièce à récupérer. Ces pièces étaient ensuite matérialisées en direct grâce à une imprimante 3D installée sur place, pour permettre aux enfants de repartir avec leur butin.

RennesCraft est une création lancée à l'initiative de la Ville de Rennes et mise en œuvre par l'association 3 Hit Combo, inspirée du jeu vidéo MineCraft⁸. RennesCraft, qui s'appuie sur une modélisation de Rennes sous format Minecraft (réalisée à partir des données SIG de la ville) permet aux utilisateurs de penser librement la ville de demain en reproduisant l'existant ou en créant à partir de leur imagination. C'est donc un véritable outil de médiation urbaine favorisant le dialogue avec les habitants et leur compréhension des contraintes d'urbanisme et d'aménagement urbain, tout en restant ludique.

I.3.2.3 La médiation professionnelle

La maquette entre aussi en jeu dans un but de développement économique et d'attractivité du territoire. Elle est en effet utilisée lors de manifestations professionnelles telles que le Salon de l'Habitat, le MIPIM (salon des professionnels de l'immobilier) ou le Congrès Union Sociale de l'Habitat pour promouvoir l'urbanisme de la ville, les grands projets d'aménagement du territoire ainsi que certaines architectures emblématiques. Ce support sert aussi lors des visites de délégations ministérielles, et notamment pour la venue des deux derniers Premiers Ministres et du Président Hollande à Rennes.

I.3.2.4 L'aide à la décision et à la conception

L'aide à la conception et la réalisation est un usage extrêmement important de la maquette numérique 3D. Ici, le support arrive bien en amont, lors de la création des projets. Afin d'orienter les décideurs dans leurs choix, des projets peuvent être modélisés et intégrés dans leur environnement existant, et différentes hypothèses d'aménagement peuvent aussi être présentées et comparées (notamment dans le cadre d'appels à projet ou de concours). Des études réalisées à partir de la maquette peuvent aussi influencer les décisions quant à différentes hypothèses : analyse du potentiel photovoltaïque des toits, modélisation du bruit, simulation d'ensoleillement, simulation de crue, précarité énergétique et autant d'autres qui apparaîtront par la suite à fur et à mesure des besoins. Un projet est aussi en réflexion concernant l'utilisation de la maquette pour l'instruction des autorisations d'urbanisme en lien avec le développement du BIM, en plus de celui sur la numérisation du processus d'instruction (pour favoriser le travail simultané de tous les services et organismes sollicités par l'instruction).

Afin de poursuivre le développement de ces usages, fédérer les différents acteurs de la ville autour d'un même socle de données et favoriser la pluridisciplinarité et la transversalité, Rennes

⁸Édité par Mojang, le joueur crée des constructions librement à partir de "cubes" de différents matériaux, une sorte de "Lego" virtuel

Métropole et Dassault Systèmes ont lancé le projet 3DEXPERIENCity Virtual Rennes (voir ci-après).

I.3.2.5 Les outils

La maquette numérique présentée en partie I-3.1. , dite maquette "Rhino", permet donc de créer un socle de données en trois dimensions, qui peut être ensuite mis à disposition de partenaires ou prestataires pour qu'ils les intègrent dans leurs solutions logicielles. Un partenariat existe depuis plusieurs années entre Rennes Métropole et Archivideo, et un outil développé par ce partenaire est particulièrement utilisé par l'unité Données Générales et 3D de Rennes Métropole : Urban. Il s'agit d'un logiciel client lourd de navigation 3D temps réel. Sur Urban on retrouve le socle de données 3D de la maquette "Rhino" interne et des modélisations manuelles plus spécifiques comme par exemple les projets d'aménagement ainsi intégrés dans leur contexte environnant. L'interface d'Urban peut être personnalisée suivant les besoins, pour accompagner les usages présentés ci-dessus.

Cependant Urban connaît deux limites importantes. La première est liée au fait qu'il s'agit d'un logiciel client lourd, ce qui signifie que son déploiement au sein des différents services de Rennes Métropole et de la Ville de Rennes et sa maintenance sont plus compliqués et empêche toute exploitation en mobilité. L'unité 3D utilise donc en parallèle d'autres moteurs comme par exemple Unity. C'est un moteur de jeux vidéo qui permet de développer des applications 3D temps réel sur le web ou sur ordinateur et d'exporter des applications mobiles pour smartphones et tablettes. Ce logiciel a la particularité de proposer une licence gratuite (avec toutefois une limitation des fonctionnalités disponibles).

En plus d'une convention d'expérimentation lancée en 2014 (incluant l'utilisation d'Urban), la collaboration avec Dassault Systèmes vient de se concrétiser sous la forme du projet "3D EXPERIENCity", cher aux deux partenaires. Ce projet prévoit le développement d'une "base de données systémique" de Rennes Métropole ("jumeau digital") et l'adaptation de la plateforme collaborative 3DEXPERIENCE développée par DS. Cette plateforme est déjà utilisée dans le domaine de l'industrie et plus particulièrement celui de l'aérospatial avec un but similaire : faire collaborer les différents métiers de la conception industrielle sur une même maquette en trois dimensions (à l'origine utilisée pour la conception des avions Airbus).

Le projet a un but principal pour Rennes Métropole : créer un "jumeau digital" de la ville, aussi appelé "base de données systémique" car l'enrichissement de la maquette par des informations attributaires se fait en croisant les différents systèmes qui composent la ville (flux, transports, énergies, personnes, etc.). Ce "jumeau digital" sera alors intégré sur la plate-forme ouverte aux différents acteurs. Une définition simple du projet 3D EXPERIENCity serait une comparaison au principe du BIM, mais appliqué à une échelle plus grande, celle du territoire métropolitain.

La plate-forme inclura aussi des modules métiers développés en interne ou par des tiers pour y effectuer directement divers calculs et disposera, à terme d'un véritable portefeuille d'applications dédiés à l'aménagement et la vie de la ville. Un projet de simulation des règles d'urbanisme et de vérification automatique de ces règles pour optimiser l'instruction des permis de construire fait notamment partie de 3D EXPERIENCity.

I.3.3 Focus sur les utilités de la modélisation de la végétation

Comme cela est expliqué précédemment, la maquette numérique urbaine de Rennes Métropole a des usages variés, et est utilisée chaque jour par différentes personnes dans différents

cadres. La végétation, élément important du paysage et de l'aménagement, n'est pas en reste et doit être modélisée correctement afin de répondre aux besoins des utilisateurs.

Pour commencer, le rendu graphique en billboard n'est plus suffisant. Lors d'utilisations de la maquette à des fins de communications, des remarques ont été relevées concernant le manque d'esthétisme des arbres. Un des objectifs de ce stage est donc d'affiner le rendu visuel de la végétation sur les différentes interfaces graphiques.

Ensuite, la végétation arborée et arbustive entre en jeu dans les utilisations opérationnelles de la maquette 3D, dont les suivantes :

- Calcul du potentiel photovoltaïque des toitures : les arbres constituent souvent des masques
- Simulation des couloirs de vent (calcul des flux d'air pour un lien donné) : la végétation est déjà prise en compte mais une amélioration de la précision du volume des arbres devient nécessaire
- Calcul des ombres portées : ces ombres induites par la végétation doivent aussi pouvoir être déterminées plus précisément
- Calcul du bruit et de sa transmission dans la ville : les arbres sont un facteur d'absorption et d'orientation du son
- Scénarios d'ensoleillement d'habitations en fonction de la croissance de la végétation et de sa gestion

Il faut aussi avoir une vision à plus long terme de l'usage de cette maquette et de la végétation qui y est présente. En effet, quand la maquette aura une donnée "végétation" suffisamment correcte (en termes d'exhaustivité et de précision), elle pourra être utilisée par d'autres services pour des usages encore plus opérationnels comme par exemple par la Direction des Jardins et de la Biodiversité pour le suivi et l'entretien des espaces verts de la métropole.

Et pour finir, la végétation prend de manière plus générale une place de plus en plus importante en ville et notamment à Rennes. C'est d'ailleurs un des axes de développement principaux du nouveau projet urbain de la Ville de Rennes (Rennes 2030). D'autres usages sont également présentés par Signorelli V. et Leduc T., 2016.

II Contexte technique

II.1 Une donnée principale : le LiDAR

Pour entamer la présentation du contexte technique du TFE, cette première partie expliquera ce qu'est le LiDAR, principale donnée utilisée. Nous verrons ensuite son intérêt dans le cadre de notre étude puis les données qui seront utilisées.

II.1.1 Qu'est-ce que le LiDAR ?

II.1.1.1 Définition

Le terme LiDAR est une technique de mesure qui tire son nom de sa définition anglaise : *Light Detection And Ranging*, traduisible par "Laser à émission et réception". Ce nom se rapproche du RaDAR (*Radio Detection And Ranging*), qui est une autre technique de mesure utilisant des ondes radiométriques plutôt que des ondes de lumière. Le LiDAR fait partie du domaine de la lasergrammétrie car répond parfaitement à sa définition : "détermination de la forme et des dimensions d'un objet à partir de données laser". Le terme laser signifie quant à lui "Lumière Amplifiée par Simulation d'Émission de Rayonnement" ou "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Le laser est donc un dispositif qui fournit ou amplifie une radiation avec des fréquences situées dans les domaines infrarouge, visible ou ultra-violet du spectre électromagnétique. Pour résumer, le principe du LiDAR repose sur l'émission d'une onde lumineuse qui va percuter l'objet mesuré avant d'être récupéré par le récepteur, tout cela dans un but de détermination de la forme de cet objet.

II.1.1.2 LiDAR terrestre et LiDAR aéroporté

Les deux grands types de LiDAR utilisés dans les différentes sciences de la mesure sont le LiDAR terrestre et le LiDAR aéroporté. Le premier est assimilé au scanner laser terrestre, technologie laser ayant pour but d'effectuer des levés en 3 dimensions. Le second utilise un scanner laser embarqué à bord d'avions, d'hélicoptères, ou plus récemment de drones. Le LiDAR est aussi utilisé à bord de plates-formes spatiales, en suivant le principe du LiDAR aéroporté.

Les scanners laser terrestres 3D sont des instruments développés dans les années 1980 mais qui se sont popularisés au cours des dix voire des cinq dernières années. De plus en plus de topographes font l'acquisition d'appareils de ce type, parfois couplés avec des systèmes de mesures présents sur les stations totales (comme par exemple la Multistation Leica MS60). Les scanners laser utilisent la technique du balayage laser, ou scannage, dans un but d'acquisition d'un très grand nombre de points, enregistrés sous forme de "nuage". En topographie les utilisations du scanner laser sont variées : relevé de terrain, de façade, auscultation et suivi d'ouvrage ou encore métrologie.

Les scanners laser 3D sont regroupés en quatre types, suivant leur principe de fonctionnement :

- Les scanners laser à différence de phase utilisent un principe de mesure de distance similaire à celui du tachéomètre : mesure de différence de phase t (grâce à un phasemètre) entre les ondes émises et les ondes reçues, voir figure 10

- Les scanners laser à triangulation calculent les distances à partir de résolutions de triangles, en mesurant deux angles et une distance entre trois points : la surface de l'objet à mesurer (P), le laser (A) et une caméra CCD (B), voir figure 9
- Les scanners laser à impulsion ou à temps de vol utilisent le principe $2*D = v*t$ (où D est la distance instrument/objet mesuré, v la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu et t le temps parcouru par le faisceau entre l'émission et la réception)
- Les scanners laser à bras ou à main utilisent un principe proche de celui de la triangulation, et ont pour principal intérêt de pouvoir se déplacer autour de l'objet à scanner

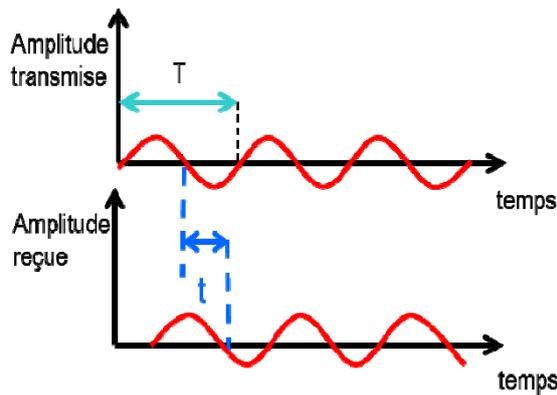


Figure 10: Principe de la différence de phase

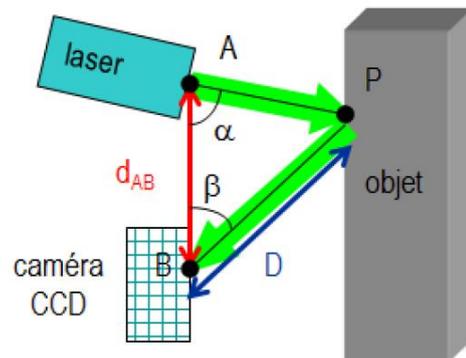


Figure 9: Principe de la triangulation

Le système LiDAR aéroporté utilise le principe du temps de vol. Deux mesures sont utilisées : la variation de temps entre l'émission et la réception du signal de lumière permet de déterminer la distance entre le laser et l'objet mesuré et l'albédo pour caractériser la surface de réflexion du laser. Le LiDAR aéroporté a aussi la particularité d'être constamment en mouvement et d'être très souvent éloigné du récepteur, ce qui oblige à prendre en compte un "bras de levier" dans les calculs.

II.1.1.3 Intérêt du LiDAR

Le LiDAR aéroporté (ou ALS, pour *Airborne Laser Scanning*) peut capter plusieurs pics d'intensité dans l'onde rétrodiffusée, grâce à la séparabilité du faisceau laser émis. En parle alors de LiDAR multi-échocs (ME). Les systèmes LiDAR ME peuvent recevoir jusqu'à 6 échos, mais 90% de l'énergie réfléchi est concentrée dans les deux premiers. Cependant, seuls les maxima d'intensité de l'onde retournée sont enregistrés en temps réel, et l'onde ne peut pas être traitée ultérieurement. Pour pallier à ce problème, des systèmes à retour d'onde complète (*full wave-form*) sont apparus plus récemment. Ils permettent d'enregistrer l'intégralité de l'onde et ainsi de résoudre en partie le problème de sur/sous détection des pics d'intensité.

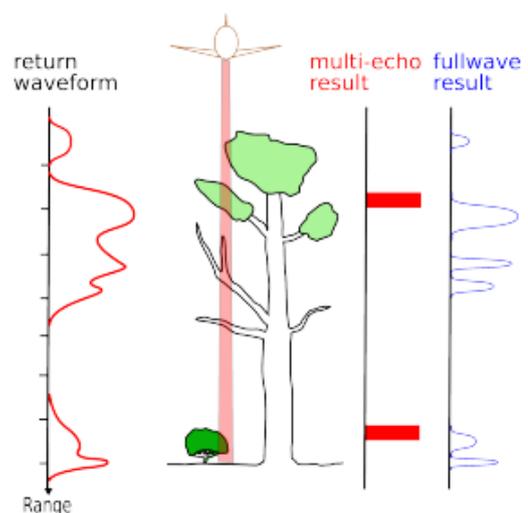


Figure 11: Comparaison des deux types de retours enregistrés (source : Mallet C., 2014)

Grâce à cette pluralité d'échos enregistrés, le LiDAR devient une des seules techniques de mesure aérienne pour cartographier le sol dans de zones boisées. En effet, le faisceau peut être transmis à travers les ouvertures du feuillage et ainsi atteindre le sol. Une fois la distinction sol/sursol faite, la production d'un MNT sous couvert de végétation est faisable. Le LiDAR est d'ailleurs utilisé pour de la prospection archéologique sous couvert forestier. Grâce à lui, deux cités mythiques d'Amérique centrale ont par exemple été découvertes en 2012, en pleine jungle hondurienne.

C'est pour cela que cette donnée nous a paru tout de suite intéressante. C'est la seule solution pour avoir une donnée homogène sur tout le territoire de la métropole rennaise permettant de produire un MNT de bonne qualité ainsi qu'un dimensionnement fiable de la végétation.

II.1.2 Les mesures utilisées

II.1.2.1 Format

Dans les plupart des cas, les fichiers de mesures LiDAR aéroporté définissent un nuage de points, donc une liste des points définis en trois dimensions. Certains formats permettent aussi de rajouter de l'information à chaque point du nuage, afin de diversifier les traitements appliqués au nuage.

À l'origine, les levés LiDAR étaient livrés au format ASCII (texte délimité de type ".xyz", ".xyzc" ou ".csv") avec la forme suivante : Coordonnée X, Coordonnée Y, Coordonnée Z, Classe (pour le format ".xyzc"). Ce format a vite été limité par le volume de stockage (les nuages LiDAR étant très volumineux) et par sa vitesse de lecture/écriture.

Les limites du format ASCII étant atteintes pour l'enregistrement de levés LiDAR, un format binaire a été développé et largement adopté par la communauté des utilisateurs de ce type de données. Créé et actualisé par l'ASPRS, le format LAS est plus approprié car il contient plus d'informations et sa binarité permet un stockage optimisé. Un fichier LAS est composé de deux parties :

- Un en-tête composé de différentes informations, avec notamment l'emprise des données, date, heure, nombre de points dans le nuage, nombre de points par retour ou encore version utilisée (las 1.1, las 1.2, etc.)
- Une liste de points avec pour chaque ligne des informations comme les coordonnées x, y et z, l'intensité, le numéro de retour, le nombre de retours, la classe, la couleur RGB ou encore l'angle de scan

Pour traiter plus facilement les nuages de points LiDAR, on peut donc ajouter une information "classe" à chaque point. Les classes sont définies à l'aide de codes numériques entiers. Les principales classes utilisées sont terre ou sol nu, végétation, bâtiment et eau mais chaque utilisateur peut définir plus de classes s'il le souhaite, afin d'apporter de la précision. L'ASPRS a aussi défini une classification standard, prédéfinie pour les fichiers LAS de format 1.1 à 1.4. En effet, l'ASPRS met régulièrement à jour son format d'échange de fichier LiDAR : le format LAS 1.0 date de 2003, le 1.1 de 2005, le 1.2 de 2008, le 1.3 de 2010 et le 1.4 de 2013.

La société RapidlassoGmbH⁹ a aussi développé en 2012 un format compressé du ".las" : le ".laz", issu de la librairie ouverte LASzip. Cette compression permet de réduire la taille des fichiers de points de 70 à 80% en comparaison au format LAS.

Comme expliqué dans la précédente partie, les informations issues de levés LiDAR ont aussi évolué avec l'apparition des systèmes à retour d'onde complète. Les formats LAS 1.3 et 1.4 permettent le stockage du signal en continu, mais pas le format ASCII. Rapidlasso a aussi développé deux formats de stockage pour enregistrer les données issus de LiDAR à retour d'onde complète : le ".pls" (enregistrement des métadonnées, autrement dit de l'en-tête) et le ".wvs" (enregistrement du signal de retour continu).

II.1.2.2 Données LiDAR à traiter

Comme dit précédemment, dès les premières recherches que j'ai effectuées sur la caractérisation de la végétation, les mesures LiDAR se sont imposées car fortement adaptées à notre utilisation. Rennes métropole travaillant en étroite collaboration avec le laboratoire COSTEL (Climat et Occupation du Sol par Télédétection – CNRS Université Rennes 2) et ce dernier utilisant régulièrement des mesures LiDAR par l'intermédiaire de la plateforme LIDAR topo-bathymétrique Nantes-Rennes, un prêt de données a tout de suite été envisagé. Pour débiter les essais et définir si cette technique de mesure a vraiment un intérêt dans la caractérisation et la modélisation de la végétation, un levé LiDAR de toute la tâche urbaine de Rennes réalisé en été en 2015 nous a été mis à disposition. Ses caractéristiques sont définies dans le tableau 1.

Date	21/08/2015
Vitesse de vol	128 nœuds
Hauteur de vol	1100 m
Divergence du faisceau	0.35 mrad
Fréquence	200Hz
Densité de points	PIR : 14 pts/m ² Vert : 11 pts/m ²
Précision en Z	<10 cm

Réalisé avec un appareil Optech Titan, ce levé a pour particularité d'émettre et de recevoir deux longueurs d'onde différentes : dans le canal proche infrarouge (1064 nm) et dans le canal vert (532 nm). La seconde longueur d'onde émise est moins courante que la première car elle est destinée à un usage bathymétrique. En effet, les ondes de lumières du canal vert se répercutent au fond de l'eau alors que celles du canal proche infrarouge ne vont pas plus loin que la surface de l'eau ou de la terre.

Tableau 1: Caractéristiques du relevé LiDAR prêté

En parallèle, dans le cadre d'un partenariat avec l'IGN qui permet l'échange de données avec la métropole et notamment des prises de vues aériennes tous les trois ans, un levé LiDAR va être effectué sur le même vol que celui des prises de vues et sera donc transmis à Rennes Métropole. Si les résultats sont satisfaisants, la collectivité espère par ailleurs poursuivre cet échange et ainsi acquérir de nouvelles mesures LiDAR à jour tous les trois ans sur l'ensemble du territoire de la métropole. Les caractéristiques du relevé peuvent être trouvées en tableau 2.

⁹ Société allemande spécialisée dans le traitement des mesures LiDAR, notamment à l'origine du logiciel LAStools et de la librairie de compression LASzip

Instrument	ALS70-HP
Diamètre tache au sol	40 cm
Fréquence d'impulsion	290 kHz
Fréquence de scan	50 Hz
Angle d'ouverture max	50°
Fauchée max	1680 m
Densité au nadir	2 pts/m ²

Tableau 2: Caractéristiques du futur relevé LiDAR

Le LiDAR est seulement ajouté au vol et ce dernier est donc paramétré pour effectuer des prises de vues photographiques. La hauteur de vol est de 6000/6500 pieds (1800/2000 m) et la vitesse de 160 nœuds (300 km/h). Ces deux paramètres sont relativement élevés pour un

levé LiDAR. Yu *et al.* (2004) précisent que la hauteur de vol a une incidence importante sur la qualité des mesures. On voit par exemple sur le tableau 3 qu'un vol à 1500m ne permet pas de détecter autant d'arbre qu'un vol à 400 ou 800m et que la précision sur la mesure de hauteur est fortement diminuée.

La densité au nadir est moyenne mais un fort recouvrement est prévu, toujours pour respecter les caractéristiques des prises de vues aériennes. Deux taux de recouvrement différents ont été décidé : un assez fort sur la tâche urbaine de Rennes et un plus faible sur le reste de la métropole et donc sur les zones plus rurales. La densité totale prévue sur la première zone est de 10 pts/m² et de 6 pts/m² sur la seconde. Le calcul de cette densité est décrit en Annexe 5. Toujours pour respecter le cahier des charges des prises de vues, le vol va être réalisé dépendamment des conditions météorologiques. Il aura lieu plutôt entre Juin et Aout pour avoir un soleil assez haut et limiter les ombres portées et par temps dégagé pour ne pas photographier des nuages qui perturberaient le traitement.

Flight altitude (m)	No. of trees detected	Bias (m)	S.D. (m)	Standard error of the mean height (m)
400	1446	-0.08	0.76	0.02
800	1400	-0.16	0.89	0.02
1500	532	-0.49	1.16	0.05

Tableau 3: Influence de la hauteur de vol (source : Yu *et al.*, 2004)

Après récupération du nuage de points LiDAR prochainement relevé, un post-traitement est confié à un prestataire privé pour la classification du nuage. Comme précisé en partie II-1.2.1, le format LAS permet d'ajouter à chaque point du nuage une valeur de classe. C'est ici ce que devra effectuer le prestataire.

Les classes demandées sont : bâti, végétation, sol, surfaces en eau. En plus de cette classification, un "nettoyage" du nuage sera réalisé pour filtrer les points aberrants, issus par exemple de la réflexion du laser sur un oiseau ou sur tout autre objet non utilisable.

II.2 État de l'art : les mesures LiDAR et la végétation

La partie suivante présente plusieurs méthodes de caractérisation de la végétation. Elle n'est pas exhaustive et se limite aux besoins du stage. La première sous-partie, abordée brièvement, concerne une individualisation ou une segmentation des arbres directement à partir du nuage alors que la deuxième présente une méthode utilisant des rasters. Nous aborderons ensuite la classification automatique des espèces d'arbres et finirons sur les logiciels à ma disposition pour effectuer les traitements. Les logiciels et langages appropriés sont présentés en annexe 4.

II.2.1 Approche "nuage" (cloud-based)

Comme expliqué en introduction de partie 2), il est possible de caractériser les arbres directement à partir du nuage de points, et notamment d'effectuer une segmentation du nuage en "clusters" : c'est le principe du clustering. Ce principe permet de définir pour chaque point du nuage à quel cluster il appartient et donc à quel arbre.

Une des approches les plus utilisées dans ce domaine est celle par reconnaissance de forme dite Bayésienne, décrite par Andersen *et al.* (2002). La première partie de cette méthode est la construction de modèles types de formes d'arbres, suivant les espèces présentes dans la zone à segmenter. Ensuite, les modèles sont ajustés au nuage de points dans une formulation Bayésienne (utilisant des probabilités de cohérence d'une partie du nuage avec un modèle). Cette approche est grandement liée au modèle d'arbre choisi (les deux principaux sont l'ellipsoïde et le cône) et ne peut pas être appliquée à une zone de végétation très hétérogène.

D'autres méthodes, comme celle présentée par Ferraz (2012), utilisent le nuage pour individualiser les arbres à partir de maxima locaux en densité et en hauteur. En effet, les cimes des arbres sont repérées comme étant des pics de densité et de hauteur. Ces méthodes permettent d'identifier les arbres dans des ensembles complexes composés de dominants et de végétation plus basse, située en dessous des feuillages dominants et donc difficile à repérer. Le nuage de points est ici assimilé à une distribution multimodale (plusieurs sommets dans la distribution). Le principal avantage est le caractère non-supervisé de l'approche, on peut donc l'appliquer à différents types d'arbres et de forêts sans avoir déterminé précédemment ces types.

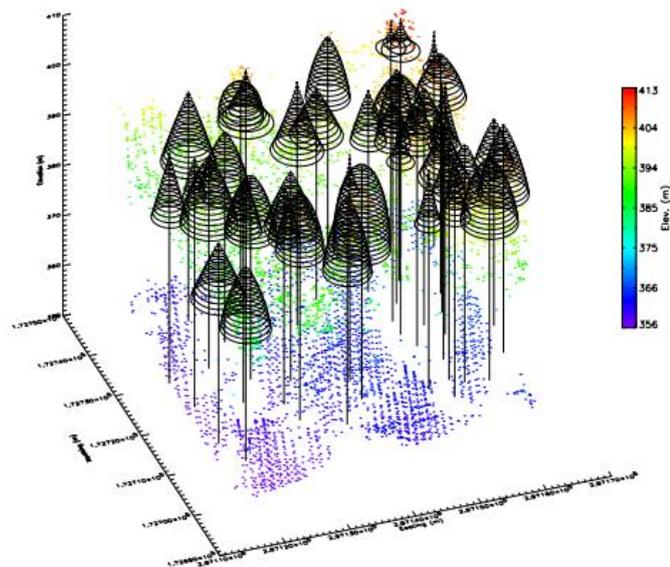


Figure 12 : Approche "Bayésienne" (source : Andersen et al. 2002)

Une autre approche, appelée "normalization cut", permettant d'identifier les arbres "dominés" est présentée par Reitberger *et al.* (2009). Celle-ci se base sur un algorithme créé par Shi et Malik (2000) qui permet de segmenter un nuage de points à partir de voxels. L'approche complète une segmentation à partir d'un MNC (voir partie II-2.2.) et applique un poids à chaque voxel à partir de leurs coordonnées xyz et parfois de l'intensité du retour LiDAR et du retour d'onde (pour des mesures full-waveform) afin de maximiser les similarités entre les voxels d'un même segment et de minimiser celles entre les différents segments.

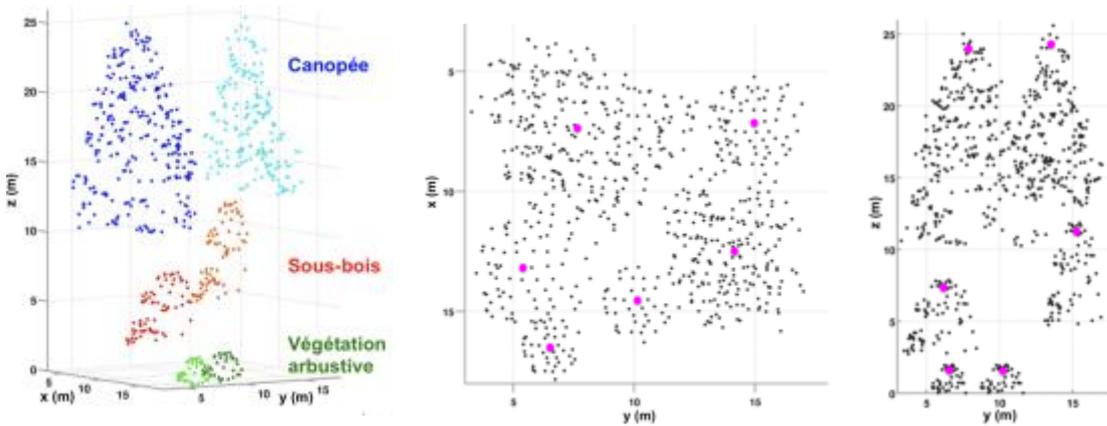


Figure 13 : Segmentation du nuage de points avec au centre des maximas locaux en densité et à droite des maximas locaux en hauteur (source : Ferraz A. 2012)

Plus généralement, les approches "nuage" sont souvent divisées en deux grandes catégories : le clustering par k-moyennes et la segmentation voxel. La première fonctionne par itérations avec premièrement des points déterminés comme cimes (par maximas locaux, suivant différentes méthodes comme celles présentées en figure 14 issues de Bock *et al.* 2011). Ensuite, chaque point du nuage est assimilé à un cluster à partir d'un critère de distance. Cette technique est développée par Morsdorf *et al.* (2004). La segmentation voxel utilise des pixels volumétriques pour effectuer diverses estimations de caractéristiques géométriques d'arbres, c'est par exemple le cas de l'approche normalization cut présentée ci-dessus.

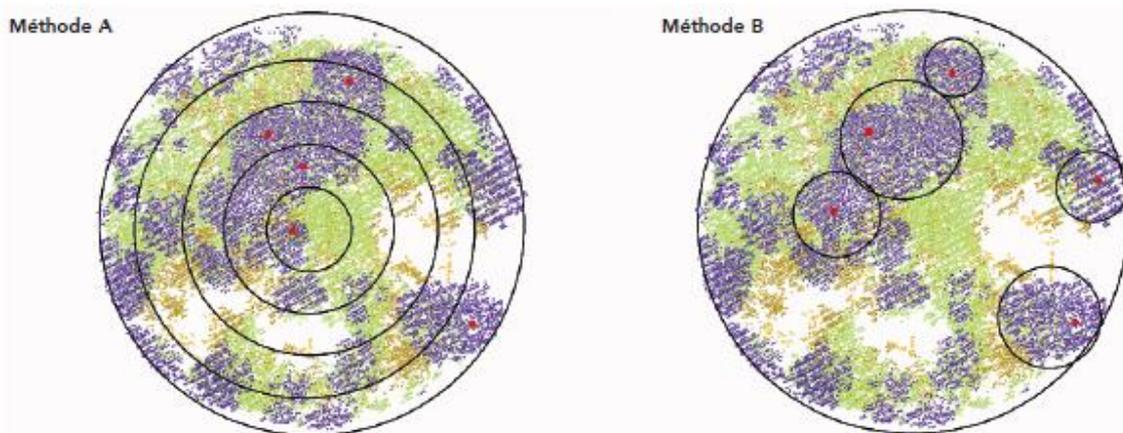


Figure 14 : Deux méthodes détection de cimes par maximas locaux (Méthode A : "La placette est divisée en 3, 4 ou 5 cercles concentriques et les hauteurs maxima dans chaque cercle sont moyennées - Méthode B : "On identifie le point le plus haut de la placette, puis on ignore les points dans un rayon d'exclusion dépendant de la hauteur de ce point")

Il existe de nombreuses autres méthodes pour individualiser, segmenter et même modéliser les arbres directement à partir du nuage de points LiDAR. Cependant, elles concluent généralement

que les conditions de mesures pour les appliquer doivent respecter un ou plusieurs des critères suivants :

- Utiliser un vol d'hiver (à fusionner si possible à un vol d'été pour compléter au maximum la donnée) afin d'obtenir une distribution des points la plus homogène possible sur toute la hauteur de l'arbre à feuilles caduques : pour un vol d'été, la majorité des points se trouve sur l'enveloppe supérieure du feuillage

- Posséder des mesures à retour d'onde complète pour utiliser ces données

- Avoir une densité de points très forte, toujours dans un but d'exhaustivité de représentation de toutes les strates du couvert végétal, et de limitation des défauts liés au manque de densité (certains points importants peuvent manquer et perturber le traitement)

Ces caractéristiques de mesures n'étant pas respectées, une approche "nuage" est plus difficilement réalisable qu'une approche "traditionnelle". L'état de l'art de ce premier type de méthodes reste donc très succinct, contrairement à celui des méthodes utilisant un ou des raster(s), présenté ci-après.

II.2.2 Approche "MNC" classique (raster)

Le plus courant des moyens d'individualiser et de caractériser la végétation à partir de données LiDAR suit une procédure relativement simple, mais qui a su faire ses preuves depuis presque 20 ans en étant toujours améliorée par de nouvelles recherches. Le processus de base est le suivant : création d'un MNC, détection des cimes puis segmentation des couronnes. Les sous-parties suivantes présenteront ces trois étapes dans l'ordre où elles sont effectuées puis une rapide précision sera faite sur les avancées de l'approche dite "MNC". Pour donner un ordre de grandeur de la qualité de cette méthode, elle permet d'identifier correctement entre 40 et 80% des arbres, suivant de nombreux paramètres comme les espèces ou le terrain (et notamment le relief).

Pour commencer nous pouvons définir ce qu'est un MNC (ou CHM en anglais) : c'est tout simplement un MNE (modèle numérique d'élévation) qui suit la canopée d'un ensemble d'arbres. Un MNS (modèle numérique de surface, ou DSM) décrit la surface supérieure de tous ce qui compose la réalité terrain (arbres, bâtiments, etc.) alors qu'un MNT (ou DTM) décrit la surface du sol sans tenir compte des éléments situés au-dessus de celui-ci. Un MNE est la soustraction du MNT au MNS, ce qui a pour résultat une description de tous les éléments de surface mais normalisés par rapport au sol : les altitudes en chaque point sont transformées en hauteur par rapport au sol. Le MNC est un MNE qui prend en compte uniquement la végétation.

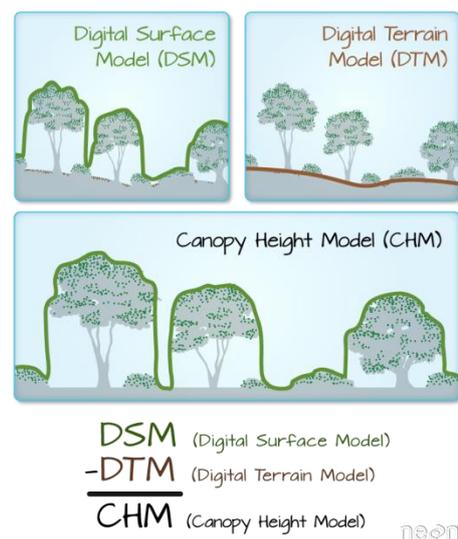


Figure 15 : Définition du MNC (en haut à gauche : MNS, en haut à droite: MNT, en bas : MNC)

II.2.2.1 MNT

La construction de ce MNC dépend donc de la construction du MNT. Même si beaucoup d'utilisateurs de données LiDAR possèdent déjà un MNT sur leur territoire, il est préférable d'en créer un nouveau qui sera plus cohérent car réalisé à partir des données LiDAR qui seront utilisées

aussi pour la création du MNC. Il est cependant difficile de généraliser quant à la précision d'un MNT obtenu à partir de données LiDAR car les paramètres varient grandement. Ceux-ci sont décrits par Ahokas *et al.* (2005) et sont principalement le système lui-même (instrument LiDAR et géoréférencement), les caractéristiques des données (de l'émetteur LiDAR et du vol), le traitement effectué (interpolation, classification, échantillonnage) et les caractéristiques du terrain modélisé (présence de végétation, type de sol, relief).

La principale difficulté lors de la réalisation du MNT à partir d'un nuage de point LiDAR est la classification des points du nuage entre le sol et le sursol. Celle-ci est couramment faite selon une des deux méthodes suivantes, présentées par Wanner (2013) :

- La méthode BCAL du laboratoire du centre aérospatial de Boise (Idaho, USA) où l'on définit un pas de grille qui sera utilisée pour rechercher des minimas (le sol), qui eux permettront une interpolation (par splines, linéairement, par régression polynomiale ou par l'inverse des distances pondérées), chaque point situé sous le modèle (MNT "provisoire") est ainsi classé en "sol" et le pas de la grille est affiné pour recommencer l'opération jusqu'à obtenir un résultat convenable

- La méthode MCC ou classification par courbure multi-échelle présentée par Evans et Hudak (2007) part à l'inverse du "haut" du nuage et supprime les points n'appartenant probablement pas au sol grâce à trois itérations successives où une surface est calculée et lissée et où les points situés au-dessus sont supprimés

Cette classification peut aussi être réalisée entièrement par des logiciels comme par exemple Fusion ou Lastools. Après l'avoir terminée, il suffit de créer une interpolation entre les points "sol" afin d'obtenir le MNT final. Plusieurs méthodes sont là aussi possibles, elles sont en partie présentées par Yang *et al.* (2004) :

- Le TIN (réseau triangulé irrégulier) est une surface qui relie tous les points classés "sol" entre eux en créant ainsi des triangles en 3 dimensions, il s'agit ici d'une définition générale, le TIN peut être réalisé selon différentes méthodes

- Les "voisins naturels" sont issus d'une interprétation par polygones de Voronoï (découpage du plan en polygones à partir de "germes", ici les points du sol)

- L'interpolation linéaire consiste à calculer la valeur moyenne du TIN dans chaque pixel issu d'une grille raster préalablement définie

- Par splines, où on calcule un lissage passant pour tous les points "sol" en réduisant la courbure globale des surfaces calculées avec une fonction mathématique

- L'IDW (ou pondération par l'inverse de la distance), réalise une interpolation en appliquant un poids à chaque cellule calculé à partir de la moyennes des valeurs des points la composant, où les poids importants seront appliqués aux points proches du centre de la cellule

II.2.2.2 MNC

Après réalisation du MNT, la normalisation pour arriver à un MNE et non à un MNS peut se faire soit sur le nuage directement (chaque point du nuage verra son altitude se transformer en hauteur par rapport au sol) soit sur le MNS (chaque cellule du raster calculé se verra soustraire le raster MNT).

Une approche courante est celle utilisée par l'outil CanopyModel du logiciel Fusion : on définit une grille pour le MNC où chaque cellule se verra attribuer la valeur de hauteur maximale

des points compris dans cette cellule. Cette approche est très simpliste mais reste sans doute la plus couramment utilisée.

Une autre méthode est celle du TIN. Ici on conserve uniquement les premiers retours (le premier impact du laser, très souvent situé sur l'enveloppe externe de l'arbre) et on effectue un maillage triangulaire sur l'ensemble de ces points. Étant donné que les premiers retours ne représentent qu'une partie (généralement entre un cinquième et la moitié) du nuage LiDAR, les données ne sont pas exploitées complètement et la densité est affaiblie, ce qui pose réellement problème si elle n'était pas assez forte à l'origine. En plus de ce problème des "pits" ou fossés en français apparaissent car certains premiers retours ne correspondent pas à l'enveloppe extérieure de l'arbre mais à un point (branche ou feuille voire même autre objet ou sol) situé en dessous.

Afin de palier à ce second souci majeur, Khosravipour *et al.* (2014) ont mis au point un processus appelé "pit-free CHM". Celui-ci effectue le calcul basique de maillage de tous les premiers retours par cellule au-dessus d'une certaine hauteur et réitère ce traitement à plusieurs hauteurs différentes. Ensuite, chaque cellule du MNC final correspond à la cellule des différents MNC (à chaque hauteur) la plus haute. Pour donner un ordre d'idée, la publication propose de commencer par 7 niveaux différents (0, 2, 5, 10, 15, 20 et 25m).

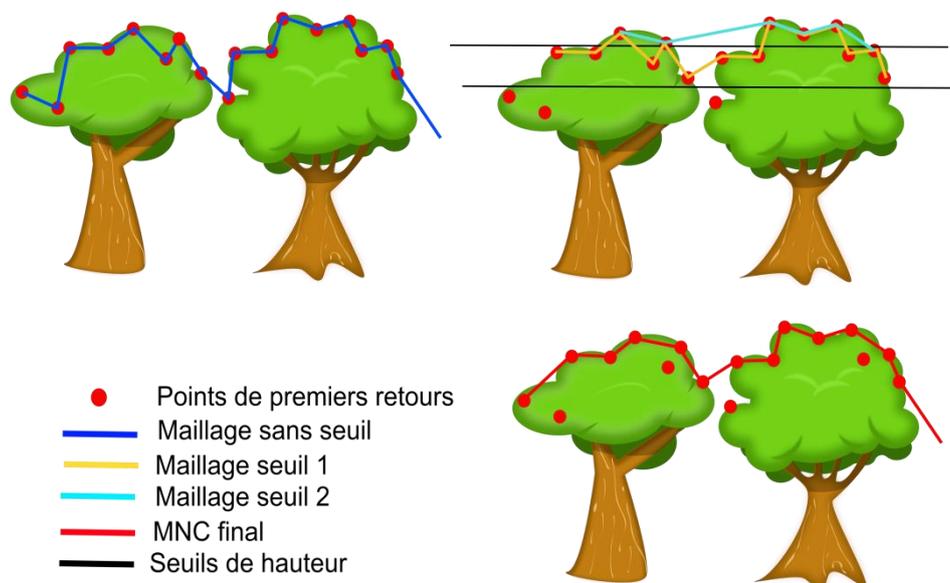


Figure 16 : Explication de la méthode "pit-free CHM"

Et pour finir, le raster MNC subi généralement divers filtrages d'image dans un but de lissage de valeurs et de renforcement des contours de couronnes. Les valeurs manquantes ou aberrantes dans la grille du CHM sont assimilées à un bruit dit "poivre-et-sel". Certains filtres linéaires comme le moyen (chaque valeur de pixel est remplacée par la moyenne locale) ou le gaussien (moins "fort", utilise une fonction gaussienne) permettent d'effectuer un lissage des valeurs et sont couramment utilisés. Dans la littérature on retrouve quelquefois aussi le filtre médian (remplace la valeur de chaque pixel par la valeur médiane locale), qui permet une bonne réduction du bruit poivre-et-sel tout en gardant des contours, et ici des contours de couronnes d'arbres, bien marqués. Deux autres techniques rencontrées sont l'utilisation d'un filtre de Lee renforcé (Lee, 1980) et l'addition de filtres morphologiques (dilatation puis érosion, Haralick *et al.*, 1987). Jakubowski *et al.* (2013) présentent une méthode assez complète en lissant le MNC grâce à une approche morphologique puis en utilisant des masques afin de conserver au maximum les

valeurs originales du MNC. Les pixels défectueux sur le raster brut sont remplacés par des pixels filtrés, tout en conservant les pixels bruts jugés cohérents.

II.2.2.3 Maximas locaux

Une fois l'image de la canopée créée, il faut passer à la recherche des cimes d'arbres, afin de les individualiser, qui selon la méthode générale présentée se fait par identification des maxima locaux du MNC. Cette recherche de maxima se fait communément par un des trois moyens suivants : fenêtre à taille fixe, fenêtre à taille variable ou la transformation "H-maxima".

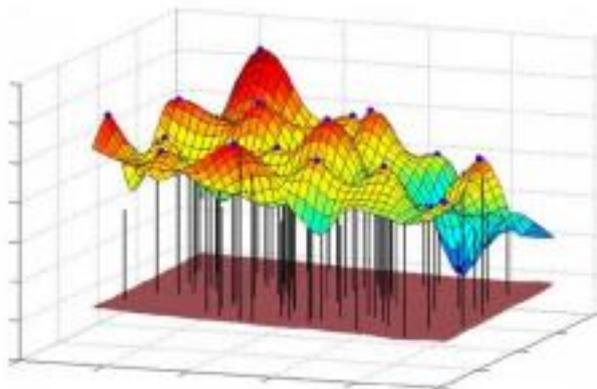


Figure 17 : Maximas locaux représentés par des points bleus (source : Reitberger *et al.* 2009)

La recherche des maxima locaux à fenêtre n est une approche très simple : à chaque pixel, on recherche dans un rayon n pixels (fenêtre généralement circulaire dans le cas de la végétation) la valeur maximale, qui correspond ici à la hauteur

maximale. n peut être un entier défini par l'utilisateur, on parle alors de fenêtre fixe et les valeurs couramment utilisées sont 3, 5 et 7. Popescu *et al.* (2004) et Chen *et al.* (2006) ont démontré qu'on peut aussi utiliser une fenêtre de taille variable en se basant sur des relations allométriques. En effet, le diamètre D d'une couronne d'arbre peut être estimé à partir de la hauteur H de cime, donnée présente dans le MNC, et cela plus spécifiquement dans des zones de boisement homogène. Plusieurs relations sont ainsi proposées comme par exemple par Popescu *et al.*, 2004 (Équation 1) en forêt de conifères ou par Pitkänen *et al.*, 2004 (Équation 2) en forêt mixte. Le rayon de recherche de maxima locaux sera ainsi différent pour chaque pixel du MNC. Le troisième moyen, la transformation H-maxima, est présenté par Kwak *et al.* (2007). Il se base sur une équation de Soille (2003) et a pour principe la suppression de tous les maxima avec un poids situé en dessous d'un certain seuil, défini à partir d'une dilatation du CHM.

$$D = 3.75105 - 0.17919 * (H + 0.01241) * H$$

Équation 1: Popescu *et al.*, 2004

$$D = 1.0 + 0.16 * H$$

Équation 2: Pitkänen *et al.*, 2004

II.2.2.4 Segmentation

La troisième et dernière étape de cette méthode générale "MNC" est la segmentation des couronnes des arbres. Là encore, plusieurs approches étant présentées dans la littérature, je citerai les deux plus répandues :

La méthode décrite par Pyysalo & Hyypä (2002) et Kwak *et al.* (2007) utilise un algorithme de ligne de partage des eaux ou *watershed*. La première étape consiste à inverser le MNC afin d'obtenir un raster où les points les plus bas correspondent aux cimes et seront assimilés

à des exutoires de bassins versants, chaque point cime définissant un bassin. Ensuite, on inonde les bassins à partir des exutoires jusqu'au contact entre bassin et ainsi on définit la ligne de partage des eaux. Dans la pratique, on part du pixel bas et chaque pixel voisin est agrégé au bassin si la pente produit un écoulement dans sa direction. Les lignes de partage des eaux deviennent ainsi les lignes séparant les couronnes entre elles. Afin d'éviter des problèmes de segmentation en limite de zones boisées ou pour les contours des arbres isolés, il est nécessaire de traiter uniquement des zones de végétation (le MNC sera découpé à chaque site arboré) ou d'éliminer tous les points situés en dessous d'un certain seuil (généralement choisi entre 2 et 6 mètres).

La seconde approche est basée sur une segmentation par croissance de région. Cela signifie qu'à partir de germes de départ (ici les cimes), un pixel est agrégé à la région connexe pour laquelle il vérifie un prédicat, c'est une approche ascendante où les pixels sont traités de façon itérative. Dans le contexte de la foresterie, une approche est développée par Li *et al.* (2012). Celle-ci s'appuie sur le fait que l'espace horizontal entre deux cimes d'arbres est plus grand que celui situé entre leurs couronnes. Les points avec un espacement horizontal supérieur à un seuil défini sont exclus de l'arbre cible et inversement les autres points seront inclus dans la région et donc dans la couronne cible. Ainsi, la méthode est montrée sur la figure 18 : A est un point cime identifié de l'arbre #1, on classe ensuite les points plus bas. Le point B est classé en arbre #2 car la distance AB est supérieure à un certain seuil. Pour le point C, la distance AC est plus petite que le seuil, on compare les distances avec A et B et le point est alors classé en arbre #1. Ensuite, le point D est classé en arbre #2 car il est plus proche de B que de C. Et pour finir le point E est classé en arbre #2 car il est plus proche de D que de C.

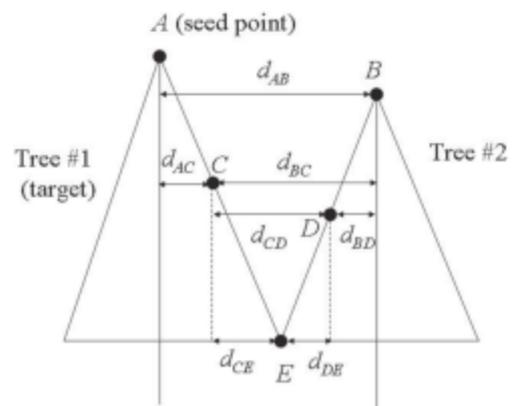


Figure 18 : Approche de segmentation des couronnes par Li *et al.* 2012

De nombreuses autres approches de segmentation ont été développées, notamment par détection de contours (Hyypä *et al.*, 2001) ou la mise en correspondance avec des modèles de forme standards (template-matching, Brandtberg *et al.*, 2003).

II.2.3 Des approches plus complètes

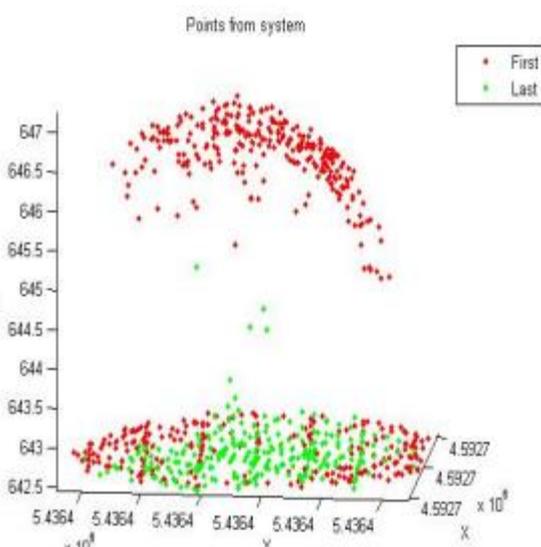


Figure 19 : Point de premiers (en rouge) et derniers (en vert) retours autour d'un arbre (source : Reitberger *et al.* 2006)

La littérature dans le domaine de la caractérisation de la végétation étant extrêmement développée, il m'est impossible de décrire toutes les méthodes d'individualisation et de segmentation des arbres trouvées lors de la recherche bibliographique. Des approches plus complètes que les deux grands types présentés précédemment ont notamment été présentées depuis plus d'une décennie.

Pour commencer, l'approche MNC classique a parfois été réalisée avant d'être ajustée par des traitements appliqués directement au nuage de point, pour compléter et corriger les arbres individualisés, ou tout simplement pour valider et

comparer les deux grandes approches. De nombreux exemples de ce type sont présentés par Kaartinen *et al.* (2012) et Jakubowski *et al.* (2013). Comme on peut le voir sur la figure 19, le nuage de points utilisé pour ce stage est issu d'un relevé LiDAR réalisé en été, la pénétration du laser dans les arbres est donc faible et le nuage ne représente quasiment que l'enveloppe extérieure des arbres. C'est donc pour cela que l'utilisation du nuage directement ne sera là non plus pas envisagée.

Ensuite, il existe des méthodes appliquant partiellement l'approche MNC classique. C'est le cas par exemple de celle de Höfle *et al.* (2008) qui réalisent une segmentation directement sur le MNC sans passer par une détection de cimes. La première étape est ici de séparer les objets convexes du raster (les couronnes) par des zones concaves. Deuxièmement un seuil de hauteur est appliqué pour éliminer toutes les zones les plus proches du sol (par exemple à deux mètres). Et troisièmement le croisement est fait avec un autre raster calculé lui à partir d'un ratio d'échos pour chaque cellule, autrement dit en comptant les réflexions multiples.

On voit aussi apparaître des techniques totalement différentes basées sur des estimations statistiques à partir de dimensions des arbres, de densité ou encore de couvert forestier. Ces statistiques se basent sur des relations allométriques présentées par Ferraz (2012) et permettent par exemple d'estimer la biomasse d'un ensemble forestier à partir de variables comme la hauteur des arbres, facilement mesurée par LiDAR. Cette biomasse peut ensuite être utilisée pour d'autres estimations comme celle du flux de carbone.

Beaucoup de recherches s'appuient aussi sur le croisement des données LiDAR avec d'autres données comme des orthophotos ou des mesures hyperspectrales, c'est-à-dire de propriétés spectrales d'image lues dans une multitude de bandes spectrales (généralement dans le domaine du visible et du proche-infrarouge). Ces dernières sont d'ailleurs très prometteuses, si l'on en juge aux publications de certains chercheurs comme Koetz *et al.* (2006).

Et pour finir, revenons au but de ce travail de fin d'études : la modélisation des arbres. Pour atteindre cet objectif, certains ont fait le choix de ne pas les individualiser et de réaliser une modélisation dite en "2.5 D". Cela signifie que la modélisation est simplement faite à partir du MNC qui est par la suite texturé. C'est le choix qu'à fait par exemple Google Maps, malgré un passage à une modélisation plus proche de la 3D dans de plus en plus de lieux. Ce choix est compréhensible car la production de la maquette est largement facilitée, tant en temps de calcul (élimination des étapes de caractérisation des arbres) qu'en conception de modèles 3D. En effet, leur but est non scientifique, il s'agit uniquement d'une visualisation grand public. Cette option n'est pas envisageable pour notre situation. En effet, au vu des usages prévus il est nécessaire de pouvoir individualiser chaque arbre.



Figure 20 : Modélisation en trois dimensions de la végétation sur Google Earth

II.2.4 L'identification des espèces

Après avoir individualisé et individualisé les arbres, la question se pose de la détermination de l'espèce. En effet, cette classification permettrait un grand gain de précision pour les divers usages techniques et pour la représentation graphique. Cette problématique est au cœur

de nombreux travaux de recherches mais aucune solution stable et efficace sur tout type de végétation n'a pour le moment été publiée.

Une des approches les plus courantes est l'utilisation de données hyperspectrales. Ces données seraient à coupler avec une segmentation des arbres à partir d'images ou de relevés LiDAR. De nombreuses études sur les signatures spectrales de la végétation ont été réalisées, notamment par Lassieur (2006) dans le cadre de détection d'activités illégales de déforestation. Une démarche intéressante est celle de Chloé Avril (2016) qui a tenté de cartographier la végétation sur la ville de Rennes par télédétection avec des données hyperspectrales et multispectrales. Une cartographie feuillu/conifère donne des résultats satisfaisants avec une approche orientée objet mais aucune classification plus fine n'a su être convaincante.

Une autre méthode est aussi utilisée depuis de nombreuses années : l'utilisation de la réflectance des écorces d'arbre. Celle-ci varie pour chaque espèce (ou groupe d'espèces) et permet donc une classification de bonne qualité. Malheureusement, ces données ne sont pas en notre possession car étant issues de levés au sol, elles ne rentrent ni dans le cadre des mesures faites par Rennes Métropole ni dans celui des mesures utilisées par le laboratoire COSTEL. Ces méthodes sont décrites par Brandtberg *et al.* (2003) et Todd *et al.* (2003). La littérature indique aussi que la forme des arbres permet de déterminer l'espèce, en fonction aussi de nombreux paramètres comme l'âge de l'arbre, son entretien par l'homme ou son milieu naturel. C'est notamment ce que décrivent Hallé et Hedelin dans "l'Analyse architecturale des arbres" (1987). En se basant sur ces informations une classification automatique est envisagée, là encore après avoir bien identifié et segmenté les arbres selon diverses méthodes. C'est par exemple ce que proposent Koenig et Höfle (2016), en couplant avec des données radiométriques et des données issues de LiDAR à retour d'onde complète et en pondérant ces trois types de données selon leur qualité et leur fiabilité. Certaines des autres approches découvertes sont basées sur l'analyse d'un nuage de points LiDAR. C'est le cas d'Andersen *et al.* (2004) qui utilisent des modèles de régression sous le logiciel R afin d'estimer les essences. Reitberger *et al.* (2008) utilisent quant à eux des probabilités de Bayes sur la densité des points et créent des modèles d'espèces. Et Hollaus *et al.* (2009) utilisent les mécanismes de rétrodiffusion des rayons laser sur la canopée grâce à un relevé LiDAR d'hiver.

Et pour finir, une technologie très prometteuse fait son apparition depuis quelques années dans le domaine de la classification automatique des essences d'arbre : la phénologie. Ce terme est défini comme "l'étude de l'influence des climats sur les phénomènes biologiques saisonniers végétaux et animaux"¹⁰. L'utilisation de séries temporelles d'images semble en effet bien adaptée à la détection d'essences d'arbres car ces dernières ont des cycles différents en termes de chute des feuilles, de jaunissement et de débourrement. Le laboratoire DYNAFOR (INRA / INP-ENSAT / INP-EI Purpan) est notamment très dynamique dans ce domaine. Il effectue des recherches de ce type en utilisant des séries temporelles denses à très haute résolution spatiale issues du satellite Formosat-2. L'engouement pour les traitements de ce type est de plus en plus fort depuis le lancement de la série de satellites Sentinel-2 en 2015 et 2017 par l'Agence Spatiale Européenne.

La caractérisation de l'essence des arbres ne sera abordée qu'en fin de stage, suivant le temps et les moyens disponibles. C'est pour cela que l'état de l'art dans ce domaine n'est que peu développé à cette date. D'autres collectivités ont d'ores et déjà entamé des réflexions et des études sur le sujet pour enrichir leur maquette 3D, comme par exemple le canton de Genève, dans le cadre de son projet Bati 3D, qui utilise un MNS et des indices de rendu couleurs d'images aériennes en se servant de régions d'apprentissage grâce à une base de données "végétation" existante.

¹⁰ Encyclopédie Larousse édition 2017

II.3 Une base de données géographique unique

Outre les données LiDAR à ma disposition, Rennes Métropole possède une base de données géographique centralisée rassemblant différents types d'informations susceptibles d'être utilisées dans le cadre de ce stage.

Cette base est liée à un catalogue de métadonnées, qui permet de connaître très rapidement les informations sur chaque donnée ou jeu de données. Ce catalogue répond à trois obligations : la sauvegarde des connaissances devant le nombre de données et le nombre d'utilisateurs, la structuration à plusieurs niveaux et le respect de la directive INSPIRE.

Le caractère unique de la base permet le regroupement des données dans un entrepôt unique, leur fiabilisation, la gestion des droits d'accès, les requêtes ainsi qu'une collaboration des différents utilisateurs. Cette base est gérée par le logiciel-serveur PostGIS ainsi que par le logiciel-serveur ArcSDE pour les données utilisées sous ArcGIS.

Au sein de cette base, de nombreuses données géographiques sont stockées et utilisables en temps réel pour ce stage, dont notamment les éléments suivants utilisés pour la modélisation de la végétation (définition et informations issues du catalogue des métadonnées). Elles sont disponibles sous forme de tables (ensemble de données sous forme de tableau, où chaque colonne est une catégorie d'information) et de schéma (ensemble permettant de regrouper des objets) :

- Table *espace_public.gev_aali*: "Ensemble du patrimoine arboré en accompagnement de voirie sur le territoire rennais, géré par la Direction des Jardins. Identification des arbres par leurs essences, date de plantation et diagnostic phytosanitaire". La précision des éléments annoncée est de 1mètre, mais elle peut dépasser ce seuil pour des géoréférencements d'arbre réalisés avec de appareils GPS de type "randonnée". Cette table se base aussi sur les éléments de la base topographique de la ville de Rennes.

- Table *espace_public.gev_aorn*: " Ensemble du patrimoine arboré d'ornement au sein d'espaces verts (parcs, squares, jardins de proximité, etc.) ou équipements (complexes sportifs, écoles, cimetières, etc.) sur le territoire rennais, géré par la Direction des Jardins. Données plus complètes pour les arbres d'ornement au sein des écoles et des crèches : essences, date de plantation et diagnostic phytosanitaire". La précision sur le positionnement est similaire à celle de la table *gev_aali*.

- Schéma *toposurf*: données issues de la base de données topographiques Topstation, dont notamment les tables *v_jardi_arbre_alignement*, *v_jardi_arbre_feuillu*, *v_jardi_arbre_resineux* et *v_jardi_haie* qui représentent chacune des types de végétation sur le territoire rennais. La précision des données est ici largement supérieure et peut descendre en dessous de 10 cm. On retrouve aussi dans ce schéma toutes les tables d'éléments de mobilier urbains qui seront utilisées en partie III-1.2.2.

- Schéma *Données_gendont* les tables *v_arbre_alietv_arbre_orn* correspondant respectivement aux arbres dits d'alignement (accompagnement de voirie) et aux arbres dits d'ornement (autres arbres relevés)

- Schéma *pat_naturel* avec des données issues de bases internes ou externes, comme par exemple la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement). La table *audiar_espforet* fait partie de ce schéma : "Cette couche localise les espaces boisés (naturels ou cultivés) d'une étendue "significative" sur le territoire de Rennes Métropole. Elle est

cogérée par Rennes Métropole (Service Information Géographique) et l'Agence d'Urbanisme et de Développement Intercommunal de l'Agglomération Rennaise (Audiard)". La précision annoncée de cette couche est 25mètres.

- Le *schéma ref_alti* et ses deux tables *mnt_courbe_niveau* (lignes représentant les isohypses espacés de 2 mètres, c'est-à-dire les lignes imaginaires reliant tous les points d'un MNT ayant la même altitude) et *mnt_point_culminant* (points culminants du MNT). Ces deux tables sont issues du traitement du Modèle Numérique de Terrain réalisé à partir de prises de vues aériennes verticales de 2014 et de la restitution des lignes de rupture de pente et des ouvrages d'art, couvrant toute la surface de la métropole avec classe de précision de 37 centimètres. Le pas de la grille est de 2mètres.

Ces données seront exploitées à différentes étapes du traitement : utilisation du MNT (voir partie III-1.3.) nettoyage du nuage (voir partie III-1.2.), validation des résultats en comparaison avec les tables de la végétation (voir partie III-2.2.) et ajout de l'information "essence" aux arbres individualisés grâce à une jointure spatiale avec ces tables (voir partie III-2.3.).

III Caractérisation de la végétation en vue de sa modélisation

III.1 Phase préparatoire : application sur une zone test

Afin de faciliter la recherche d'un ensemble de traitements fiables et de bonne qualité applicables sur tout le territoire, une zone test a été déterminée. Le processus sera donc défini et ajusté suivant cette zone, puis validé sur d'autres secteurs. Cette partie présente donc la zone choisie pour l'application du processus et détaille celui-ci. Nous retrouverons les grandes étapes de l'approche dite "MNC" classique mais aussi les améliorations apportées à celle-ci. Les données utilisées pour cette partie sont présentées en partie II-1.2.2.

III.1.1 Présentation de la zone

La zone choisie correspond à la partie ouest du parc du Thabor, situé près du centre-ville de Rennes, entre les rues de Paris et de la Palestine. Ancien jardin des moines de l'abbaye bénédictine Saint-Melaine, il a la particularité de regrouper un jardin à la française, un jardin à l'anglaise et un jardin botanique important. La diversité de la végétation a été un critère important dans le choix de cette zone. En effet, elle représente des essences d'arbres que l'on ne trouve habituellement pas dans un même lieu.

La proximité du centre-ville est aussi un avantage, pour retrouver des constructions proches de la végétation et ainsi confronter la méthode à un terrain plus complexe. En plus d'une partie du collège Anne de Bretagne au sud et un abri lié à l'église Sainte-Melaine au nord, la zone définie contient des éléments de différentes natures et donc de différentes hauteurs comme une statue, une fontaine, une scène extérieure (pour accueillir des évènements culturels), un kiosque à musique et une volière. La topographie du terrain entre aussi en jeu car comme l'ont démontré Khosravipour *et al.* (2015), la pente a une incidence importante sur la précision de la détection des cimes dans le MNC.

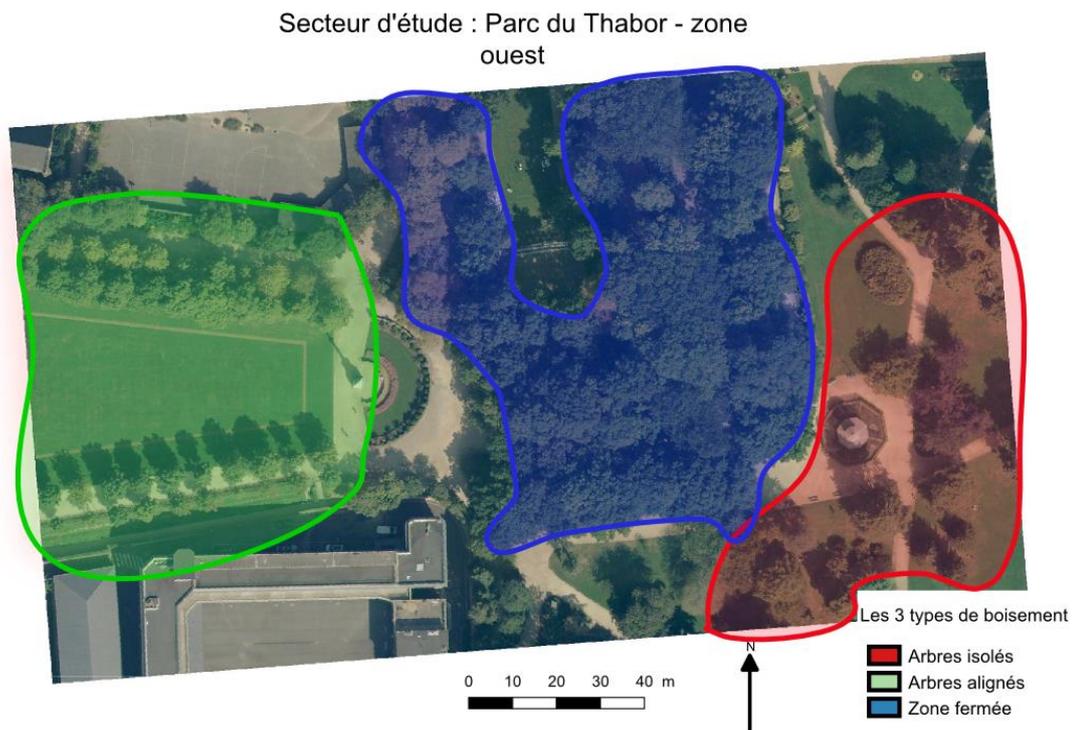


Figure 21 : Secteur d'étude et ses trois types de boisements (fond de plan : orthophotographie 2014)

L'atout principal de cette zone est aussi que malgré sa superficie réduite, qui permet des temps de traitements relativement courts, elle possède les trois principaux types de boisement que nous retrouverons sur la métropole :

- Des alignements d'arbres (que l'on retrouvera aux abords des routes et au niveau des haies bocagères en milieu rural) à l'ouest
- Une zone dite "fermée", avec une couverture de canopée continue sur une superficie de plus de 500m²
- Des arbres isolés, avec des essences hétérogènes parfois importées d'autres régions du monde

En plus de toutes ces raisons techniques, la proximité de ce parc avec le lieu de stage permet de faciliter les relevés sur le terrain, utiles pour valider les solutions. Ces relevés ont été réalisés avec l'aide d'Alexandre Moine, agent de la DJB, qui m'a donné des techniques simples de mesure des dimensions d'un arbre et pouvait identifier rapidement les essences. Ces informations ont ensuite été comparées avec celles déterminées automatiquement par le processus mis en place.

III.1.2 Préparation du nuage de points

Les processus des traitements à réaliser pour modéliser les arbres à partir de données LiDAR sont à déterminer en se basant sur le nuage transmis par le prestataire, qui devra effectuer conformément au cahier des charges un "nettoyage" de la donnée et classifier le nuage suivant la nature des objets et du terrain relevés. Cependant, le nuage en ma possession n'a pas subi un tel traitement qui devra être fait avant d'entamer le processus en lui-même.

III.1.2.1 Bâtiments

Premièrement, il a été assez simple de soustraire les bâtiments au nuage. En effet, toutes les constructions sont recensées et régulièrement mises à jour sur la base de données unique (voir partie II-3.) sous la forme de polygones Shapefile 2D correspondants aux emprises au sol. La première étape est donc de fusionner toutes les couches correspondantes au bâti existant ainsi que toutes les constructions démolies depuis la date du relevé LiDAR. Ces dernières sont connues car comme pour les constructions, les démolitions font l'objet d'une autorisation d'urbanisme et sont recensées numériquement sur toute la ville de Rennes (voir partie I-3.1.2.).

Le principe est de "trouer" verticalement le nuage de points 3D à partir de polygones 2D. Cela s'est ici fait grâce au logiciel Fusion et son outil PolyClipData.

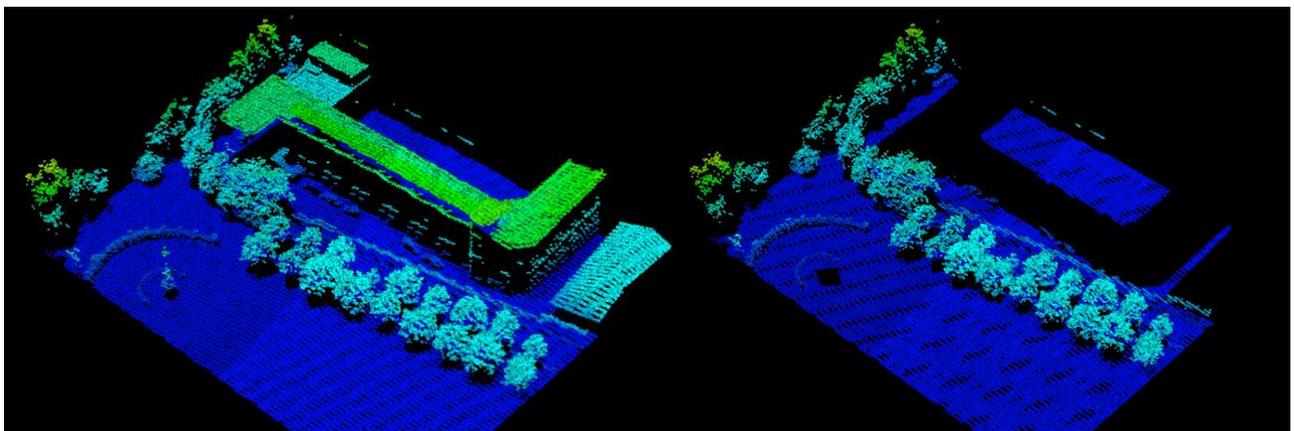


Figure 22 : Nuage avant et après découpage des bâtiments (Parc du Thabor secteur sud-ouest)

III.1.2.2 Mobiliers urbain et autres objets récurrents

Après l'élimination des zones bâties, le même principe peut s'appliquer sur tous les objets de type mobilier urbains, qui ne doivent pas perturber le calcul. Un candélabre pourra par exemple être identifié automatiquement comme un arbre et ainsi perturber les traitements.

La base de données unique contient tous les éléments relevés par l'unité topographiques sur le territoire de la ville de Rennes, et notamment des objets susceptibles d'être identifiés comme des arbres :

- Les poteaux et pylônes électriques et de communication
- Les mâts de jalonnement
- Les caméras de trafic et leur support
- Les feux tricolores
- Les panneaux publicitaires
- Les bâtiments annexes ou les parties de bâtiment non présents dans les couches réservées au bâti comme les balcons ou les débords de toiture
- Les candélabres

Tous ces éléments sont présents sous formes ponctuelles ou linéaires. Afin de les transformer en polygones et de palier à d'éventuelles imprécisions de positionnement, une zone tampon a été réalisée sur chaque objet sous QGIS. La valeur choisie est de 50 centimètres, c'est-à-dire qu'un objet ponctuel sera représenté par un disque de diamètre 1 mètre. Après fusion de tous les polygones, le découpage du nuage se fait avec le même outil que pour les couches bâtiment.

III.1.2.3 Points aberrants et finition manuelle

Au sein du nuage on trouve parfois des points apparaissant comme visiblement aberrants, comme par exemple un ou plusieurs points correspondant à un oiseau. L'outil FilterData de Fusion et son algorithme Outlier est adapté à ce type de nettoyage. Il permet d'identifier et de supprimer les points en fonction des valeurs d'élévation observées dans une fenêtre de comparaison. Le filtre calcule l'élévation moyenne et son écart-type pour chaque cellule de la grille et les compare à chaque retour individuel. Les points situés dans la gamme d'élévation calculée sont alors sauvegardés et les autres supprimés.

Et pour finir, un nettoyage manuel s'impose pour compléter les différents filtres automatiques. Certains objets détectés par le LiDAR peuvent par exemple être absents de la base de données et certains points peuvent échapper à un filtrage parfois trop souple. Ce nettoyage a été réalisé sous CloudCompare en créant des fenêtres 3D et en supprimant les points situés à l'intérieur de ces fenêtres. Ainsi, le nuage de points est maintenant prêt à être utilisé et les conditions de traitements en sont grandement améliorées.

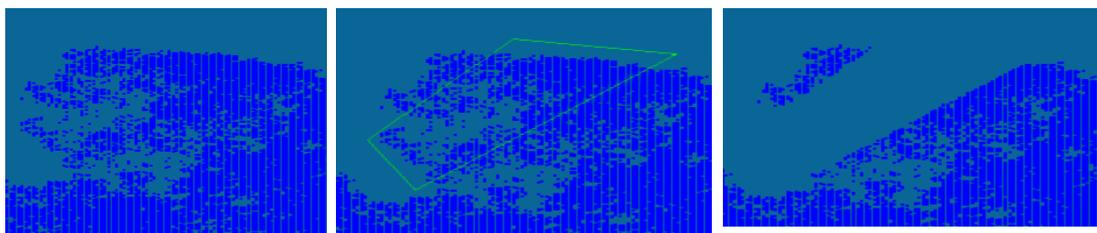


Figure 23 : Nettoyage manuel du nuage sous CloudCompare

III.1.3 MNT

Pour cette étape, plusieurs options étaient possibles. La première est l'utilisation du MNT existant. Celui-ci est disponible via le catalogue des données géographiques, il date de 2014 et est issu d'une exploitation d'une prise de vue aérienne verticale. Sa forme est une grille avec un pas de 2m, et sa classe de précision totale altimétrique est de 37 cm. Un nouveau MNT sera réalisé à partir de la prise de vue ou du relevé LiDAR de 2017, dans le cadre du marché public du traitement des données issues du partenariat avec l'IGN. Malheureusement le prestataire n'a pas encore été déterminé, tout comme la méthode de réalisation du MNT, nous n'en tiendrons donc pas compte. La précision obtenue sur un MNT issu de levé LiDAR est généralement meilleure que 37cm, surtout avec une densité comme celle de notre nuage. Cette précision peut atteindre 10 cm en conditions optimales, et très souvent 20 cm dans notre cas. Malgré cette différence de précision possiblement négligeable pour notre finalité (20 cm ou 30 cm d'erreur sur la hauteur d'un arbre modélisé en 3D n'a pas une incidence majeure), il est toujours mieux d'utiliser les données les plus précises : le choix a alors été fait de créer un nouveau MNT uniquement à partir du nuage de points LiDAR.

Une classification automatique sol / sursol avait déjà été réalisée sur le nuage en ma possession. J'ai cependant souhaité tester trois autres solutions afin de choisir la meilleure et d'approcher les différents logiciels :

- Le logiciel MCC LiDAR, qui utilise la méthode par courbure multi-échelle (voir partie II.2.2.1.); il prend en compte deux paramètres : l'échelle et le seuil de courbure. Ces deux paramètres ont été ajustés pour optimiser le résultat. Ce dernier est relativement bon, avec moins de 1% des points classifiés sol étant en réalité du sursol, mais avec aussi environ 30% des points classifiés sursol étant en réalité au sol (chiffres obtenues par visualisation manuelle sur un échantillon retreint, les paramètres sont ajustés par favoriser ce type de résultats, car la densité est suffisante pour se permettre de "perdre" de nombreux points du sol avant le maillage).

- L'outil Lasground du logiciel Lastools permet de réaliser ce type de classification, avec pour particularité le choix d'un paramètre suivant le type de terrain et l'échelle : "-town" pour terrains plats, "-city" pour les villes de taille moyenne et "-metro" pour les très grandes villes. Peu importe les paramètres en entrées, les résultats sont composés de nombreux points classés comme sol alors qu'ils ne le sont pas. Malgré la possible utilisation d'un filtre pour supprimer ces points, ils ne seront pas aussi bien classifiés que par le logiciel MCC-LiDAR. De plus, nous ne savons pas quels algorithmes utilise LAStools pour réaliser cette classification.

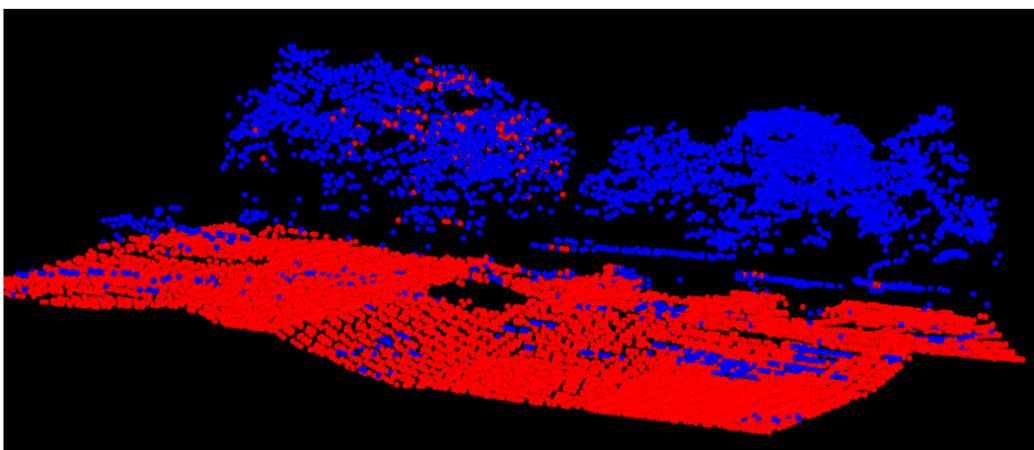


Figure 24 : Extrait du nuage de points après classification sol (en rouge) / sursol (en bleu) par l'outil Lasground

- L'outil GroundFilter du logiciel Fusion peut lui aussi réaliser cette classification, en utilisant une méthode proche de celle de MCC, avec en plus une pondération de chaque point du nuage calculée avec sa position par rapport aux différentes surfaces définies itérativement. En sortie de ce traitement on retrouve un fichier LAS contenant uniquement des points sol. Le nombre de points identifiés comme sursol alors qu'ils ne le sont pas n'est donc pas connu, mais celui des points mal identifiés comme sol est très faible.

Finalement, la classification déjà réalisée dans le nuage est la meilleure, elle sera donc utilisée et les trois tests présentés ci-dessus ne seront pas pris en compte. Ne connaissant pas la méthode de classification appliquée au nuage avant que je ne le récupère, il m'est impossible de savoir si cette qualité est due à des meilleurs traitements automatiques ou à une vérification manuelle. Pour créer un MNT raster, plusieurs méthodes ont aussi été testées, et la meilleure est sans doute la plus simple : l'interpolation linéaire (calcul d'un TIN puis de la valeur moyenne de toutes les hauteurs du TIN pour chaque pixel de la grille). C'est cette méthode qui est utilisée par Fusion et par LAStools avec son outil las2dem. C'est d'ailleurs ce dernier qui est utilisé pour réaliser le raster.

III.1.4 MNC

Dans un premier temps, un MNC entièrement automatique a été calculé grâce à l'outil CanopyModel du logiciel Fusion. Ce dernier réalise une grille où chaque pixel prend la valeur du plus haut point LiDAR compris dans la cellule. Ensuite, un paramètre "ground" peut être spécifié en ajoutant un fichier MNT, préalablement converti au format .dtm, ce qui normalise les altitudes en hauteurs par rapport au sol et ainsi crée un réel MNC. L'outil propose aussi l'utilisation d'un filtre médian, d'un filtre moyen ou les deux. Une des particularités de cet outil est qu'il permet de conserver les maxima locaux du MNC lors du filtrage, pour forcer la surface à rester proche des sommets d'arbres. Le résultat est ici satisfaisant, et l'outil permet de compléter les zones de faible dimensions sans valeurs en détectant les valeurs proches et en pondérant par rapport à la distance jusqu'à ces valeurs.

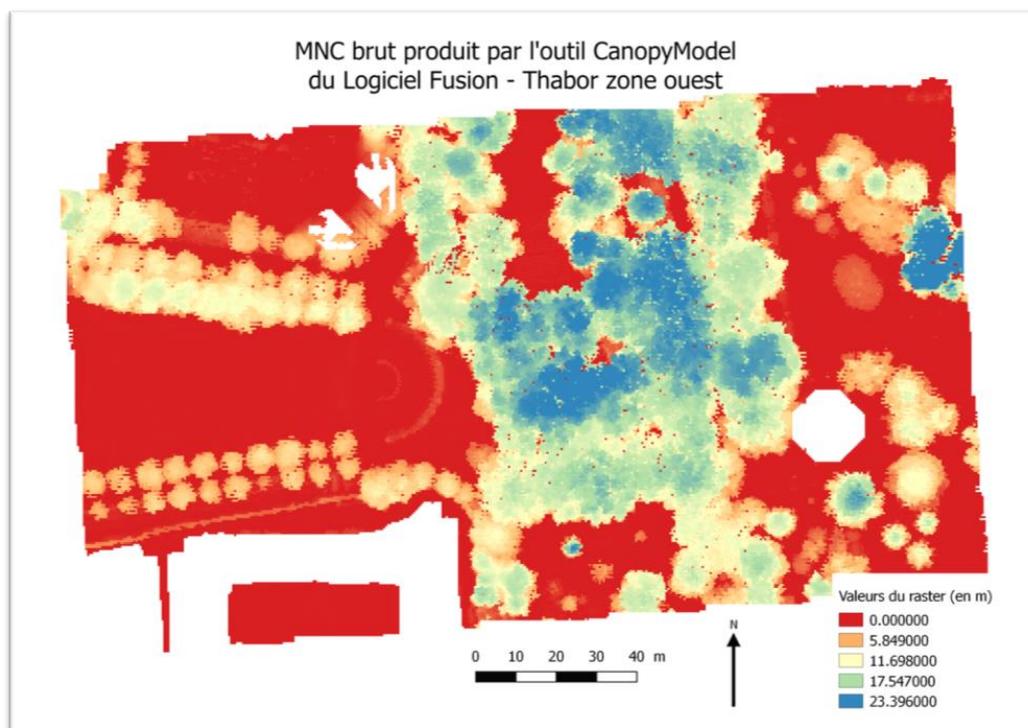


Figure 25 : MNC brut produit par l'outil CanopyModel

Plusieurs autres MNC ont été calculés par différents moyen avec LAStools :

- Rasterisation d'un TIN de tous les premiers retours par cellule
- Utilisation des tous les points les plus hauts par cellule

Ces deux méthodes donnent des résultats visiblement différents. La première méthode (TIN) a beaucoup de valeurs fausses (des "trous" et du bruit poivre-et-sel), car tous les premiers retours ne correspondent pas forcément à la végétation. La seconde méthode est quant à elle plus performante en termes de limitation du bruit rendu et d'accentuation des contours d'arbres.

Ensuite, un MNC a été créé avec la technique du "pit-free CHM" (voir partie II-2.2.2.) que j'ai retranscrit en langage Python. Ce dernier utilise des outils LAStools, qu'on peut appeler à partir d'IDLE grâce au module OS, bibliothèque dédiée à l'utilisation des fonctionnalités du système d'exploitation (comme la gestion de fichiers et dossiers, l'appel d'exécutables). Le script en question est disponible en Annexe 6. Le résultat est ici de bien meilleure qualité que celui obtenu par rasterisation d'un TIN de tous les premiers retours par cellule. Cependant, le fait d'utiliser uniquement les premiers retours réduit de façon trop importante le nombre de points pris en compte, et cette solution a dû être abandonné.

Finalement, la méthode choisie est celle de la création d'un raster avec les valeurs les plus hautes de chaque cellule. Celle-ci est très simple à mettre en place grâce à l'outil GridSurfaceCreate de Fusion et permet d'obtenir un MNC brut que l'on peut affiner manuellement grâce à des filtres. Le pas de la grille est de 50 centimètres, ce qui est assez grand pour éviter les pixels sans valeur (densité de points suffisante) mais pas trop pour garder une bonne précision et surtout ne pas trop déformer les caractéristiques du nuage de points.

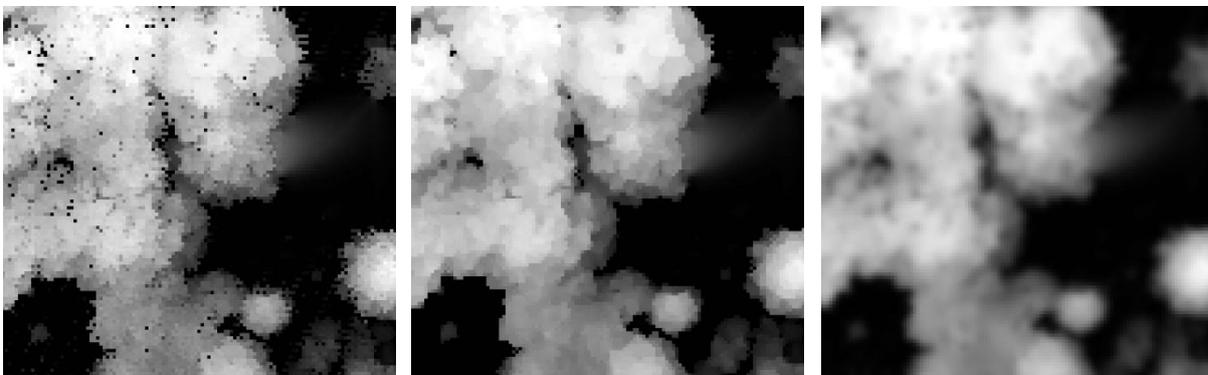


Figure 26 : MNC brut (à gauche), après filtrage médian (au centre) et après filtrage gaussien (à droite)

Plusieurs filtres de différents types ont été appliqués sur ce MNC brut, avec chacun des effets différents. Les rendus visuels de ces filtrages sont visibles en Figure 26. Le meilleur résultat étant celui obtenu par l'application d'un filtre médian, ce dernier a été choisi pour la suite des traitements. En effet, c'est le seul filtre "commun" (facilement applicable car déjà utilisé par de nombreux logiciels de traitement d'image) qui offre la possibilité de réduire le bruit poivre-et-sel et de lisser les valeurs, tout en accentuant les contours des couronnes d'arbres et ainsi faciliter la segmentation future.

Pour appliquer un filtre médian plusieurs solutions existent, et j'ai choisi celle du module QGIS pkfilter issu de la bibliothèque pktools spécialisée dans le traitement d'images de télédétection et basé sur la bibliothèque GDAL. Ce module a pour avantage de pouvoir l'utiliser de

deux façons : par l'interface graphique de QGIS en ajoutant l'extension pktools et en ligne de commande à partir d'IDLE, d'un fichier batch ou simplement d'une fenêtre de commande Windows.

III.1.5 Utilisation des pentes

III.1.5.1 Objectif

Afin de mieux déterminer les cimes d'arbres, plusieurs solutions peuvent accentuer le MNC au niveau du sommet des arbres. La densité de points du nuage peut notamment être utilisée, car elle est plus importante au niveau du sommet des arbres que sur le reste de l'objet. Cependant, avec une acquisition par un vol d'été la densité n'est que peu représentative car la pénétration du laser s'arrête très souvent au feuillage supérieur. J'ai donc souhaité exploiter une autre solution : la pente. Celle-ci est en effet proche de zéro au sommet des arbres sur le MNC et peut donc être utilisée pour mieux déterminer ce point stratégique.

L'idée était de calculer les pentes sur le MNC brut afin de retrouver les caractéristiques originales du nuage de points. Un filtrage a néanmoins été nécessaire car le bruit poivre-et-sel était trop important et perturbait le calcul des pentes. Un filtre gaussien a donc été appliqué sur le MNC brut afin de lisser les valeurs du raster. Ce type de filtrage est ici adapté car il est plus léger qu'un filtre moyen et permet un réel lissage contrairement au filtre médian qui accentue les contours. Ce filtre peut lui aussi être utilisé par différents moyens notamment par plusieurs plugins QGIS comme pktools, SAGA ou encore GRASS. La solution adoptée est celle d'une fonction en langage Python adaptée sur la base d'un script libre présenté sur plusieurs forums internet et issus de réflexions communes entre les utilisateurs de ces forums en ligne. De ce fait, le filtrage appliqué est complètement géré par l'utilisateur, contrairement à un plugin QGIS où l'algorithme appliqué n'est pas toujours connu entièrement. La figure X montre, schématiquement, les étapes et l'intérêt de l'utilisation de la pente pour améliorer la détection des cimes.

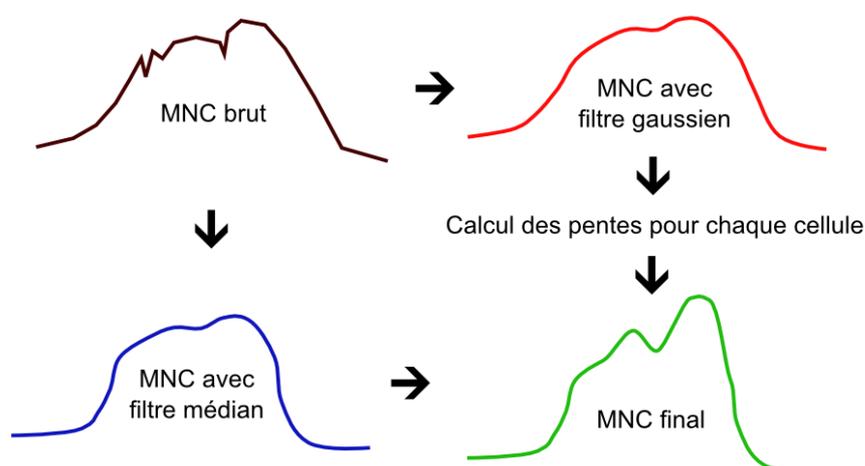


Figure 27 : Schéma explicatif de la pondération du MNC par sa pente

III.1.5.2 Pondération par un raster

Pour mettre cette méthode en place, plusieurs solutions ont également été envisagées. Après plusieurs essais fructueux, la méthode choisie est la suivante :

- Calcul d'un raster où chaque pixel du MNC avec filtrage gaussien est comparé à ses pixels contigus pour déterminer sa valeur moyenne de pente

- Pondération du MNC avec filtrage médian par l'inverse du raster des pentes

La première étape a été réalisée par l'outil `gdaldem` de la bibliothèque GDAL ajoutée à QGIS sous forme de plugin. Cet outil permet le calcul automatique des pentes en chaque pixel du raster très simplement et efficacement. La seconde étape a tout d'abord été réalisée grâce à la calculatrice raster disponible sous QGIS, puis manuellement sous Python en utilisant la bibliothèque GDAL pour ouvrir et gérer les bandes raster. La formule de pondération utilisée est la suivante :

$$MNC_{final} = MNC_{médian} \times \left(1 - \frac{Pente}{X}\right)$$

Avec X un coefficient compris entre 100 et 400, pour ajuster la puissance de la pondération. Ce coefficient doit être assez élevé pour être influent mais suffisamment bas pour ne pas modifier complètement le MNC et éviter d'augmenter les valeurs minimales locales du MNC qui correspondent au sol.

Comme on peut le voir en figure 28, les cimes beaucoup apparaissent plus marquées avec cette technique. La suite des traitements peut alors être abordée.

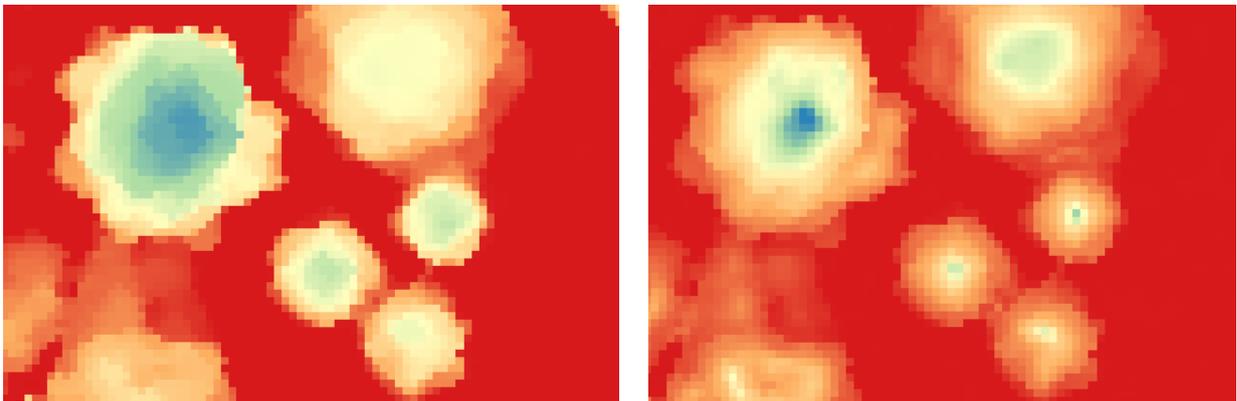


Figure 28 : MNC avant (à gauche) et après (à droite) la pondération par un raster

III.1.6 Détection des sommets et segmentation

III.1.6.1 Méthodes entièrement automatiques : premiers essais

Passons désormais à une étape déterminante du processus : l'individualisation des arbres. Nous avons vu en partie II-2.2. que celle-ci se réalise généralement en deux parties, en détectant premièrement les cimes grâce à un filtre de maxima locaux puis en segmentant les couronnes d'arbres. Deux outils issus du logiciel Fusion permettent cependant de réaliser ensemble ces deux traitements automatiquement. Ils ont constitué les premiers essais de l'individualisation des arbres, afin de se rendre compte assez tôt des possibilités de la méthode classique dite du MNC.

Le premier outil est CanopyMaxima. Il identifie dans un premier temps les cimes à partir du MNC en effectuant une recherche de maxima locaux par fenêtre à taille variable. Cette variabilité se base sur les relations allométriques liant la hauteur d'un arbre au diamètre de sa couronne. Différentes relations peuvent être utilisées suivant les caractéristiques de la végétation à traiter. Ensuite, il estime la hauteur de la base de la couronne à la moitié de la hauteur totale de l'arbre. Et pour finir, 16 profils sont extraits du MNC à partir de chaque cime détectée et créé des points le long de ces profils avec un écart entre les points égal à la moitié du pas du MNC raster (un

profil est un transect centré sur la cime et il y a un profil tous les 22.5°). Le rayon de couronne pour chaque profil est déterminé à partir d'une des deux règles suivantes :

- Si le point est un minimum local, la distance horizontale jusqu'à ce point est le rayon de couronne pour ce profil
- Si une série de trois points a des hauteurs inférieures à 66% de la hauteur de la cime, la distance jusqu'au deuxième point est utilisée comme rayon du profil

Le rayon de chaque couronne est alors calculé en moyennant les rayons des 16 profils. Les profils n'ayant pas de valeur car n'ayant pas répondu à une des deux règles citées ci-dessus ne sont pas pris en compte dans cette moyenne.

Cet outil a pour avantage sa facilité d'utilisation : il suffit d'ajouter en entrée le MNC pour obtenir en sortie un fichier Shapefile avec les cimes en objet ponctuels et un autre avec les couronnes sous forme de polygones. Néanmoins, l'estimation du rayon des couronnes n'est pas assez proche de la réalité pour pouvoir être utilisée dans notre cas.

Le second outil testé est TreeSeg. Il utilise un algorithme de bassin versants appliqué directement au MNC sans avoir déterminé les cimes au préalable. Les cimes peuvent être déterminées par la suite en sélectionnant le point le plus haut pour chaque bassin. Dans ce cas, 18 profils de points sont calculés à partir de la cime pour déterminer le bord de la couronne. Chaque point du profil est testé pour répondre à trois critères : les deux cités ci-dessus utilisés par l'outil CanopyMaxima et un troisième, où l'écart en hauteur avant le point doit être supérieur à quatre fois l'écart en hauteur après le point. Là aussi l'utilisation est simple et on peut retrouver en sortie les deux mêmes Shapefiles qu'en sortie de l'outil CanopyMaxima.

Comme on peut le voir sur la figure 29, les premiers résultats obtenus très rapidement grâce à TreeSeg étaient très encourageants sur l'identification des cimes. Ils n'étaient cependant pas encore suffisants pour être utilisés directement pour la modélisation, et les couronnes identifiées étaient très éloignées de la réalité.

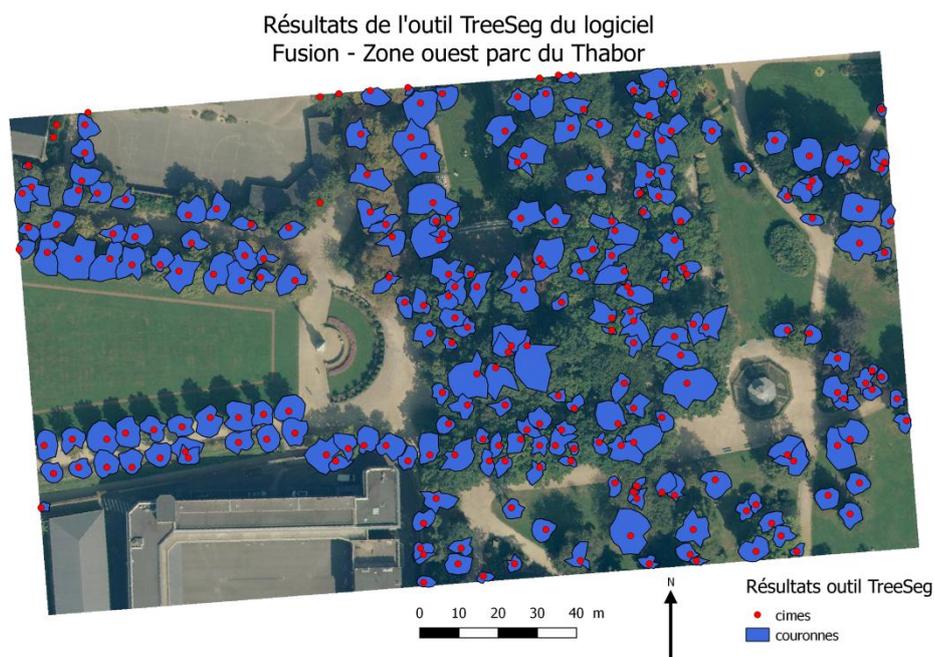


Figure 29 : Résultats de la détection des cimes et des couronnes par TreeSeg (fond de plan : orthophotographie 2014)

III.1.6.2 Identification des cimes

Les traitements complètement automatiques étant cohérents mais n'ayant pas des résultats assez précis, nous avons appliqué une approche canopée classique. Pour la première étape, l'identification des cimes par maxima locaux, les deux principales solutions ont été testées : par fenêtre variable et par fenêtre fixe. Pour ce faire, les trois langages informatiques présentés en annexe 4 ont été testés : Python pour commencer parce que son utilisation était déjà connue, R ensuite pour avoir un rendu graphique direct et pour finir Matlab après son acquisition.

Pour commencer, un script Python disponible librement, `treeDetectLmax`¹¹, permettant d'identifier les maxima locaux d'un raster avec une fenêtre de taille fixe, a été téléchargé. Ce programme prend en compte un MNC en entrée ainsi que le rayon de recherche des maxima locaux et la hauteur minimale d'identification (seuil généralement fixé entre 2 et 5 m) pour créer un fichier SHP et un fichier KML en sortie, avec chacun des points correspondants aux différentes cimes détectées. Les résultats étaient satisfaisants, malgré un problème plus général qui commençait à s'identifier : le rayon de recherche de maxima devait être adapté suivant la densité d'arbres dans une zone. Le package `rLiDAR` du logiciel R permet aussi de réaliser le même type de détection, avec là aussi en entrée le MNC, le rayon de recherche et le seuil de hauteur. Il a été testé afin de vérifier que les résultats étaient similaires à ceux issus du script Python mais aussi pour prendre en main le logiciel R afin de réaliser d'autres traitements, notamment des enveloppes convexes 3D.

Un autre essai a ensuite été réalisé pour comparer les résultats avec une recherche de maxima locaux à fenêtre de taille variable. Une bibliothèque de fonctions MatLab est disponible, proposé par le même développeur que le script Python cité ci-dessus, Matthew Parkan. Dans cette bibliothèque Digital Forestry Toolbox, on retrouve plusieurs fonctions dont `canopyPeaks`, qui permet de détecter les cimes sur un MNC par maxima locaux à fenêtre fixe mais aussi à fenêtre variable. La variabilité de la taille de la fenêtre peut être implémentée manuellement par l'utilisateur qui choisit quelle relation allométrique utiliser suivant le type d'arbre à identifier et le terrain.

Les résultats de l'utilisation d'une fenêtre à taille variable ne sont pas sensiblement meilleurs, voire même de moins bonne qualité que ceux obtenus avec une fenêtre à taille fixe. En effet, la zone comprend une trop grande hétérogénéité entre les arbres pour permettre cette technique, et le problème sera amplifié pour une application étendue à la métropole. La décision a alors été prise d'utiliser une fenêtre à taille fixe, plus stable ayant pour atout principal une utilisation homogène sur tout type d'arbre et de terrain, sans en favoriser un.

III.1.6.3 Segmentation des couronnes

La segmentation peut alors débuter avec comme points de départ les cimes précédemment identifiées. Là aussi, plusieurs essais ont été réalisés, avec les différentes méthodes décrites en partie II-2.2.4. La plus adaptée étant, comme attendu, la méthode des bassins versants et de ligne de partage des eaux. Les premiers essais se sont effectués sous QGIS avec les outils SAGA. Ils étaient très facile à réaliser grâce à l'interface graphique de QGIS et les résultats étaient visibles directement sous forme de couches automatiquement ajoutées au projet. Ici, les résultats étaient ici bons dès le premier essai.

¹¹ Script téléchargeable sur le site "LiDAR et forêts" (<https://sites.google.com/site/lidareforet/>)

Cette méthode de segmentation a donc été adoptée et l'ensemble des étapes s'est faite sous Matlab pour limiter les changements de logiciels et ainsi la création de fichiers temporaires pas toujours nécessaires. En effet, il a suffi de créer un court script capable de lancer les deux fonctions canopyPeaks et treeWatershed de la bibliothèque de Matthew Parkan pour réaliser respectivement les étapes d'identification des cimes et de segmentation des couronnes. Le script a ensuite été modifié pour pouvoir être lancé depuis IDLE sous la forme d'une fonction et ainsi créer des fichiers SHP des cimes et des couronnes sous Python grâce à la bibliothèque GDAL/OGR.

III.1.7 Partition en zones ouvertes/fermées

III.1.7.1 Une nécessité

Comme cela a été repéré lors de l'identification des cimes, la densité d'arbres a une grande importance sur les paramètres à utiliser lors des traitements. Plus que la densité, des essais réalisés manuellement ont prouvé que c'est la fermeture ou l'ouverture du couvert forestier qui influe sur la qualité des résultats. En zone de boisement continu, les écarts en hauteur doivent être plus fortement accentués qu'en zone dite "ouverte". Cela peut se traduire par une pondération du raster pente plus importante par rapport au MNC. Les écarts étant plus faibles en zone dite "fermée", il a aussi fallu les conserver au maximum en modifiant le processus de pondération du MNC : le calcul d'un raster des pentes s'est fait sur le MNC brut et c'est le raster obtenu qui a été lissé par un filtrage gaussien. L'autre différence entre les deux types de zone est la taille de la fenêtre de recherche des maximas locaux. Elle doit être plus importante en zone fermée qu'en zone ouverte pour éviter une sur-quantification des cimes.

III.1.7.2 Moyen utilisé

Afin d'y arriver, plusieurs solutions ont été exploitées durant les différentes périodes du TFE. Durant toute la première partie des traitements, cette partition en zones n'était pas prévue et la qualité des résultats stagnait. Ensuite, une zone fermée avait été déterminée manuellement sur le secteur d'étude afin de poursuivre avec les étapes suivantes et ainsi appliquer des traitements différenciés en fonction des zones, mais il a fallu trouver une méthode applicable automatiquement à tout le territoire métropolitain.

Une des solutions envisagées premièrement est l'utilisation d'une carte de chaleur¹². Celle-ci avait été calculée suivant la densité des cimes détectées par un prétraitement entièrement automatique sous Fusion. QGIS permet la création d'une carte de ce type sous format raster, qui peut ensuite être seuillée pour définir deux types de zones.

Une autre possibilité est celle de la matrice des distances calculable par QGIS. Le principe est de sélectionner tous les points ayant d'autres points proches d'eux. Là encore on se base sur une couche de points issue d'un prétraitement, et une matrice des distances est calculée par QGIS sur chacun de ces points. Cet outil permet de connaître la distance jusqu'aux X points les plus proches, avec X un entier choisi par l'utilisateur. Après avoir fait une jointure attributaire entre la couche des points et celle de la matrice, toutes les distances

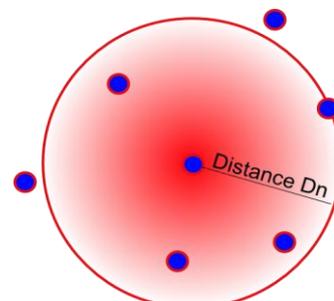


Figure 30 : Le point centre sera identifié en zone dense si $i = 4$

¹² Selon la documentation du logiciel Qgis (http://docs.qgis.org/1.8/fr/docs/user_manual) : "Une carte de chaleur est une carte raster montrant la densité ou l'amplitude d'une information relative au point. Le résultat se visualise sous la forme de "points chauds"".

calculées correspondent à des attributs pour chacune des cimes. Il suffit alors de réaliser une sélection attributaire pour connaître les cimes déterminées comme en zone de boisement fermé. Cette sélection peut se faire selon la formule suivante : $D_n < i$; avec D_n la distance calculée jusqu'au $n^{\text{ème}}$ point et i un seuil, généralement situé entre 4 et 10 m suivant les différents essais réalisés.

Cependant, ces techniques n'étaient toujours pas assez stables pour être utilisées sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole. Aussi, une dernière méthode a été mise au point et a été sélectionnée pour effectuer la suite des traitements. Celle-ci consiste en la réalisation des étapes suivantes :

- Premier traitement de détection des cimes et de segmentation des couronnes avec des paramètres adaptés aux zones dites "ouvertes"

- Buffer de dilatation de 1 m sur les couronnes nouvellement identifiées (figure 31 étape 1)

- Union de toutes les couronnes s'intersectant (étape 2)

- Érosion avec un buffer d'une valeur de -8 m (étape 3)

- Suppression des zones restantes inférieures en superficie à 80 m² (étape 4)

- Dilatation avec un buffer de 7 m pour retrouver les limites des couronnes d'arbres (étape 5)

- Les polygones ainsi créés qui intersectent les premiers polygones de couronnes calculés voient leurs limites s'étendre jusqu'aux limites des couronnes (étape 6)

- Suppression des cimes et des couronnes situées dans les zones définies comme fermées

- Découpage du MNC suivant ces zones et pondération avec le raster des pentes lissé

- Traitement de détection des cimes et de segmentation des couronnes avec des paramètres adaptés aux zones dites "fermées"

- Union des cimes suivant les deux types de zones, et union aussi des couronnes pour avoir en résultat uniquement deux fichiers SHP.

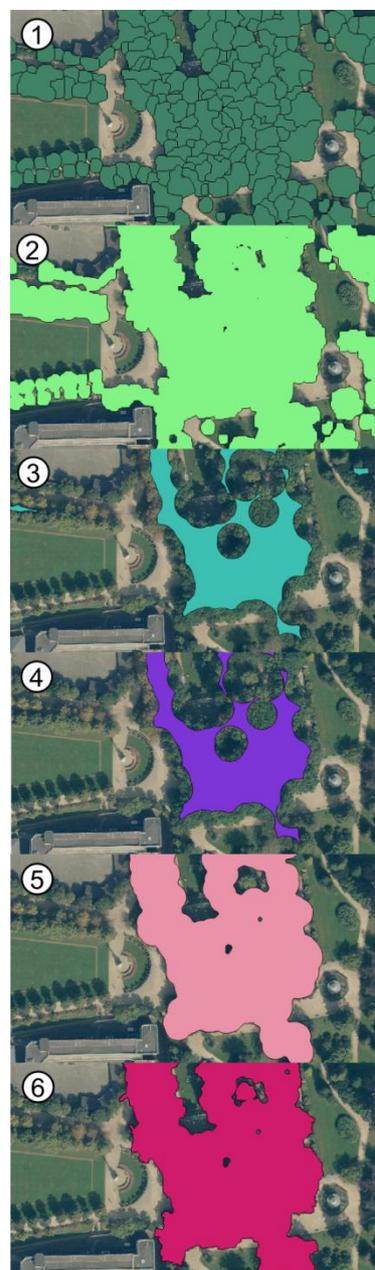


Figure 31 : les 6 grandes étapes de la définition des zones fermées (fond de plan : orthophotographie 2014)

III.1.8 Non-verticalité des arbres

III.1.8.1 Problématique

Une des grandes limites de ce TFE est la non-verticalité des arbres. Ce problème est un réel défaut de l'ensemble de la méthode décrite jusqu'ici. En effet, les arbres sont désormais individualisés et sont représentés chacun par un point et un polygone. La modélisation se fera donc

très probablement à partir du point, qui est le point identifié comme maxima local sur le modèle numérique de canopée. Cependant, si l'on projette ce point cime au sol, il ne correspond pas toujours au centre du tronc. Malgré le fait que le point le plus haut d'un arbre est très souvent le point situé dans la continuité du tronc, ce dernier n'est jamais parfaitement vertical, il est même parfois dans une position très oblique. Ce phénomène peut s'accroître en cas de relief du sol.

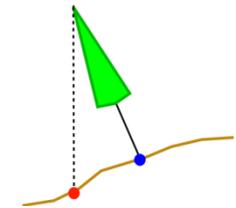


Figure 32 : Problème de non-verticalité des arbres

III.1.8.2 Calcul d'une droite de régression par la méthode des moindres carrés

Afin de repérer et de corriger ce défaut, une solution nous a été proposée par Jean Nabucet, collaborateur régulier de Rennes Métropole par l'intermédiaire de son laboratoire de recherches : le COSTEL. Cette solution est la construction au sein de chaque couronne d'une droite de régression des points LiDAR. Celle-ci peut se calculer par la méthode des moindres carrés. Les points LiDAR pris en compte seront ici les points supérieurs à un seuil de hauteur de 2m et avec l'identifiant du polygone des couronnes par lequel ils ont été découpés. Cette découpe s'est réalisée par l'outil PolyClipData de Fusion. Les points ont ensuite été transformés en un fichier SHP unique par SAGA et se sont vu ajouter un attribut correspondant à la couronne à laquelle ils appartiennent par un script FME.

Une telle droite correspondrait donc à l'orientation de l'arbre, la calculer reviendrait à calculer le vecteur directeur de l'axe tronc-cime.

Le raisonnement de M. Nabucet est le suivant :

Chaque couronne possède n points $M_i(x_i, y_i, z_i)$ avec i allant de 1 à n .

(D) est la droite de régression avec $A(x_a, y_a, z_a)$ un point lui appartenant et $N(n_x, n_y, n_z)$ un vecteur directeur de (D).

Pour tout i , M_i appartient à (D) si et seulement s'il existe un réel k tel que $AM = k.N$

On a alors le système suivant :

$$\begin{cases} x_i - x_a = k \times n_x \\ y_i - y_a = k \times n_y \\ z_i - z_a = k \times n_z \end{cases}$$

On a donc : $k = \frac{(x_i - x_a)}{n_x}$

Et en substituant cette valeur de k dans les deux autres équations on obtient :

$$\begin{cases} n_x \times (y_i - y_a) = n_y \times (x_i - x_a) \\ n_x \times (z_i - z_a) = n_z \times (x_i - x_a) \end{cases}$$

L'équation de notre droite est définie par ce dernier système.

On peut alors linéariser le système en fixant deux paramètres :

$z_a = 0$ et $n_x = 1$

Ces deux hypothèses sont vraies sauf dans le cas où la droite est comprise dans un plan parallèle mais distinct au plan (O, x, y) .

On a finalement :

$$\begin{cases} x_i = n_x \times z_i + x_a \\ y_i = n_y \times z_i + y_a \end{cases}$$

On peut enfin résoudre ce système à quatre inconnues (x_a , y_a , n_x et n_y) par la méthode des moindres carrés en le mettant sous forme matricielle.

On a une équation de la forme $B = A \cdot X$

$$\text{Avec } B = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ n_x \\ n_y \end{bmatrix}; \text{ et } A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & z_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & z_i \end{bmatrix}$$

Avec pour résultat $X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot B)$

Les divers calculs utilisant les moindres carrés étudiés lors de travaux pratiques à l'ESGT ont grandement facilité la traduction de ce raisonnement en Python. Le script obtenu est disponible en annexe 7. En revanche, lire correctement les données s'est révélé plus délicat. Pour cela, plusieurs étapes ont été nécessaires :

- Lecture de fichier DBF associé au fichier SHP des points LiDAR retenus grâce au module dbfread
- Tri de ce fichier pour rassembler les points appartenant à la même couronne
- Première boucle "while" lisant les lignes du fichier (chaque ligne correspondant à un point LiDAR) une par une
- Seconde boucle "while" imbriquée dans la première qui lit chaque ligne d'une couronne suivant l'identifiant de cette dernière
- Enregistrement des coordonnées Y et Z de chaque point appartenant à la couronne dans un tableau
- Calculs matriciels pour obtenir la solution des moindres carrés
- Enregistrement des 4 inconnues par l'intermédiaire d'un dictionnaire ayant pour clés les identifiants de chaque couronne

III.1.8.3 Réussite de cette étape

Malgré un principe en théorie efficace, les résultats n'ont pas été satisfaisants. La cause de cet échec est la date du relevé LiDAR : un vol d'été, comme celui en notre possession, permet d'obtenir une forte densité de points sur l'enveloppe extérieure des houppiers mais la pénétration dans le feuillage est parfois très faible. Contrairement à cela, un vol d'hiver aura une densité homogène sur les arbres à feuilles caduques. Lorsque l'on a des points situés sur l'extérieur du houppier, la droite calculée n'est pas de bonne qualité et peut même parfois être très loin de la réalité. Le moindre défaut de quelques points peut faire varier la direction de la droite très

fortement.

Cependant, les droites de régression calculées seront utilisées par la suite lors de la validation, et cette approche pourra être abordée sur un relevé vol d'hiver effectué récemment par la Plateforme LIDAR topo-bathymétrique Nantes-Rennes prochainement mis à notre disposition.

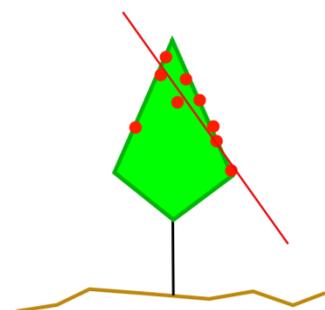


Figure 33 : problème lié au calcul d'une droite de régression pour un vol d'été

III.2 Le processus définitif

Dans cette dernière partie, nous verrons premièrement comment réaliser un processus unique et définitif afin de répondre à la problématique, ensuite nous aborderons la question de la validation des résultats et pour finir la finalité du stage sera traitée : la modélisation. Nous retrouvons en figure 34 un organigramme schématisant les différentes étapes du processus définitif, les données utilisées et les trois phases de validation des résultats.

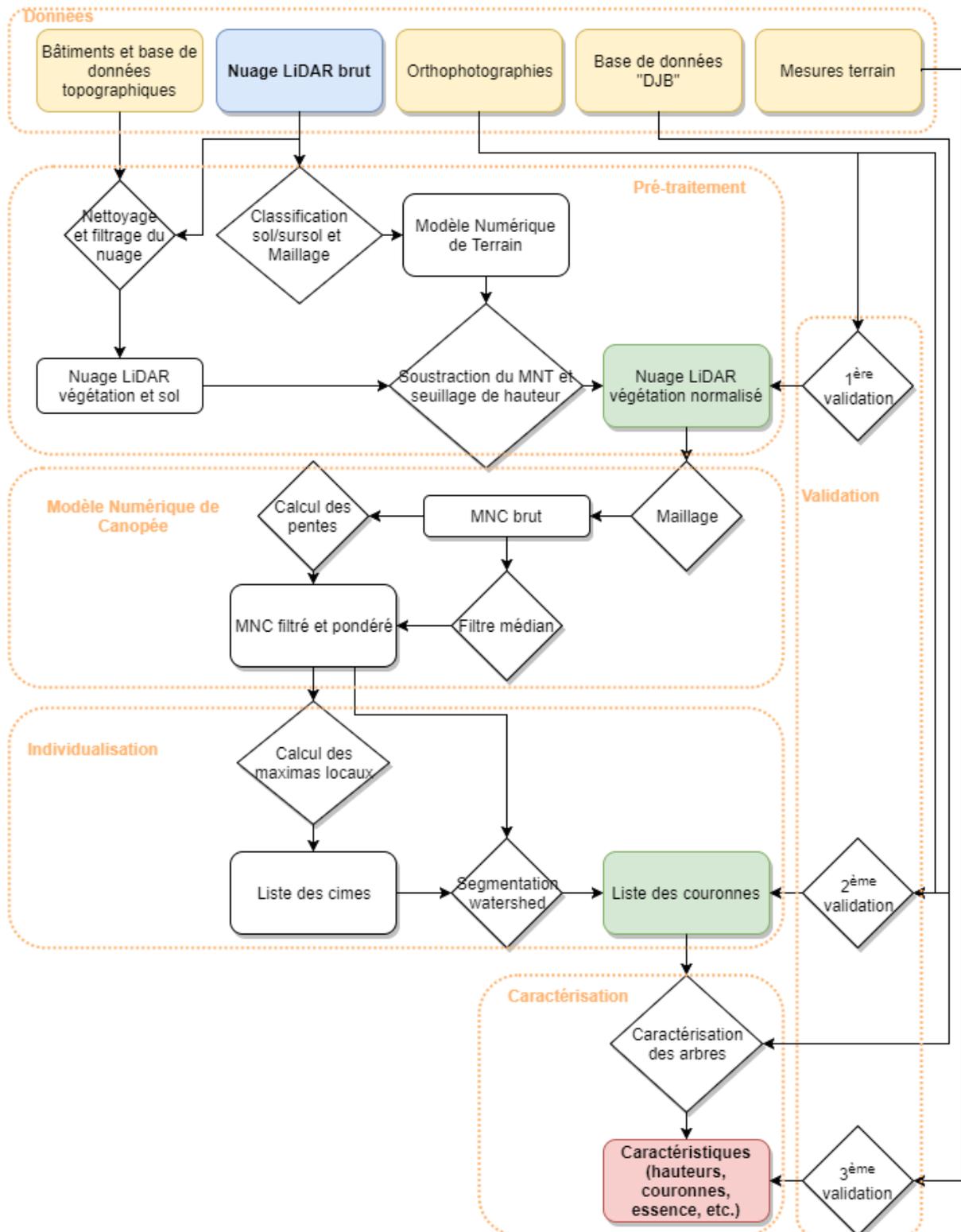


Figure 34 : Organigramme du processus retenu

III.2.1 La réalisation d'un processus unique et automatique

Comme précisé par la problématique guidant ce mémoire, un des grands principes de mon travail a été la création d'une chaîne de traitements permettant de réaliser automatiquement les différentes étapes jusqu'à la modélisation, indépendamment de la zone à traiter. Pour cela, j'ai réalisé un script au langage Python, utilisable par exemple par IDLE, qui lance un par un les traitements en s'adaptant au secteur à étudier et en étant en interactivité avec l'utilisateur. Ce langage a été choisi car c'est le langage informatique étudié au cours du cycle ingénieur de l'ESGT, il est polyvalent et permet une utilisation aisée de structures de contrôle (boucles, tests, etc.).

Le principe de ce script est de créer, à partir d'un nuage de points, des fichiers SHP avec tous les attributs nécessaires à la modélisation. Il y aura donc en entrée un fichier LAS et deux fichiers SHP : les bâtiments avec un buffer de 2m et les données de la base topographique avec un buffer de 1m. En sortie, nous trouverons deux fichiers SHP, l'un avec les couronnes (polygones) et l'autre avec les cimes (points), chacun ayant en attributs les caractéristiques de hauteur utilisées par la suite lors de la modélisation.

Pour commencer, une interaction avec l'utilisateur a été prévue afin de choisir la zone géographique à traiter et de choisir les différents paramètres (rayon de recherche des maxima locaux, coefficient de pondération par la pente, pas du MNC, etc.). Ceci s'est fait grâce à la fonction `input()` de Python et d'une boucle `while` permettant de vérifier que le paramètre donné par l'utilisateur est cohérent, et de refaire une demande si ce n'est pas le cas. Le script a été divisé en 6 étapes, qui seront présentées ci-après. Dans un souci de gestion des données, chaque étape correspond à un dossier où seront stockés tous les fichiers intermédiaires.

III.2.1.1 Étape 1 : préparation des données

La première étape consiste à préparer l'ensemble des données avant d'entamer les traitements à proprement dits. Il s'agit ici du nettoyage du nuage et principalement de son découpage par les deux Shapefiles des bâtiments et des éléments de la base topographique grâce à l'outil `PloyClipData`. Pour utiliser cet outil à partir de Python, j'ai utilisé la fonction `system()` du module `os` qui permet d'exécuter une commande externe. Par exemple pour supprimer les éléments de la base de données topographiques du nuage dit "brut", la commande est la suivante :

```
>>>polyclipdata = "c:\\fusion\\polyclipdata"  
>>>pcd_1 = polyclipdata + "/outside " + elements_topo + " " + nuage_clean_bat + " " + nuage_brut  
>>>os.system(pcd_1)
```

Ensuite, il a fallu diviser le nuage en tuiles de 500m par 500m pour créer le MNT et normaliser les altitudes. Ce "tuilage" s'est réalisé par l'outil `lastile` de `lastools`. Un MNT divisé en tuiles a été créé par l'outil `las2dem` de `lastools` mais ne sera pas utilisé lors de la suite des traitements. En effet, la normalisation des altitudes en hauteurs s'est faite avec l'outil `lasheight` qui ne nécessite pas de MNT lorsque le nuage est bien classifié en sol/sursol, ce qui est le cas ici.

III.2.1.2 Étape 2 : MNC

Afin de créer le maillage points les plus hauts par cellule et ainsi le MNC, l'outil `GridSurfaceCreate` de `Fusion` a été utilisé. Il permet de lire plusieurs fichiers LAS mis sous la forme d'un fichier texte avec à chaque ligne les liens vers le fichier LAS en question. Pour créer cette liste sous Python, la fonction `walk` de la librairie `os` a été utilisée sous forme de boucle. Pour

chaque fichier LAS détecté dans un répertoire donné, une ligne dans le fichier texte est écrite avec le chemin d'accès au fichier, et la boucle s'arrête quand tous les fichiers du répertoire ont été lus. Ensuite l'outil de Fusion est lancé par la fonction system. Pour finir, le MNC au format .dtm est converti au format .tif par l'outil DTM2TIF de Fusion.

Comme précisé en partie III-1.4.4., un filtrage médian s'applique au MNC. Il est réalisé par l'outil pkfilter, toujours grâce à la fonction system.

Ensuite vient le calcul du raster des pentes. Le MNC brut subit tout d'abord un filtrage gaussien avec une fonction Python nommée gaussian_blur disponible librement sur internet. Le raster est alors calculé par l'outil gdaldem et son paramètre slope, lancé par la fonction system. Un autre raster des pentes est aussi calculé directement sur le MNC brut et subit ensuite le même filtre gaussien. Ce dernier raster sera utilisé pour les zones postérieurement définies comme fermées.

La dernière étape pour la préparation d'un MNC adapté est la pondération du MNC médian par le raster des pentes. Deux MNC finaux sont calculés, l'un pour les zones dites ouvertes et l'autre pour les zones dites fermées. La bibliothèque GDAL/OGR est ici très utile car elle permet d'ouvrir un fichier raster, d'identifier une bande à traiter et d'effectuer des calculs entre bandes.

III.2.1.3 Étape 3 : individualisation des arbres en zones ouvertes

Pour cette étape, l'identification des cimes et la segmentation des couronnes sont faites sur le logiciel Matlab, premièrement avec les paramètres ajustés aux zones ouvertes mais appliqués sur tout le secteur traité. Deux fonctions développées par Matthew Parkan sont utilisées :

- TreePeaks : Localisation des maxima locaux dans un MNC
- TreeWatershed : Extraction des couronnes d'arbres à partir d'un MNC et d'une liste des cimes en suivant l'algorithme de segmentation par bassin versant de Kwak et al. (2007).

Ces deux scripts Matlab sont inclus dans la boîte à outils "Digital Forestry Toolbox" (DFT), compilation de tutoriels et de fonctions Matlab pour le traitement et l'analyse de données de télédétection pour l'étude des forêts. Après avoir téléchargé et décompressé la DFT, les fonctions peuvent être ouvertes dans Matlab et utilisées directement. J'ai donc créé un script Matlab qui appelle les deux fonctions précédemment citées avec les paramètres adaptés et exporte la liste des cimes dans un tableau ainsi que les couronnes dans un fichier raster. Pour exécuter le script Matlab créé à partir du script Python général, le moteur Matlab pour Python est appelé. Ensuite, la fonction est exécutée grâce à ce moteur, avec 3 paramètres en entrée (le MNC, la taille de fenêtre de recherche de maxima locaux et le nom du fichier de sortie des couronnes raster) et en précisant l'option "nargout=3" qui permet d'enregistrer le résultat (liste des cimes détectées en coordonnées "image" et en coordonnées UTM ainsi que la liste des couronnes segmentées) dans une variable, ici appelée "result_ouvert".

```
>>eng = matlab.engine.start_matlab()
>>result_ouvert=eng.seg_pente_chm_solo (CHM_ouvert,rayon_ouvert,SEG_ouvert_raster,
nargout=3)
```

La liste des cimes en coordonnées générales est alors transformée en un fichier Shapefile de type points. Pour créer ce fichier la première phase est la construction d'un numpy array (liste de données sous forme de tableau) regroupant toutes les cimes. La seconde phase est la création d'un fichier SHP par GDAL et la lecture ligne par ligne des éléments du numpy array avec une boucle for pour les ajouter au fichier SHP par la fonction SetPoint_2D de GDAL.

Et pour finir cette troisième grande étape, les couronnes font elles aussi l'objet d'une création d'un fichier Shapefile, mais cette fois-ci de type polygones. Le raster créé par Matlab est ouvert par GDAL et sa bande principale est lue, puis est convertie en polygones par la fonction Polygonize de GDAL. L'outil ogr2ogr de GDAL est ensuite appelé par la fonction call de la bibliothèque subprocess, pour garder uniquement les polygones de plus de 2.5 m² ayant un identifiant différent de 0 (cet identifiant étant utilisé pour créer le ou les polygone(s) inverse(s) des couronnes, c'est à dire les zones non boisées). Ces deux sélections se font par une requête en langage SQL.

III.2.1.4 Étape 4 : partition en zones fermées/ouvertes

La méthode utilisée pour diviser les secteurs à traiter en zones ouvertes et en zones fermées est expliquée en partie III-1.7.2. Les tampons, négatifs ou positifs, sont réalisés par différentes fonctions de la bibliothèque OGR qui permettent la lecture et l'écriture de Shapefiles, le calcul du tampon en lui-même et la lecture des éléments d'un Shapefile un par un en boucle pour calculer les tampons. L'union des polygones est elle aussi réalisée par des fonctions des bibliothèques OGR et Fiona, cette dernière étant spécialisée dans la lecture et l'écriture de données spatialisées.

La phase de division du polygone unique en polygones multiples est opérée par la fonction Python multipoly2poly, disponible librement sur internet. Comme pour la fin de la troisième grande étape, la suppression des polygones inférieurs en superficie à 80 m² se fait par une requête SQL en option de l'outil ogr2ogr.

L'étape se termine par l'utilisation d'une fonction FME nommée Dissolver et appelée par la fonction call de la bibliothèque subprocess. Ainsi chaque polygone représentant une zone fermée étend ses limites extérieures jusqu'à celles des couronnes qu'il intersecte. Cette fonction FME permet donc d'ajuster la partition en zones aux limites des couronnes et ainsi d'éviter des éventuels conflits entre la segmentation en zone ouverte et celle en zone fermée (voir partie III-1.7.2.).

III.2.1.5 Étape 5 : individualisation des arbres en zone fermée

Les polygones définissant les zones fermées sont ajoutés en paramètre de la fonction gdalwarp afin de découper le MNC sur ces zones. Ce dernier est ensuite utilisé en entrée du script Matlab et l'identification des cimes ainsi que la segmentation des couronnes sont similaires à celles des zones ouvertes. Les mêmes fichiers SHP sont créés. Seuls le MNC en entrée et le rayon de recherche des maxima locaux sont différents.

III.2.1.6 Étape 6 : préparation à la modélisation

Cette dernière grande étape permet de préparer des fichiers qui seront utilisés pour atteindre la finalité du projet : la modélisation des arbres en trois dimensions. Pour commencer un fichier SHP des zones ouvertes est créé en soustrayant celui des zones fermées à l'emprise totale du nuage. Ce nouveau fichier permet de découper les cimes et les couronnes déterminées avec les paramètres de zones ouvertes pour qu'elles soient situées uniquement dans ce type de zones. Les cimes présentes uniquement en zones ouvertes et celles situées uniquement en zones fermées sont alors fusionnées, de même pour les couronnes.

Un script a ensuite été écrit sous FME et appelé par Python afin de réaliser les étapes suivantes :

- Génération d'un identifiant unique de 16 caractères pour chaque couronne avec l'outil UUID Generator
- Suppression des couronnes ne comprenant aucune cime avec l'outil SpatialFilter
- Suppression des cimes sans couronne et récupération du même identifiant que la couronne pour chaque cime correspondante par l'outil Clipper
- Génération des barycentres des couronnes (centroïdes de polygones) avec l'outil CenterPointReplacer
- Calcul de la distance entre les centres de chaque couronne et les cimes correspondantes par l'outil NeighborFinder, pour vérifier manuellement d'éventuelles erreurs

Le nuage de points LiDAR "végétation normalisé" (après suppression des éléments connus et soustraction du MNT) est alors découpé suivant les couronnes par l'outil ShapesPoints de SAGA. Tous les points LiDAR situés dans l'emprise d'une couronne prennent ainsi son identifiant unique. Cette réintégration du nuage sera utilisée ensuite pour la préparation à la modélisation et développée en partie III-2.3.

III.2.2 La validation des résultats

III.2.2.1 But et moyens

Une étape importante pour tout projet à caractère scientifique est la phase de validation des résultats. Ici, plusieurs validations ont été réalisées à différents niveaux du processus de traitement pour vérifier la qualité du nuage "végétation" (sans éléments autres que les arbres), de la segmentation et de la préparation à la modélisation. Le choix du processus s'est fait tout au long du stage, premièrement à partir de l'état de l'art puis sur l'échantillon test instinctivement en comparant les différents résultats avec les orthophotographies et les bases de données disponibles recensant une partie de la végétation. Il a ensuite fallu qualifier ces résultats par des chiffres, ce qui constitue une véritable validation.

Pour commencer, trois secteurs d'études représentatifs de l'ensemble de territoire métropolitain et non encore traités ont été définis : le premier dans le quartier de la Croix-Noblet sur la commune de Cesson-Sévigné, le deuxième au cœur des Prairies Saint-Martin et le troisième en plein centre-ville de Rennes comprenant la Place République et la Place de Bretagne. Les caractéristiques de chaque secteur sont présentées en tableau 4.

	Croix Noblet	Prairies Saint-Martin	République
<i>Description rapide</i>	Quartier résidentiel avec stade et une partie de l'École des transmissions	Parc Naturel Urbain avec quelques habitations, un cours d'eau	Constructions de grandes hauteurs, chantier, rues et places
<i>Superficie (m²)</i>	327 270	113 260	292 600
<i>Surface boisée (m²)</i>	26 000 (8%)	55 000 (49%)	22 000 (7.5%)
<i>Surfaces boisées fermées (m²)</i>	9 400 (36% de la surface boisée)	41 500 (75% de la surface boisée)	3 200 (15% de la surface boisée)
<i>Surface bâtie (m²)</i>	31 000 (10 %)	5 000 (4%)	179 000 (61 %)

Tableau 4 : Caractéristiques des trois secteurs de validation

Premièrement des essais de validation ont été réalisés à partir des droites de régression par moindres carrés calculées (distance horizontale entre la cime détectée et le point d'intersection de la droite de régression et du sol). Malheureusement ces droites ne peuvent actuellement pas être utilisées, pour les raisons expliquées en partie III-1.8.3. Un autre test a été celui de la mesure de distance entre la cime détectée et le barycentre de la couronne segmentée. Cependant, là non plus les résultats n'étaient pas utilisables car pour beaucoup d'arbre la cime est excentrée du tronc (notamment quand l'arbre n'est pas vertical ou qu'il subit un entretien par l'homme). Le choix du processus de validation s'est alors orienté vers trois différents niveaux, aux trois grandes étapes des traitements.

III.2.2.2 Validation du nuage

La première grande étape du processus de traitement est l'obtention d'un nuage contenant uniquement des arbres et avec des hauteurs par rapport au sol (voir parties III-1.2. et III-1.3.). C'est donc sur ce premier résultat intermédiaire que sera réalisée la première validation. La décision a été prise de réaliser celle-ci sur les cimes identifiées, ce qui semble ne pas correspondre à la donnée à valider. L'idée est la suivante : pour chaque secteur on superpose les cimes identifiées par maxima locaux avec un fond orthophotographique, et on identifie quels points ne correspondent pas à de la végétation. En cas de doute, on peut utiliser Google Earth afin de vérifier si l'objet est bien un arbre. On peut aussi superposer le MNC du secteur afin d'observer la taille de l'objet et sa hauteur (un objet de 1 pixel, ou 50 centimètres, très haut ne peut vraisemblablement pas être un arbre et sera plutôt un candélabre ou autre mobilier urbain de ce type).

Les orthophotographies utilisées ont une résolution de 10 centimètres (ce qui est suffisant ici) et datent de 2014. Cette date est postérieure à la date du levé LiDAR mais la période de mesure est la même, nous faisons donc l'hypothèse qu'en un an la végétation n'a pas évolué. Les résultats obtenus sont visibles en tableau 5.

	Croix Noblet	Prairies St-Martin	République
<i>Cimes détectées</i>	567	1008	563
<i>Arbres effectifs</i>	549 (97%)	1007 (99.9%)	506 (90%)
<i>Points hors végétation</i>	18	1	57

Tableau 5 : Résultats de la première validation

Les points détectés comme cimes et ne correspondant pas à des arbres peuvent être de différentes natures : balcons et autres constructions ou parties de constructions non présents dans la base utilisée pour le nettoyage du nuage, murs et murets supérieurs au seuil de hauteur, zone de rupture de pente. Ces derniers éléments correspondent à des ponts ou des talus supérieurs au seuil de hauteur et non pris en compte tels quels dans le MNT. L'utilisation du MNT avec les lignes de rupture de pente et déjà réalisé est prévue et sera réalisée en fin de stage. Malgré ces erreurs, les résultats correspondent aux attentes, et les plus mauvais sont issus des traitements en zone plus complexe (90% des cimes identifiées correspondent à des arbres pour le centre-ville). Une validation inverse (vérification de la présence de tous les arbres dans le nuage prétraité) a été imaginée mais n'a pas été mise en place car l'hypothèse de non évolution du terrain était alors trop forte, et les différentes méthodes (comparaison avec orthophotographies ou relevés terrain) n'étaient pas précises. De plus, les arbres présents dans le nuage sont uniquement ceux situés au-dessus du seuil de hauteur (à priori 5 mètres) et il est difficile d'évaluer si un arbre représenté sur une orthophotographie mais absent du nuage a effectivement une hauteur supérieure au seuil et constitue donc une erreur.

III.2.2.3 Validation de la segmentation

Le deuxième résultat intermédiaire majeur est l'ensemble des couronnes d'arbres segmentées. Pour valider ce résultat, nous avons mis en place un protocole de vérification de cohérence de chaque segment et non de la segmentation en elle-même (on vérifie que le segment se superpose approximativement à un arbre, on ne vérifie pas si ses limites correspondent précisément à celles de l'arbre, car cela sera trop difficile à mettre en place ici). Les arbres sont tout d'abord répartis en trois catégories :

- Arbres isolés (ne correspondant à aucune des deux règles suivantes)
- Arbres alignés (au moins 4 arbres alignés dans une direction avec distances entre couronnes inférieures à 1 mètre)
- Boisements fermés (au moins 4 arbres avec couvert forestier continu et chaque arbre est contigu à au moins deux autres arbres)

Ces catégories seront ensuite utilisées pour l'analyse des résultats de la validation et les possibles améliorations qui en découlent. Le protocole de validation est le suivant : pour chaque catégorie d'arbres on compte le nombre de couronnes de bonne qualité et celles de mauvaise qualité (bonnes/fausses). Dans ces dernières on effectue un second tri entre les erreurs de sur-segmentation (plusieurs segments pour un arbre), de sous-segmentation (plusieurs arbres pour un segment) et les segmentations fausses (toutes les autres erreurs, hors points ne correspondant pas à la végétation, déjà comptabilisés dans la première validation). Pour effectuer ces comptages on superpose la couche des polygones couronnes avec la couche des arbres de la DJB en ajoutant un fond de plan orthophotographique. Les segments jugés "bons" doivent contenir un seul arbre de la couche connue et leurs limites doivent correspondre approximativement aux limites de l'arbre sur l'orthophotographie. En cas de doute, on peut se référer à la couche des données topographiques (moins complète pour la végétation mais plus précise) ou Google Earth (vision en trois dimensions et photographies "streetview"). Les résultats sont présentés en tableau 6. La réalité terrain est actuellement définie comme le nombre de segments total correspondant effectivement à des arbres. Comme pour la première validation, les arbres non identifiés ne sont pas pris en compte. En effet, la couche de données végétation existante n'est pas assez mise à jour pour prendre en compte les points ne correspondant à aucune couronne identifiée et la hauteur n'est pas connue (il est normal qu'un arbre ne soit pas identifié si il a une hauteur inférieure à 1 mètre).

Le première analyse que l'on peut faire est la suivante : peu importe la zone traitée (malgré de grandes différences, voir partie III-2.2.1.) on retrouve sensiblement les mêmes qualités de résultats suivant les types de végétation : **entre 84.9 et 85.6 %** de couronnes bien segmentées pour les arbres isolés, **entre 66.5 et 69.8 %** pour les arbres alignés et **entre 33.3 et 39.6 %** pour les zones fermées. Ensuite, on peut regarder quelles erreurs arrivent le plus souvent : dans environ **50%** des cas il s'agit de sur-segmentation, puis environ **40%** de sous-segmentation et **10%** d'autres erreurs. Et pour finir, on peut moyenniser les résultats pour savoir qu'au total environ **70%** des couronnes sont bien segmentées. On rappelle que tous ces résultats ne tiennent pas compte des objets identifiés ne correspondant pas à des arbres et des arbres non identifiés.

On peut conclure que le processus est bien ajusté entre la sur-segmentation à la sous-segmentation. On conclut aussi malheureusement que les résultats en zones fermées sont très mauvais (**35 %** des couronnes sont bien segmentées) : il faudra donc envisager d'autres solutions si l'on souhaite utiliser ces couronnes. Pour la modélisation, nous avons prévu temporairement de modéliser les zones denses "en bloc" sans individualiser les arbres, ce qui est suffisant pour les usages actuels de la végétation modélisée en trois dimensions mais n'est pas une solution définitive.

	Croix Noblet			St-Martin			République		
	Isolés	Alignés	Fermés	Isolés	Alignés	Fermés	Isolés	Alignés	Fermés
Réalité	549			1007			506		
	181	209	159	148	129	730	232	220	54
Couronnes bonnes	357			475			362		
	155	139	63	126	90	259	197	148	18
Couronnes fausses	192			532			144		
	26	70	96	22	39	471	35	72	36
Dont:									
Sur-segmentation	104			212			72		
	7	27	70	5	20	187	18	50	4
Sous-segmentation	69			231			58		
	13	35	21	13	14	204	11	15	31
Mauvaise seg.	19			89			14		
	6	8	5	4	5	80	6	7	1

Tableau 6 : Résultats de la deuxième validation

III.2.2.4 Validation de la caractérisation

La troisième phase de validation se fait sur la dernière étape des traitements réalisés : la préparation à la modélisation. Il s'agit tout simplement de la caractérisation individuelle des arbres en dimensions et en essence. Nous nous concentrons ici uniquement sur les dimensions calculées, l'ajout de l'information essence se faisant grâce à une base jugée bonne car déjà vérifiée par la DJB (un contrôle terrain sera tout de même effectué sur des petits échantillons tests et en cas de doute). Plusieurs dimensions calculées seront validées : la hauteur de cime, la hauteur de houppier (hauteur à l'envergure la plus large) et l'envergure (envergure minimale et envergure maximale). Ces données n'étant pas connues, une campagne de relevés terrain va être mise en place prochainement. Le protocole est le suivant : après avoir choisi plusieurs échantillons différents représentatifs de l'ensemble des arbres métropolitains, nous nous rendrons sur place afin de mesurer manuellement la géométrie de la végétation et ainsi comparer les résultats obtenus par calcul avec les résultats obtenus par mesure terrain. Les mesures seront faites à l'aide d'un ruban de mesure et d'un distance-mètre (Leica D5, précision de plus ou moins 1 mm pour une portée maximale de 200 m). Pour la hauteur de cime, un problème se pose car la précision du LiDAR (inférieure à 10 cm en Z) sera alors supérieure à celle de la mesure terrain : le protocole prévu est la résolution d'un triangle entre l'opérateur, le bas de l'arbre et la cime avec mesure de la distance jusqu'à la cime et de l'angle entre le bas de l'arbre et la cime à partir du point de vue de l'opérateur. En effet, la mesure de distance entre l'opérateur et la cime sera perturbée par un pointé difficile à assurer (on ne pourra pas être certain que la distance mesurée est bien prise jusqu'à la cime et non jusqu'à une branche située avant ou jusqu'à un point semblant correspondre à la cime d'un point de vue au sol). Une autre erreur non prévisible est le fait que le point LiDAR le plus haut sur un arbre ne correspond pas forcément à la cime, car la densité est seulement de 8 pts/m² en moyenne.

III.2.3 Préparation à la modélisation

Cette dernière étape permet de caractériser chaque arbre, avec plusieurs informations. Elle est représentée par l'ensemble de traitements "caractérisation" sur l'organigramme du processus de traitements, figure 34 en début de partie III-2. La modélisation des arbres et sa méthode sont actuellement en cours de réflexion avec la société RhinoTerrain. Nous ne sommes donc pas

actuellement en capacité d'assurer quelles informations seront prises en compte pour la modélisation. Cependant, nous avons conclu après une réflexion préalable en commun avec la société de développement que les attributs suivants serviront de base :

- Polygone de couronne (résultat de la segmentation)
- Hauteur de cime
- Hauteur de houppier (hauteur à l'envergure maximale)
- Hauteur de haut de tronc (première branche)
- Position du tronc
- Essence

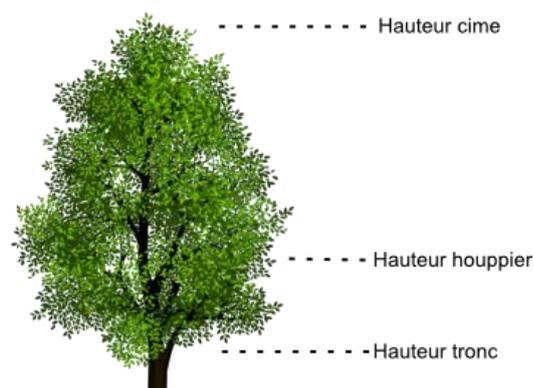


Figure 35 : Les trois hauteurs prises en compte pour la modélisation

III.2.3.1 Dimensionnement

La première dimension à définir est la hauteur de cime. Ici nous prenons tout simplement le point LiDAR le plus haut situé dans l'emprise au sol de la couronne.

La deuxième dimension est la hauteur de houppier et plusieurs solutions ont été envisagées : la première est de créer une zone tampon de 50 centimètres vers l'intérieur de chaque couronne et de prendre le point LiDAR le plus haut dans cette zone. Cette solution était utilisée avant d'effectuer la première validation car nous n'étions jusqu'alors que peu confiant sur la qualité du premier résultat intermédiaire (le nuage végétation normalisé). Elle permettait de ne pas prendre en compte les points au sol en cas de classification de mauvaise qualité. La deuxième solution est aussi l'utilisation de la même zone tampon mais cette fois-ci en sélectionnant la hauteur du point LiDAR le plus bas de la zone.

Pour la hauteur du houppier, nous utiliserons une relation statistique liant la hauteur de tronc à celle de houppier. Cette relation sera déterminée par la suite après réalisation de recherches bibliographiques plus poussées.

Pour la position du tronc, nous prenons les coordonnées X et Y des cimes déterminées par maximas locaux. Cette position sera modifiée dans le cas d'une acquisition LiDAR d'hiver : il est alors plus facile d'identifier le tronc en cas de forte densité de points (forme de disque vide au sol) et nous pourrions aussi déterminer la position du tronc en utilisant l'intersection de la droite de régression calculée par moindre carrés avec le sol.

III.2.3.2 Essence

La caractéristique "essence" n'a pour le moment pas été rajoutée aux informations de chaque arbre identifié. Le premier moyen qui sera utilisé est la jointure de la couche des couronnes segmentées avec la couche de la DJB, où l'essence des arbres est connue pour les arbres situés en alignement des voies publiques sur la ville de Rennes. Cette jointure spatiale suivra le protocole suivant : pour chaque couronne, si un point de la base DJB et bien un seul est situé dans la couronne, on effectue la jointure et l'attribut "essence" est ajouté à la couronne. Cette méthode n'étant applicable que sur un nombre restreint d'arbres, une autre solution sera recherchée. A l'heure actuelle, la réalisation d'une classification d'image supervisée sur des données SPOT6 d'hiver est envisagée et permettrait de réaliser une bonne classification entre les arbres à feuilles caduques et ceux à feuillage persistant.

Conclusion

En première conclusion, ce projet répond à la problématique donnée en introduction, car la chaîne de traitements est applicable à tout secteur du territoire de Rennes Métropole et les caractéristiques individuelles de la végétation obtenues permettront de modéliser en trois dimensions les arbres.

La première partie de ce mémoire permet de comprendre la problématique et les enjeux, la seconde présente le contexte et la troisième propose une méthode complète de caractérisation de la végétation à partir de données LiDAR. Il propose une véritable présentation de l'ensemble de la réflexion et de la production effectuées au cours de ce Travail de Fin d'Études.

Concernant la qualité des résultats, il y aura une poursuite afin d'augmenter le pourcentage de couronnes bien segmentées. Cette amélioration pourra se faire par plusieurs manières :

- Nouvelle acquisition LiDAR avec des paramètres plus adaptés : hauteur de vol et vitesse réduites, vol d'hiver, et si possible en *full-waveform*
- Ajustement de la méthode à appliquer sur des secteurs plus restreints : une homogénéité des types d'arbres permettra un meilleur résultat et une méthode plus adaptée
- Recherches plus poussées à effectuer sur la classification automatique de l'essence des arbres

Sur un aspect plus personnel, ce stage a été une véritable découverte du monde de la recherche et de ses nombreuses possibilités. En effet, les sujets sur lesquels des améliorations sont possibles sont indénombrables et en constante évolution.

Ce TFE a aussi été une réussite concernant les apports personnels sur la caractérisation des arbres : malgré leur faible quantité, ils procurent un sentiment de découverte et d'avancée qu'on ne retrouve pas lors d'un travail de type plus "productif".

Bibliographie

AHOKAS E., YU X., OKSANEN J., HYYPPA J., KAARTINEN H., HYYPPA H. optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning, ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005

ANDERSEN H.E., McGAUGHEY R.J., REUTEBUCH S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. Remote sensing of environment, n°94, 2005, pp. 441-449.

REITBERGER J., KRZYSZEK P., STILLA U. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 5, 2008 , pp. 1407 – 1431.

ANDERSEN H.E., REUTEBUCH S.E., SCHREUDER G.F. Bayesian Object Recognition for the Analysis of Complex Forest Scenes in Airborne Laser Scanner Data. In: ISPRS Commission III Symposium, 2002, Graz, Austria, part 3A, pp. 35-41.

AVRIL C. Cartographie de la végétation en ville par télédétection évaluation des données à très haute résolution spatial de l'hyperspectral au multispectral application à la ville de rennes. Rapport de stage de fin d'études Master Cartographie des Espaces à Risques, Université de Nantes, 2016, 53 p.

BOCK J., RENAUD J.P., DEZ G., MARTINS F., LEROY M., DAMBRINE E., DUPOUEY J.L. Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers. Rendez-vous techniques Office National des Forêts, 2011, n°32, p. 39-44.

BRANDTBERG, T., WARNER T.A. LANDENBERGER R.E., MCGRAW J.B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, Remote sensing of Environment, 2003, n°85, pp. 290–303.

CHEN Q., BALDOCCI D., GONG P., KELLY M., Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 72, no. 8, pp. 923–932, Aug. 2006.

DALSTEIN T. Potentialités d'un socle de données 3D pour une grande collectivité : la cas de Metz Métropole. Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2014, 93 p.

EVANS, J.S., & HUDAK, A.T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return lidar in forested environments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45: 1029-1038, 2007.

FERRAZ A. Cartographie 3D d'une forêt à partir de données LiDAR aéroporté. Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en géophysique de l'Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, École doctorale des Sciences de la Terre, 2012, 176 p.

GROFER G., KOLBE T.H., NAGEL C., HAFELE K.H. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Open Geospatial Consortium, 2012, version 2.0.0.

HALLE F., HEDELIN C. L'Analyse architecturale des arbres, Pont-de-la-Maye CTIFL, 1987.

HARALICK R.M., STERNBERG S., ZHUANG X. Image Analysis Using Mathematical Morphology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI 9, No. 4, July, 1987, pp. 532-550

HOFLE B., HOLLAUS M., LEHNER H., PFEIFER N., WAGNER W. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data. In: Proc. Silvilaser 2008, Edinburgh, Scotland, pp. 227-235.

HOLLAUS M., WAGNER W., SCHADAUER K., MAIER B., GABLER K. Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. Canadian Journal of Forest Research, n°39, 2009, pp. 1387-1400.

HYYPPA J., KELLE O., LEHIKONEN M., INKENEN M. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-dimensional tree height models produced by laser scanner, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, n°39, pp.969–975.

JAKUBOWSKI H.K., LI W., GUO Q., KELLY M., Delineating Individual Trees from Lidar Data: A Comparison of Vector- and Raster-based Segmentation Approaches. Remote Sens. 2013, 5, pp. 4163-4186.

KAARTINEN H., HYYPPA J., YU X., VASTARANTA M., HYYPPA H., KUKKO, A., HOLOPAINEN M., HEIPKE C., HIRSCHMUGL M., MORSDORF F. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. Remote Sensing 4, 2012, pp. 950-974.

KHOSRAVIPOUR A., SKIDMORE A.K., ISENBURG M., HUSSIN Y. Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 80, n°9, pp. 863-872. 2014

KHOSRAVIPOUR A., SKIDMORE A.K., WANG T., KHOSHELHAM K. Effect of slope on treetop detection using a LiDAR Canopy Height Model. In : ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, n°104, pp. 44-52.

KOENIG K., HOFLE B. Full-Waveform Airborne Laser Scanning in Vegetation Studies—A Review of Point Cloud and Waveform Features for Tree Species Classification. Forests, vol. 7, n° 9, p. 198, sept. 2016.

KOETZ B.; MORSDORF F.; SUN G.; RANSON K.J.; ITTEN K.; ALLGOWER B. Inversion of a lidar waveform model for forest biophysical parameter estimation. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE , vol.3, no.1, pp. 49- 53, Jan. 2006.

KWAK D.A., LEE W.K. , LEE J.H., BIGING G.S., and GONG P., Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data, J For Res, vol. 12, no. 6, pp. 425–434, Oct. 2007.

LASSIEUR S. Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales, Rapport de stage Master 2eme année SIG et Gestion de l'Espace, Université Jean Monnet, NATO NC3 Agency (La Haye, Pays-Bas), 2006.

LEE J.S. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1980, PAMI-2, pp. 165–168.

LI W., GUO Q., JAKUBOWSKI H.K., KELLY M. A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 78, no. 1, 2012, pp.75–84.

MALLET C., CHEHATA N., DAVID N. Lidar aéroporté à retour d'onde complète: principe, traitements & applications. In: IGN, Séminaire LETG – "Lidar et milieux naturels", Université de Caen Basse-Normandie, 10 avril 2014.

MORS DORF F.; MEIERA E.; KÖTZA B.; ITTENA K.I.; DOBBERTINC M.; ALLGÖWER B. LiDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sens. Environ.* 2004, 92, 353–362.

PITKÄNEN J., MALTAMO M., HYYPPÄ J., YU X. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, n°36, pp. 187-191.

POPESCU S. C., WYNNE R.H. Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, vol. 70, n°5, pp. 589-604.

PYYSALO U., HYYPPA H. Reconstructing Tree Crowns from Laser Scanner Data for Feature Extraction. In: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ISPRS Commission III Symposium (PCV'02)*. 9-12 septembre 2003. Graz. Austria.

REITBERGER J., KRZYSZEK P. Benefit of airborne full waveform lidar for 3d segmentation and classification of single trees. In : *ASPRS 2009 Annual Conference*, Baltimore, Maryland, du 9 au 13 mars 2009.

SHI J., MALIK J. Normalized Cuts and Image Segmentation. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, 2000, vol. 22, n°8.

SIGNORELLI V., LEDUC T., De l'influence de la végétation et du relief dans la simulation de la ville à l'échelle du quartier. In J.-P. Goulette & B. Ferries (Eds.), *SCAN'16*, pp. 125–134, 2016. Toulouse, France: Presses Universitaires de Nancy.

SOILLE P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, 2003, Chapter 6. Springer-Verlag New York, Inc.

TODD KW, CSILLAG F, ATKINSON PM. Three dimensional mapping of light transmittance and foliage distribution using lidar. *Canadian journal of remote sensing*, 2003, v29, p 544.

WANNER X. Analyse de la qualité des MNT issus de vols LiDAR en forêt de montagne. Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA Spécialité TOPOGRAPHIE, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 2013, 83 p.

YANG C. S., KAO S. P., LEE F. B., HUNG P. S. Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0, *ISPRS Archives*, 2004, vol. 35, no. 2, pp. 778-785.

YU X., HYYPPA J., HYYPPA H., MALTAMO M. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, 2004.

Table des figures

Figure 1 : Logo Rennes Métropole	7
Figure 2: Organigramme de la structure de stage.....	9
Figure 3: Catégories des données disponibles sur https://data.rennesmetropole.fr/page/home/	10
Figure 4: Différents niveaux de détail du CityGML (source : SimStadt)	13
Figure 5: Distinction des objets en CityGML suivant leur géométrie.....	13
Figure 6: Exemple d'un objet de type "MultiSolid" en CityGML.....	14
Figure 7: "Primitives" de bâtiments avant modélisation 3D	15
Figure 8: Exemple de modélisation "en croisillons"	16
Figure 9: Principe de la triangulation.....	22
Figure 10: Principe de la différence de phase	22
Figure 11: Comparaison des deux types de retours enregistrés (source : Mallet C., 2014)	22
Figure 12 : Approche "Bayésienne" (source : Andersen et al. 2002).....	26
Figure 13 : Segmentation du nuage de points avec au centre des maxima locaux en densité et à droite des maxima locaux en hauteur (source : Ferraz A. 2012).....	27
Figure 14 : Deux méthodes de détection de cimes par maxima locaux (Méthode A : "La placette est divisée en 3, 4 ou 5 cercles concentriques et les hauteurs maxima dans chaque cercle sont moyennées - Méthode B : "On identifie le point le plus haut de la placette, puis on ignore les points dans un rayon d'exclusion dépendant de la hauteur de ce point").....	27
Figure 15 : Définition du MNC (en haut à gauche : MNS, en haut à droite: MNT, en bas : MNC)	28
Figure 16 : Explication de la méthode "pit-free CHM"	30
Figure 17 : Maximas locaux représentés par des points bleus (source : Reitberger et al. 2009).....	31
Figure 18 : Approche de segmentation des couronnes par Li et al. 2012	32
Figure 19 : Point de premiers (en rouge) et derniers (en vert) retours autour d'un arbre (source : Reitberger et al. 2006)	32
Figure 20 : Modélisation en trois dimensions de la végétation sur Google Earth.....	33
Figure 21 : Secteur d'étude et ses trois types de boisements (fond de plan : orthophotographie 2014)	37
Figure 22 : Nuage avant et après découpage des bâtiments (Parc du Thabor secteur sud-ouest)	38
Figure 23 : Nettoyage manuel du nuage sous CloudCompare	39
Figure 24 : Extrait du nuage de points après classification sol (en rouge) / sursol (en bleu) par l'outil Lasgroud.....	40
Figure 25 : MNC brut produit par l'outil CanopyModel	41
Figure 26 : MNC brut (à gauche), après filtrage médian (au centre) et après filtrage gaussien (à droite)	42
Figure 27 : Schéma explicatif de la pondération du MNC par sa pente.....	43
Figure 28 : MNC avant (à gauche) et après (à droite) la pondération par un raster	44
Figure 29 : Résultats de la détection des cimes et des couronnes par TreeSeg (fond de plan : orthophotographie 2014)	45
Figure 30 : Le point centre sera identifié en zone dense si $i = 4$	47
Figure 31 : les 6 grandes étapes de la définition des zones fermées (fond de plan : orthophotographie 2014)	48
Figure 32 : Problème de non-verticalité des arbres.....	49
Figure 33 : problème lié au calcul d'une droite de régression pour un vol d'été	50
Figure 34 : Organigramme du processus retenu.....	51
Figure 35 : Les trois hauteurs prises en compte pour la modélisation	59

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques du relevé LiDAR prêté	24
Tableau 2: Caractéristiques du futur relevé LiDAR.....	25
Tableau 3: Influence de la hauteur de vol (source : Yu et al., 2004).....	25
Tableau 4 : Caractéristiques des trois secteurs de validation	55
Tableau 5 : Résultats de la première validation	56
Tableau 6 : Résultats de la deuxième validation	58

Table des annexes

Annexe 1 Présentation historique de la ville de Rennes et de sa structure intercommunale.....	67
Annexe 2 Exemples de maquettes numériques urbaines.....	69
Annexe 3 OGC City Markup Language (CityGML) Encoding Standard: Extrait pages 132 et 133 ("Vegetation objects")	72
Annexe 4 Logiciels et langages appropriés et disponibles.....	74
Annexe 5 Calcul de la densité d'un relevé LiDAR avec recouvrement	77
Annexe 6 "Pit-free CHM" : Script Python	78
Annexe 7 Droite de régression par moindres carrés : Script Python.....	79
Annexe 8 Poster de présentation	83

Annexe 1

Présentation historique de la ville de Rennes et de sa structure intercommunale

Fondée il y a environ 2000 ans, la ville de Rennes portait à l'origine le nom de Condate. Ce toponyme signifiant confluent en latin est retrouvé dans de nombreux lieux en France et au Royaume-Uni. Ici il indique que la ville de Rennes a vu le jour à la confluence entre deux cours d'eau : l'Ille et la Vilaine. Après avoir rejoint le royaume de Bretagne avec Nantes en 851, Rennes devient une ville ducal au cours des siècles jusqu'à accueillir le couronnement de la duchesse Anne de Bretagne à la fin du XV^{ème} siècle. Quelques années plus tard, le duché de Bretagne est rattaché au royaume de France avec une officialisation par l'Édit de Vannes en 1532, et Rennes devient alors le siège du parlement de Bretagne.

En 1720, un incendie frappe la ville en se propageant rapidement à cause de l'étroitesse des rues et de l'utilisation massive du bois dans les constructions. Le roi Louis XV envoie alors un ingénieur militaire, Isaac Robelin, puis un architecte, Jacques Gabriel, afin de planifier la reconstruction de la ville. Celle-ci est alors rendue plus agréable et plus saine, malgré un point négatif : le creusement des inégalités entre la ville hautement reconstruite et les quartiers épargnés par l'incendie où la pauvreté augmente grandement.

En 1857, la gare de Rennes est inaugurée et le premier train fait son apparition. L'arrivée du chemin de fer marque une époque de grands changements pour la ville : l'ouverture au commerce est facilitée, l'industrialisation se développe et l'ambition de devenir une grande ville universitaire est nettement visible.

Le 4 Aout 1944, Rennes est l'une des premières grandes villes de France libérée à la fin de la Seconde Guerre Mondiale. Mais elle a lourdement payé son occupation: un tiers des habitations de la ville a été détruit. Une étape de reconstruction et de réaménagement commence, avec l'explosion de l'exode rural, dans les années 1950. Une seconde vague d'industrialisation est alors lancée, avec notamment l'arrivée de l'usine Citroën inaugurée par le Général De Gaulle en 1960.

Au cours des années 1960-1970, le besoin de loger les nouveaux arrivants (principalement une conséquence de l'exode rural et du développement de l'université) se fait ressentir. Des grands ensembles sont alors construits. Pour accompagner l'arrivée de ces nouveaux habitants une rocade est ouverte en 1968.

Afin de faciliter et mutualiser la gestion des services de logement, les secours, la recherche et la technologie ainsi que l'urbanisme et l'aménagement, Rennes et 26 autres communes forment une première structure intercommunale : Rennes District en 1970.

Cette formation s'est réalisée sous l'impulsion de Henry Fréville, qui en devient le premier président.

Depuis, la structure (devenue communauté d'agglomération en 2000 puis métropole en 2015 avec 43 communes membres) poursuit son expansion et sa modernisation. De grands projets en témoignent : le développement de nouveaux quartiers plus soucieux de l'environnement et plus agréables, de pôles plus attractifs comme Rennes-Atalante (technopole) ou Ker Lann (campus universitaire) ou encore l'installation d'une première ligne de métro automatique puis d'une seconde en cours de travaux.

Annexe 2

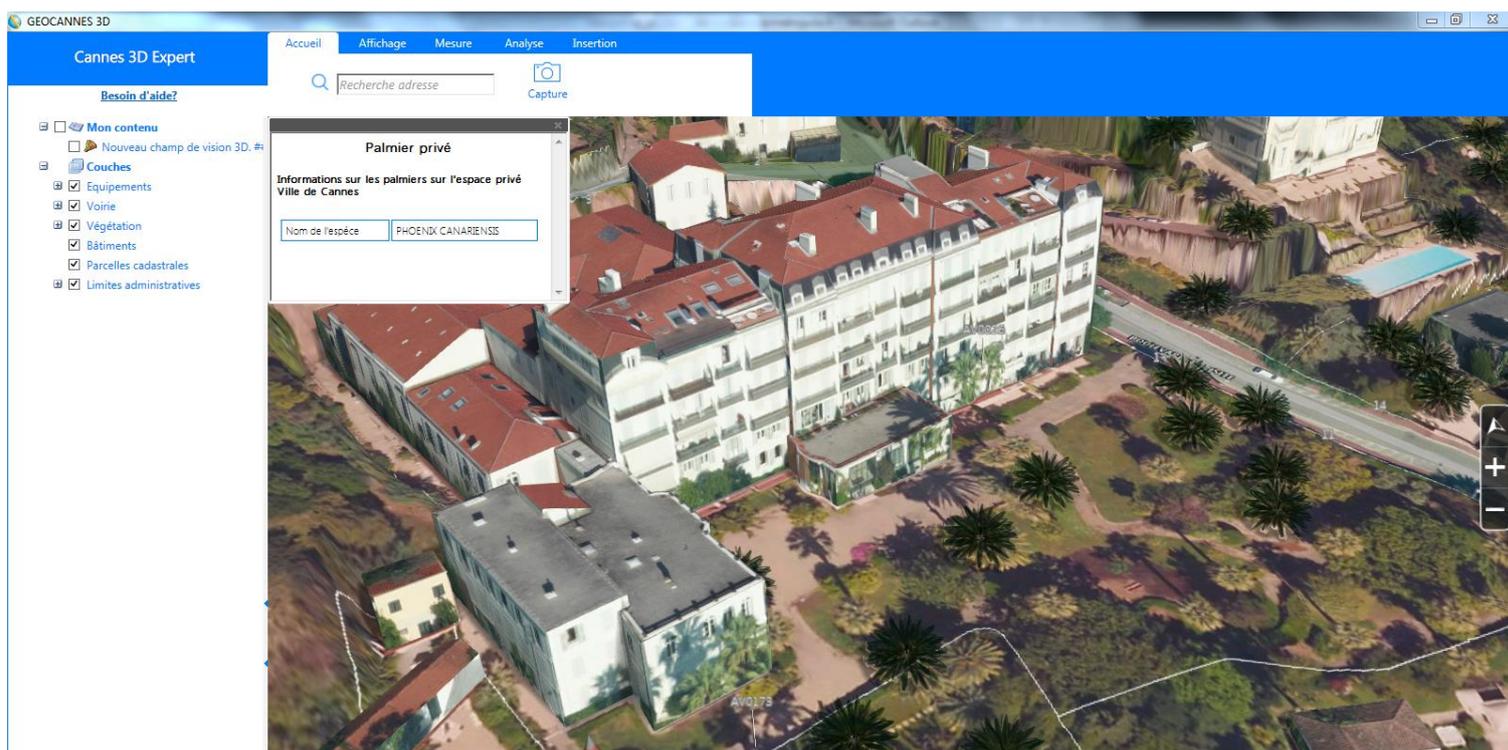
Exemples de maquettes numériques urbaines

Rennes est une des villes françaises les plus avancées au niveau de cette technologie, mais ce n'est pas la seule. Plusieurs autres exemples seront donc présentés ici. Les informations proviennent pour la plupart de discussions avec les agents de ces villes dédiés à la conception et à la gestion de ces maquettes 3D.

CANNES

La maquette virtuelle de Cannes, "Geocannes 3D", fut une des premières grandes modélisations 3D européennes accessible au grand public. Initié en 2004, le projet a été finalisé et diffusé sur internet en 2006. Le budget d'acquisition initial de cette maquette de 24 km² est de 450000 euros et l'éditeur retenu est Skyline Software Systems. Le principal avantage de cette maquette est la visualisation extrêmement simple grâce au logiciel Terra Explorer de Skyline. La manipulation des données y est facilitée grâce à la présence de 6 couches que l'utilisateur choisit de faire apparaître ou non :

- Équipements
- Voirie
- Végétation
- Bâtiments
- Parcelles cadastrales
- Limites administratives



Fenêtre d'affichage de Geocannes 3D

La maquette permet aussi plusieurs analyses : affichage des ombres portées suivant l'heure souhaitée, mesures de distances, carte des pentes, profils de terrains, ligne de mire ainsi que l'insertion de données basiques comme du texte (par exemple le nom d'un bâtiment) ou des images (par exemple une photographie d'un point de vue) et la vectorisation de polygones ou de polygones (par exemple saisie manuelle d'un schéma). En ce qui concerne la végétation, il est même possible de connaître l'espèce de certains arbres grâce à un simple clic (voir figure 6). L'acquisition des données sur la végétation se fait par une saisie manuelle à partir des orthophotographies ou d'un GPS dit "de randonnée" des attributs hauteur, diamètre tronc, essence et état général. La modélisation est ensuite réalisée grâce à Terra Explorer et à une bibliothèque de modèles 3D optimisés. La précision sur le positionnement est d'environ 1 mètre et peut être très approximative sur la hauteur des arbres.

MONACO

Monaco est aussi un des leaders dans le domaine des maquettes numériques urbaines. En effet, elle possède une maquette très précise car basée sur un plan topographique régulièrement mis à jour qui couvre l'intégralité du territoire de la principauté. En plus de cela, les bâtiments nouveaux ou rénovés sont obligatoirement mis à jour car un propriétaire a l'obligation de fournir la maquette 3D du bâtiment pour obtenir un permis de construire. Cette situation est évidemment idéale mais est inapplicable pour l'instant à la majorité des villes françaises. Monaco en a les moyens du fait du niveau extrêmement élevé de la pression immobilière dû à la faible superficie de la principauté et aux prix du marché immobilier.

La maquette numérique 3D de Monaco couvre la totalité de la principauté (2.5 km²) et ses abords immédiats (6.5 km²) avec une grande précision ainsi que des zones plus éloignées avec une précision plus faible. Grâce à cette qualité de données, la maquette permet des mesures précises dans les trois dimensions ainsi que diverses études comme par exemple des flux d'air, de diffusion de polluants ou encore des nuisances acoustiques. Comme pour les autres villes, cette maquette a aussi un but de communication. Certains bâtiments emblématiques comme le palais princier ont fait l'objet d'une modélisation très fine grâce à des scanners laser 3D. Quant aux textures des façades, elles sont ajoutées grâce à des prises de vues obliques haute définition.

Au niveau de la production des données, Monaco utilise les logiciels suivants : AutocadMap (Autodesk) et Covadis (Géomédia) pour les plans topographiques et les calculs, Rhinocéros pour la production de la maquette 3D, SketchUp pour l'élaboration des modèles 3D, et Terra Explorer et Lumion pour la navigation 3D dans la maquette.

LYON

La particularité de la maquette 3D du Grand Lyon est sa libre utilisation. Les six catégories d'éléments (bâti, bâti remarquable, objet remarquable, pont remarquable, MNT et surfaces en eau) sont disponibles gratuitement et librement sur le site de diffusion des données de la métropole et également sur le site officiel national de l'opendata. Tout comme Rennes, la métropole de Lyon a fait le choix de Rhinocity pour la modélisation des éléments en 3D à partir de ses données de base acquises de différentes façons. Le MNT est réalisé à partir d'un levé LiDAR (densité de 1.6 à 3.2 pts/m²) et des lignes caractéristiques du paysage (ruptures de pentes, limites de surfaces d'eau, bords de voies et chemins, ouvrages d'art, etc.). Les bâtiments sont modélisés sous un niveau de détail LoD2 à partir d'une volumétrie obtenue par restitution photogrammétrique (précision de 36 cm en XYZ). Les bâtiments et ouvrages remarquables sont quant à eux modélisés manuellement à partir d'images aériennes.

Selon mes dernières informations, la végétation ne faisait pas l'objet d'une modélisation automatique homogène, certains arbres étant modélisés manuellement et d'autres sur Rhino à partir du croisement de données couleurs (canaux rouge et infrarouge des orthophotographies) et d'un MNS, en se servant d'une bibliothèque des arbres et arbustes au format 3DM. Un appel d'offres avait été lancé en 2014/2015 afin d'améliorer la maquette 3D et notamment les données de végétation. Désormais la métropole devrait bientôt pouvoir compter sur une base enrichie des modèles d'arbres et d'arbustes et le prestataire doit aussi permettre des modélisations différentes d'un même arbre suivant son âge et la saison de l'année, ainsi que deux modes de représentation différents : en facettes (ou "croisillons", voir partie I-3.1.3) et en volume 3D (volume proche de la réalité, représentant une enveloppe 3Dréelle de l'arbre contrairement à la modélisation en croisillons qui dessine uniquement deux faces 2D) .



Exemple de point de vue sur la maquette 3D du Grand Lyon

Annexe 3

OGC City Markup Language (CityGML) Encoding Standard: Extrait pages 132 et 133 ("Vegetation objects")

10.8 Vegetation objects

Vegetation features are important components of a 3D city model, since they support the recognition of the surrounding environment. By the analysis and visualisation of vegetation objects, statements on their distribution, structure and diversification can be made. Habitats can be analysed and impacts on the fauna can be derived. The vegetation model may be used as a basis for simulations of, for example forest fire, urban aeration or micro climate. The model could be used, for example to examine forest damage, to detect obstacles (e.g. concerning air traffic) or to perform analysis tasks in the field of environmental protection. The vegetation model of CityGML is defined by the thematic extension module Vegetation (cf. chapter 7).

The vegetation model of CityGML distinguishes between solitary vegetation objects like trees and vegetation areas, which represent biotopes like forests or other plant communities. Single vegetation objects are modelled by the class `SolitaryVegetationObject`, whereas for areas filled with a specific vegetation the class `PlantCover` is used. The geometry representation of a `PlantCover` feature may be a `MultiSurface` or a `MultiSolid`, depending on the vertical extent of the vegetation. For example regarding forests, a `MultiSolid` representation might be more appropriate. The UML diagram of the vegetation model is depicted in Fig. 64, for the XML schema definition see below and annex A.12.

A `SolitaryVegetationObject` may have the attributes `class`, `function`, `usage`, `species` `height`, `trunkDiameter` and `crownDiameter`. The attribute `class` contains the classification of the object or plant habit, e.g. tree, bush, grass, and can occur only once (see chapter 10.8.4 and annex C.7). The attribute `species` defines the species' name, for example "Abies alba", and can occur at most once (see chapter 10.8.4 and annex C.7). The optional attributes `function` and `usage` denotes the intended respectively real purpose of the object, for example botanical monument, and can occur multiple times. The possible attribute values for `class`, `species`, `function`, and `usage` can be provided in a code list. The attribute `height` contains the relative height of the object. The attributes `crownDiameter` and `trunkDiameter` represent the plant crown and trunk diameter respectively. The trunk diameter is often used in regulations of municipal cadastre (e.g. tree management rules).

A `PlantCover` feature may have the attributes `class`, `function`, `usage` and `averageHeight`. The plant community of a `PlantCover` is represented by the attribute `class`. The values of this attribute can be specified in a code list (cf. chapter 10.8.4 and annex C.7) whose values should not only describe one plant type or species, but denote a typical mixture of plant types in a plant community. This information can be used in particular to generate realistic 3D visualisations, where the `PlantCover` region is automatically, perhaps randomly, filled with a corresponding mixture of 3D plant objects. The attributes `function` and `usage` indicate the intended respectively real purpose of the object, for example national forest,

and can occur multiple times. The attribute `averageHeight` denotes the average relative vegetation height.

Since both `SolitaryVegetationObject` and `PlantCover` are derived from `_CityObject`, they inherit all attributes of a city object, in particular a name (`gml:name`) and an `ExternalReference` to a corresponding object in an external information system, which may contain botanical information from public environmental agencies (see chapter 6.7).

The geometry of a `SolitaryVegetationObject` may be defined in LOD 1-4 explicitly by a GML geometry having absolute coordinates, or prototypically by an `ImplicitGeometry` (cf. chapter 8.2). Solitary vegetation objects probably are one of the most important features where implicit geometries are appropriate, since the shape of most types of vegetation objects, such as trees of the same species, can be treated as identical in most cases. Furthermore, season dependent appearances may be mapped using `ImplicitGeometry`. For visualisation purposes, only the content of the library object defining the object's shape and appearance has to be swapped

A `SolitaryVegetationObject` or a `PlantCover` may have a different geometry in each LOD. Whereas a `SolitaryVegetationObject` is associated with the `gml:_Geometry` class representing an arbitrary GML geometry (by the relation `lodXGeometry`, $X \in [1..4]$), a `PlantCover` is restricted to be either a `gml:MultiSolid` or a `gml:MultiSurface`. An example of a `PlantCover` modelled as `gml:MultiSolid` is a 'solid forest model'

Annexe 4

Logiciels et langages appropriés et disponibles

Plusieurs logiciels ont été mis à ma disposition pour le traitement des données LiDAR, et d'autres ont été installés par mes soins. Cette partie présente les principaux logiciels approchés, et la liste des logiciels applicables à un sujet comme le mien n'est bien évidemment pas exhaustive.

Logiciels et langages généralistes :

- R

R est un langage informatique et un environnement logiciel open source ("GNU R") dédié aux calculs de statistiques et aux graphiques. Le projet a débuté en 1993 en Nouvelle-Zélande et la première version officielle du langage est apparue en 2000. Le langage n'a depuis pas cessé d'évoluer, avec notamment la création en 2015 du R Consortium, groupement de soutien de la communauté R qui comprend par exemple les multinationales IBM et Microsoft. La communauté R est présente dans de très nombreux domaines techniques et scientifiques, et notamment dans celui de la mesure et plus particulièrement de la mesure LiDAR. Un package, nommé rLiDAR (Silva, Crookson, Hudak et Vierling), permet par exemple de créer des enveloppes convexes en 2D et 3D autour d'arbres individualisés ou encore de détecter les cimes par maxima locaux dans un MNC.

- QGIS/ArcGIS

Ces deux logiciels bien connus des géomaticiens ont la particularité de pouvoir utiliser des fonctionnalités issues d'autres logiciels et bibliothèques, sous forme de plugins ou tout simplement de boîte à outils de traitement. QGIS et ArcGIS sont des systèmes d'information géographique, le premier étant un projet sous licence libre de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo) et le second un logiciel propriétaire développé par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc). QGIS est né au début des années 2000 et a pour principal atout d'être suivi par une communauté immense, constamment active, qui permet pour un utilisateur occasionnel de trouver des solutions très rapidement et facilement et qui fait que le développement du logiciel et de ses plugins est sans cesse amélioré. ArcGIS quant à lui a une position prédominante dans le monde des SIG propriétaires pour des raisons historiques. En effet, son propriétaire (ESRI) est notamment à l'origine du format ESRI Shapefile ou ".shp" et affecte tous les moyens nécessaires au développement de son logiciel phare.

- Python

Ce langage de programmation est l'un des plus répandu internationalement, du fait de sa prise en main aisée et de sa polyvalence. Il s'est imposé dans la sphère des outils logiciels scientifiques comme le langage permettant le pré- ou post-traitement des résultats voire la création de scripts via les API de ces logiciels. Un autre de ses atouts est son universalité et sa gratuité, il fonctionne en effet sur toutes les plateformes et systèmes d'exploitation. Et pour finir, ses bibliothèques extrêmement riches font de lui un outil Open Source très utile dans de nombreux domaines. La bibliothèque libre GDAL, issue du projet GDAL totalement dépendant de Python, est

par exemple très largement utilisée par les géomaticiens. Pour ce stage la version 3.5 de Python est utilisée.

- Matlab

MATLAB (pour MATrixLABoratory) est lui aussi un langage de programmation, mais contrairement à Python il possède un environnement de développement "officiel" qui porte le même nom que le langage. Conçu pour les ingénieurs et les scientifiques, il permet l'analyse des données, le développement d'algorithmes et la création de modèles. MATLAB est une solution développée par MathWorks, éditeur de logiciels américain spécialisé dans le calcul mathématiques et ayant deux produits phares : MATLAB et Simulink (modélisation système et simulation multi-domaine). En plus du cœur du logiciel, MATLAB voit sa polyvalence encouragée par la création de nombreuses boîtes à outils. Ici seules les boîtes à outils "Image Processing" (analyse et développement d'algorithmes pour le traitement d'image) et "Mapping" (analyse et visualisation de données géographiques) sont utilisées.

Logiciels dédiés au traitement de nuages de points :

- LAStools

LAStools est une solution développée par Rapidlasso GmbH, société aussi à l'origine de la librairie LASzip permettant de compresser les fichiers LAS en fichiers LAZ. LAStools est un ensemble d'outils utilisant une architecture multi-cœurs, utilisables individuellement en ligne de commande et permettant le traitement des nuages de points LiDAR. Ces outils peuvent aussi être utilisés à partir de fichiers batch, afin de réaliser des traitements plus complexes, plusieurs traitements successifs, ou tout simplement de garder une trace des commandes utilisées. LAStools possède aussi une interface graphique mais celle-ci ne permet d'utiliser que les outils les plus simples et est généralement peu recommandée par les professionnels du LiDAR. Parmi les outils disponibles on trouve par exemple "las2dem" qui permet de réaliser un maillage sur un ensemble de points (et notamment la création d'un "dem" : digital elevation model, ou modèle numérique d'élévation en français) ou encore "txt2las" qui permet de modifier le format du nuage de point en passant du ".txt" au ".las". La librairie LAStools décompte plus de 20 outils différents.

- CloudCompare

CloudCompare est un logiciel d'édition et de traitement des nuages de points 3D. Il permet de gérer et de comparer des nuages, et aussi de réaliser des maillages surfaciques. Ce logiciel est le fruit d'une collaboration entre la division Recherches & Développement d'EDF (afin de mesurer et cartographier en trois dimensions l'intérieur des centrales, des barrages et des tours aéro-réfrigérantes par des mesures de scanners laser 3D) et Telecom ParisTech. C'est maintenant un logiciel indépendant, libre et gratuit.

- libLAS

Comme son nom l'indique LibLAS est une librairie, qui est utilisée dans la lecture et l'écriture de fichiers LAS. Les outils sont aussi utilisables en ligne de commande et sont basés sur le fonctionnement de LAStools. On retrouve notamment l'outil "las2txt" déjà présent dans la librairie de Rapidlasso. En plus de ses outils, LibLAS permet l'intégration des fichiers LAS dans des applications en langages C et C++ développées personnellement.

Logiciels de traitements de nuages de points dédiés aux applications forestières :

- Fusion

Tout comme LAStools, Fusion est une bibliothèque d'outils utilisables en ligne de commande en plus d'être un logiciel avec une interface graphique. Il est développé par le Département de l'Agriculture des États-Unis et plus particulièrement par la cellule de recherche "Pacifique Nord-Ouest" du service des forêts. Ce logiciel est entièrement dédié à l'utilisation de mesures LiDAR dans la foresterie. L'interface graphique permet de visualiser des nuages de points, des MNT, des MNC et d'effectuer des traitements très basiques comme la transformation de formats de fichiers de points ou de fichiers raster. La bibliothèque d'outils en ligne de commande est quant à elle beaucoup plus étoffée, et regroupe plus de 40 outils différents. Pour citer quelques exemples, "PolyClipData" permet de découper un ou plusieurs nuage(s) de points avec un ou plusieurs polygone(s) au format Shapefile, "CanopyMaxima" permet d'identifier les cimes à partir d'un MNC grâce à un algorithme de détection de maxima locaux par fenêtre variable suivant la hauteur de l'arbre similaire à celui reporté par Popescu et al., 2002 et Popescu et Wynn, 2004 (voir partie II-2.2.3.), et "TINSurfaceCreate" réalise un maillage sur un nuage de points. Fusion est un logiciel libre gratuit téléchargeable très facilement sur internet.

- Computree

Cette plateforme informatique développée conjointement par l'ONF (Office National des Forêts) et l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Cluny est présentée notamment par Colin (2011). Elle est elle aussi dédiée au traitement de nuages de points 3D dans le domaine forestier. C'est une plateforme ouverte sous forme modulaire, c'est-à-dire que les outils sont créés en plugins indépendants par les développeurs du projet mais aussi par des tiers. Malgré un objectif fortement adapté à mes usages (extraction de données sur la structure des arbres et des peuplements), Computree est généralement réservée aux traitements de nuages de points issus de mesures LiDAR terrestres, autrement dit de scanners laser 3D.

- MCC-LIDAR

MCC-LIDAR est un outil en ligne de commande pour le traitement de nuages de points LiDAR en environnement forestier. Il permet la classification sol/sursol des points grâce à l'utilisation d'un algorithme de classification par courbure multi-échelle (présenté en partie II-2.2.1.).

Tous les logiciels et langages présentés ci-dessus ont été testés, mis à part Computree. En effet, un problème de blocage sécuritaire m'a empêché d'utiliser ce logiciel, qui aurait tout de même pu être testé malgré qu'il soit prévu pour traiter de données LiDAR terrestres et non aéroportées.

Annexe 5

Calcul de la densité d'un relevé LiDAR avec recouvrement

Le levé LiDAR qui va être effectué a les caractéristiques suivantes :

Instrument	LEICA ALS70-HP
Fréquence d'impulsion	290 kHz
Angle d'ouverture max	50°
Hauteur de vol	6000-6500 pieds
Vitesse de vol	160 nœuds
Recouvrement	75%

Considérons une hauteur de vol h , un angle d'ouverture φ et une fauchée L (voir schéma). Nous pouvons déduire L des deux autres variables grâce à la formule suivante tirée des relations trigonométriques dans un triangle rectangle :

$$\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{L}{2} \times h^{-1}$$

Avec $\varphi = 50^\circ$ et $h = 1900\text{m}$ (environ 6250 pieds).

On a alors : $L = 2 * \tan(25^\circ) * 1900 = 1770 \text{ m}$.

On peut alors calculer la densité d de points moyenne en 1h de vol en ajoutant les paramètres V , la vitesse de vol, et F , la fréquence d'impulsion avec :

$$d = \frac{F \times 3600}{V \times L}$$

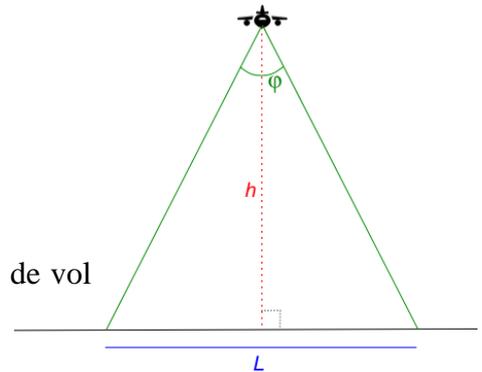
Ici $F = 290\,000 \text{ Hz}$ et $V = 296\,000 \text{ m/h}$ (environ 160 nœuds).

On a alors : $d = (290 * 3600) / (296 * 1770) = 1,99 \text{ pts/m}^2$.

La densité de points par mètre carré pour une seule bande est donc de 2. Ayant un recouvrement R important (75%, peu habituel pour les levés LiDAR mais imposé ici par le levé photogrammétrique qui aura lieu sur le même vol), la densité sera augmentée ainsi :

$$d_{vraie} = d_{1 \text{ bande}} \times \frac{1}{1 - R}$$

La densité réelle moyenne est finalement de **8 pts/m²**.



Annexe 6

"Pit-free CHM" : Script Python

```
import os
import tempfile

precision = 0.25
seuil_haut = 40
seuil_bas = 0
step = 0.5
beam_radius = 0.25
maxv = round(seuil_haut / precision)
beam_lidar = "path3/beam_lidar.las"
output = c + '/th_chmpy_025.asc'
nuage = "path1/fr_heights.las"
c = "path2/traitement_complet"
ctemp = c + '/temp'
if os.path.exists(ctemp):
    os.remove(ctemp)
os.mkdir(ctemp)

lasthin = 'C:/lastools/bin/lasthin' + ' -i ' + nuage + ' -highest' + ' -step '
        + str(step/2) + ' -subcircle ' + str(beam_radius) + ' -o ' + beam_lidar
os.system(lasthin)

for i in range (seuil_bas,maxv):
    i*=precision
    i=round(i,1)
    print (i)
    blast2dem = 'C:/lastools/bin/blast2dem' + ' -i ' + beam_lidar + ' -drop_z_above '
                + str(i+0.05) + ' -step ' + str(step) + ' -kill ' + str(step*3) + ' -odir '
                + ctemp + ' -odix_' + str(round(i*10)) + ' -obil'
    os.system (blast2dem)

if os.path.exists(output):
    os.rename(output,output + '_step' + str(step) + '_old.asc')
# os.remove(output)
lasgrid = 'C:/lastools/bin/lasgrid' + ' -i ' + ctemp + '/* .bil' + ' -merged '
        + ' -o ' + output + ' -step ' + str(step) + ' -highest '
os.system(lasgrid)
os.remove(ctemp)
```

Annexe 7

Droite de régression par moindres carrés : Script Python

```
# -*- coding: cp1252 -*-

# Traitement des couronnes et des points qui la constituent
# Lecture séquentielle du fichier de points constituant les couronnes
# Fichier obligatoirement trié par identifiant de couronne
#from simpledbf import Dbf5
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
import pylab
pylab.ion()
from math import *
import numpy as np
import operator
from dbfread import DBF
import os
from simpledbf import Dbf5

filename = r"path1\point_lidar_arbres.dbf"

in_dbf = DBF(filename)
in_dbf = sorted(in_dbf, key=operator.itemgetter('ident'))
sortedlist = iter(in_dbf)

# lecture 1 ère ligne
row = next(sortedlist)

eof = False # fin de fichier

dict_resultats = {}

while not eof:
    # Debut traitement d'une couronne
    #=====
    id_couronne_traitee = row["ident"]

    print ("Nouvelle Couronne traitée={0}".format(id_couronne_traitee))
```

```

a = np.array([]).reshape(0,3)
# ...

# Traitement des lignes décrivant les points de la couronne...

# Tant que id_couronne ligne lue = id_couronne_traitee
while row["ident"]==id_couronne_traitee and not eof:

    # Traitement d'une ligne décrivant un point de la couronne
    #=====
    x = float(row["X"])
    y = float(row["Y"])
    z = float(row["Z"])
    id_couronne = row["ident"]

    #print ("Point : X={0};Y={1};Z={2};id={3}".format(x,y,z,id_couronne))
    a = np.vstack([a,[x,y,z]])

    #print( len(a))
    #=====
    try:
        row = next(sortedlist) # ligne suivante
    except StopIteration:
        eof = True # erreur fin de fichier

# Lignes de la couronne traitées

print ("Nombre de points de la couronne {0}".format(len(a)) )
#print ("Récapitulatif des points")
#print (a )

if len(a) == 1 :
    row = next(sortedlist)
else :
    # ...
    A = np.zeros((2*len(a),4))
    B = np.zeros((2*len(a),1))

    for i in range (len(a)):
        A[2*i,0] = 1
        A[2*i,1] = 0
        A[2*i,2] = a[i,2]
        A[2*i,3] = 0

```

```

A[2*i+1,0] = 0
A[2*i+1,1] = 1
A[2*i+1,2] = 0
A[2*i+1,3] = a[i,2]

B[2*i] = a[i,0]
B[2*i+1] = a[i,1]

A = np.matrix(A)
B = np.matrix(B)
AT=A.transpose()
N=AT*A
X=np.linalg.inv (N)*(AT*B)

dict_resultats[id_couronne_traitee] = X

# Fin traitement d'une couronne
#=====

#textFile.close()

#=====
#Comparaison avec points cimes

cimes = "path2/cimes_avec_couronnes.shp"
cimes_coord = "path3/cimes_coord.shp"
cimes_csv = cimes_coord[:-4]+".csv"
if os.path.exists(cimes_csv):
    os.remove(cimes_csv)

path_saga = "C:\Program Files\QGIS 2.14\apps\saga\saga_cmd.exe"
path_actp = path_saga + ' shapes_points 6 -INPUT ' + cimes + ' -OUTPUT ' + cimes_coord
os.system(path_actp)

cimes_dbf = Dbf5(cimes_coord[:-4]+".dbf")
cimes_dbf.to_csv(cimes_csv)
#in_dbf = sorted(cimes_dbf, key=operator.itemgetter('ident'))
textFile = open(cimes_csv, "r")
reader = csv.DictReader( textFile ,delimiter = ',')
dict_disth = { }
dict_angle = { }

```

```

dict_angle_inf60 = {}
xyz = np.array([]).reshape(0,3)
xyz_sup60 = np.array([]).reshape(0,3)
row = next(reader)
eof = False
while not eof:
    id_couronne_traitee = row["ident"]
    print (id_couronne_traitee)
    droite = dict_resultats[id_couronne_traitee]
    dist_h = sqrt(( float(droite[0]) - float(row['X']) )**2 + ( float(droite[1]) - float(row['Y'])
)**2)
    dict_disth[id_couronne_traitee] = dist_h
    angle = np.arctan(1/(sqrt(droite[2]**2 + droite[3]**2)))*180/pi
    dict_angle[id_couronne_traitee] = angle
    x = float(droite[0])
    y = float(droite[1])
    z = 0
    xyz = np.vstack([xyz,[x,y,z]])
    if angle < 60 :
        dict_angle_inf60[id_couronne_traitee] = angle
        xyz_sup60 = np.vstack([xyz_sup60,[x,y,z]])
    try:
        row = next(reader) # ligne suivante
    except StopIteration:
        eof = True # erreur fin de fichier
textFile.close()

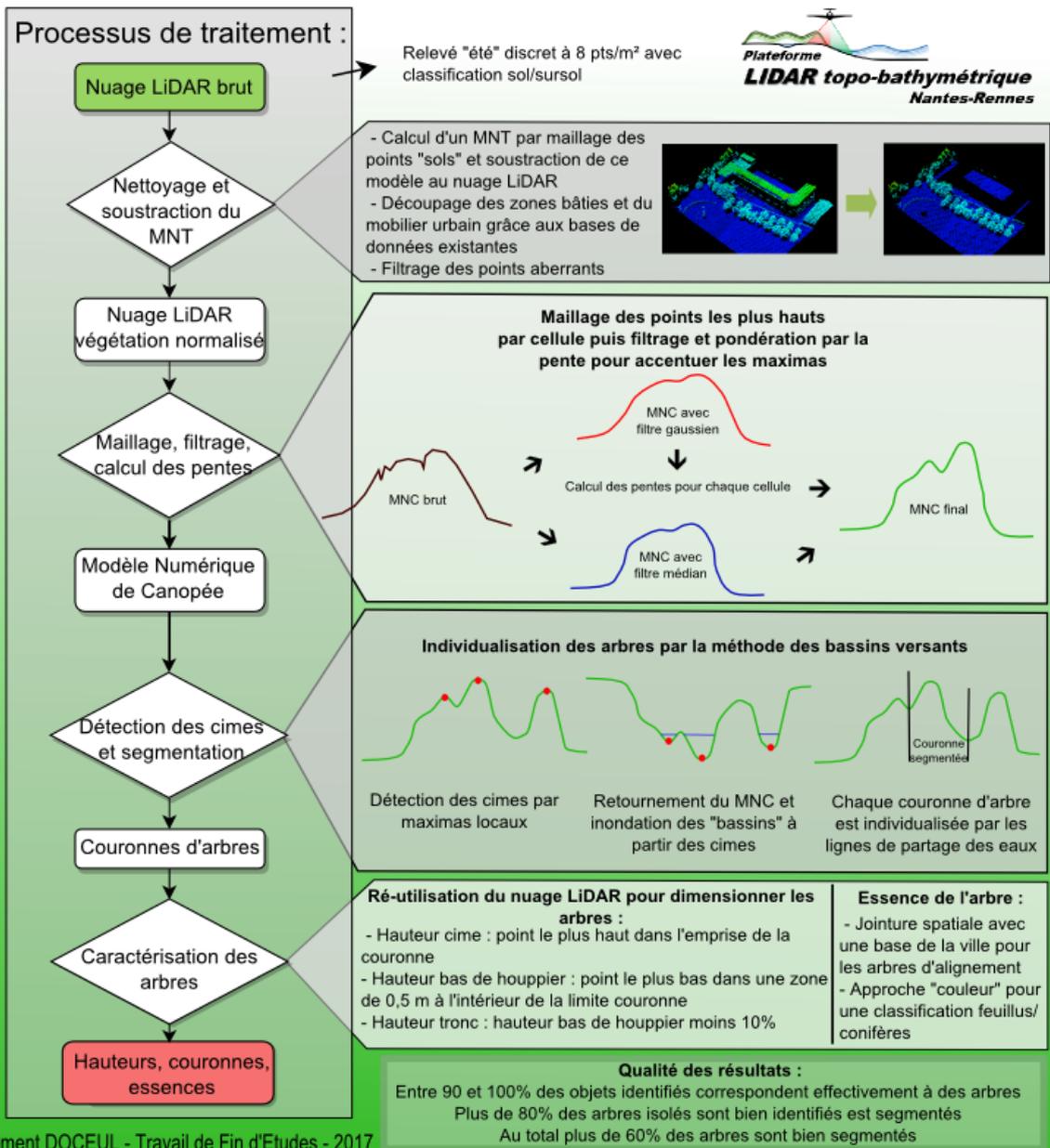
np.savetxt('path4\\xyz.txt', xyz, delimiter=';',newline='\n')
np.savetxt('path5\\xyz_sup60.txt', xyz_sup60, delimiter=';',newline='\n')

```

Annexe 8 Poster de présentation

CARACTERISATION DE LA VEGETATION DE RENNES METROPOLE PAR RELEVÉ LIDAR

Objectif final : Modélisation de la végétation en trois dimensions pour compléter la maquette 3D métropolitaine



Caractérisation de la végétation de Rennes Métropole par relevé LiDAR en vue de sa modélisation.

Mémoire d'Ingénieur E.S.G.T - C.N.A.M., Le Mans 2017.

RESUME

La maquette 3D de Rennes Métropole voit ses usages se développer et se diversifier (communication, aide à la conception, développement économique, etc.), et par la même occasion, une nécessité accrue d'exhaustivité et de précision. Les bâtiments font l'objet d'une modélisation régulière et fiable, ce qui n'est pas encore le cas de la végétation. Ce Travail de Fin d'Études a donc pour but de créer un processus automatique pour caractériser la végétation du territoire métropolitain en vue de sa modélisation, à partir des données disponibles et notamment d'un relevé LiDAR.

Le processus adopté suit une approche très courante, avec pour commencer la création d'un Modèle Numérique de Canopée, qui représente la surface supérieure de la végétation après soustraction du Modèle Numérique de Terrain. Le MNC ainsi obtenu est alors filtré et pondéré par un raster de ses pentes, pour faire l'objet d'une recherche de maxima locaux (cimes d'arbres). Le MNC est ensuite retourné et segmenté par un algorithme de lignes de partage des eaux. Pour finir, les caractéristiques propres à chaque couronne sont ajoutées et le processus de modélisation peut être entamé.

Mots clés : LiDAR, végétation, modèle numérique de canopée, modélisation 3D, maquette 3D

SUMMARY

The 3D model of Rennes Métropole sees its uses increase (communication, design assistance, etc.), as well as its necessity of exhaustiveness and precision. Buildings are regularly and reliably modeled, which is not yet the case with vegetation. This end-of-study work aims to create an automatic process to characterize the vegetation of the metropolitan territory in view of its modeling, on the basis of available data and in particular a LiDAR dataset.

The process adopted follows a very common approach, starting with the creation of a Canopy Height Model, which represents the top surface of the vegetation after subtraction of the Digital Terrain Model. The CHM thus obtained is then filtered and weighted by a raster of its slopes, to be the object of a search of local maxima (tree tops). The CHM is then returned and segmented by a watershed algorithm. To finish, the characteristics specific to each crown are added and the modeling can be started.

Key words: LiDAR, vegetation, canopy height model, 3D modelling, 3D model