

ÉCOLE DOCTORALE n°269 : Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (MSII)

ICube – TRIO – UMR 7357

THÈSE présentée par :

Elena BOURNEZ

soutenue le : **19 novembre 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

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

**Etude du rôle de la végétation dans la
création de microclimats urbains.**

**Approche combinée de mesures et de
modélisations à différentes échelles.**

THÈSE dirigée par :

M. NAJJAR Georges

Maître de conférences, Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

Mme LEMONSU Aude

M. POLIDORI Laurent

Chargée de recherche, CNRM, Toulouse

Directeur de recherche, CESBIO, Toulouse

EXAMINATEURS :

M. CLAPPIER Alain

M. GRUSSENMEYER Pierre

Mme LANDES Tania

M. SAUDREAU Marc

M. AMEGLIO Thierry

Professeur des Universités, Université de Strasbourg

Professeur des Universités, INSA de Strasbourg

Maître de conférences, INSA de Strasbourg (Co-encadrante)

Chargé de recherche, INRA de Clermont-Ferrand

Directeur de recherche, INRA de Clermont-Ferrand

INVITE :

M. KASTENDEUCH Pierre

Maître de conférences, Université de Strasbourg (Co-encadrant)

À ma mère, à mon père et à mon compagnon.

Cette thèse a été financée par l'Université de Strasbourg. Elle a été réalisée au sein de l'équipe TRIO du laboratoire ICube (UMR7357), sur une période de trois ans, allant d'octobre 2015 à novembre 2017. L'encadrement scientifique a été assuré conjointement, par l'équipe TRIO sous l'égide du CNRS et de l'Université de Strasbourg, ainsi que par l'UMR PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand.

Ce projet intervient à la croisée de trois domaines spécifiques, l'un concernant les sciences géographiques et la climatologie urbaine, un autre concernant la bioclimatologie et le fonctionnement des arbres et un autre, mon domaine de formation, relatif aux sciences topographiques et aux techniques de mesures géométriques.

Acronymes et appellations :

TRIO	<i>Téledétection, Radiométrie et Imagerie Optique</i>
ICube	<i>Laboratoire des sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie</i>
CNRS	<i>Centre National de la Recherche Scientifique</i>
PIAF	<i>Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant</i>
INRA	<i>Institut National de la Recherche Agronomique</i>

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail de thèse, je voudrais profiter de l'occasion qui m'est ici offerte pour remercier l'ensemble des personnes qui ont, au cours de ces trois années, contribué directement ou indirectement à la réalisation de cette thèse.

Avant tout, j'adresse mes remerciements à Aude Lemonsu et Laurent Polidori pour le rôle de rapporteurs auquel ils ont consenti. Je suis honorée par leur présence au sein de mon jury et très reconnaissante pour le temps qu'ils accordent à la relecture de ce mémoire, ainsi que pour le regard critique porté sur ce travail. De plus, ils m'ont fait le privilège de prendre part à ma soutenance de mi-parcours et je leur en sais gré. Je souhaite également remercier Thierry Améglio, Alain Clappier et Pierre Grussenmeyer de participer en tant qu'examineurs dans le jury de thèse.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement Georges Najjar, directeur de thèse, ainsi que Pierre Kastendeuch, co-encadrant. Nos chemins se sont croisés en 2014, lors de mon Projet de Recherche Technologique, puis à travers mon Projet de Fin d'Etudes, au cours duquel ils m'ont proposé de poursuivre l'aventure avec eux en thèse. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour mener à bien ce sujet de thèse. Grâce à leur disponibilité et leur partage d'expérience, j'ai pu découvrir une discipline passionnante, qui est la climatologie urbaine. Je les remercie aussi de m'avoir permis de participer à de nombreuses conférences au cours de ma thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Tania Landes, co-encadrante de cette thèse, qui a suivi mon parcours depuis mes débuts à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg. De par son expérience de recherche et ses qualités humaines, elle a su me donner l'élan nécessaire aux moments où il le fallait et m'a permis de surmonter les moments difficiles de cette thèse. Je lui suis aussi très reconnaissante pour les nombreux moments passés à reprendre mes rédactions, ce qui n'a pas dû être toujours évident.

Ce travail ne serait pas arrivé à terme sans l'apport de Marc Saudreau, qui pour moi a joué le rôle de troisième encadrant dans cette thèse. Du début jusqu'à la fin, il a été pour moi un pilier. Ses excellents conseils et son coup d'œil avisé ont, de bien des manières, façonné ce travail. Je le remercie pour le temps passé à me partager son expertise dans le domaine de la bioclimatologie et son investissement sans faille dans l'initiation et le suivi de cette thèse. Je lui suis infiniment reconnaissante pour tout ce qu'il a su m'apporter pendant ces trois années.

Je souhaite remercier toutes les personnes ayant contribué à l'installation et à la récolte des nombreuses mesures de terrain, dont j'ai eu besoin au cours de ma thèse. Ces mesures ont été réalisées grâce à la collaboration de deux équipes de recherches : l'équipe TRIO du laboratoire ICube à Strasbourg et l'UMR PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand. Je tiens à remercier, tout d'abord, Jérôme Ngao, membre de l'équipe PIAF, qui m'a permis de bénéficier de mesures du flux de sève, qui furent des données cruciales pour ma thèse. Puis, je voudrais manifester ma gratitude à quatre membres de l'équipe TRIO. Tout d'abord, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Samuel Guillemain, qui m'a accompagnée toutes ces années, quelle que soit la saison, pour réaliser des levés lasergrammétriques. Ensuite, je voudrais remercier Laure Roupioz, qui non seulement m'a permis d'avoir des mesures de radio-thermomètres, mais aussi pour son soutien et le partage de son expérience. Enfin, je

souhaite remercier Jérôme Colin et Françoise Nerry pour leur aide sur des points techniques liés toujours aux mesures.

Cette thèse a aussi été l'occasion d'utiliser des données et modèles numériques provenant d'équipes extérieures. C'est pourquoi, je souhaite exprimer mes remerciements à Philippe Slisse, membre du service GCT de l'Eurométropole de Strasbourg, pour m'avoir fourni une maquette 3D de la ville, qui fut primordiale pour le bon déroulement de ma thèse. Je tiens également à remercier Frédéric Boudon et Yan Hackenberg, qui ont tous deux pris le temps de m'aiguiller sur l'utilisation et le fonctionnement de leur algorithme de reconstruction 3D.

Je tiens à saluer amicalement Ronghai Hu, doctorant de l'équipe TRIO, qui m'a permis de travailler à ses côtés. Cette collaboration a été l'occasion d'avancer dans nos travaux de recherches respectifs et a été d'une très grande utilité dans le cadre de ma thèse. Je le remercie pour sa gentillesse et son dévouement sur le sujet. Je remercie également Marine, Coline et Antoine, étudiants en masters, qui ont travaillé sur ma thèse.

Grâce aux personnes que j'ai pu côtoyer tous les jours dans le laboratoire PAGE à l'INSA de Strasbourg, ces trois années ont été pour moi remplies de partage et de ce fait très enrichissantes professionnellement et personnellement. Je tiens à remercier mes co-doctorants : Arnadi, Elise, Hélène, Emmanuel, Marouane et Xiucheng, nous nous sommes vus passer par beaucoup d'états et bien des fois nous étions les seuls à nous comprendre. J'adresse mes encouragements à ceux qui n'ont pas terminé leur thèse. Je remercie également l'ensemble des enseignants et techniciens de la spécialité Topographie de l'INSA de Strasbourg, et notamment : Emmanuel Alby, Bernard Grandmougin, Mathieu Koehl, Jacques Ledig et Daniel Levy.

Je termine cette page en adressant une reconnaissance infinie à tous mes proches, amis et membres de ma famille, qui ont suivi, voire subi ce travail, et qui m'ont toujours apporté leur soutien tout au long de cette épreuve. Il m'est difficile de tous les citer, eux, Alsaciens, Corses, Lyonnais, Montpelliérains, Moutiérais, Niçois, Parisiens... j'espère qu'ils se reconnaîtront. J'aimerais particulièrement remercier Lisa et Violaine qui m'ont apporté leur aide dans les épreuves personnelles que j'ai traversées au cours de cette thèse, je leur en serais à jamais reconnaissante. Je tiens aussi à montrer toute ma gratitude envers Florence, Mamie, Mémé, Françoise, Alex et Gilles pour leur amour et mon frère, Florian, qui malgré nos querelles restera toujours dans mon cœur.

Pour terminer, je souhaite dédier ce travail à ma maman, Marie-Christine, dont je ne serai jamais assez reconnaissante de l'amour et l'attention qu'elle me porte, à mon papa, Jean-Marc, qui là-haut, m'a souvent permis de tenir pied, et enfin à mon cher et tendre, Guillaume, qui selon moi mérite le titre de docteur pour m'avoir épaulée tout au long de cette épreuve ! Cette thèse nous a fait murir ensemble et envisager de nombreuses perspectives de vies communes, tant sur le plan professionnel que personnel.

Résumé

Actuellement, les villes sont confrontées au phénomène d'îlot de chaleur urbain qui traduit une « surchauffe » nocturne de l'air en ville par rapport à la campagne. Un des impacts négatifs est l'inconfort thermique que cela engendre auprès des habitants. Améliorer le microclimat en zone urbaine est donc l'une des préoccupations des aménageurs. Pour cela, la végétalisation des villes (réintroduction de pelouses, d'arbres, végétalisation des murs et toitures, etc.) s'avère une solution prometteuse. En effet, le flux d'évapotranspiration de la végétation et les ombres portées provenant des arbres ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère aux alentours, qui se traduit par une diminution des températures de surface. Mais, l'aménagement de ville « vertes » est un acte qui doit être réfléchi pour optimiser les bienfaits que la végétation peut procurer au climat urbain. Cette réflexion s'effectue actuellement à travers la coexistence de campagnes de mesures et de modélisations numériques des phénomènes physiques en interaction avec le fonctionnement des végétaux. Les modèles numériques existants, capables de simuler les interactions en trois dimensions entre la végétation et l'environnement urbain alentour, ne simulent que très rarement l'évapotranspiration émise par la végétation et ne sont que très rarement validés par des mesures de terrain.

Un défi majeur aujourd'hui est le développement d'un modèle microclimatique capable de reproduire les conditions climatiques d'un milieu urbain, à différentes échelles spatiales (rue, quartier, ville) et temporelles (minute, journée, mois), dans l'objectif de proposer un outil d'aide à la décision pour l'aménagement des villes durables. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse, dont la problématique est d'étudier comment prendre en compte la végétation, et plus particulièrement les arbres, dans un modèle microclimatique 3D dans le but de simuler le microclimat d'un quartier.

Nous présentons dans un premier temps le contexte de la thèse à travers les enjeux de la végétalisation des villes et une description des méthodes existantes permettant de quantifier l'impact de la végétation en milieu urbain. Puis, les modèles numériques de simulation LASER/F et RATP, utilisés dans cette étude, sont décrits. Ensuite, après un état de l'art sur la reconstruction 3D d'arbres, nous détaillons les chaînes de traitement mises en place pour reconstruire des maquettes 3D d'arbres utilisables dans les deux modèles. Une troisième chaîne de traitements menant à la reconstruction 3D de l'environnement urbain est détaillée. Puis, dans un second temps, nous considérons une première échelle de modélisation, où le potentiel des modèles LASER/F et RATP à simuler le fonctionnement d'un arbre urbain est évalué dans le cas bien particulier d'un tilleul argenté taillé. Dans un troisième temps, le modèle microclimatique LASER/F est appliqué à l'ensemble du parc du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg, contenant plusieurs arbres, différents types de sols et des bâtiments. Le but est de tenter de simuler les interactions entre la végétation et l'environnement urbain avec le nouveau module de végétation intégré dans LASER/F au cours de cette thèse. Nous mettons un point d'honneur à simuler correctement l'évapotranspiration des arbres. Pour ce faire, les simulations numériques sont évaluées à partir de mesures réalisées directement dans la zone d'étude. Enfin, le potentiel actuel du modèle LASER/F comme outil d'aide à la décision dans l'aménagement de villes « vertes » est exposé.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, végétalisation, arbre, nuage de points, reconstruction 3D, modèle microclimatique, évapotranspiration.

Abstract

Today, cities are facing the phenomenon of urban heat islands that reflect a nocturnal "overheating" of air in the city compared to the countryside. One of the negative impacts is the thermal discomfort that it generates for city inhabitants. Improving the microclimate in urban areas is therefore one of the concerns of urban planners. For this purpose, the greening of cities (reintroduction of lawns, trees, green walls and roofs, etc.) is a promising solution. Indeed, vegetation evapotranspiration and shadows from trees have a significant impact on the thermal balance of the surrounding atmosphere, which results in a decrease of surface temperature. However, this reintroduction is an act that must be planned to optimize the benefits that vegetation can induce to the urban climate. This planning is currently carried out through the combination of measurement campaigns and numerical modeling of physical phenomena interacting with the functioning of plants. In general, numerical models which are able to simulate the three-dimensional interactions between vegetation and the surrounding urban environment, very rarely simulate evapotranspiration of the vegetation. Moreover, they are hardly ever validated by field measurements.

A key challenge today is the development of a microclimatic model capable of reproducing the climatic conditions of an urban environment, at different spatial scales (street, neighborhood, city) and temporal scales (minute, day, month), with the aim of proposing a decision-making tool for sustainable cities. In this context, the main problem addressed in this thesis is to take into account vegetation, and more particularly trees, in a 3D microclimatic model in order to simulate the local microclimate of a neighborhood.

We will first present the context of the thesis through the issues of urban greening and describe existing methods to quantify the impact of vegetation in urban areas. Then, the numerical simulation models, LASER/F and RATP, used in this study, will be analyzed. Then, after a state of the art on 3D reconstruction of trees, we will detail the workflow implemented to reconstruct 3D mock-up of trees that can be used in both models. Another workflow leading to the 3D mock-up of the urban environment will also be detailed. After that, the first step which concerns simulations at tree modeling scale will be presented. For this purpose, the LASER/F and RATP models are evaluated in the very particular case of a pruned silver linden tree. In a second step, the application of the LASER/F microclimatic model in a larger modeling scale will be showcased. The area of application was the park of the "Jardin du Palais Universitaire" in Strasbourg, containing several trees, different types of soil and buildings. The objective is to try to simulate the interactions between vegetation and urban environment with the new vegetation module integrated in LASER/F during this thesis. We particularly focus on the way enabling to correctly simulate the evapotranspiration of trees. To do this, numerical simulations were compared to field measurements made directly in the study area. Finally, the current potential of the LASER/F model as a decision support tool in the development of "green" cities will be presented.

Keywords: urban heat island, vegetation, tree, point cloud, 3D reconstruction, microclimatic model, evapotranspiration.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des sigles	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1. Contexte de la thèse	3
1.1. Intégration de la végétation en milieu urbain	3
1.1.1. Le bilan énergétique d'une zone urbaine.....	4
1.1.2. Solutions d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain	6
1.1.3. Apport de la végétation	7
1.2. Approche existante pour étudier le rôle de la végétation sur le climat urbain	8
1.2.1. Campagnes de mesures climatiques	8
1.2.2. Modèles numériques de simulation.....	9
1.2.2.1. Echelle de modélisation	9
1.2.2.2. Modèles numériques intégrant la végétation.....	10
1.3. Problématique de cette thèse	11
Chapitre 2. Outils et méthodes	13
2.1. Modèles numériques de simulation utilisés	14
2.1.1. Le modèle microclimatique LASER/F	14
2.1.1.1. Description générale.....	14
2.1.1.2. Intégration d'un module de fonctionnement de la végétation.....	15
2.1.2. Le modèle écophysologique RATP.....	16
2.1.3. Différences conceptuelles entre les deux modèles	18
2.1.3.1. Différences de caractéristiques structurelles	18
2.1.3.2. Différences de caractéristiques optiques	20
2.1.3.3. Différences de caractéristiques physiologiques	21
2.1.3.4. Principales différences de fonctionnement	21
2.2. Choix de la zone d'étude	22
2.2.1. Présentation de la zone d'étude	22
2.2.1.1. Généralités.....	22
2.2.1.2. Arbres étudiés.....	23
2.2.2. Campagne de mesures de terrain ICube	24
2.3. Conclusion du Chapitre 2	25

Chapitre 3. Reconstruction 3D d'un arbre isolé et d'un parc urbain.....	27
3.1. Reconstruction 3D d'un arbre isolé	28
3.1.1. Acquisition de la structure 3D d'un arbre	29
3.1.1.1. Méthodes existantes	29
3.1.1.2. Protocole d'acquisition mis en place	30
3.1.2. Reconstruction 3D détaillée d'un arbre.....	32
3.1.2.1. Méthodes de reconstruction du bois de l'arbre	32
3.1.2.2. Méthodes de reconstruction du feuillage explicite	36
3.1.2.3. Processus de reconstruction détaillée mis en place	37
3.1.3. Reconstruction 3D globale d'un arbre	47
3.1.3.1. Méthode de reconstruction du volume de la couronne foliaire	47
3.1.3.2. Méthodes d'extraction d'informations relatives au feuillage	48
3.1.3.3. Processus de reconstruction globale mis en place	49
3.1.4. Conclusion sur la reconstruction 3D d'arbres.....	53
3.2. Reconstruction 3D de la zone d'intérêt du jardin du Palais Universitaire	54
3.2.1. Données disponibles sur l'Eurométropole de Strasbourg	54
3.2.1.1. Données aériennes	54
3.2.1.2. Maquettes 3D existantes des bâtiments	56
3.2.2. Reconstruction de la maquette du jardin du Palais Universitaire	57
3.2.2.1. Reconstruction des bâtiments	58
3.2.2.2. Reconstruction des sols.....	58
3.2.2.3. Reconstruction des arbres	59
3.2.3. Conclusion sur la reconstruction de l'environnement urbain	60
3.3. Conclusion du Chapitre 3	61
Chapitre 4. Simulation numérique à l'échelle d'un arbre	63
4.1. Paramétrage des modèles pour simuler le fonctionnement d'un arbre	64
4.1.1. Paramétrage des caractéristiques structurelles	64
4.1.2. Paramétrage des caractéristiques optiques	65
4.1.3. Paramétrage des caractéristiques physiologiques	66
4.1.4. Conclusion sur les différences de paramétrage entre RATP et LASER/F.....	67
4.2. Etude de la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par RATP au paramétrage	68
4.2.1. Introduction	69
4.2.2. Matériels et méthodes	69
4.2.2.1. Méthodes de reconstruction des LOD	69
4.2.2.2. Caractéristiques du feuillage de chaque LOD	72
4.2.2.3. Analyses statistiques	72

4.2.3.	Résultats	73
4.2.3.1.	Comparaison des caractéristiques du feuillage entre les LOD.....	73
4.2.3.2.	Comparaison de l'évapotranspiration simulée à partir des différents LOD	76
4.2.3.3.	Relation entre les différences de taux d'évapotranspiration et les différences de caractéristiques des LOD	77
4.2.4.	Discussion et conclusion	79
4.3.	Potentiel des modèles pour simuler le taux d'évapotranspiration d'un arbre... 82	
4.3.1.	Comparaison des simulations entre LASER/F et RATP.....	82
4.3.1.1.	Matériels et méthodes	82
4.3.1.2.	Résultats	84
4.3.1.3.	Discussion	89
4.3.2.	Comparaison des simulations à une mesure de flux de sève.....	91
4.3.2.1.	Matériels et méthodes	91
4.3.2.2.	Résultats	91
4.3.2.3.	Discussion	93
4.3.3.	Conclusion sur le potentiel des modèles à simuler le comportement d'un arbre	95
4.4.	Conclusion du Chapitre 4	96
Chapitre 5.	Extension des simulations à l'échelle d'un parc.....	99
5.1.	Paramétrage de LASER/F à l'échelle d'un parc	100
5.1.1.	Périodes de simulations	100
5.1.2.	Maquette de la zone de simulation	102
5.1.2.1.	Caractéristiques relatives à la géométrie 3D	103
5.1.2.2.	Caractéristiques relatives à la typologie des objets.....	103
5.1.3.	Complexité du calcul LASER/F.....	104
5.1.3.1.	Fragmentation de la maquette	104
5.1.3.2.	Calcul de radiosité.....	105
5.2.	Comparaison des simulations de LASER/F à des mesures de terrain.....	106
5.2.1.	Présentation des grandeurs comparées	107
5.2.2.	Résultats et analyses des comparaisons.....	108
5.2.2.1.	Comparaisons relatives aux arbres.....	108
5.2.2.2.	Comparaisons relatives à l'ensemble du parc	115
5.2.3.	Conclusion sur la comparaison des simulations à des mesures de terrain	120
5.3.	Utilisation de LASER/F pour l'étude de l'impact de la végétation sur le climat urbain	122
5.3.1.	Interactions des arbres avec l'environnement	123
5.3.1.1.	Impact de la végétation sur l'environnement urbain.....	124
5.3.1.2.	Impact des arbres sur le confort thermique d'un être humain.....	125
5.3.2.	Aménagement de villes « vertes ».....	126

5.3.3. Conclusion relative aux applications futures de LASER/F.....	127
5.4. Conclusion du Chapitre 5	127
Conclusion générale	129
Contributions.....	137
Références bibliographiques	139
Table des figures.....	155
Table des tableaux.....	159
Annexes	161

Liste des sigles

μ	<i>Clumping factor</i> - Facteur d'aggrégation
3D	Trois dimensions
a_T	Pente de régression linéaire
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics equations</i>
DBH	<i>Diameter at Breast Height</i> - Diamètre du tronc à hauteur de poitrine
<i>dr</i>	<i>Refined index of agreement</i> - Indice d'accord
E1, E2	Etude 1, étude 2
EMS	Eurométropole de Strasbourg
ET	Evapotranspiration
g_s	Conductance stomatique
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
LAD	<i>Leaf Area Density</i> - Densité foliaire
LAI	<i>Leaf Area Index</i> - Indice de surface foliaire
LE	Flux de chaleur latente
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LOD	<i>Level of Detail</i> - Niveau de détail
M1	Marronnier 1
M2	Marronnier 2
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> - Erreur moyenne absolue
MBE	<i>Mean Bias Error</i> - Erreur moyenne
MSE	<i>Mean Square Error</i> - Variance
MT	Marronnier taillé
NIR	<i>Near Infrared</i> - Proche infrarouge
P1, P2, P3	Période 1, période 2, période 3
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i> - Rayonnement photosynthétiquement actif
PEA	<i>Projected Envelope Area</i> - Superficie de l'enveloppe projetée au sol
PLA	<i>Projected Leaf Area</i> - Superficie de la surface foliaire projetée au sol
PT	Platane taillé
QSM	<i>Quantitative Structure Measurement</i>
R^2	Coefficient de détermination
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> - Erreur moyenne quadratique
SLT	Scanner Laser Terrestre
STAR	<i>Silhouette-to-Total Area Ratio</i> - Rapport de la surface foliaire visible sur la surface foliaire totale
TAT	Tilleul argenté taillé
TATP	Tilleul argenté taillé avec ses pousses
TLA	<i>Total Leaf Area</i> - Surface foliaire totale
UTCI	<i>Universal Thermal Comfort Index</i> - Indice de confort thermique
VPD	<i>Vapor Pressure Deficit</i> - Déficit de pression de vapeur d'eau

Introduction générale

Actuellement, les villes sont confrontées au phénomène d'îlot de chaleur urbain qui traduit une surchauffe de la température de l'air en ville par rapport à la campagne. Un des impacts négatifs est l'inconfort thermique que cela engendre auprès des habitants. Pour pallier cela, la végétalisation des villes s'avère une bonne solution, mais cet acte doit être réfléchi pour optimiser les bienfaits que peuvent apporter de la pelouse ou des arbres par exemple sur le climat urbain. Cette réflexion s'effectue actuellement à travers la coexistence de campagnes de mesures et de modélisations numériques des phénomènes physiques en interaction avec le fonctionnement des végétaux.

Une étude sur la compréhension du fonctionnement de la végétation en ville et de son impact sur l'îlot de chaleur urbain est menée depuis cinq ans à Strasbourg par l'équipe TRIO du laboratoire ICube, dans le cadre de plusieurs projets financés (INTERREG IV ATMO – IDEE, CNES/TOSCA – AVENUE, Biodiversa EU – URBANMYCOSERVE et ANR – COOLTREES). Cette équipe est composée de géographes, spécialistes en climatologie urbaine et de topographes, spécialistes de l'acquisition de données géométriques et de leurs traitements. Une des préoccupations de ces chercheurs est le développement d'un outil de simulation numérique (un modèle microclimatique) capable de reproduire les conditions climatiques d'une rue, voire d'un quartier urbain végétalisé, à différentes échelles spatiales et temporelles. Les interactions entre la végétation et l'environnement alentour doivent pour cela être simulées. Ce travail nécessite des connaissances dans différents domaines relatifs à la climatologie urbaine, au fonctionnement des végétaux et à la représentation tridimensionnelle de l'environnement urbain. Ainsi, est née une collaboration entre l'équipe TRIO et l'UMR PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand, représentée par des écophysiologistes des arbres. C'est dans ce contexte pluridisciplinaire que s'inscrit cette thèse, financée par l'Université de Strasbourg. L'objectif de la présente est d'étudier comment prendre en compte la végétation, et plus particulièrement les arbres, dans un modèle microclimatique, développé au sein de l'équipe TRIO, afin d'être en mesure de simuler les interactions de la végétation avec son environnement urbain alentour.

Ce manuscrit est structuré en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, le contexte de la thèse sera posé. L'intérêt d'intégrer plus de végétation en milieu urbain sera exposé. Pour cela, nous mettrons en avant, les bienfaits de la végétation sur le microclimat environnant. Puis, un point sera réalisé sur l'approche existante utilisée actuellement par les scientifiques pour quantifier l'effet de la végétation sur le climat urbain. Enfin, la problématique de la thèse sera énoncée et les objectifs à atteindre seront identifiés.

Dans le deuxième chapitre, les outils utilisés durant cette thèse seront exposés. Nous présenterons tout d'abord une description et une inter-comparaison des modèles numériques de simulation employés, qui sont : i) le modèle microclimatique développé au sein de l'équipe TRIO et ii) un modèle écophysiologique, développé par l'UMR PIAF, utilisé pour nous aider dans notre démarche. Le nouveau module de fonctionnement de la végétation, intégré dans le modèle microclimatique au cours de cette thèse, sera exposé. Les besoins des deux modèles au niveau du paramétrage des caractéristiques relatives au feuillage d'un arbre seront détaillés. Puis, nous définirons la zone d'étude sur laquelle les modèles seront appliqués. De

même, nous identifierons les types d'arbres étudiés. Enfin, l'approche envisagée pour mener à bien cette thèse sera expliquée.

Le troisième chapitre sera consacré à la reconstruction des maquettes numériques en trois dimensions (3D) qui seront utilisées dans les modèles. La première partie se penchera sur les méthodes existantes pour reconstruire en trois dimensions un arbre isolé. A l'issue de cette étude, le protocole d'acquisition de la donnée utilisée en entrée, ainsi que les approches de reconstructions envisagées, seront décrits. La deuxième partie sera consacrée au processus de reconstruction mis en place pour obtenir la maquette 3D de l'environnement urbain sur lequel le modèle microclimatique sera appliqué.

Dans le quatrième chapitre, l'étude des simulations numériques à l'échelle d'un arbre sera présentée. Pour cela, nous précisons tout d'abord le paramétrage requis par les modèles utilisés pour simuler le fonctionnement d'un arbre. Puis, nous étudions la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par le modèle écophysologique à son paramétrage, afin de mieux comprendre comment considérer l'arbre dans le modèle microclimatique. Enfin, une comparaison entre les deux modèles et avec des mesures de terrain permettra de conclure sur le potentiel de ces modèles numériques de simulation.

Dans le cinquième chapitre, la zone de simulation sera étendue à l'échelle d'un parc. Le modèle microclimatique sera employé à cet effet. Les choix du paramétrage du modèle pour réaliser cette étude seront listés. Puis, les simulations du microclimat obtenues à l'échelle du parc seront comparées à des mesures de terrain. L'évaluation des capacités du nouveau module de fonctionnement de la végétation dans le modèle microclimatique sera primordiale dans cette thèse. Pour finir, les applications futures envisageables avec le modèle seront entrevues. Nous nous concentrerons sur l'étude de l'impact de la végétation sur le climat et sur l'étude de la végétalisation des villes comme solution adressée aux aménageurs urbains.

Chapitre 1. Contexte de la thèse

1.1. Intégration de la végétation en milieu urbain	3
1.1.1. Le bilan énergétique d'une zone urbaine.....	4
1.1.2. Solutions d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain	6
1.1.3. Apport de la végétation	7
1.2. Approche existante pour étudier le rôle de la végétation sur le climat urbain	8
1.2.1. Campagnes de mesures climatiques	8
1.2.2. Modèles numériques de simulation	9
1.2.2.1. Echelle de modélisation	9
1.2.2.2. Modèles numériques intégrant la végétation.....	10
1.3. Problématique de cette thèse	11

Améliorer le climat en zone urbaine est au cœur des préoccupations des aménageurs urbains, notamment en raison des pics de chaleurs de plus en plus fréquents auxquels la population urbaine doit faire face. Dans ce chapitre, les enjeux de l'intégration de la végétation en zone urbaine sont exposés. Une deuxième partie fait le point sur les méthodes visant à étudier et à quantifier l'apport du végétal en ville, telles que les campagnes de mesures réalisées sur le terrain et les modèles numériques de simulation existants. Enfin, la problématique de la thèse est développée et ses objectifs sont énoncés.

1.1. Intégration de la végétation en milieu urbain

Depuis quelques années, on constate un déplacement des habitants des zones rurales vers les zones urbaines (WHO, 2016), ce qui engendre une urbanisation croissante. Cette urbanisation s'est traduite dans un premier temps par un étalement des villes (Seto et al., 2011). Or, cet étalement induit une forte urbanisation des zones rurales et donc la diminution des zones naturelles dans le monde. Bien que cette diminution soit faible (de l'ordre de 1 à 2 % de surface continentale), elle influe sur le réchauffement climatique. Pour éviter l'étalement urbain, les agglomérations doivent se densifier de manière à pouvoir accueillir ce flux croissant de population (Coutts et al., 2007 ; Ruth & Coelho, 2007), tout en faisant face à d'autres objectifs environnementaux importants pouvant s'avérer contradictoires, comme maintenir la biodiversité, anticiper et limiter le changement climatique, réduire les émissions de gaz à effet de serre et offrir un cadre de vie sain et agréable aux habitants (Musy, 2014).

La densification des villes pose plusieurs problèmes, notamment sanitaires et écologiques. Dans cette étude, nous nous concentrons sur le climat particulier que génèrent les villes.

Depuis le 19^{ème} siècle, on parle de microclimat urbain dans lequel les conditions météorologiques sont différentes de celles retrouvées dans les campagnes alentour (Howard, 1833). Un aspect bien connu de ce microclimat urbain est l'îlot de chaleur urbain (ICU) qu'il génère. L'ICU est la différence instantanée entre la température de l'air entre le milieu urbain et le milieu rural. Il traduit une température plus chaude globalement (la nuit et lorsque le vent est faible) dans les villes que dans les espaces ruraux environnants (Figure 1.1). Cette différence de température peut aller de 2 à 3 °C, jusqu'à plus de 10 °C pour de très grandes villes lorsque ces facteurs sont réunis (Oke, 1982). Les études menées sur une ville moyenne comme Strasbourg ont permis d'observer des ICU de 8 °C (Kastendeuch et al., 2010). Dans le contexte du réchauffement climatique et selon les prévisions du climat à long terme, les ICU vont être intensifiés par des vagues de chaleur qui vont devenir de plus en plus fréquentes dans de nombreux pays (IPCC, 2007). De nombreux effets négatifs accompagnent ces phénomènes, sur la demande en énergie des bâtiments, sur le confort thermique des habitants, sur la santé humaine, etc. (Katsouyanni et al., 1993). La communauté scientifique cherche à minimiser les effets de l'ICU (Masson et al., 2013) en passant tout d'abord par la compréhension de sa création, par l'identification des situations et des processus climatiques qui donnent naissance à l'ICU et qui mènent à de l'inconfort.

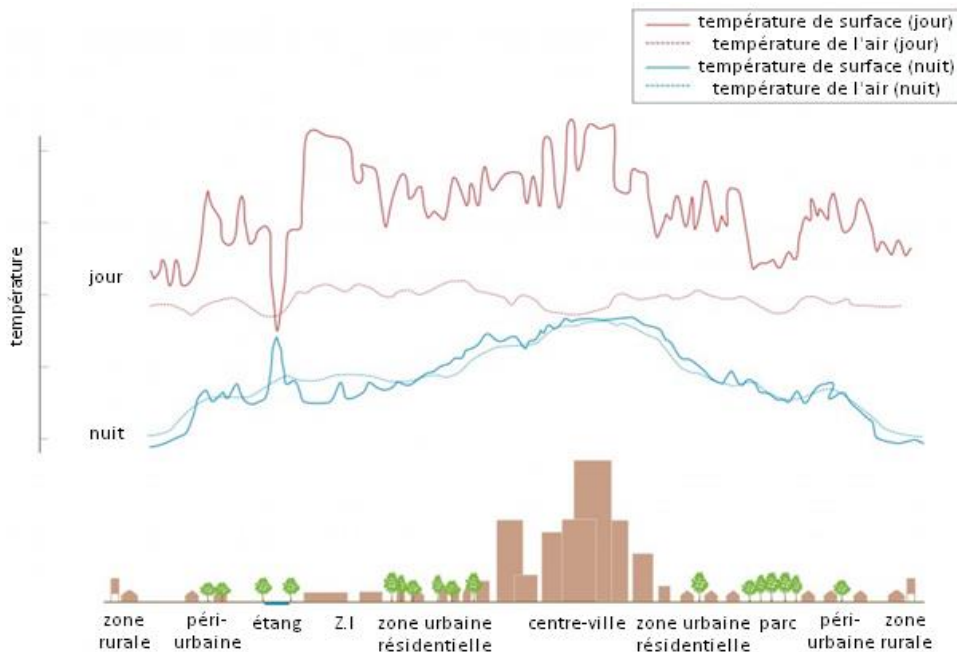


Figure 1.1 – Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain selon la zone d'étude, le jour et la nuit (traduite depuis Voogt (2000)).

1.1.1. Le bilan énergétique d'une zone urbaine

Les transferts d'énergie par rayonnement et par chaleur sont à la base des processus climatiques et microclimatiques. En d'autres termes, l'atmosphère demeure une machine thermique dont l'équilibre énergétique dépend des bilans relatifs aux transferts radiatifs (rayonnement net), convectifs (flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente) et conductifs (flux de chaleur dans le sol et la variation d'énergie stockée) (Vinet, 2000). L'équation fondamentale du bilan d'énergie [1] traduit cet équilibre énergétique :

$$RN + A = S + LE + G + \Delta S \quad [1]$$

Le rayonnement net (RN) est la différence entre le rayonnement descendant (incident) et montant dans le solaire et l'infrarouge. L'énergie anthropique (A) est l'apport supplémentaire d'énergie engendrée par les activités humaines. Le flux de chaleur sensible (S) est dû à une différence de températures entre une surface et l'atmosphère. Il est associé au réchauffement et au refroidissement de l'air. Le flux de chaleur latente (LE) correspond à la chaleur associée à l'évaporation de l'eau ou à sa condensation entre une surface et l'atmosphère. Le flux de chaleur dans le sol (G) est un flux conductif piloté par les différences de températures au sein du sol ou d'un mur. Enfin, la variation d'énergie stockée (ΔS) correspond à l'énergie qui reste éventuellement stockée dans la couche de surface après équilibre du bilan d'énergie. L'intensité de ces flux se révèle variable selon les propriétés physiques des matériaux.

En milieu urbain, la répartition de l'énergie est perturbée par rapport à celle que l'on retrouve en zone rurale, d'où les différences climatiques entre les deux milieux (Figure 1.2).

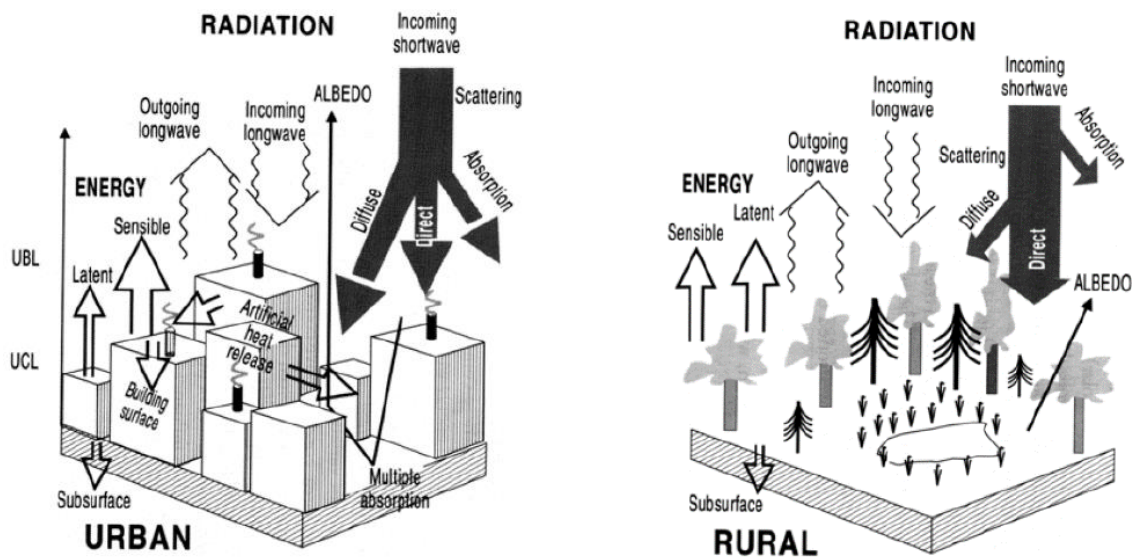


Figure 1.2 – Schématisation des différents flux d'énergie et de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine et rurale pour une journée avec un ciel dégagé (Colombert, 2008). La largeur des flèches permet de se rendre compte de l'importance des flux.

Tout d'abord, le flux de chaleur latente est beaucoup plus faible en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette différence est due en partie à la forte présence de surfaces minérales artificielles (bâtiment, bitume, etc.) dans les villes, qui évaporent de l'eau uniquement après une période pluvieuse, contrairement à la végétation, retrouvée majoritairement en milieu rural, qui a la capacité de transpirer l'eau qu'elle puise dans le sol et donc d'émettre un flux de chaleur latente même en période sèche. A cause d'une évaporation faible en ville, l'énergie non utilisée pour vaporiser l'eau contribue au réchauffement des surfaces et par conséquent au réchauffement de l'atmosphère. Ainsi, les flux de chaleur sensible, de chaleur dans le sol et de stockage vont se trouver plus importants. Les surfaces minérales en ville sont aussi souvent composées de matériaux qui absorbent fortement le rayonnement. Elles vont donc stocker davantage et ainsi, réchauffer l'atmosphère (flux de chaleur sensible et rayonnement émis) et réchauffer le sol (flux de chaleur dans le sol). A cela s'ajoute la forte inertie thermique¹ des matériaux en ville par rapport aux végétaux et aux sols nus, compte tenu de leurs propriétés thermiques. Ils ont donc plus de capacité à emmagasiner la chaleur. La quantité d'énergie stockée dans les surfaces (sol ou bâti) est donc plus importante en ville qu'en campagne. Ensuite, les bâtiments en ville sont des obstacles au rayonnement réfléchi ou émis par les

¹ Inertie thermique : capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit.

surfaces adjacentes puisque le rayonnement va subir des réflexions multiples avant de s'échapper vers l'atmosphère. Ce piégeage radiatif augmente la température des surfaces alentour (sol, façade), ce qui favorise le réchauffement de l'air. Ce phénomène est variable selon la hauteur des bâtiments, l'albédo des surfaces et la largeur des canyons urbains. Le vent joue aussi un rôle important dans la création d'ICU. Si le vent est très fort, le microclimat produit par la ville sera dissipé dans l'atmosphère et donc l'ICU ne sera plus présent. Or, de nombreux obstacles tels que les bâtiments et les arbres perturbent la turbulence du vent qui provient de l'extérieur. Des phénomènes contraires sont observés suivant la configuration des lieux avec une accélération des vents mais aussi un ralentissement qui peut favoriser l'apparition d'ICU.

Tout ceci est accentué par un apport en énergie plus important en ville qu'en campagne car l'énergie ne provient pas uniquement du rayonnement net, mais aussi des activités anthropiques liées à l'homme. Il ne faut donc pas négliger dans le bilan énergétique l'apport des sources de chaleur internes à la ville (A - production de chaleur par les transports, le chauffage, la climatisation, l'industrie, etc.), que l'on ne retrouve pas en zone végétale. Ainsi, cette quantité d'énergie supplémentaire contribue à l'accentuation des ICU.

Ces différences de quantités de flux permettent de comprendre pourquoi on a des écarts de températures de l'air entre un milieu urbain et un milieu rural, mais aussi de constater que l'on peut retrouver des différences de températures au sein même d'une ville. Oke (1982) montre que pour les mêmes conditions météorologiques, l'ICU varie selon les quartiers. La ville demeure un espace totalement hétérogène, avec une variabilité dans la composition (différents matériaux) et la configuration des quartiers (canyon, pavillon, place, parc) et une variabilité spatiale de température de l'air, laissant apparaître des ICU mais aussi des îlots de fraîcheur urbains (IFU), engendrés par la présence de zones végétales mais aussi de zones minérales constamment ombragées (Pons et al., 2014).

Ces différences de quantités de flux engendrées par la configuration même des villes permettent de comprendre l'origine de l'ICU, mais aussi d'envisager des solutions d'atténuation de ces phénomènes.

1.1.2. Solutions d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain

Plusieurs solutions concrètes peuvent être envisagées pour agir sur le microclimat urbain et les ICU et améliorer l'indice de confort de la population urbaine : augmentation des surfaces d'eau, modification de la géométrie urbaine, utilisation de matériaux et de revêtements alternatifs, réduction des activités anthropiques, végétalisation des villes.

- L'eau contenue dans des surfaces naturelles (étangs, rivières, cascades) ou des surfaces artificielles (fontaines, canaux, pulvérisateurs) possède un coefficient d'absorption important et donc elle permet d'absorber une bonne partie du rayonnement. D'autre part, l'eau permet par évaporation de rafraîchir et d'humidifier l'air alentour. Ces effets engendrent une amélioration de l'indice de confort thermique des habitants. De plus, en présence de vent, il est montré que l'impact de l'eau peut se ressentir à des dizaines de mètres plus loin (Nishimura et al., 1998 ; Tominaga et al., 2015).
- L'intérêt de modifier la géométrie urbaine pour réduire l'ICU est que cela permet de faire varier la quantité d'ensoleillement journalier atteignant les sols mais aussi la quantité de réflexions du rayonnement. Ces deux modifications sont contre-productives, puisque bien souvent une réduction de l'ensoleillement, causée par un

rapprochement des rues, induit une augmentation des réflexions. Néanmoins, il existe un seuil d'ouverture au-delà duquel l'effet s'inverse. Un compromis dans l'aménagement doit donc être trouvé. Plusieurs critères peuvent être pris en compte : la densité, la hauteur, l'espacement et l'orientation des bâtiments. Ces modifications peuvent être appliquées uniquement dans le cadre de nouveaux projets ou bien dans la rénovation qui reste coûteuse (Ali-Toudert & Mayer, 2006 ; Jamei et al., 2016).

- Modifier les revêtements des sols artificiels ou bien les matériaux utilisés sur les façades des bâtiments a pour objectif de diminuer la température de surface de ces zones en jouant sur l'albédo, la rugosité et les propriétés thermiques (Santamouris, 2013).
- L'Homme et les activités qu'il réalise génèrent de l'énergie et par conséquent constituent des sources de chaleur internes conséquentes dans les villes qui augmentent l'intensité de l'ICU. Pour contrebalancer ce réchauffement, deux types d'actions sont menées dans les villes avec : l'isolation de l'habitat pour réduire l'utilisation de la climatisation et du chauffage dans les ménages (MTES, 2018) et l'instauration de la gratuité des transports en commun tels que les bus et tramways pour réduire le nombre de voitures circulant en ville, ces dernières générant à la fois un réchauffement mais aussi une pollution de l'atmosphère (Rizman et al., 2008).
- Augmenter la quantité de surfaces végétalisées en introduisant davantage de pelouse et d'arbres semble une solution prometteuse, car au-delà de l'aspect thermique (flux de chaleur latente et ombre portée), elle offre aussi une large palette de services écosystémiques : sociétaux, environnementaux et économiques (Mullaney et al., 2015).

Dans cette thèse, nous allons nous focaliser sur la végétalisation des villes comme solution pour améliorer le microclimat urbain. Le prochain paragraphe présentera les raisons de ce choix et plus en détail cette solution.

1.1.3. Apport de la végétation

De nombreuses études travaillent sur l'intégration de la végétation en ville sous différentes formes : zones enherbées (Armson et al., 2012), arbres (Shahidan & Jones, 2008), façades et toits végétalisés (Koc et al., 2018) et parcs urbains (Bowler et al., 2010). Dans notre étude, nous nous intéressons à l'apport des zones enherbées (ou végétation basse) et plus particulièrement des arbres (ou végétation haute), pour minimiser le réchauffement en ville. L'enjeu dans l'introduction de la végétation se trouve dans la possibilité de profiter au maximum des bienfaits du végétal, désignés sous l'appellation de services écosystémiques, de plus en plus reconnus et mis en avant dans les projets et politiques urbaines locales, nationales et internationales (Musy, 2014). Nous nous intéressons aux bienfaits sur le microclimat urbain et le confort thermique des habitants.

La transpiration, la température de surface de la végétation et l'ombre portée provenant des arbres ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère aux alentours, créant un rafraîchissement qui se traduit par des îlots de fraîcheur (Bowler et al., 2010 ; Saudreau et al., 2015). L'ombre portée permet de réduire les températures de surfaces des objets alentour et donc de diminuer le stockage et le flux de chaleur sensible qui sont responsables de l'ICU. L'intensité de l'ombre est variable selon les caractéristiques optiques du feuillage qui définissent la quantité de rayonnement absorbé. La transpiration correspond au processus d'évaporation de l'eau relatif à la végétation. Elle permet à la végétation de réguler sa température de surface, car c'est un processus qui absorbe la chaleur. Elle rend aussi possible

l'humidification, donc le rafraîchissement de l'air, et le stockage de moins d'énergie dans le sol (Saudreau et al., 2015). Ce processus dépend des conditions climatiques et de la conductance stomatique (caractéristiques physiologiques) des végétaux. Cette dernière traduit le degré d'ouverture des stomates (les « pores » des feuilles) influencé par les facteurs externes (rayonnement, température, déficit de pression de vapeur d'eau, eau dans le sol, etc.) et internes (potentiel hydrique, teneur en azote, etc.). Les stomates permettent à une feuille de réguler sa perte en eau par transpiration. La pelouse transpire suivant le même processus que les arbres, cependant, elle puise l'eau moins en profondeur dans le sol. En période de sécheresse, le sol en surface s'asséchant plus vite que le sol en profondeur, la transpiration de la pelouse sera plus rapidement nulle que celle d'un arbre. On parle d'évaporation lorsque l'eau vaporisé sur les végétaux, n'est pas issue du processus de transpiration, mais de la pluie. Afin d'éviter de différencier la transpiration et l'évaporation, le terme évapotranspiration (ET) sera utilisé dans ce mémoire, pour parler du flux de chaleur latente émanant de la végétation uniquement.

Ces phénomènes (évapotranspiration, ombre portée) sont d'intensités différentes suivant l'espèce d'arbres ou de pelouses (variation de caractéristiques optiques et physiologiques), la densité et la spatialisation de la végétation, la présence d'eau dans le sol, les conditions climatiques, etc. (Bodnaruk et al., 2017). Végétaliser les villes pour rafraîchir l'air environnant doit donc être réfléchi de manière à optimiser au maximum l'apport bénéfique que peuvent procurer les plantes et ne pas gaspiller les dépenses effectuées pour ces opérations, telles que l'utilisation de l'eau pour l'arrosage. Ainsi, pour une aide à la décision efficace lors d'aménagements de villes « vertes » ou durables, il apparaît donc nécessaire de mieux connaître les phénomènes physiques et les paramètres qui conditionnent les rôles relatifs de la végétation (Musy, 2014).

1.2. Approche existante pour étudier le rôle de la végétation sur le climat urbain

Nous présentons dans cette partie l'approche existante, utilisée par les scientifiques, pour étudier le rôle de la végétation sur le climat urbain. Cette approche s'appuie sur deux méthodes complémentaires : la mesure spécifique réalisée sur le terrain et la simulation effectuée avec des modèles numériques.

1.2.1. Campagnes de mesures climatiques

De nombreuses campagnes de mesures issues de projets de recherche ont vu le jour dans différentes villes afin d'étudier le microclimat urbain : CLU-ESCOMPTE² à Marseille (Mestayer et al., 2003), CAPITOU³ à Toulouse (Masson et al., 2008) et BUBBLE⁴ à Bâle en Suisse (Rotach et al., 2005). Ces campagnes ont pour objectif d'étudier la variabilité du bilan d'énergie en fonction des couverts urbains, l'îlot de chaleur urbain et la structure de la couche limite urbaine (Pigeon, 2007). D'autres projets sont plus ciblés sur le rôle de la végétation en ville, tels que VegDUD⁵ à Nantes (Musy, 2014) et EPICC⁶ à Vancouver au Canada (Liss et

² CLU-ESCOMPTE : *Couche Limite Urbaine – Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions.*

³ CAPITOU : *Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer.*

⁴ BUBBLE : *Basel Urban Boundary Layer Experiment.*

⁵ VegDUD : *Rôle du VEGétal dans le Développement Urbain Durable.*

al., 2010). Une campagne de mesures permet de quantifier directement sur le terrain de nombreuses grandeurs qui se trouvent à l'origine du microclimat, telles que les composantes du bilan d'énergie, la température et l'humidité de l'air.

Les campagnes de mesures sont limitées dans l'espace, dans le temps et dans le nombre de grandeurs observées. En effet, souvent la portée des mesures n'est que locale et n'est pas représentative par exemple de l'ensemble des quartiers d'une ville. De plus, ces mesures sont souvent coûteuses et lourdes à mettre en place (mâts ou tours instrumentés) et peuvent demander plusieurs mois de logistique suivant le phénomène que l'on souhaite étudier. Ainsi, ces campagnes de mesures ne peuvent être multipliées indéfiniment. Elles sont donc réalisées en majorité pour accroître notre connaissance du climat urbain, en comprenant mieux les processus en jeu, mais aussi pour obtenir des jeux d'observations afin de nourrir et d'évaluer les modèles numériques, qui permettent, une fois validés, de simuler le microclimat urbain sur diverses zones urbaines.

1.2.2. Modèles numériques de simulation

En général, trois types de données sont nécessaires pour le fonctionnement d'un modèle de simulation qui spatialise le climat : une représentation de la géométrie de la zone d'étude (en une, ou deux, ou trois dimensions), la nature et la composition des matériaux composant cette zone et des données de forçage météorologique (Najjar et al., 2010). A partir de ces informations, le modèle simule les échanges de flux entre chaque objet de l'environnement urbain et ses alentours. Les résultats permettent de simuler, suivant le pas de temps des données de forçage, une dynamique journalière ou hebdomadaire, voire mensuelle du climat. L'évaluation des simulations d'un modèle s'effectue grâce aux mesures de terrain, introduites précédemment.

Ainsi, associé à des études expérimentales, un modèle numérique se révèle un outil efficace pour étudier le climat urbain. Il peut simuler une évolution spatiale et temporelle des interactions au sein d'une zone et à différentes échelles (Masson et al., 2008). De plus, le modèle numérique, permet d'évaluer, non seulement l'impact de la végétation existante sur le climat, mais aussi l'impact de l'introduction de la végétation dans de futurs projets urbains.

1.2.2.1. Echelle de modélisation

Il existe des modèles de simulation à différentes échelles. Le choix de l'échelle de modélisation s'établit suivant les objectifs fixés (interactions entre un objet et le milieu urbain, aménagement urbain, étude de l'ICU, etc.). Ils peuvent être scindés en deux catégories :

- Les modèles à méso-échelle qui couvrent des villes, voire des régions.
- Les modèles à micro-échelle ou microclimatiques qui sont focalisés sur des objets ou des rues, voire des quartiers.

Pour obtenir des simulations sur toute une ville, on préférera utiliser un modèle à méso-échelle (Lafore et al., 1998 ; Skamarock & Klemp, 2008). Cependant, ce type de modèles ne peut réaliser des simulations qu'au-dessus d'une certaine résolution horizontale, qui est en général au mieux d'une centaine de mètres. Si l'on souhaite étudier des plus petites zones, telles qu'une rue ou un quartier, ou bien obtenir des résultats avec une plus fine résolution de

⁶ EPICC : *Environmental Prediction in Canadian Cities*.

quelques mètres, il faudra utiliser un modèle microclimatique (Bruse & Fleer, 1998 ; Grawe et al., 2013 ; Kastendeuch & Najjar, 2009). Certains modèles microclimatiques fonctionnent à l'échelle d'un objet afin de se concentrer sur un élément de manière détaillée, comme un bâtiment ou un arbre (Sinoquet et al., 2001).

Ces deux catégories de modèles sont capables de fournir tous les flux liés à la création du climat urbain, au niveau des bâtiments, des sols et aussi de la végétation. La qualité de ces simulations dépend de plusieurs facteurs et en particulier de la qualité avec laquelle on tient compte de la géométrie de la zone d'étude (en pourcentages, en 2D ou en 3D). Les modèles microclimatiques requièrent une représentation plus fine des objets dans l'environnement urbain que les modèles à méso-échelle, ces derniers étant basés sur une carte qui schématise l'occupation des sols de la ville sous forme de pourcentages. Quelle que soit l'échelle de simulation, un compromis doit être trouvé entre le niveau de détail de la géométrie urbaine et l'exactitude des simulations climatiques.

1.2.2.2. Modèles numériques intégrant la végétation

Jusqu'à récemment, très peu de modèles numériques considéraient la végétation (Grimmond et al., 2011). Depuis quelques années seulement, les modèles commencent à prendre en compte, dans leur simulation, les processus physiques liés à la présence de la végétation. La végétation peut être gérée en une dimension – 1D (Lee & Park, 2008 ; Ryu et al., 2015) ou en plusieurs dimensions – 2D ou 3D (Krayenhoff et al., 2014 ; Redon et al., 2017). A l'échelle d'une ville ou d'un quartier, la végétation est souvent prise en compte en 2D par les modèles numériques. Pour cela, des informations, telles que la superficie d'occupation du sol de la végétation, sa position et sa quantité (à travers un indice de surface foliaire) sont utilisées. Ce type de représentation permet d'étudier le rôle de la végétation sur l'ICU d'une ville. Lorsque l'on souhaite étudier l'impact de la végétation et notamment des arbres sur le microclimat d'un parc ou d'une rue, le plus souvent l'objectif visé est l'aménagement durable de ces zones. Dans ce cas, l'impact radiatif des arbres est à prendre en compte et ceci ne peut pas s'effectuer seulement en connaissant la position des arbres et leur indice de surface foliaire. Il est primordial de connaître leur hauteur et leur forme et donc d'employer des modèles numériques capables de considérer la végétation en 3D. Dans cette étude, nous nous intéressons aux modèles numériques intégrant la végétation en 3D, plus particulièrement à l'échelle de la rue, voire du quartier, dans l'optique d'étudier l'aménagement de villes durables.

Dans la littérature, différents types de modèles semblent répondre à ces critères. Premièrement, il y a les modèles radiatifs simulant principalement l'impact radiatif des arbres sur l'environnement alentour (DART-EB - Belot, 2007 ; SOLWEIG - Lindberg et al., 2008 ; RayMan - Matzarakis et al., 2007 ; SOLENE-N3S - Robitu et al., 2006 ; Vinet, 2000). Deuxièmement, il y a les modèles CFD (*Computational Fluid Dynamics equations*) qui simulent les effets aérodynamiques de la végétation présente en milieu urbain, mais aussi la trajectoire du vent dans les rues (Schlünzen et al., 2011). Ces modèles demandent une intensité de calculs très importante et sont trop complexes à mettre en œuvre pour des non-spécialistes. De plus, pour la plupart, ils ne traitent pas les échanges d'énergie entre la surface urbaine et l'atmosphère. Or, l'évapotranspiration émise par la végétation s'avère très importante pour rafraîchir les villes (Bowler et al., 2010). C'est pour ces raisons que d'autres modèles ont vu le jour, afin de considérer à la fois l'impact radiatif des arbres mais aussi l'évapotranspiration de la végétation, en prenant en compte, pour certains, l'écoulement des flux (ENVI-met - Bruse, 2004). Comme l'illustre la Figure 1.3, les modèles microclimatiques

prennent en compte la géométrie 3D d'un milieu urbain, en général, soit à partir de faces, soit à partir de voxels. L'utilisation de voxels permet de détailler un peu plus la géométrie des objets, mais augmente la complexité d'utilisation du modèle et nécessite un temps de traitement des simulations plus conséquent. Un dernier point important à prendre en compte, est que dans ces modèles microclimatiques, les interactions relatives à la végétation sont très rarement validées.

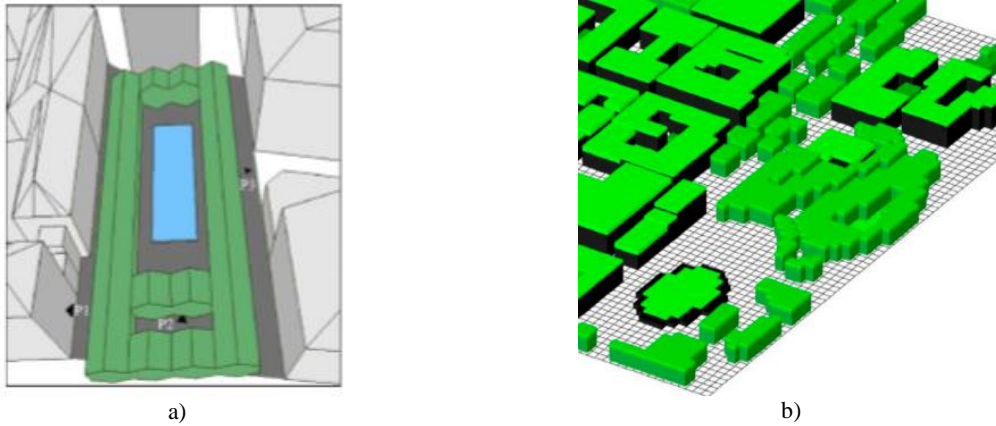


Figure 1.3 – Maquettes 3D d'un environnement urbain contenant des arbres, prises en compte dans les modèles microclimatiques : a) SOLENE-N3S (Robitu et al., 2006) et b) ENVI-met (Ambrosini et al., 2014).

Au vu du contexte exposé précédemment, l'approche combinant des mesures réelles et des simulations numériques est la solution adaptée pour comprendre l'apport de la végétation dans le climat urbain et prodiguer des conseils dans l'aménagement de villes durables. Simuler l'impact radiatif de la végétation, mais aussi l'évapotranspiration qu'elle émet s'avère important pour quantifier son effet rafraîchissant sur le climat.

1.3. Problématique de cette thèse

Cette thèse s'inscrit dans le contexte du développement, au sein de l'équipe TRIO, d'un modèle microclimatique (LASER/F - Kastendeuch & Najjar, 2009), capable de simuler le bilan radiatif et d'énergie de la végétation, prise en compte de manière détaillée, en milieu urbain. L'emboîtement d'échelle de simulations spatiales et temporelles devra être géré par le modèle. L'objectif, à long terme, est d'utiliser ce modèle comme outil d'aide à la décision pour la végétalisation des milieux urbains, à l'échelle d'une rue, d'un quartier, voire d'une ville. La problématique de la thèse consiste donc à **étudier comment prendre en compte la végétation, et plus particulièrement les arbres, dans ce modèle microclimatique, afin de simuler le microclimat d'un quartier.**

Cette problématique conduit à une approche du sujet selon différentes échelles de modélisation, allant de l'échelle d'un arbre à l'échelle d'un parc. La première échelle vise à étudier comment simuler le fonctionnement d'un arbre isolé, à travers un nouveau module de végétation, intégré au cours de cette thèse, dans le modèle microclimatique LASER/F. La deuxième échelle de modélisation prend en compte l'arbre dans son environnement urbain et permet de simuler les interactions entre la végétation (plusieurs arbres et pelouses) et les objets urbains alentour. Pour évaluer les simulations du modèle, des mesures de terrain vont être utilisées.

Dans l'objectif d'aider à l'aménagement urbain, le modèle microclimatique LASER/F devra être capable de simuler le fonctionnement de plusieurs arbres, de différentes espèces et géométries. Il n'est pas envisageable de réaliser des mesures sur chaque arbre présent en milieu urbain pour évaluer le modèle. L'alternative choisie consistera à utiliser un modèle numérique de référence, dédié au fonctionnement des arbres, pour évaluer les simulations du modèle microclimatique, relatives à différentes espèces d'arbres. Ainsi, dans cette thèse un deuxième modèle numérique sera utilisé (RATP - Sinoquet et al., 2001), à la fois pour évaluer les simulations de LASER/F sur plusieurs espèces d'arbres, mais aussi pour s'inspirer des concepts de RATP lors du développement d'un nouveau module de végétation dans le modèle LASER/F.

Nous avons identifié plusieurs objectifs à atteindre au cours de cette thèse.

Le premier objectif consiste à mettre en place une chaîne de traitements pour **reconstruire des maquettes 3D d'arbres** en vue de leur intégration dans les modèles numériques utilisés. Il faudra reconstruire les arbres présents dans la zone d'étude, ainsi que l'environnement de cette zone en trois dimensions. Cet objectif sera traité dans le Chapitre 3 de cette thèse.

Le deuxième objectif est de **faire fonctionner les modèles** pour simuler le microclimat d'un arbre et au sein d'un parc urbain. Le paramétrage de diverses données en entrée, telles que des données météorologiques ou physiologiques, devra être géré. Ce deuxième objectif sera considéré dans le Chapitre 4 et le Chapitre 5.

Enfin, il semble indispensable de **garantir la qualité des résultats** des simulations obtenues, et cela constitue le quatrième objectif à atteindre. Les résultats des modèles seront comparés entre eux, et aussi confrontés à des mesures de terrain. Ce dernier objectif sera abordé dans les deux derniers chapitres de cette thèse

Ces objectifs exigent des connaissances dans des domaines transversaux. Etant topographe de formation, il a fallu comprendre le fonctionnement des arbres et assimiler de nouvelles notions en climatologie urbaine.

Chapitre 2. Outils et méthodes

2.1. Modèles numériques de simulation utilisés	14
2.1.1. Le modèle microclimatique LASER/F	14
2.1.1.1. Description générale.....	14
2.1.1.2. Intégration d'un module de fonctionnement de la végétation.....	15
2.1.2. Le modèle écophysologique RATP.....	16
2.1.3. Différences conceptuelles entre les deux modèles	18
2.1.3.1. Différences de caractéristiques structurelles	18
2.1.3.2. Différences de caractéristiques optiques	20
2.1.3.3. Différences de caractéristiques physiologiques	21
2.1.3.4. Principales différences de fonctionnement	21
2.2. Choix de la zone d'étude	22
2.2.1. Présentation de la zone d'étude	22
2.2.1.1. Généralités.....	22
2.2.1.2. Arbres étudiés.....	23
2.2.2. Campagne de mesures de terrain ICube	24
2.3. Conclusion du Chapitre 2	25

Ce chapitre présente tout d'abord les deux modèles utilisés, pour mener à bien les objectifs fixés au cours de cette thèse. Le module de végétation intégré, au cours de cette thèse, dans le modèle microclimatique, est détaillé. Les différences entre les deux modèles numériques sont exposées. Dans un second temps, la zone d'étude sur laquelle a été appliqué les modèles est présentée, ainsi que les campagnes de mesures de terrain réalisées au sein de cette zone qui serviront de données de forçage aux modèles et de données d'évaluation.

Les questions auxquelles nous allons répondre dans ce chapitre sont :

- Comment fonctionnent les deux modèles numériques de simulation utilisés ?
- Comment fonctionne le module de végétation intégré dans le modèle microclimatique LASER/F ?
- Comment ces modèles prennent en compte les arbres ?

2.1. Modèles numériques de simulation utilisés

Afin de répondre à la problématique de cette thèse, deux modèles sont utilisés. Le modèle microclimatique qui sera utilisé pour tenter de simuler le microclimat au sein d'un quartier végétalisé est le modèle LASER/F (Kastendeuch et al., 2017). Le second modèle est un modèle écophysiological, que nous considérons comme modèle de référence de simulation du fonctionnement d'un arbre. Ce modèle, nommé RATP (Sinoquet et al., 2001), sera utilisé pour s'inspirer des concepts utilisés dans le développement du module de végétation de LASER/F, mais aussi pour évaluer les simulations de LASER/F à l'échelle d'un arbre.

2.1.1. Le modèle microclimatique LASER/F

2.1.1.1. Description générale

Le modèle microclimatique LASER/F (*Latent, SEnsible and Radiation Fluxes*) est développé depuis 2002 par le laboratoire ICube, équipe TRIO à Strasbourg (Kastendeuch et al., 2017 ; Kastendeuch & Najjar, 2009, 2015). Le code LASER/F est écrit en langage Pascal Objet. C'est un modèle basé sur les principes de la thermodynamique⁷ qui permet de simuler les bilans radiatifs et d'énergie en tout point d'une zone de simulation urbaine ou rurale. Ces simulations supposent une connaissance fine de la géométrie de la zone étudiée, ainsi que de ses caractéristiques physiques. Les données en entrée nécessaires pour le fonctionnement du modèle LASER/F sont décrites en Annexe A, page 162. La zone de simulation, représentée par une maquette 3D se trouve divisée en un réseau de mailles de 250 m x 250 m maximum. Chaque maille est constituée de plusieurs objets définis par un type d'objets (bâtiment, mobilier, terrain). Ces objets sont composés de différentes faces (polygones 3D) qui possèdent chacune des propriétés physiques propres (revêtement, matériaux, etc.) qui doivent être renseignées en données d'entrée. A partir de ces données, de valeurs d'initialisation de la simulation (quantité d'eau dans le sol, température du sol, etc.) et des conditions météorologiques de forçage fournies à différents pas de temps, LASER/F détermine les différents termes de l'équation du bilan d'énergie [1] et d'eau en milieu urbain. Les principes fondamentaux suivis par le modèle LASER/F sont les suivants :

- Résolution du bilan radiatif par pas de temps en prenant en compte les rayonnements solaires : direct en fonction de la position du soleil, diffus et réfléchi par le sol, ainsi que le rayonnement infrarouge atmosphérique et terrestre (réfléchi et émis).
- Détermination de la conduction thermique dans le sol et à travers les façades des bâtiments. Le transfert de chaleur par conduction est calculé en régime transitoire. Ainsi, une liaison est réalisée entre les différents pas de temps. Les valeurs déterminées au pas de temps n sont stockées et utilisées pour évaluer les résultats au pas de temps $n+1$.
- Module simplifié de gestion d'énergie à l'intérieur des bâtiments (expérimental et en cours de réécriture).
- Echanges de chaleur, par flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente, entre des surfaces minérales et l'atmosphère.
- Bilan d'eau des sols naturels.
- Pronostic des caractéristiques de l'air dans les rues.

⁷ Thermodynamique : branche de la physique qui étudie les transformations énergétiques : mouvements de chaleur, changements d'état, etc.

- Pronostic de l'indice de confort en n'importe quel point de la zone de simulation.

Les équations appliquées dans ces calculs, peuvent varier en fonction du type d'objets ou de faces concernés. Ces calculs sont toujours effectués au niveau du barycentre des triangles (facettes) obtenus après une fragmentation automatique, des surfaces (faces) de la maquette 3D, réalisée par LASER/F.

Ce modèle LASER/F a l'avantage d'avoir déjà été validé sur les simulations des températures de surface des bâtiments dans une rue (Jacob, 2016) et dans un parc (Roupioz et al., 2018), et sur le bilan d'énergie, à l'exception du flux de chaleur latente, dans deux quartiers différents (Kastendeuch et al., 2017 ; Kastendeuch & Najjar, 2009).

2.1.1.2. Intégration d'un module de fonctionnement de la végétation

Nous pensons que LASER/F a un fort potentiel pour prendre en compte la végétation et permettre de quantifier son impact sur le climat urbain car il a été développé pour simuler spécifiquement le bilan d'énergie dans une architecture complexe telle que la ville. L'intérêt de ce modèle, par rapport à d'autres modèles existants, se trouve dans sa capacité à réaliser des simulations à une échelle très fine spatialement (prise en compte de petits objets) et temporellement (intervalle de temps entre les simulations de quelques minutes). De plus, il simule tous les flux du bilan radiatif et d'énergie, contrairement à certains modèles qui ne prennent pas en compte l'évapotranspiration de la végétation. LASER/F ne simule pas l'écoulement du vent, comme le font les modèles CFD. Toutefois, bien que la direction du vent ne soit pas prise en compte dans le modèle, il permet de calculer à quelle vitesse le vent circule dans le canyon, par l'intermédiaire d'une paramétrisation. L'atout majeur de LASER/F est que c'est un modèle de recherche, développé par notre équipe et de ce fait, nous savons exactement comment il fonctionne et quelles sont ses limites. Par conséquent, nous pouvons avoir la main sur son développement, de manière à répondre à nos besoins.

LASER/F a été développé dans l'objectif de simuler le microclimat de n'importe quel type de quartiers comprenant des bâtiments, différentes natures de sol et de la végétation. Le module actuel de végétation intégré dans LASER/F est très élémentaire. Au cours de cette thèse, nous avons cherché à intégrer dans LASER/F un nouveau module de fonctionnement de la végétation, plus complet et plus performant. Ce module tient compte de deux types de végétation : le sol enherbé (végétation basse) et les arbres (végétation haute). Il a pour objectif de simuler les ombres portées des arbres par l'atténuation du rayonnement à travers le couvert, mais aussi de calculer l'évapotranspiration émise par la végétation. Les travaux entrepris durant cette thèse ont permis de faire évoluer le module en testant différentes versions (une dizaine, dont deux majeures) et en les comparant à des mesures de terrain. Nous parlerons dans ce mémoire des résultats obtenus avec la dernière version datant de mai 2018.

La géométrie 3D prise en compte dans le modèle pour ces deux types de végétation est illustrée dans la Figure 2.1. Cette géométrie comprend la surface de sol, l'enveloppe de la couronne de l'arbre, l'indice de surface foliaire (LAI : *Leaf Area Index*) et la profondeur racinaire, associés au sol ou à l'arbre. Au niveau du fonctionnement du sol enherbé, un bilan d'énergie complet est calculé par itérations successives, alors que pour le fonctionnement de l'arbre, les termes du bilan d'énergie et la température de surface des feuilles sont calculés séparément par des équations simplifiées, conformément aux travaux réalisés par Campbell & Norman (2012). L'évapotranspiration du sol enherbé et des arbres est modulée en fonction : (i) des conditions météorologiques, (ii) de la conductance stomatique, qui est évaluée suivant le même principe de base pour les deux types de végétation (régulation

physiologique) et (iii) du contenu en eau du sol. Dans le modèle LASER/F, la conductance stomatique est contrôlée par le microclimat entourant l'arbre, tel que le rayonnement incident, la température de l'air, la quantité de CO₂, le déficit de pression de vapeur d'eau (VPD : *Vapor Pressure Deficit*) et le contenu en eau dans le sol. Il s'inspire des équations établies par Noilhan et Mahfouf (1996). Dans le modèle, la végétation puise l'eau dans le sol suivant sa profondeur racinaire. Deux points sont importants à distinguer : la quantité d'eau disponible pour la transpiration et la spatialisation des racines dans la terre.

La quantité d'eau finalement utilisée dans le calcul de la conductance stomatique dépend de la réserve utile d'eau et de la proportion de racines qui se trouvent dans chaque couche de sol. La profondeur racinaire est plus importante pour un arbre que pour le sol enherbé. Pour les arbres, une fonction non linéaire, à forme asymptotique, est utilisée pour répartir les racines entre la surface du sol et une profondeur donnée (Jackson et al., 1996). Cette fonction donne le pourcentage de racines contenu dans chaque couche de sol. Ainsi, 26 %, 46 % et 70 % des racines se trouvent respectivement dans les premiers 10 cm, 20 cm et 40 cm de profondeur. Ce paramétrage demeure identique, quelle que soit l'espèce d'arbres étudiée. Plus de détails sur le fonctionnement des arbres dans ce nouveau module sont présentés dans la sous-partie 2.1.3, page 17.

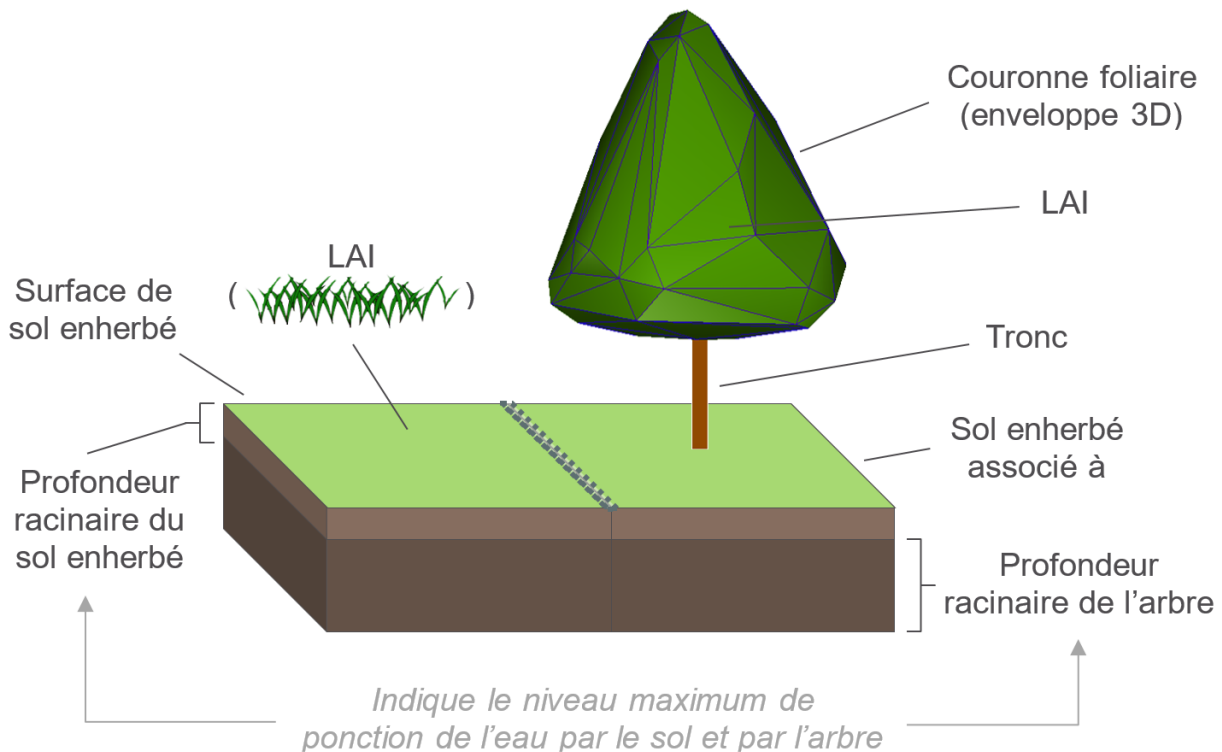


Figure 2.1 – Schématisation de la géométrie 3D du module de végétation dans LASER/F comprenant le sol enherbé et l'arbre. Le LAI (indice de surface foliaire) donne une idée de la quantité de feuilles sur le sol et dans la couronne foliaire. Les profondeurs racinaires indiquent le niveau maximum de ponction de l'eau.

2.1.2. Le modèle écophysiological RATP

Afin de mieux comprendre comment prendre en compte les arbres dans LASER/F et d'évaluer les résultats de ce modèle au niveau des simulations du microclimat à l'intérieur et à l'extérieur de la couronne foliaire d'un arbre, le modèle écophysiological RATP (*Radiation Absorption, Transpiration and Photosynthesis*) a été choisi (Sinoquet et al., 2001). Le code, écrit en Fortran90 et en Python, se trouve aussi disponible sur la plateforme OpenAlea (Pradal

et al., 2008). RATP a été développé par l'UMR PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand pour simuler la distribution spatiale du rayonnement et des échanges gazeux sous un couvert végétal feuillu en fonction de la structure du couvert, du microclimat aux alentours et des propriétés physiques et physiologiques des feuilles. Ce modèle permet de simuler le bilan radiatif, le bilan d'énergie et la photosynthèse d'un arbre ou de plusieurs arbres en même temps. Les données d'entrée, décrites dans l'Annexe B, page 166, sont : (i) une grille de voxels⁸ dimensionnés en fonction de la dimension des feuilles et de la couronne (Figure 2.2) ; (ii) un ensemble de caractéristiques fonctionnelles ; et (iii) les données météorologiques. Les principes fondamentaux suivis par le modèle RATP sont les suivants :

- Pour chaque pas de temps, un lancer de faisceaux lumineux est calculé en fonction de la distribution directionnelle du rayonnement incident, en tenant compte de la direction du soleil.
- Pour chaque voxel atteint par ces faisceaux, une atténuation du rayonnement va être calculée. Le principe du calcul est basé sur la loi de probabilité de répartition de la lumière dans un milieu continu : la loi de Beer-Lambert (Houghton, 2002).
- Les sources de rayonnement sont le ciel, y compris les fractions directes et diffuses (c'est-à-dire dispersées par les nuages et les gaz atmosphériques) du rayonnement incident, ainsi que les composantes du feuillage et la surface du sol qui diffusent une fraction du rayonnement intercepté. Seules les courtes longueurs d'onde (rayonnement photosynthétiquement actif (PAR : *Photosynthetic Active Radiation*) et proche infrarouge (IR : *Infrared radiation*) sont prises en compte dans le calcul, car les autres impactent peu sur la photosynthèse et l'évapotranspiration d'un arbre.
- Le bilan d'énergie des surfaces foliaires éclairées et ombragées dans chaque voxel est calculé selon les conditions météorologiques des pas de temps étudiés. Ce calcul s'effectue par un processus itératif, qui permet la détermination de la température de surface des feuilles équilibrant les gains et les pertes des flux du bilan d'énergie.
- Le taux de transpiration des feuilles à l'intérieur d'un voxel est déterminé par la réponse physiologique de la plante (conductance stomatique) et par la demande par évaporation (Monteith & Unsworth, 1990). Dans le modèle RATP, la conductance stomatique est contrôlée par le microclimat entourant les feuilles (rayonnement, CO₂ et VPD interceptés) et la température des feuilles selon le modèle de Jarvis (Jarvis, 1976).

Au vu de la collaboration entre notre équipe de recherche et celle de l'UMR PIAF, le choix du modèle écophysologique utilisé dans cette étude, parmi les autres modèles existants (Dauzat et al., 2006 ; Green, 1993 ; Sinoquet et al., 2001 ; Wang & Jarvis, 1990), s'est porté sur RATP. De part cette collaboration, l'équipe PIAF cherche à évaluer les capacités de leur modèle à simuler le fonctionnement d'arbres urbains. En effet, pour l'instant, ce modèle a l'avantage d'avoir été validé sur plusieurs espèces d'arbres telles que des pommiers (Massonnet et al., 2008) ou des noyers (Sinoquet et al., 2001), mais qui se trouvent dans des vergers. La validation a été réalisée au niveau des flux de photosynthèse, d'évapotranspiration et de la température des feuilles du couvert. Ainsi, au cours de cette thèse, nous procéderons à une étape d'évaluation des simulations produites par RATP appliqué à des arbres en ville, grâce aux mesures de terrain disponibles.

⁸ Voxel : contraction de « *volumetric pixel* ». Equivalent d'un pixel en trois dimensions.

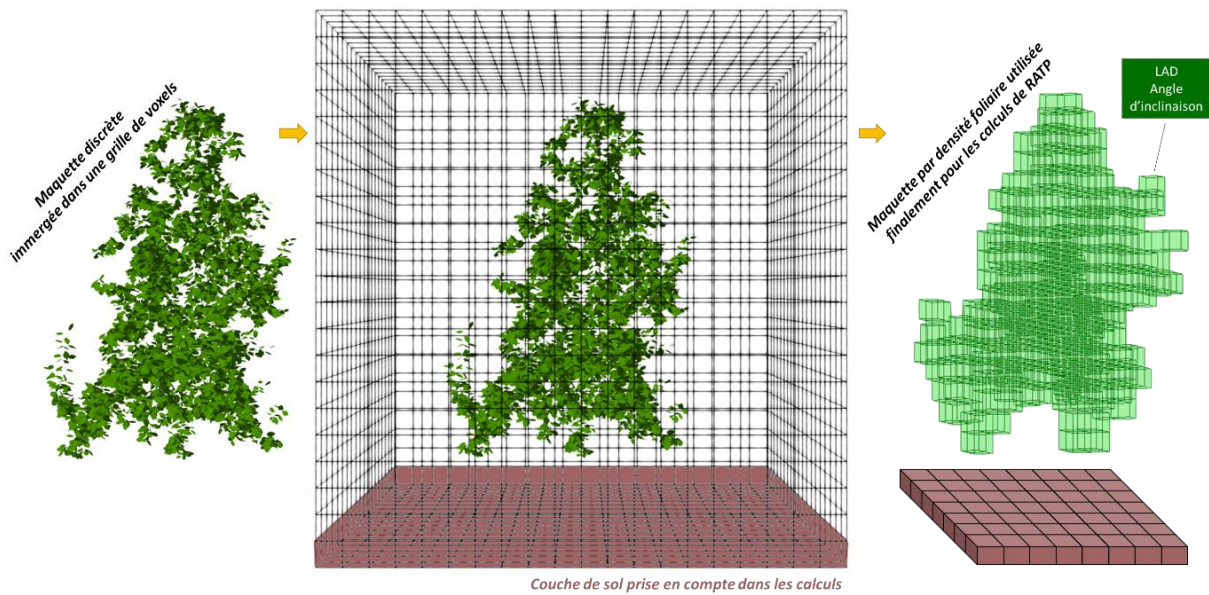


Figure 2.2 – Schématisation du processus de prise en compte du feuillage d’un arbre en trois dimensions dans RATP. La maquette finalement utilisée est constituée de voxels et pour chaque voxel une densité foliaire et un angle d’inclinaison des feuilles sont attribués. Ces informations sont souvent extraites d’une maquette discrète et grâce à son immersion dans une grille de voxels. La couche de voxels la plus basse représente la couche de sol.

Nous allons à présent comparer conceptuellement le nouveau module de végétation intégré dans LASER/F avec le modèle RATP.

2.1.3. Différences conceptuelles entre les deux modèles

Simuler l’impact radiatif d’un arbre ou son évapotranspiration, quel que soit le modèle numérique de simulation utilisé (LASER/F ou RATP), nécessite la connaissance de nombreuses caractéristiques relatives à son feuillage :

- Caractéristiques structurelles : quantité, spatialisation, inclinaison, taille, surface des feuilles, etc.
- Caractéristiques optiques : réflectivité, transmissivité, absorptivité
- Caractéristiques physiologiques : régulation stomatique liée aux facteurs environnementaux et internes à la plante.

Dans cette sous-partie, nous allons voir comment sont gérées conceptuellement ces caractéristiques par les deux modèles, mais aussi les différences, en termes de principe de calculs.

2.1.3.1. Différences de caractéristiques structurelles

Pour pouvoir simuler avec le plus d’exactitude possible l’évapotranspiration d’un arbre, il s’avère nécessaire de prendre en compte la spatialisation des feuilles dans le couvert pour pouvoir déterminer la variabilité spatiale de divers facteurs tels que le rayonnement, la température de feuilles, le vent ou l’humidité. Plusieurs stratégies de représentation sont possibles, cela peut s’accomplir grâce à des maquettes, plus ou moins détaillées, représentant les arbres en trois dimensions (Chapitre 1, sous-partie 1.2.2.2). La spatialisation des feuilles peut être prise en compte dans un modèle de simulation discret, où le feuillage explicite est très détaillé ou bien dans un modèle de simulation de densité foliaire, où le feuillage se trouve

implicitement pris en compte. Le modèle discret permettrait d'obtenir des simulations plus exactes, mais avec un temps de traitement conséquent (Albasha et al., 2016). C'est pourquoi, dans RATP et LASER/F le choix de réduire l'information en travaillant à l'échelle de voxels (RATP) ou d'enveloppes (LASER/F) a été fait. Chaque modèle interprète la maquette 3D de manière à en extraire les informations nécessaires pour pouvoir réaliser les calculs de transferts radiatifs et de bilans d'énergie au niveau du feuillage. La Figure 2.3 permet d'illustrer comment chaque modèle prend en compte un arbre :

- Les variables de base utilisées par RATP sont la densité foliaire (LAD : *Leaf Area Density*) et l'angle d'inclinaison des feuilles. Pour déterminer ces variables, une maquette définissant un feuillage explicite, c'est-à-dire où toutes les feuilles sont individualisées et spatialisées en trois dimensions, est généralement utilisée dans RATP. Ces feuilles sont immergées dans une grille 3D composée de voxels. La dimension des voxels est définie de manière à obtenir un résultat le plus détaillé possible tout en respectant les principes établis par les lois appliquées dans le modèle. Le nombre de feuilles contenues dans chaque voxel permet de fixer une surface foliaire par voxel. Le volume des voxels étant connu, la LAD par voxel est alors déterminée. A ce stade, les feuilles ne sont plus définies explicitement mais implicitement par leur surface foliaire totale par voxel. A l'échelle du voxel, la surface foliaire est répartie de manière homogène. L'inclinaison des feuilles se trouve également soit extraite de la maquette explicite initiale, soit imposée. Dans tous les cas, l'inclinaison est considérée comme constante dans chaque voxel.
- LASER/F fonctionne uniquement avec un feuillage implicite pris en compte dans une enveloppe. Pour chaque face de l'enveloppe, un LAI par face est calculé à partir du LAI de l'arbre fourni en entrée. Un volume à l'intérieur de la couronne est associé à chaque face. Il est dimensionné par la distance entre le centre de l'arbre et le centre de la face. Dans ces volumes, la LAD est répartie aléatoirement. Un volume vide de feuilles peut être pris en compte à l'intérieur de la couronne, ce qui réduit le volume dans lequel le feuillage est réparti. Cette information nécessite un changement dans le code. La distribution de l'inclinaison des feuilles est fixée quel que soit le type d'arbres avec un angle d'inclinaison moyen de 60° par rapport au zénith (Campbell & Norman, 2012).

Ainsi, dans les deux modèles, le feuillage est pris en compte implicitement à partir de caractéristiques structurelles du couvert (LAI, LAD, angle d'inclinaison). Il semble important de noter que l'approche par voxels, utilisée par le modèle RATP, induit une perte d'information et des biais sur la spatialisation du feuillage par rapport à une représentation 3D où toutes les feuilles sont individualisées et donc bien orientées et spatialisées. Par exemple, le volume occupé par le feuillage et la surface d'interception de la lumière sont biaisés par cette approche. La lumière demeure le principal facteur qui pilote la transpiration et la photosynthèse. Il paraît donc important de l'appréhender correctement. Pour pallier cette perte d'information, un facteur correcteur d'agrégation est déterminé en comparant la maquette voxelisée à la maquette discrète. Le modèle RATP permet une spatialisation plus réelle du feuillage que le modèle LASER/F, puisque l'utilisation de voxels de petites dimensions (ex. 20 cm) permet d'être plus fidèle à la spatialisation réelle des feuilles que l'utilisation d'une enveloppe globale de l'extérieur de la couronne, bien que le volume à l'intérieur duquel le feuillage est spatialisé peut être réduit. Enfin, il est important de prendre en compte que, que ce soit les voxels ou les faces, tous deux représentent un milieu homogène, constitué uniquement de feuillage.

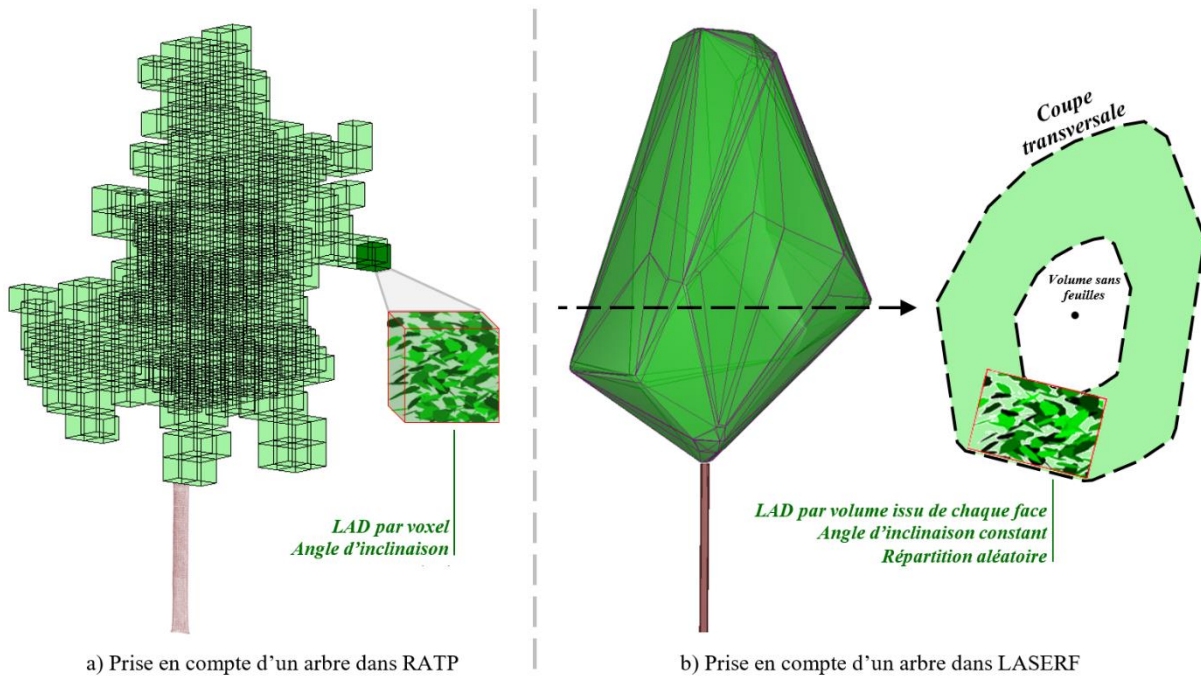


Figure 2.3 – Prise en compte du feuillage d’un arbre avec a) RATP et avec b) LASER/F.

2.1.3.2. Différences de caractéristiques optiques

Une fois le feuillage intégré dans les modèles, il faut lui attribuer des caractéristiques optiques pour simuler la quantité de rayonnement réfléchi, transmis et absorbé par les feuilles dans trois bandes spectrales différentes : le rayonnement photosynthétiquement actif principalement utilisé par les feuilles pour la photosynthèse, le rayonnement proche infrarouge et le rayonnement infrarouge.

Les caractéristiques optiques d’une feuille sont intégrées par les modèles, soit par des données en entrée (RATP), soit directement dans le code (LASER/F). Par conséquent, dans le cas où plusieurs espèces d’arbres sont étudiées, RATP permet le paramétrage des différences optiques entre le feuillage des différentes espèces. Quant à LASER/F, il utilise toujours les mêmes caractéristiques, généralement observées sur les végétaux (Campbell & Norman, 2012). A partir de ces caractéristiques, les modèles déterminent pour chaque voxel (RATP) ou face (LASER/F) les coefficients d’échanges radiatifs entre les sources de rayonnement et les récepteurs, ici les feuilles. Ces coefficients dépendent de la quantité de rayonnement intercepté qui est pondérée en fonction de la position du soleil, de la LAD et des angles d’inclinaison des feuilles. Cette quantité de rayonnement intercepté est plus ou moins atténuée dans le couvert selon les calculs réalisés par les modèles. Ainsi, les caractéristiques optiques du feuillage dans sa globalité seront différentes de celles d’une feuille unique imposées au départ. Ces caractéristiques optiques globales, calculées par les modèles, sont primordiales puisqu’elles conditionnent indirectement l’évapotranspiration simulée, via le rayonnement intercepté par les feuilles. Ces caractéristiques sont aussi importantes dans LASER/F pour déterminer l’intensité de l’ombre portée sur les surfaces adjacentes, via la quantité de rayonnement qui traverse la couronne. Le coefficient d’atténuation du rayonnement à travers la couronne, appliqué dans LASER/F reste identique quelle que soit la distance parcourue par le rayon lumineux.

2.1.3.3. Différences de caractéristiques physiologiques

En modélisation, la régulation stomatique d'un feuillage, qui va conditionner son évapotranspiration, s'avère prise en compte en calculant sa conductance stomatique pour chaque pas de temps simulé. Dans RATP et LASER/F, cette conductance est calculée respectivement, selon la formulation de Jarvis (1976) et celle de Noilhan & Mahfouf (1996). Ces formulations supposent que les facteurs météorologiques (température de l'air, rayonnement photosynthétiquement actif, CO₂, VPD et la quantité d'eau dans le sol) agissent indépendamment les uns des autres sur la régulation stomatique. Ce phénomène est traduit par le paramétrage de fonctions de régulations. Sachant que ces paramètres dépendent de la plante considérée, des conditions météorologiques et de la saison, il s'avère nécessaire de les déterminer à plusieurs moments, de manière à pouvoir reproduire leur évolution au cours de l'année (Jarvis, 1976).

Dans le cas de RATP, les fonctions de réponse aux facteurs météorologiques peuvent être différentes suivant les arbres étudiés, puisqu'elles sont renseignées en donnée en entrée. Quant à LASER/F, autant d'informations différentes par espèce d'arbres ne peuvent être gérées par le modèle. Ainsi, pour le moment, la conductance stomatique tient compte uniquement de la différence entre résineux et feuillus. Elle est définie dans les travaux de Noilhan & Mahfouf (1996). On notera que contrairement à RATP, la régulation stomatique du feuillage dans LASER/F tient compte de la quantité d'eau présente dans le sol, sur tout le profil racinaire de l'arbre. Récemment, une version de RATP comprenant le stress hydrique a été paramétrée sur un pommier (Ngao et al., 2017). Cette paramétrisation étant complexe, elle n'a pas été utilisée dans cette étude. Ainsi, au cours de cette thèse, les simulations de LASER/F seront calculées en fonction de la sécheresse dans le sol contrairement à RATP où l'arbre est supposé fonctionner en confort hydrique.

2.1.3.4. Principales différences de fonctionnement

D'après la description détaillée de chacun des modèles, nous retiendrons que :

- Les interactions entre le sol et la couronne foliaire sont prises en compte par RATP et LASER/F. Toutefois, LASER/F permet de s'adapter à la nature et aux conditions hydriques du sol sous l'arbre, contrairement à RATP.
- Les deux modèles exercent une atténuation du rayonnement à travers le couvert, mais celle-ci ne s'avère pas gérée de la même manière. Cette atténuation s'effectue à travers chaque voxel avec RATP et donc la forme de la couronne est prise en compte. Avec LASER/F, l'atténuation reste identique quel que soit le point d'impact du rayon lumineux (à l'extrémité ou au centre de la couronne). Les deux modèles ne simulent pas la variabilité dans le couvert, du vent ou de l'humidité. Par contre RATP simule la variabilité de la température du feuillage dans la couronne, alors que LASER/F simule cette variabilité seulement sur l'extérieur de la couronne.
- Contrairement à RATP, LASER/F ne réalise aucune distinction entre le feuillage éclairé et le feuillage ombragé au cours des calculs.
- Les flux et la température de surface sont calculés par RATP en résolvant le bilan d'énergie de chaque voxel, alors qu'avec LASER/F ils sont calculés pour chaque face de la couronne foliaire à l'aide d'équations simplifiées. Cette approche implique des résultats moins réalistes. Néanmoins, il serait trop complexe de réaliser une résolution complète du bilan d'énergie par itérations, étant donné que LASER/F prend aussi en compte les interactions relatives à la présence des bâtiments et des sols.

- L'évapotranspiration d'un arbre est calculée par les deux modèles en fonction de la conductance stomatique de son feuillage. La prise en compte du bilan d'eau dans le sol est gérée uniquement avec le modèle LASER/F. Ainsi, lors d'une sécheresse intense du sol, les simulations de RATP ne seront pas représentatives de l'état hydrique de l'arbre.
- Les calculs relatifs à l'arbre sont effectués à l'état stationnaire pour les deux modèles. Ainsi, les calculs effectués au pas de temps n sont indépendants des précédents effectués au pas de temps $n-1$.
- Les résultats obtenus peuvent être extraits au niveau de la maille, au niveau de l'objet, au niveau d'une face et au niveau d'une facette, avec LASER/F et au niveau de chaque voxel ou de l'ensemble des voxels, avec RATP. Les deux modèles permettent une spatialisation tridimensionnelle des résultats directement sur la maquette 3D de la zone de simulation.

Ainsi, le fonctionnement des arbres n'est pas tout à fait géré de la même manière suivant le modèle de simulation. Comme LASER/F est un modèle microclimatique censé fonctionner sur une zone de simulation plus large que RATP, plus de simplifications du fonctionnement des arbres sont effectuées. Dans les chapitres suivants, nous verrons quel est l'impact de ces simplifications sur les simulations.

2.2. Choix de la zone d'étude

Les modèles de simulation ont été appliqués à une zone d'étude spécifique située à Strasbourg.

2.2.1. Présentation de la zone d'étude

2.2.1.1. Généralités

Au vu du sujet de cette thèse, un parc urbain a été choisi comme zone d'étude. Il s'agit du parc du jardin du Palais Universitaire situé au cœur de la ville de Strasbourg, en France, illustré à travers la Figure 2.4a. Comme le montre la Figure 2.4b, cette zone contient beaucoup de végétation (arbres et pelouses), avec en son centre quatre rangées de tilleuls argentés régulièrement espacés de 3 m et d'une hauteur moyenne de 9 m en période estivale. Ces arbres sont entourés de bâtiments universitaires d'une hauteur moyenne de 18 m. Le modèle LASER/F estime un espacement moyen des bâtiments dans la zone d'étude de 44 m. L'occupation du sol est composée de 37 % de bitume, 28 % d'herbe, 7 % de sol nu et 27 % de surface d'emprise au sol des bâtiments. D'après les travaux de [Stewart et al. \(2014\)](#), cette zone correspondrait à une zone climatique n°5 qui signifie « ouverte à mi-hauteur » (LCZ 5 – local climate zone « *Open mid-rise* »).

Ce parc a été choisi tout d'abord parce qu'il représente un environnement urbain typique où les arbres sont soit isolés, soit en groupes contenant différentes espèces, mais souvent entourés de bâtiments. C'est donc un endroit idéal pour étudier le comportement des arbres en ville, mais aussi l'effet de ce parc sur le microclimat urbain. Pour ces mêmes raisons, depuis plusieurs années, une campagne de mesures est réalisée au centre de ce parc (présentation de cette campagne dans la sous-partie 2.2.2). Ces mesures demeurent un véritable atout dans cette étude et correspond à la deuxième raison du choix de cette zone, puisque les modèles de

simulation utilisés vont pouvoir être paramétrés et évalués directement avec des mesures provenant de la zone proche. Le centre d'intérêt dans cette étude correspond à la zone entre les rangées de tilleuls argentés où les mesures de terrain sont principalement réalisées.

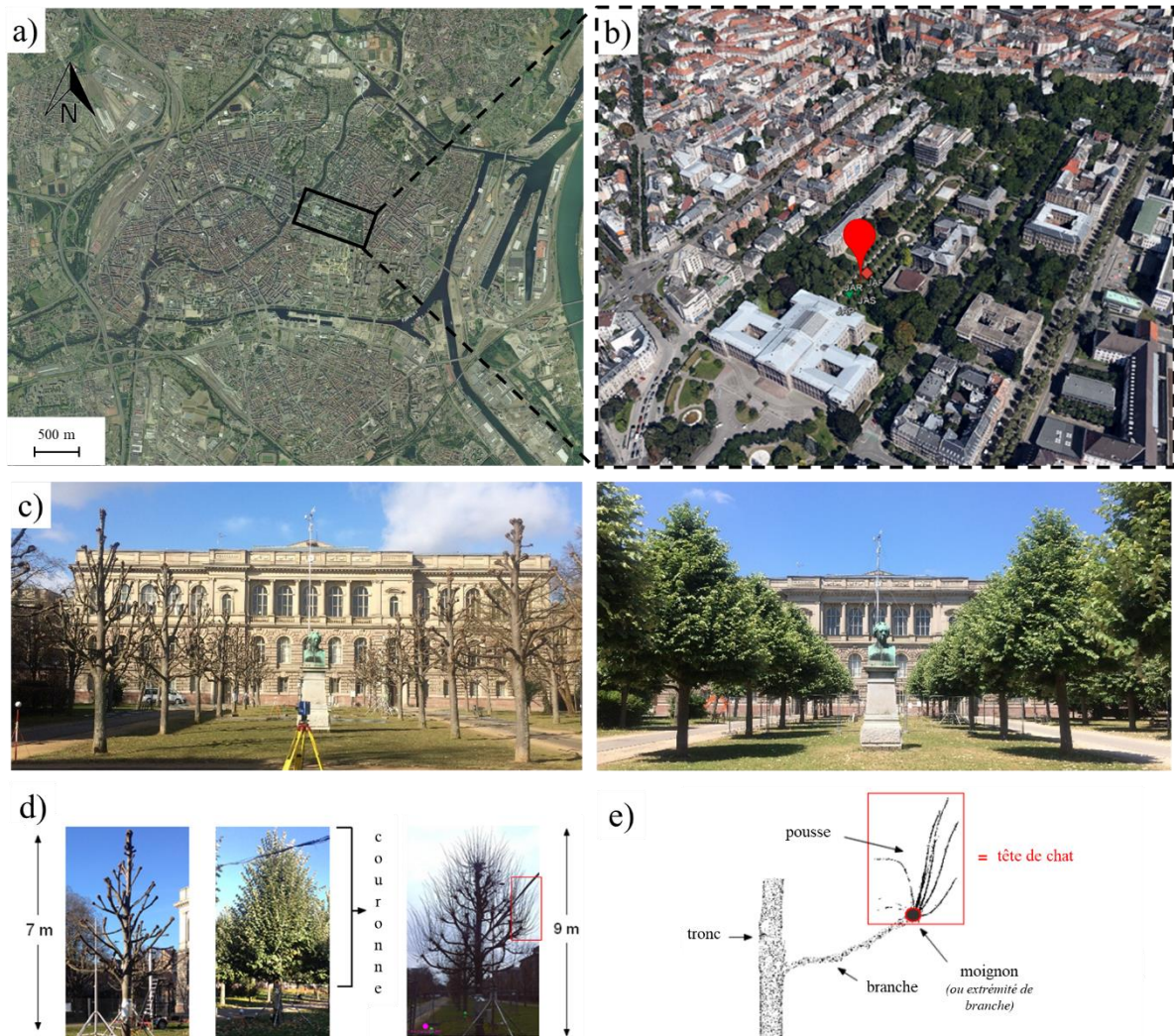


Figure 2.4 – Localisation de la zone d'étude du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg (coordonnées géographiques : 48°35'4.5" N ; 7°45'49.6" E) : a) vue de l'Eurométropole de Strasbourg (source : Géoportail), b) visualisation aérienne (prise de vue par hélicoptère) du parc et de la zone d'intérêt et c) photos au centre des rangées de tilleuls argentés : en hiver (à gauche) et en été (à droite). d) Zoom plus détaillé sur les tilleuls argentés étudiés : photographie des trois étapes de croissance de l'arbre, fraîchement taillé, état feuillu et après chute des feuilles, lorsque les pousses sont nues et e) description de l'architecture de l'arbre avec les têtes de chat aux extrémités de chaque branche.

2.2.1.2. Arbres étudiés

Les arbres principalement présents dans cette zone sont des tilleuls argentés (*Tilia tomentosa Moench*) (Figure 2.4c). Parmi les 85 000 arbres urbains implantés dans la ville de Strasbourg, le tilleul fait partie des plus représentés (15 % des arbres). C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de commencer notre étude par cette espèce.

Chaque tilleul argenté a une hauteur d'environ 9 m en période estivale et une hauteur sous la couronne d'environ 2,0 m. Le diamètre du tronc à hauteur de poitrine est d'environ 0,3 m et le diamètre de la couronne est d'environ 5,0 m. Les tilleuls argentés étudiés ont la particularité

d'être taillés en forme conique de « tête de chat » (Clair-Maczulajtys & Bory, 1988) (Figure 2.4d et Figure 2.4e). Une fois par an, en hiver, toutes les pousses végétatives au niveau des extrémités des branches sont taillées. Elles repoussent au début du printemps en même temps que les feuilles qui apparaissent en avril et restent jusqu'en octobre. Nous utiliserons le terme « tête de chat » pour désigner l'extrémité d'une branche et ses pousses végétatives (support des feuilles) (Figure 2.4e). La taille régulière de ces arbres engendre une agrégation du feuillage au niveau des têtes de chat, nous émettons donc l'hypothèse de l'absence de feuilles au centre des couronnes.

Au cours de cette thèse, nous avons tout d'abord tenté de simuler le comportement d'un tilleul argenté en particulier, situé au centre du parc et qui a été baptisé le « Georges' tree ».

2.2.2. Campagne de mesures de terrain ICube

Depuis 2013, plusieurs sites de l'Eurométropole de Strasbourg font l'objet d'études climatiques, visant à mesurer et à comprendre le climat urbain et plus particulièrement à étudier le rôle de la végétation (Najjar et al., 2015). Ces études sont réalisées à partir de campagnes de mesures ayant pour objectifs l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de l'effet de l'ICU, la compréhension des processus qui le contrôlent, l'analyse de la contribution de la végétation et, à terme, la mesure de l'indice de confort thermique de la population.

De nombreux capteurs, localisés dans le parc et ses alentours, permettent d'effectuer en continu des mesures des échanges radiatifs et de chaleur qui se produisent dans la zone d'étude. Une bonne partie de ces données pourra être utilisée dans cette thèse pour analyser et simuler le climat de cette zone à l'aide des modèles de simulation et aussi pour valider les simulations obtenues. Une liste exhaustive, des capteurs dont les données mesurées ont été utilisées dans cette thèse, est présentée en Annexe C, page 168.

Les données météorologiques de forçage utilisées avec LASER/F et RATP proviennent de trois sites de mesures et principalement du parc. Le forçage radiatif (solaire et infrarouge) est mesuré sur le toit d'un bâtiment à environ 700 m du parc (Figure 2.5a). Pour la température de l'air et l'humidité, nous avons choisi d'utiliser les mesures provenant d'un capteur météorologique fixé sur un mât à 17 m de hauteur au centre du parc pour avoir ces grandeurs à la hauteur moyenne des toits. Au sommet de ce même mat, les mesures de la vitesse du vent en trois dimensions réalisées par un anémomètre sonique et de la concentration en CO₂ dans l'air effectuées avec un analyseur de gaz ont été utilisées (Figure 2.5b). La quantité de précipitation est mesurée, soit dans le jardin botanique situé au bout du parc dans la Figure 2.4b, soit avec la station météorologique située à l'aéroport d'Entzheim à 10 km du site. La pression atmosphérique est mesurée à Entzheim également.

D'autres mesures écophysiologiques entreprises dans le parc pourront être utilisées pour l'évaluation des modèles de simulation. Des capteurs localisés au niveau du sol permettent de quantifier, à une échelle très fine, presque la totalité du bilan d'énergie émanant de la pelouse (Figure 2.5c). Le comportement du Georges' tree est étudié en détail à travers la mesure de la température de son feuillage, de l'évapotranspiration qu'il émet et de la quantité de rayonnement et d'humidité à l'intérieure de la couronne sur plusieurs hauteurs (Figure 2.5c). L'évapotranspiration est mesurée pour six tilleuls argentés. Les mesures réalisées dans ce parc permettent aussi de déterminer les flux en hauteur au niveau moyen des toits. Les flux de chaleur sensible et latente ainsi que le rayonnement solaire et infrarouge montant sont quantifiés à 17 m de hauteur en haut du mât.

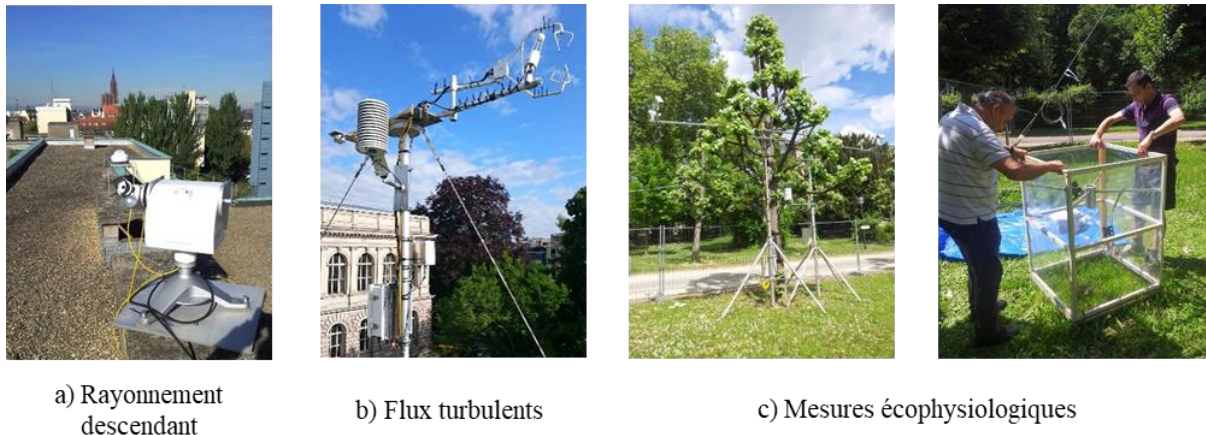


Figure 2.5 – Photographies de différents capteurs utilisés dans la zone d'étude

2.3. Conclusion du Chapitre 2

C'est à travers l'utilisation simultanée de mesures de terrain et des modèles numériques de simulation LASER/F et RATP que nous allons tenter de répondre à la problématique de cette thèse. La prise en compte de l'impact de la végétation sur le climat d'un parc nécessite la simulation de son évapotranspiration et de ses ombres portées, via une géométrie 3D assez fine. De ce point de vue, le modèle microclimatique LASER/F semble posséder un fort potentiel, puisqu'il répond à l'ensemble de ces critères. De plus, son fonctionnement sur des surfaces minérales a déjà été validé.

Le nouveau module de fonctionnement de la végétation (sol enherbé et arbre) intégré dans LASER/F a été présenté dans ce chapitre. Ce module a évolué au cours de la thèse, à travers une dizaine de versions développées, dont deux majeures. Ce sont finalement les résultats provenant de la dernière version, datant de mai 2018, qui sont présentés dans ce mémoire. Tout d'abord, nous allons tenter de simuler le fonctionnement d'un arbre urbain isolé avec les modèles RATP et LASER/F. L'emploi en parallèle de ces deux modèles permettra de mieux comprendre les concepts importants à prendre en compte pour simuler le comportement d'un arbre, mais aussi de comparer les simulations de LASER/F avec un modèle dédié à cet effet (RATP). Ce sera aussi l'occasion d'évaluer les simulations du modèle RATP sur un arbre urbain. Nous avons mis en avant dans ce chapitre comment les arbres sont gérés à travers les deux modèles, du point de vue du code utilisé, mais aussi de la prise en compte de leurs caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques qui pilotent l'impact qu'ils auront sur le microclimat alentour. Dans LASER/F, la maquette 3D d'un arbre est décrite par une enveloppe dans laquelle le feuillage est spatialisé aléatoirement à partir d'un indice de surface foliaire. Quant à RATP, le feuillage est spatialisé de manière homogène dans des voxels, qui composent la couronne foliaire, pour lesquels un indice de densité foliaire est renseigné.

Les modèles LASER/F et RATP vont être testés dans un cas bien particulier d'un arbre situé dans le parc du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg. Ce parc est d'ailleurs représentatif de ceux retrouvés dans les villes européennes où le climat est tempéré. Notre choix s'est porté sur ce parc, car depuis quelques années une campagne de mesures réalisée en son centre, permet de mesurer et de comprendre le climat qui y règne et plus particulièrement d'étudier l'impact de la végétation. Cette campagne de mesures assez complète (mesures relatives au sol, aux arbres et à l'ensemble du parc) va nous permettre d'acquérir le forçage météorologique nécessaire aux modèles mais aussi des données de comparaison pour évaluer

leurs simulations. Les arbres étudiés sont des tilleuls argentés taillés, très présents en milieu urbain. Ainsi, LASER/F et RATP vont être utilisés pour simuler le comportement du tilleul argenté « Georges' tree ». Puis, LASER/F sera employé sur la zone du parc du jardin du Palais Universitaire pour tenter de simuler le microclimat et évaluer les interactions entre la végétation et l'environnement par rapport à des mesures de terrain.

Chapitre 3. Reconstruction 3D d'un arbre isolé et d'un parc urbain

3.1. Reconstruction 3D d'un arbre isolé	28
3.1.1. Acquisition de la structure 3D d'un arbre	29
3.1.1.1. Méthodes existantes	29
3.1.1.2. Protocole d'acquisition mis en place.....	30
3.1.2. Reconstruction 3D détaillée d'un arbre	32
3.1.2.1. Méthodes de reconstruction du bois de l'arbre	32
3.1.2.2. Méthodes de reconstruction du feuillage explicite.....	36
3.1.2.3. Processus de reconstruction détaillée mis en place.....	37
3.1.3. Reconstruction 3D globale d'un arbre.....	47
3.1.3.1. Méthode de reconstruction du volume de la couronne foliaire.....	47
3.1.3.2. Méthodes d'extraction d'informations relatives au feuillage.....	48
3.1.3.3. Processus de reconstruction globale mis en place.....	49
3.1.4. Conclusion sur la reconstruction 3D d'arbres	53
3.2. Reconstruction 3D de la zone d'intérêt du jardin du Palais Universitaire	54
3.2.1. Données disponibles sur l'Eurométropole de Strasbourg	54
3.2.1.1. Données aériennes.....	54
3.2.1.2. Maquettes 3D existantes des bâtiments.....	56
3.2.2. Reconstruction de la maquette du jardin du Palais Universitaire.....	57
3.2.2.1. Reconstruction des bâtiments.....	58
3.2.2.2. Reconstruction des sols	58
3.2.2.3. Reconstruction des arbres	59
3.2.3. Conclusion sur la reconstruction de l'environnement urbain.....	60
3.3. Conclusion du Chapitre 3	61

La connaissance de la géométrie 3D de la zone de simulation (arbre ou parc) est nécessaire au fonctionnement des modèles RATP et LASER/F qui spatialisent en trois dimensions le microclimat au sein d'un arbre ou d'un quartier. Dans ce chapitre, une présentation non exhaustive de méthodes permettant de reconstruire la géométrie d'arbres est réalisée. Puis, pour étendre les simulations à une zone plus large englobant l'environnement du jardin du Palais Universitaire, la méthode mise en place pour reconstruire ce parc est présentée. La représentation des arbres est limitée aux arbres isolés au sein de ce parc pour s'affranchir des

difficultés que peut amener la prise en compte de groupements d'arbres (couronnes entremêlées).

Les questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans ce chapitre sont :

- Comment obtenir l'information de base à la reconstruction 3D d'un arbre et de son environnement urbain ?
- Suivant les besoins de RATP et LASER/F, quelle méthode de reconstructions employer pour aboutir à des maquettes adaptées à leur fonctionnement ?

3.1. Reconstruction 3D d'un arbre isolé

Quand un arbre est représenté en trois dimensions dans un modèle écophysique ou un modèle microclimatique, cela permet de simuler de manière plus réaliste les phénomènes d'évapotranspiration et d'ombre portée, deux facteurs qui contribuent au refroidissement de l'air. Ces deux phénomènes se produisant grâce au feuillage des arbres, il est indispensable de disposer d'informations sur la couronne foliaire, telles que l'emprise de cette couronne, la quantité et la spatialisation des feuilles présentes à l'intérieur, pour pouvoir simuler correctement le fonctionnement des arbres (Ross, 1981).

Les feuilles d'un arbre étant localisées principalement autour de branches végétatives (pousses), une représentation du bois est nécessaire pour pouvoir spatialiser le plus fidèlement possible le feuillage d'un arbre. Cependant, la géométrie complexe des arbres ne facilite pas leur reconstruction 3D. Les arbres sont généralement composés de branches de différents ordres de ramification⁹, de différentes tailles et de différents diamètres. La reconstruction du bois est d'autant plus complexe pour un arbre feuillu, puisque les feuilles étant localisées au niveau du bois de l'arbre, ce dernier est partiellement masqué. Ces observations soulignent la difficulté qu'il y a à acquérir de l'information 3D sur la géométrie des arbres, mais aussi à reconstruire des maquettes fidèles à la réalité par rapport à des objets à géométrie plus simple tels que des bâtiments.

Nous avons vu dans le Chapitre 1 qu'en général les maquettes des arbres, utilisées dans les modèles microclimatiques, simplifient beaucoup ces informations structurelles, en représentant par exemple les couronnes par des formes géométriques simples. Avec LASER/F et surtout RATP nous pouvons améliorer cette représentation de l'arbre pour espérer obtenir des simulations plus fidèles à la réalité. Les deux modèles prennent en compte le feuillage de manière implicite à travers des maquettes 3D plus ou moins détaillées en utilisant une enveloppe ou des voxels. Ils ont aussi besoin de caractéristiques structurelles du couvert, telles que les angles d'inclinaison des feuilles et l'indice de surface foliaire ou de densité foliaire pour connaître la quantité de feuilles présente dans la couronne. Comme évoqué, la spatialisation du feuillage dans la couronne s'effectue de manière aléatoire dans LASER/F, alors qu'avec RATP elle respecte plus ou moins la structure du feuillage suivant la dimension des voxels.

⁹ Ordre de ramification : chaque axe (racine ou tige) d'un arbre est identifié par son ordre d'apparition et sa localisation dans le système ramifié auquel il se rattache : l'axe issu de la graine (tronc, pivot) est appelé l'axe d'ordre un, ses formations latérales (branches ou racines d'exploitation) sont d'ordre deux, leurs sous-formations latérales (rameaux) sont d'ordre 3, etc. (Drénou, 1999).

Pour notre étude à l'échelle d'un arbre, nous souhaitons tirer le meilleur profit de chacun des modèles de simulation. C'est la raison pour laquelle nous allons étudier, à travers cette partie, comment reconstruire les maquettes « optimales » pour aboutir aux meilleurs résultats que l'on puisse espérer avec RATP et LASER/F. Premièrement, nous allons chercher à reproduire une maquette dite « détaillée » de l'arbre pour une utilisation dans RATP. Cette maquette sera composée d'un feuillage explicitement représenté afin de préserver la réelle spatialisation du feuillage dans la couronne lors du passage en un feuillage implicitement pris en compte dans les voxels. Pour spatialiser au mieux le feuillage dans la couronne, la reconstruction du bois de l'arbre du tronc jusqu'aux pousses sera nécessaire. Deuxièmement, nous allons étudier les méthodes alternatives plus rapides, se passant de la reconstruction du bois de l'arbre pour reproduire leur géométrie 3D, dans l'objectif de prendre en compte plusieurs arbres à l'échelle d'un quartier avec le modèle microclimatique LASER/F. La maquette obtenue intégrera la quantité de feuillage présente dans la couronne. Contrairement à la maquette détaillée, aucune information sur la spatialisation de ce feuillage ne sera nécessaire, puisque LASER/F procède lui-même à une spatialisation aléatoire. Nous qualifierons ce type de maquettes de « global ». Auparavant, une présentation des méthodes d'acquisition permettant d'obtenir les données utiles à la reconstruction 3D est réalisée.

3.1.1. Acquisition de la structure 3D d'un arbre

Plusieurs techniques sont proposées dans la littérature pour reconstruire numériquement un arbre en trois dimensions (Delagrangé & Rochon, 2011 ; Godin, 2000 ; Shlyakhter et al., 2001), mais nous nous concentrerons sur celles permettant de produire un nuage de points couvrant l'objet étudié. Le nuage de points est une donnée de base couramment employée dans la littérature pour réaliser des maquettes en trois dimensions d'objets existants divers et variés (Lachat et al., 2015 ; Macher, 2017). Compte tenu de l'échelle à laquelle nous souhaitons commencer l'étude (échelle de l'arbre), nous nous intéressons en premier lieu aux systèmes d'acquisition terrestres et statiques qui produisent des nuages de points meilleurs, du point de vue de la densité et de la précision, que ceux que l'on pourrait obtenir avec des systèmes d'acquisition mobiles ou aériens. Ainsi, nous pourrions étudier, à partir de données denses et précises, s'il est possible ou non d'extraire des maquettes 3D d'arbres.

3.1.1.1. Méthodes existantes

Dans la littérature, trois techniques sont utilisées couramment pour acquérir des nuages de points d'arbres : la digitalisation électromagnétique, la photogrammétrie et la lasergrammétrie. La première technique est basée sur la mesure de la localisation 3D d'un pointeur (digitaliseur électromagnétique) permettant de retrouver des coordonnées 3D de points spécifiques des composants de l'arbre (pousses, fruits, feuilles), comme expliqué dans Sinoquet & Rivet (1997) et Dones & Adam (2013). Cette technique est largement utilisée dans la mesure de la géométrie d'un arbre, en particulier pour l'acquisition de sa topologie (schéma de ramification) (Sellier & Fourcaud, 2005) ou pour l'estimation de la distribution spatiale des feuilles (Sonohat et al., 2006). Bien que cette technique soit adaptée pour la création de maquettes précises, l'étape d'acquisition reste manuelle et fastidieuse. Les deux autres techniques sont plus rapides, sans contact avec l'objet et requièrent moins d'interventions manuelles. A partir de photographies terrestres, un nuage de points de l'arbre peut être généré par corrélation dense d'images (Murtiyoso et al., 2017 ; Quan et al., 2006 ; Santos & Ueda, 2013). Sur ce nuage, des mesures relatives au volume, à la hauteur et au diamètre d'un arbre peuvent être effectuées (Morgenroth & Gomez, 2014). La détection de

petits arbres peut être aussi réalisées avec des photographies terrestres (Miller et al., 2015). Cette technique est facile à utiliser et constitue une alternative très peu coûteuse à la lasergrammétrie (Miller et al., 2015). L'inconvénient de la photogrammétrie est qu'un nombre trop important de prises de vues est nécessaire pour permettre la reconstruction complète d'un arbre isolé (Annexe D, page 173). Finalement, la lasergrammétrie semble la technique la plus adéquate. En effet, un scanner laser terrestre (SLT) permet une acquisition rapide et précise d'un nuage de points dense (Landes et al., 2011 ; Landes & Grussenmeyer, 2011 ; van Leeuwen & Nieuwenhuis, 2010). De plus, de nombreuses études ont montré les capacités du LiDAR (*Light Detection And Ranging*) à extraire des informations liées à la végétation (Beland et al., 2015 ; van Leeuwen & Nieuwenhuis, 2010).

La qualité du nuage de points d'un objet obtenu avec un SLT dépend de différentes sources d'erreurs : celles liées à l'objet étudié, les erreurs instrumentales, environnementales et méthodologiques (Grussenmeyer et al., 2016). Les erreurs affectant le nuage de points de l'arbre étudié sont dues à la complexité de sa géométrie (ordres de ramifications, nombre et épaisseur des branches, présence de feuilles) qui est par ailleurs variable au fil du temps, car dépendante de l'état de l'arbre suivant les saisons (feuillu, non feuillu et taillé). Le bruit présent dans le nuage de points est la conséquence de branches fines ou de feuilles, alors que les trous présents dans le nuage de points sont causés par des masques provenant de larges branches ou d'une structure de branches dense mais aussi de la présence du feuillage. La qualité du nuage de points dépend aussi de la configuration du levé et des conditions d'acquisition sur le terrain, telles que la distance entre l'arbre scanné et le SLT, le nombre de stations, le paramétrage du scannage ou encore les conditions météorologiques. Dans la plupart des études, le protocole d'acquisition mis en place sur le terrain consiste à établir plusieurs stations autour de l'arbre concerné. Plus le nombre de stations est élevé, meilleure sera la couverture de l'arbre, jusqu'à une certaine limite évidemment, déterminée par la densité foliaire au cœur de la couronne. Afin de disposer de suffisamment de points pour caractériser les branches de l'arbre, l'espacement entre chaque point mesuré doit être défini selon le diamètre des branches et la distance scanner-objet. De même, dans le cas où les feuilles cachent le bois de l'arbre, le pas de balayage du SLT (l'espacement entre les points) devra être adapté selon le détail souhaité dans la maquette. Un petit espacement est à privilégier pour acquérir de l'information au niveau des feuilles, telle que leur forme, dimension, inclinaison, etc. Ces grandeurs restent toutefois très compliquées à obtenir car le léger mouvement de feuilles fines engendre beaucoup de bruit autour de chacune d'elles dans le nuage de points. Dans le cas où seule la forme de la couronne foliaire dans sa globalité est à déterminer, un grand espacement entre les points du nuage de points, soit un nuage de points peu dense, est suffisant. Enfin, les étapes de traitements du nuage de points brut, telles que la consolidation, la segmentation et le ré-échantillonnage peuvent aussi affecter la qualité du nuage de points. Ce bilan des erreurs doit être considéré dans l'analyse de la qualité des nuages de points censés décrire la géométrie des arbres étudiés.

3.1.1.2. Protocole d'acquisition mis en place

Bien que dans cette thèse les modèles numériques de simulation vont être appliqués exclusivement sur des tilleuls argentés, tous taillés de la même manière et selon une forme spécifique, nous nous sommes tout de même penchés sur la possibilité de reconstruire différentes géométries d'arbres dans l'objectif futur de pouvoir appliquer ces modèles de simulation aux diverses espèces d'arbres présentes en ville. Pour ce faire, entre 2013 et 2017, des acquisitions topographiques ont été réalisées, sur trois zones dans Strasbourg : le jardin du

Palais Universitaire (Figure 3.1b), le boulevard de la Marne (Figure 3.1c) et le boulevard Leblois (Figure 3.1d).

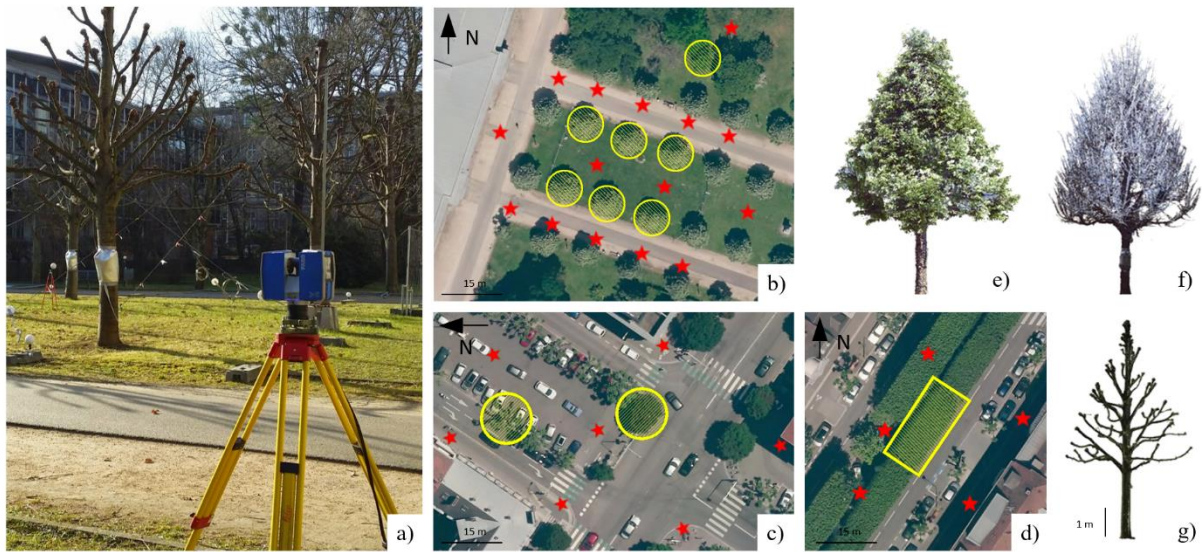


Figure 3.1 – Acquisition de nuages de points d'arbres (cercles jaunes) avec a) un scanner laser terrestre (étoiles rouges représentant les positions du SLT) sur plusieurs zones : b) jardin du Palais Universitaire ; c) boulevard Leblois et d) boulevard de la Marne. Nuages de points obtenus, après pré-traitement, pour le Georges' tree : e) feuillu ; f) non feuillu et g) taillé.

Pour chaque zone, un même protocole d'acquisition a été mis en place. Plusieurs stations au SLT sont réalisées autour de chaque arbre (étoiles rouges dans la Figure 3.1), de manière à observer chaque arbre depuis au moins quatre points de vue différents (cercles jaunes dans la Figure 3.1). L'appareil utilisé est un scanner laser à différence de phase (FARO Focus 3D X 330) qui a la particularité d'être léger, pratique d'utilisation et moins coûteux que les scanners laser à impulsions (Figure 3.1a). Un géoréférencement des scènes dans un système géodésique connu (système NTF, projection Lambert I) est réalisé grâce à la mesure de points fixes par GNSS (*Global Navigation Satellite System*) et à un lever au tachéomètre des sphères permettant la consolidation des nuages de points liant les stations entre elles. Les paramètres d'acquisition du SLT, tels que le champ de vision ($300^\circ / 360^\circ$ ou des fenêtres) ou l'enregistrement de l'information R, G, B sont choisis en fonction du nombre d'arbres dont on souhaite disposer dans la scène et de la nécessité ou non d'associer l'information radiométrique aux nuages de points. Le pas de balayage est choisi en fonction de la géométrie de l'arbre étudié et de son état dépendant de la saison. Une campagne d'acquisitions sur les trois zones présentées a été réalisée à trois moments différents, lorsque l'arbre est feuillu (Figure 3.1e), non feuillu (Figure 3.1f) et taillé (Figure 3.1g). L'objectif était d'obtenir un maximum de données permettant la reconstruction du feuillage explicite ou implicite de ce type d'arbres, mais aussi de suivre l'évolution de ceux-ci. Pour un arbre où seul le bois est présent, le pas d'acquisition va dépendre de l'épaisseur des branches. Selon les cas, un pas allant de 3 mm à 12 mm pour une distance entre le scanner et l'arbre de 10 m peut être choisi. Lorsque l'arbre est feuillu, seule l'enveloppe de la couronne foliaire ainsi que la portion de zones non feuillues dans celle-ci, dites « portion de trous visibles » sont souhaitées. Dans ce cas, le pas d'acquisition peut être amené à 12 mm à 10 m.

A la suite des mesures réalisées sur le terrain, nous obtenons pour chaque station un nuage de points brut. Dans une première étape, la consolidation de ces nuages pour obtenir un nuage unique de la scène étudiée est réalisée. Suivant les conditions, cette étape peut être effectuée en se basant sur des sphères positionnées sur le terrain ou par une consolidation nuage/nuage.

Une précision de consolidation d'environ 4 mm est atteinte dans cette étude. Ensuite, le géoréférencement du nuage de points, en vue de le rattacher à un système de projection cartographique donné, est accompli. Le nuage de points obtenu étant très dense, celui-ci est ensuite ré-échantillonné avant de procéder à une segmentation ayant pour but d'isoler chaque arbre dans le nuage de points (Figure 3.1e, f et g). Cette segmentation est nécessaire si l'on souhaite reconstruire chaque arbre individuellement. Enfin, il est essentiel d'effectuer une dernière étape de filtrage par réduction du bruit et des artéfacts présents dans le nuage de points, améliorant ainsi la qualité de celui-ci. La qualité finale du nuage de points a été étudiée en comparant le produit final à des mesures de terrain. Pour plus de détails sur cette analyse, se référer à l'Annexe E, page 175.

La qualité du nuage de points aura un impact important sur une maquette 3D détaillée de l'arbre, qui nécessite la caractérisation du tronc, de chaque branche et de chaque feuille. L'impact sera moins important sur la maquette 3D obtenue via une reconstruction globale de l'arbre, car dans ce cas seules des informations globales qui permettent de le caractériser (volume, hauteur, LAI etc.) sont exigées. Nous allons nous pencher à présent sur les méthodes employées pour aboutir à ces deux types de maquettes.

3.1.2. Reconstruction 3D détaillée d'un arbre

Dans cette partie sont présentées les méthodes existantes pour reconstruire en trois dimensions une maquette détaillée qui soit la plus fidèle possible à la réalité. Comme nous avons vu précédemment, ceci passe tout d'abord par la reconstruction de l'ensemble du bois de l'arbre, puis par la reconstruction des feuilles.

3.1.2.1. Méthodes de reconstruction du bois de l'arbre

Durant cette dernière décennie, de nombreux travaux portant sur la reconstruction des arbres de manière détaillée à partir de nuages de points ont vu le jour. Dans le cadre de projets paysagistes par exemple, les maquettes avec rendu photo-réaliste sont appréciées, bien qu'elles ne soient en général pas représentatives de la réalité. Pour d'autres applications, telles que l'étude de la croissance des plantes (Fourcaud et al., 2008), l'étude de la biomasse forestière (quantification du volume de bois et de feuilles – Calders et al., 2015) ou encore l'étude de l'impact radiatif des arbres sur l'environnement alentour (Hofierka et al., 2017), une maquette détaillée, cette fois-ci représentative de la réalité, est nécessaire.

La structure des branches (longueur, orientation et topologie) et leur géométrie (le volume des branches) sont des caractéristiques importantes à déterminer pour reconstruire de façon explicite et réaliste un feuillage. Pour obtenir de telles caractéristiques, une représentation du squelette de l'arbre est nécessaire. Un squelette est une maquette filaire, caractérisée par des lignes d'épaisseur nulle, incluses et centrées dans la forme générée par le nuage de points. L'avantage principal d'un squelette est qu'il préserve la connexion et la topologie entre les branches (Bucksch, 2011 ; Cornea et al., 2005 ; Jiang et al., 2013). Toutefois, le squelette n'est pas une représentation appropriée dans le cas où l'on souhaite estimer la biomasse de l'arbre. Ainsi, la plupart du temps, les maquettes représentent aussi le volume du bois de l'arbre.

Dans la littérature, diverses méthodes de reconstruction permettent à la fois d'extraire du nuage de points le squelette de l'arbre et son volume. Une liste non exhaustive de ces méthodes va être à présent donnée, sans pour autant analyser les capacités de ces méthodes.

Trois catégories de méthodes sont principalement utilisées pour reconstruire le squelette : par calcul de graphe et contraction du nuage de points, par voxelisation du nuage de points et par ajustement de primitives géométriques.

➤ Calcul de graphe et contraction du nuage de points

Une des premières méthodes à avoir utilisé la reconstruction de graphe pour extraire d'un nuage de points le squelette de l'objet considéré est la méthode dite DMst (*Distance Minimum spanning tree*) développée par Verroust & Lazarus (2000). L'algorithme développé permet l'extraction du squelette d'un objet à partir du calcul de quatre structures de graphes distinctes. Tout d'abord, chaque point du nuage de points est connecté à ses voisins, formant un graphe. Ce dernier est composé de plusieurs sous-graphes, lorsque les points sont éloignés de plus d'un seuil fixé. Puis, pour chaque point d'un sous-graphe, le chemin le plus court entre ce point et le point le plus proche ayant une altitude inférieure est déterminé. Cette opération est réalisée jusqu'à atteindre le point avec la plus faible altitude dans le nuage de points. Pour cela, l'approche géodésique de Dijkstra est utilisée (Jonker & Volgenant, 1987). Ensuite, une segmentation par zone est effectuée à partir des chemins les plus courts. Enfin, les nœuds du squelette sont obtenus en calculant le point central de chaque segmentation. Cao et al. (2010) utilisent ce type de méthodes, en réalisant tout d'abord une contraction du nuage de points avec une triangulation de Delaunay, qui permet d'obtenir un nuage de points d'épaisseur quasi nulle. Puis, un amincissement topologique est effectué afin d'extraire un squelette 3D. Depuis, d'autres chercheurs ont repris cette méthode en l'appliquant aux arbres (Côté et al., 2009 ; Delagrangé et al., 2014 ; Dong, 2015 ; Preuksakarn, 2012 ; Xu et al., 2007). Par exemple, la méthode proposée par Xu et al. (2007), basée sur la création d'un graphique reprenant la structure de l'arbre, permet la jonction entre les squelettes s'il y a des données manquantes dans le nuage de points. De plus, elle permet aussi la création de branches fines là où sont localisés des points restants, c'est-à-dire non utilisés, du nuage de points. Plus tard, Livny et al. (2010) ont développé une méthode qui reprend et améliore celle de Xu et al. (2007). Grâce à une optimisation globale de l'algorithme, celui-ci est plus robuste face au bruit présent dans le nuage de points. Le seuil utilisé pour la connexion entre points est maintenant défini automatiquement par rapport à la densité de points du nuage. Il y a moins de paramètres à définir en amont qu'avec l'ancienne méthode. Enfin, plusieurs arbres qui se chevauchent peuvent être modélisés en même temps, sans segmentation préalable. Preuksakarn (2012) présente une méthode plus complexe qui utilise aussi un amincissement du nuage de points. Une première étape dite de caractérisation du nuage de points est réalisée pour permettre ensuite une meilleure squelettisation. Cette caractérisation s'élabore sous forme de classification par la connexion entre points, la densité de points et l'orientation des points. Puis, l'étape de reconstruction du squelette est effectuée en commençant par la contraction du nuage de points, basée sur la méthode de Verroust & Lazarus (2000), suivie de l'extraction du squelette. Cette méthode permet aussi la génération de structures de branches artificielles à partir de points dispersés dans le nuage. Dans ces travaux, Preuksakarn (2012) a aussi réalisé un outil *open source* intéressant, nommé « PlantScan3D » permettant de reconstruire le bois d'un arbre à partir de plusieurs méthodes existantes citées précédemment. La méthode DMst a aussi été reprise dans les travaux de Delagrangé et al. (2014), avec l'outil « PypeTree » et dans les travaux de Wang et al. (2014) à travers la méthode SAGO (*Structure-Aware Global Optimization*) améliorée dans l'étude de Wang et al. (2016). Ces deux méthodes ont pour objectif de reconstruire l'arbre à partir de nuages de points incomplets. Dernièrement, Li et al. (2017) ont proposé une nouvelle méthode BFS (*Breadth First Search*) qui construit aussi un graphe de l'ensemble des points voisins, puis regroupe les points situés autour, sous forme de blocs et en extrait les nœuds du squelette de chaque bloc.

Ensuite, les nœuds sont connectés entre eux pour former le squelette qui est ensuite lissé avec la méthode de Laplace. Deux filtres sont employés dans la méthode BFS pour réduire la présence des points qui n'appartiennent ni au tronc ni aux branches et améliorer ainsi la maquette de l'arbre.

➤ **Voxelisation du nuage de points**

Une méthode différente des précédentes ayant recours au partitionnement de l'espace en une image 3D a été développée par [Gorte & Pfeiffer \(2004\)](#). Les auteurs réalisent une conversion du nuage de points d'un arbre en un espace 3D avec la création de voxels. Puis, une squelettisation est réalisée de manière à réduire l'épaisseur du tronc et des branches à un voxel. Grâce à cela, il est ensuite possible d'extraire les différentes branches et d'identifier les relations topologiques entre elles en déterminant le chemin le plus court permettant d'obtenir le squelette de l'arbre. Toujours sur le principe de voxelisation, [Bucksch et al. \(2011 ; 2010\)](#) ont développé la méthode « Skeltree ». Elle consiste à effectuer un partitionnement de l'espace en octree¹⁰. Puis, selon les octrees, le nuage de points est segmenté. Pour chaque partie, le centroïde est extrait. Enfin, les centroïdes adjacents sont connectés de manière à former le squelette « ReebGraph ».

Pour conclure sur les deux précédentes catégories de méthodes, leurs capacités semblent à peu près équivalentes. Au cours des années, les méthodes retrouvées dans chacune des catégories se sont améliorées suivant les mêmes objectifs, être moins sensibles au bruit de mesure et aux nuages de points incomplets. A travers notre recherche, nous avons constaté que pour reconstruire le bois de l'arbre, davantage d'études utilisant le calcul de graphe, ont été entreprises. Pour finir, sur ces méthodes, il est important d'indiquer qu'il est possible à partir d'un squelette de reconstruire l'épaisseur des branches et donc d'obtenir une maquette volumétrique de l'arbre. Pour ce faire, [Xu et al. \(2007\)](#), [Côté et al. \(2009\)](#), [Delagrangé et al. \(2014\)](#) et [Preuksakarn \(2012\)](#) déterminent pour chaque nœud du squelette perpendiculairement à la direction du squelette, des cercles ajustés au nuage de points. La jonction de chaque cercle par des cylindres ou des cônes permet de créer la maquette volumétrique de l'arbre. [Delagrangé et al. \(2014\)](#) réalisent un lissage des rayons des cercles pour permettre une jonction plus réaliste entre chaque segment de branche. [Wang et al. \(2014\)](#) utilisent pour chaque segment du squelette directement un ajustement de cylindres à partir du nuage de points. [Xu et al. \(2007\)](#), [Côté et al. \(2009\)](#), et [Preuksakarn \(2012\)](#) complètent leur reconstruction grâce à la relation du « PipeModel ». Cette relation théorique établit que la surface de la section avant une jonction de branches est égale à la somme des surfaces des sections de branches après la jonction ([Shinozaki et al., 1964a, 1964b](#)). [Xu et al. \(2007\)](#) et [Livny et al. \(2010\)](#) prennent en compte des considérations mécaniques liées à la structure de l'arbre. Plus une branche est supportée par d'autres branches, plus elle doit être fine ([West et al., 1999](#)).

Au travers de certaines études présentées, nous avons vu que parfois le nuage de points ne permet pas la reconstruction des volumes, notamment lorsque celui-ci est incomplet ou lorsque le squelette a été mal reconstruit et qu'il ne correspond à aucune branche du nuage de points. Dans ces cas-là, des relations allométriques peuvent être utilisées pour combler les zones non reconstruites.

¹⁰ Octree : structure de données de type arbre dans laquelle chaque nœud peut compter jusqu'à huit « enfants ». Les octrees sont le plus souvent utilisés pour partitionner l'espace tridimensionnel ([Meagher, 1982](#)).

➤ Ajustement de primitives

Plus récemment, une dernière catégorie de méthodes, basée sur l'ajustement de primitives géométriques a été utilisée. Elle permet d'extraire du nuage de points le squelette et le volume du bois de l'arbre en même temps. Rahman et al. (2015) et Akerblom et al. (2018) montrent qu'il est préférable d'utiliser l'ajustement de cylindres à celui des sphères. Bien que les branches des arbres ne soient pas rectilignes mais curvilignes et qu'une section de branche ait plutôt une forme elliptique que circulaire, ce type de maquettes rend possible une reconstruction réaliste en même temps que l'extraction de caractéristiques géométriques relatives à l'arbre étudié. La segmentation du nuage de points par branche ou par segment est, en général, nécessaire pour permettre l'ajustement de cylindres. Rahman et al. (2015) réalisent cette segmentation manuellement, alors que Pfeifer et al. (2004), Yan et al. (2009), Raunonen et al. (2013) et Hackenberg et al. (2014) utilisent un procédé automatique. La méthode de Pfeifer et al. (2004) consiste à utiliser la voxelisation du nuage de points proposée par Gorte & Pfeiffer (2004) pour le segmenter automatiquement par partie de branches rectilignes. Puis, après un calcul des normales en chaque point, un ajustement de cylindres s'effectue du pied de l'arbre jusqu'au sommet. Yan et al. (2009) quant à eux réalisent la segmentation des branches en utilisant la méthode des k-means, puis la direction de chaque branche est calculée à partir de la détermination de vecteurs propres, et un ajustement de cercles est réalisé pour permettre la reconstruction du « B-spline » à partir de cylindres. La segmentation automatique du nuage de points de Raunonen et al. (2013) est réalisée en créant tout d'abord des petites surfaces (patches) par connexion des points du nuage de points les plus proches. Puis, les relations de voisinage entre patches permettent de déterminer les connectivités. Ensuite, par le calcul de valeurs propres et de vecteurs propres, la classification des points par parties de branches est effectuée. Enfin, la reconstruction des cylindres est réalisée par parties segmentées grâce à une direction et un rayon approximatés. Cette méthode, dépendante de la dimension des patches, a été améliorée dans l'étude de Calders et al. (2015). Raunonen et al. (2015) et Disney et al. (2018) quant à eux, présentent l'efficacité de cette méthode à travers des applications sur de grands arbres en forêts. Il faut noter que Hackenberg et al. (2014, 2015) ont développé une toute nouvelle approche basée sur l'utilisation de sphères pour ajuster des cylindres. Pour commencer, une première sphère est ajustée à la base du tronc en approximant le point d'insertion. L'intersection de cette sphère avec le nuage de points va former une section qui marquera la fin du premier cylindre et le début du deuxième. Une deuxième sphère centrée sur cette nouvelle section va être créée et ainsi de suite. Les ajustements de sphères respectent le principe des moindres carrés. Cette méthode, nommée SimpleTree, est aujourd'hui largement utilisée par la communauté scientifique (Momo Takoudjou et al., 2017 ; Yurtseven et al., 2017), car elle a été validée sur de nombreux arbres à l'aide de mesures de terrain (Hackenberg et al., 2014, 2015). De plus, elle est téléchargeable sur une plateforme informatique de traitements de nuages de points 3D dans le contexte forestier (Computree, 2018) et est utilisable à travers une interface simple d'utilisation.

Au-delà des méthodes exposées précédemment, il en existe encore d'autres pour reconstruire les arbres ; certaines sont basées sur les vecteurs propres (Bremer et al., 2012), ou sur la méthode L1 median (*LI-MST*) (Mei et al., 2016), qui combine le calcul d'enveloppes convexes et de voxels (Stovall et al., 2017) ou encore certaines réalisent des reconstructions tributaires de la densité de points dans le nuage (Aiteanu & Klein, 2014). Cet état de l'art sur les méthodes de reconstruction du bois de l'arbre montre qu'il est possible de reconstruire leur structure et leur volume de bois avec des maquettes 3D volumétriques : indirectement avec la squelettisation ou directement avec l'ajustement de primitives. L'important est de créer des maquettes dites QSM (*Quantitative Structure Measurement*) composées de primitives

géométriques hiérarchisées, approximant avec précision la structure du branchage, la géométrie et le volume de l'arbre. L'évaluation de la précision de ces méthodes peut s'effectuer soit en digitalisant le nuage de points de l'arbre étudié manuellement pour reconstruire son squelette, soit par une méthode destructive pour mesurer le volume de bois. Les méthodes de reconstruction présentées peuvent fonctionner soit seulement à partir de nuage de points du bois de l'arbre (Cao et al., 2010 ; Dong, 2015 ; Preuksakarn, 2012 ; Wang et al., 2016) soit directement à partir du nuage de points de l'arbre feuillu (Côté et al., 2009 ; Li et al., 2017 ; Livny et al., 2010 ; Xu et al., 2007). Ce constat est très intéressant pour pousser la reconstruction 3D détaillée d'un arbre jusqu'à l'obtention de son feuillage en trois dimensions.

Grâce à cette première partie d'état de l'art, nous avons pu visualiser les méthodes existantes dans la littérature, développées dans l'objectif de reconstruire en 3D le bois d'un arbre. Parmi ces méthodes, nous en avons choisi trois pour mener à bien notre étude. Nous verrons dans la suite de ce mémoire, quelles méthodes ont été sélectionnées et pour quelles raisons.

3.1.2.2. Méthodes de reconstruction du feuillage explicite

Il serait intéressant de pouvoir reconstruire le feuillage de la couronne d'un arbre directement à partir du nuage de points de l'arbre feuillu acquis au SLT. Au vu de la densité de points au niveau d'un feuillage (bruit présent à cause de la finesse des feuilles) il semble inenvisageable d'extraire la maquette 3D de chaque feuille. En revanche, il est possible d'approximer la maquette du feuillage à partir du nuage de points en se basant sur la maquette au préalable du bois de l'arbre. Il est communément admis que les branches fines des arbres, que l'on appelle aussi pousses, sont le support des feuilles. De plus, pour la plupart des études présentées, l'inclinaison des feuilles se définit de manière aléatoire et leur forme est représentée par différentes géométries (losanges, pentagone, etc.).

Après avoir reconstruit le bois de l'arbre, Aiteneau et al. (2014) spatialisent aléatoirement les feuilles autour des branches fines. Pour ce faire, seul le nuage de points d'un arbre sans feuilles peut être utilisé. D'autres méthodes basées sur des nuages de points cette fois-ci d'arbres feuillus ont vu le jour pour reconstruire un feuillage explicite (Côté et al., 2009 ; Livny et al., 2010 ; Wang et al., 2014 ; Xu et al., 2007). La méthode L-system (Boudon et al., 2012), a été utilisée dans les travaux de Côté et al. (2009), Livny et al. (2010) et Preuksakarn (2012). Cette méthode utilise les points du nuage de points restant après reconstruction 3D, considérés comme des points du feuillage, comme attracteurs pour permettre la reconstruction de branches fines. C'est autour de ces nouveaux éléments que vont être localisées les feuilles. Côté et al. (2009) imposent que chaque pousse porte des feuilles. Livny et al. (2011) améliorent la reconstruction proposée par Livny et al. (2010) en utilisant des enveloppes englobant le feuillage d'une branche pour contenir la reconstruction dans un volume. Après reconstruction du bois de l'arbre, Xu et al. (2007) utilisent eux aussi les nuages de points restants pour compléter la maquette de l'arbre en reconstituant son feuillage. Pour approximer la localisation des feuilles, les points non connectés au squelette principal et n'ayant pas servi à la reconstruction, sont considérés. Ces points sont regroupés selon la taille des feuilles de l'arbre en sphères, dans lesquelles seront spatialisées les feuilles. Pour connecter les feuilles avec la structure existante du bois la plus proche, de nouvelles branches fines sont créées. Pour la détermination de la localisation des feuilles à reconstruire Wang et al. (2014) déterminent pour chaque nœud du bois de l'arbre s'il y a des feuilles à cet endroit ou non suivant un coefficient qui exprime la densité de points en fonction du rayon de la branche.

L'évaluation des méthodes de reconstruction énoncées peut s'effectuer en récupérant l'ensemble des feuilles de l'arbre étudié et en mesurant la surface foliaire totale. Cependant, cette méthode est destructive et très fastidieuse à réaliser. Il serait intéressant d'évaluer la précision des méthodes de reconstruction grâce à un modèle de transmission de la lumière à travers le couvert tel que RATP. Côté et al. (2009) mettent un point d'honneur à ce que la maquette du feuillage de l'arbre implique que le transfert radiatif à travers le feuillage de la couronne soit approximativement équivalent au transfert réel que l'on trouve à travers la couronne de l'arbre. Un partitionnement en voxels du feuillage préalablement reconstruit est réalisé, puis l'utilisation d'un modèle de transmission de lumière permet la mesure de la réflexion et de la transmission à travers la couronne. Selon la lumière disponible simulée dans la couronne, le feuillage va être modifié ou non. Xiangyu et al. (2014) utilisent aussi ce type de modèles pour contrôler leur maquette du feuillage réalisée à partir de la voxelisation du nuage de points de la couronne.

L'ensemble des méthodes introduites sont sensibles à la qualité du nuage de points de la couronne de l'arbre à modéliser. Lorsque l'on a un feuillage dense il est difficile d'obtenir une maquette du bois de l'arbre fidèle à la réalité et donc difficile de reconstruire le feuillage. Une solution pour améliorer la reconstruction du bois, qui est la base de l'ensemble des méthodes présentées, pourrait être de scinder au préalable les points du feuillage et les points du bois de l'arbre en deux entités distinctes. D'après Disney et al. (2018) deux types d'approches permettent de réaliser cette distinction, l'une exploitant les différences d'intensité du signal et de couleur dans le nuage de points (Xiangyu et al., 2014), l'autre utilisant des classifieurs (Ma et al., 2016 ; Wang et al., 2017). Sinon, une autre solution consisterait à s'affranchir de la reconstruction du bois et donc à partir du feuillage uniquement pour reconstruire le feuillage explicitement. Bailey et al. (2018) proposent une toute nouvelle méthode pour réaliser cela. Adaptative selon la densité du feuillage, elle permet de reconstruire presque toute la surface foliaire lorsque la densité du feuillage est faible, et d'extraire au moins la distribution de la surface foliaire et la distribution des angles d'inclinaisons des feuilles lorsque la densité du feuillage est très importante.

Nous retiendrons de cette deuxième partie de l'état de l'art, que de plus en plus d'études visent à reconstruire le feuillage de l'arbre en se basant directement sur le nuage de points acquis sur le terrain. Ce constat est très encourageant, puisque un jour, il sera donc peut être envisageable de reconstruire un feuillage réaliste à partir uniquement d'un nuage de points. Néanmoins, les méthodes restent encore à améliorer et à valider, notamment lors du cas d'un feuillage dense. Tester l'une de ces méthodes pour atteindre notre objectif de reconstruction détaillée sera une solution à envisager dans de futurs travaux. A présent, le processus de reconstruction mis en place au cours de cette étude pour reconstruire une maquette 3D d'arbre avec un feuillage explicite va être exposé.

3.1.2.3. Processus de reconstruction détaillée mis en place

A ce jour, l'équipe PIAF de l'INRA de Clermont Ferrand qui a développé RATP, réalise ses maquettes d'arbre à partir de mesures manuelles sur le terrain très fastidieuses à réaliser. Les chercheurs de l'INRA reconstruisent, premièrement, le bois de l'arbre par l'emploi d'un digitaliseur électromagnétique, en contact direct avec l'arbre (description dans la sous-partie 3.1.1.1, page 29). Cette reconstruction doit permettre une hiérarchisation des branches et donc la distinction des branches porteuses de feuilles ou non, la mesure de leur longueur ainsi que la représentation de leur forme dans l'espace. Ensuite, ils effectuent des mesures allométriques directement sur les arbres (longueur des pousses, nombre et surface de

feuilles par pousses, angle d'inclinaison des feuilles, etc.). Grâce à ces mesures, des relations statistiques (corrélations) sont établies, comme par exemple entre la longueur des pousses et le nombre, la superficie et l'espacement des feuilles par pousses (Sonohat et al., 2006). Une fois ces corrélations établies, il est envisageable de reconstruire un feuillage en fonction de la longueur des pousses végétatives, et de leur position dans l'espace. Plus de détails sur l'ensemble de cette démarche sont présentés dans l'Annexe F, page 177. Un processus de reconstruction basé sur les mêmes principes a aussi été utilisé dans les études de Delagrange et Rochon (2011) et Akerblom et al. (2018).

Afin de tester le modèle RATP dans la meilleure configuration possible, nous avons cherché à travers cette étude à reconstruire l'arbre de manière aussi détaillée que ce que l'équipe du PIAF est en mesure de produire. Au vu de la densité du feuillage des tilleuls argentés étudiés, utiliser les relations allométriques établies par Sonohat et al. (2006) pour la reconstruction du feuillage nous a paru la meilleure solution à l'heure actuelle. En revanche, pour la reconstruction du bois, nous avons suggéré une nouvelle solution, à savoir la technique lasergrammétrique en vue de produire un nuage de points susceptible d'aboutir à une méthode de reconstruction plus rapide et applicable plus facilement à plusieurs arbres.

➤ **Méthode développée**

Depuis 2013, nous nous sommes penchés sur la question de modélisation 3D d'arbres en vue de l'intégrer dans le modèle numérique RATP. Grâce à la collaboration de trois étudiantes en projet de fin d'études en topographie à l'INSA de Strasbourg (Bournez, 2015 ; Hayot, 2014 ; Lempereur, 2016), nous avons créé notre propre algorithme de reconstruction d'arbres, baptisé « TreeArchitecture » (Landes et al., 2014, 2015). Celui-ci est basé sur la méthode de Cao et al. (2010), qui nous a paru, en 2013, comme étant une des moins sensibles au bruit de mesure dans le processus menant au squelette de l'arbre. L'outil actuel se compose d'une chaîne de traitements dont les étapes sont : une amélioration de la squelettisation proposée par Cao et al. (2010) (plus de branches détectées, prolongement des extrémités et raccord des branches), la génération d'une maquette volumique avec l'utilisation de cylindres et enfin d'autres caractéristiques ayant pour but de simuler le feuillage à l'aide des relations statistiques (hiérarchisation des branches, longueur des branches). Nous n'entrerons pas davantage dans le détail de cet algorithme. Le lecteur pourra se référer aux travaux de Hayot (2014), Landes et al. (2014), Landes et al. (2015), Bournez (2015), Lempereur (2016) pour disposer d'informations complémentaires sur TreeArchitecture.

➤ **Echantillon d'arbres tests**

L'évaluation de notre algorithme a été réalisée en comparant les résultats qu'il produit à des maquettes « de référence », que nous présenterons plus loin. En parallèle à nos développements, des algorithmes de reconstruction ont vu le jour dans la littérature, c'est pourquoi il nous a semblé important de confronter nos résultats à ceux produits par ces deux autres algorithmes de reconstruction *open source*, que sont « SimpleTree » (Hackenberg et al., 2015) et « PlantScan3D » (Boudon et al., 2014). SimpleTree est développé en C++ ; nous avons utilisé la version disponible sur le lien <http://www.simpletree.uni-freiburg.de/> supportée par Linux Ubuntu. La version *open source* de PlantScan3D est développée en Python ; nous avons utilisé la version 6.0 (17 juin 2016). La méthode de squelettisation disponible dans PlantScan3D et utilisée dans cette étude, est celle de Xu et al. (2007), présentée précédemment dans l'état de l'art. Pour réaliser cette évaluation, six arbres d'espèces différentes ont été sélectionnés (Figure 3.2 et agrandissement en Annexe G, page 179) : un

tilleul argenté taillé (TAT), un tilleul argenté avec des pousses non feuillues (TATP), un marronnier taillé (MT), deux marronniers non taillés (M1 et M2) et un platane taillé (PT). Cet échantillon d'arbres a été choisi pour évaluer les performances de chacun des trois algorithmes pour reconstruire des arbres taillés et non-taillés, des arbres petits et grands avec de fines ou larges branches, entremêlées ou non et aussi espacées (espacement ≥ 20 cm) ou proches. Les valeurs de ces caractéristiques, présentées dans le Tableau 3.1, ont été déterminées à partir des nuages de points, grâce à des observations, des mesures manuelles et des calculs semi-automatiques du volume et de la surface de couronne projetée au sol.

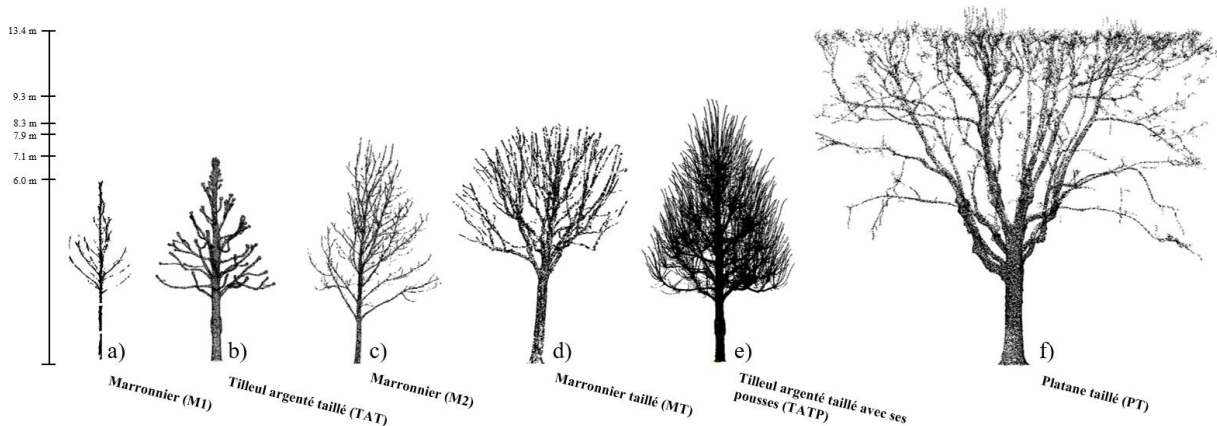


Figure 3.2 – Echantillon de nuages de points d'arbres : a) marronnier (M1 – 10 000 points) ; b) tilleul argenté taillé (TAT – 57 000 points) ; c) marronnier (M2 – 42 points) ; d) marronnier taillé (MT – 46 000 points) ; e) tilleul argenté taillé avec ses pousses (TATP – 756 000 points) et f) platane taillé (PT – 92 000 points).

Arbre	M1	TAT	M2	MT	TATP	PT
Taille de l'arbre	6,0 m	7,0 m	7,9 m	8,3 m	9,2 m	13,4 m
Taille du tronc	1,8 m	2,2 m	1,7 m	3,7 m	2,2 m	3,1 m
Forme de la couronne	◇	△	◇	○	△	□
Volume de la couronne	3,0 m ³	22,6 m ³	47,4 m ³	72,4 m ³	84,1 m ³	520,2 m ³
Surface de couronne projetée au sol	1,7 m ²	11,3 m ²	15,0 m ²	24,5 m ²	20,8 m ²	75,7 m ²
Densité de branches	Faible (23)	Faible (56)	Moyenne (296)	Moyenne (131)	Grande (≈ 975)	Moyenne (plus de 200)
Ordre des branches	1-2 (pousses)	1-2	1-2-3 (pousses)	1-2-3	1-2-3 (pousses)	1-2-3-4... (pousses)
Positionnement des branches	Espacées, pas em.*	Espacées, pas em.	Proches, peu em.	Espacées, pas em.	Proches, em.	Proches, peu em.
Diamètre des branches	1 à 5 cm	5 à 15 cm	1 à 8 cm	2 à 15 cm	1 à 15 cm	5 à 30 cm

Tableau 3.1 - Caractéristiques structurales des arbres établies à partir des nuages de points, des observations, des mesures manuelles et des calculs semi-automatiques du volume et de la surface de couronne projetée au sol (*em. = entremêlés).

L'arbre TAT est le cas standard, c'est-à-dire caractérisé par des branches espacées, non croisées et épaisses (Figure 3.2b). L'arbre M2 a aussi été choisi pour la simplicité de sa géométrie, mais il n'est pas taillé et a des branches fines (Figure 3.2c). L'arbre M1 (Figure 3.2a) est d'un point de vue géométrique aussi simple que l'arbre M2 mais il a des branches encore plus fines. L'arbre MT (Figure 3.2d) a été sélectionné pour sa géométrie plus

complexe que l'arbre précédent. Il est composé de plus de branches qui sont moins espacées avec des diamètres variables. L'arbre TATP est un cas particulier avec une forte densité de branches (Figure 3.2e). Ce cas est intéressant parce qu'il permet d'évaluer la capacité des algorithmes à modéliser des branches entremêlées et très fines. Enfin, l'arbre PT a été sélectionné pour estimer la capacité des algorithmes à reconstruire un grand arbre avec une forte variabilité de diamètres de branches et un positionnement irrégulier de celles-ci (Figure 3.2f). Concernant la qualité des nuages de points acquis par SLT sur ces arbres, il a été constaté que plus les branches sont fines et l'arbre est grand, plus la présence de trous et de bruit sur et autour des branches est importante.

Une étude quantitative et qualitative a été menée sur les maquettes générées par chacun des algorithmes sur ces six arbres. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.2 (agrandissement en Annexe G, page 179) et sont analysés dans les paragraphes suivants.

➤ **Evaluation qualitative des maquettes**

La première analyse consiste en une inspection visuelle des maquettes produites par chaque algorithme. Une superposition des trois maquettes et du nuage de points par arbre a permis de mener à bien cette évaluation. Ce processus manuel a rendu possible l'identification des forces et des faiblesses de chaque algorithme.

TreeArchitecture fournit visuellement les résultats les moins réalistes lorsque la géométrie de l'arbre n'est pas simple (ex : cas de l'arbre TATP dans le Tableau 3.2). Les branches fines (environ 2 cm) sont rarement reconstituées. Les erreurs de reconstruction se produisent dans le cas de nuages de points bruités ou d'arbres dont les branches sont en grand nombre ou encore lorsque les branches s'entremêlent. Certaines branches reconstruites ne sont pas connectées aux autres. De plus, la plupart du temps, l'épaisseur des branches semble trop importante et ce phénomène est amplifié avec des branches fines. Cependant, cet algorithme présente certains avantages : généralement, l'extrémité exacte des branches est reconstruite. De plus, les cylindres utilisés pour l'estimation du volume de bois sont liés les uns aux autres.

PlantScan3D détecte le plus de branches, dans une large gamme de diamètres (de 2 cm à 30 cm). La qualité de la maquette n'est pas affectée par la grande quantité de branches. Les croisements entre branches créent des erreurs de reconstruction, mais moins qu'avec l'algorithme précédent. Toutes les branches sont reliées les unes aux autres, mais elles sont légèrement raccourcies à leur extrémité. Concernant la qualité du nuage de points, les trous dans le nuage n'ont aucune influence sur la reconstruction, contrairement au bruit présent. En effet, une même partie de branche risque d'être squelettisée plusieurs fois. Cela se produit la plupart du temps en présence de bruit, ou de branches minces, ou de connexions avec des branches courtes. De plus, l'épaisseur du bois estimée par PlantScan3D semble plus proche de la réalité que l'épaisseur reconstruite avec TreeArchitecture, malgré quelques exagérations aux jonctions de branches. Enfin, étant le seul algorithme à utiliser des cônes comme élément de base dans la maquette, il offre une maquette lisse et réaliste. Le volume obtenu avec cet algorithme doit donc être plus proche de la réalité que celui calculé avec les autres algorithmes.

SimpleTree ne produit pas d'erreurs de reconstruction, mais omet certaines branches. Comme pour l'algorithme précédent, les branches sont toujours connectées aux autres, mais il y a aussi une sous-estimation de la longueur des branches à leur extrémité. La plupart des diamètres des branches sont détectés, mais les branches fines avec peu de points sont moins bien détectées qu'avec PlantScan3D.

		Nuage de points	TreeArchitecture	PlantScan3D	SimpleTree
M1 Marronnier	6.0 m				
TAT Tilleul argenté taillé	7.0 m				
M2 Marronnier	7.9 m				
MT Marronnier taillé	8.3 m				
TATP Tilleul argenté taillé avec ses pousses	9.2 m				
PT Platane taillé	13.4m				

Tableau 3.2 – Maquettes 3D à partir de nuage de points, produites avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree. Les figures sont agrandies dans l'Annexe G, page 179.

SimpleTree est moins sensible que les autres algorithmes aux croisements des branches. Alors que le bruit a peu d'impact sur la reconstruction, cet algorithme est très sensible aux trous. Comme nous pouvons le voir dans le cas de l'arbre MT dans le Tableau 3.2, les branches sont plus courtes que celles observées dans le nuage de points à cause des trous. Concernant l'épaisseur du bois, elle n'est pas exactement identique à celle observée sur le nuage de points, mais elle semble plus proche que celles estimées à l'aide des autres algorithmes. Cependant, en raison de quelques trous entre les cylindres, qui ne sont pas toujours liés, la longueur totale des branches et le volume doivent être légèrement sous-estimés.

Concernant la structure des données en sortie, PlantScan3D propose un graphe de structures de branches bien organisé, dans lequel les pousses sont considérées comme des branches. TreeArchitecture fournit un fichier dans lequel chaque nœud est classé par branche, mais les informations d'ordre de branchement ne sont pas produites. Enfin, avec SimpleTree, les informations de topologie ne sont pas perdues et une classification de chaque point suivant les branches ou segments composant les branches est réalisée. Cependant, avec cette classification, les branches ne sont pas classées logiquement, par exemple un squelette de branche représente un groupe de plusieurs branches, ou un squelette de branche n'est qu'une partie de la branche.

Compte tenu de l'analyse qualitative présentée, nous pouvons affirmer que les trois algorithmes de reconstruction rendent possible la reconstruction réaliste de différentes géométries complexes d'arbres, quand bien même certaines erreurs apparaissent dans les maquettes. TreeArchitecture semble fournir des maquettes dont la géométrie est moins proche du nuage de points que celles produites par PlantScan3D et SimpleTree. Ces derniers semblent fournir des maquettes équivalentes visuellement.

➤ **Evaluation quantitative des maquettes**

La deuxième analyse réalisée est l'évaluation quantitative des résultats. Cette étape exige de disposer d'une maquette 3D de référence pour chacun des arbres à l'étude. Une comparaison est réalisée entre les résultats de chaque algorithme (TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree) et les maquettes de référence. Pour ce faire, plusieurs caractéristiques chiffrables, considérées comme pertinentes pour une maquette d'arbres, sont analysées. Ces critères de comparaison sont le nombre de branches, la longueur des branches, le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (1,3 m) (DBH : *Diameter at Breast Height*) et le volume de bois.

Pour chacun de ces arbres testés, à l'exception du platane (arbre PT), des squelettes de référence ont été reconstruits. Ces squelettes de référence sont présentés dans l'Annexe G, page 179. Pour l'arbre TATP, le squelette de référence a été créé par digitalisation manuelle des pousses dans le nuage de points avec le logiciel AutoCAD (Autodesk). Les squelettes de référence des autres arbres ont été obtenus en corrigeant manuellement le résultat fourni automatiquement par l'algorithme PlantScan3D. Ces processus sont fastidieux mais indispensables pour une évaluation quantitative des critères que sont le nombre de branches, la longueur totale de branches, le DBH et le volume de bois. La valeur de référence du DBH a quant à elle été obtenue par mesures au ruban, sur le terrain, du diamètre de chacun des troncs à 1,3 m du sol. En revanche, le volume du bois est un critère pour lequel nous ne possédons pas de valeur de référence, car nous n'avons pas les moyens d'effectuer la mesure de terrain d'une telle grandeur.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4.

	Nombre de branches détectées						Longueur totale de branches (m)			
	Réf.	TreeArchitecture -B-	TreeArchitecture -VP-	PlantScan3D -B-	PlantScan3D -VP-	SimpleTree -VP-	Réf.	TreeArchitecture	PlantScan3D	SimpleTree
Moyenne des ratios	/	/	50 %	/	65 %	46 %	/	57 %	95 %	63 %
Arbre M1	23	13 (57 %)	12 (52 %)	88 (383 %)	20 (87 %)	13 (57 %)	28,1	11,8 (42 %)	33,7 (121 %)	15,1 (54 %)
Arbre TAT	56	52 (93 %)	52 (93 %)	60 (107 %)	52 (93 %)	52 (93 %)	68,1	52,8 (78 %)	61,0 (90 %)	62,9 (92 %)
Arbre M2	296	67 (23 %)	67 (23 %)	198 (67 %)	145 (49 %)	81 (27 %)	174,0	89,2 (51 %)	135,3 (78 %)	90,8 (52 %)
Arbre MT	131	110 (84 %)	108 (82 %)	202 (154 %)	124 (95 %)	70 (53 %)	231,2	178,2 (77 %)	223,5 (97 %)	112,6 (49 %)
Arbre TATP	976	325 (33 %)	/	1326 (136 %)	/	/	1026,9	401,7 (39 %)	925,5 (90 %)	697,9 (68 %)
Arbre PT	/	61	/	511	/	/	/	319,6	478,5	239,8

Tableau 3.3 – Evaluation du nombre et de la longueur totale de branches reconstruites avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree. (B = résultat brut et VP = vrais positifs). L'arbre PT ne possède pas de valeurs de référence car le squelette de référence de cet arbre était trop complexe à obtenir, étant donné la quantité trop importante de branches. Pour les mêmes raisons, les arbres TATP et PT n'ont aucune valeur de VP comptabilisée.

	DBH (cm)				Volume (m ³)		
	Réf.	TreeArchitecture	PlantScan3D	SimpleTree	TreeArchitecture	PlantScan3D	SimpleTree
Moyenne des ratios	/	84 %	95 %	89 %	/	/	/
Arbre M1	8	6 (75 %)	7 (88 %)	5 (63 %)	0,03	0,04	0,02
Arbre TAT	38	28 (74 %)	36 (95 %)	32 (84 %)	0,70	0,71	0,62
Arbre M2	16	16 (100 %)	15 (94 %)	16 (100 %)	0,32	0,61	0,25
Arbre MT	35	32 (91 %)	32 (91 %)	34 (97 %)	0,99	0,92	1,02
Arbre TATP	38	28 (74 %)	36 (95 %)	32 (84 %)	1,14	3,92	0,57
Arbre PT	61	56 (92 %)	60 (98 %)	64 (105 %)	23,02	11,29	4,19

Tableau 3.4 – Evaluation du diamètre du tronc (DBH) et du volume de bois obtenus avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree.

Les valeurs issues des reconstructions automatiques sont directement fournies par les algorithmes. Toutefois, la valeur brute (B) considérée comme le nombre de branches comptabilisé par les algorithmes ne peut être suffisante pour notre analyse. En effet, l'intérêt principal porte sur la détermination des vrais positifs (VP) parmi ces valeurs brutes, c'est-à-dire sur les branches reconstruites qui sont effectivement de véritables branches. Pour obtenir cette valeur de vrais positifs, les maquettes obtenues ont été superposées aux maquettes de références correspondantes, ce qui a rendu possible la comptabilisation des erreurs de reconstructions telles que les vrais négatifs, qui représentent les branches excédantes et les faux positifs, c'est-à-dire les branches manquantes. Les valeurs brutes extraites des résultats de l'algorithme SimpleTree, ne sont pas indiquées dans le Tableau 3.3, car comme il a été précisé dans l'analyse qualitative, la classification de branches qu'il produit n'est pas comparable à celles générées par les autres algorithmes et les maquettes de référence créées.

A partir de l'analyse de chaque squelette (Tableau 3.3), on peut affirmer que l'algorithme qui reconstruit le maximum de branches est PlantScan3D (écarts moyen en pourcentage pour PlantScan3D-VP de 65 %, contre 50 % pour TreeArchitecture-VP et 46 % pour SimpleTree-VP). Cependant, une solution permettant de supprimer les erreurs de doublons de branches créées par l'algorithme (PlantScan3D-B) et constatées dans l'analyse qualitative, doit être trouvée. TreeArchitecture et SimpleTree sont à peu près équivalents pour ce qui est de la détection des branches. Comme nous l'avons vu dans l'évaluation qualitative, cette observation ne signifie pas que les maquettes sont toujours correctes. Quant aux résultats obtenus pour les estimations de longueur, PlantScan3D semble de nouveau donner les meilleurs résultats. En effet, en moyenne, il reconstruit 95 % de la longueur de branches contre 57 % pour TreeArchitecture et 63 % pour SimpleTree. Cependant, en raison des erreurs de doublons de branches qu'il cause, la longueur totale des branches est légèrement surestimée. Pour ce qui est de la volumétrie des maquettes, comme nous pouvons le voir dans le Tableau 3.4, le DBH est déterminé avec précision par tous les algorithmes (écart moyen de 84 % pour TreeArchitecture, 95 % pour PlantScan3D et 89 % pour SimpleTree). Quand bien même nous n'avons pas de valeurs de référence pour le volume de la biomasse, nous pouvons observer que TreeArchitecture et PlantScan3D fournissent systématiquement des valeurs plus élevées que SimpleTree. Dans la littérature, il est précisé que la capacité de SimpleTree à estimer le volume du bois des arbres a été évaluée avec une erreur relative de 8 % par rapport à des mesures de terrain destructives sur plusieurs arbres. De plus, cet algorithme est basé sur une règle allométrique indiquant que la section transversale avant une jonction de branche est égale à la somme des sections transversales après la jonction (Hackenberg et al., 2015). Par conséquent, nous pouvons considérer que les estimations de SimpleTree concernant le volume du bois des arbres sont fiables.

➤ Discussion

Le Tableau 3.5 présente un résumé des conclusions que l'on peut tirer de cette analyse, le vert désignant une très bonne maîtrise du critère par l'algorithme, l'orange une maîtrise correcte et le rouge une maîtrise médiocre.

Sur la base de l'ensemble des analyses effectuées précédemment, il est possible de tirer une conclusion globale sur la possibilité de modéliser la géométrie d'arbres à l'aide des algorithmes étudiés. Pour une géométrie simple, comme celle du tilleul argenté taillé (TAT), tous les algorithmes fournissent des résultats réalistes. Cependant, lorsque la géométrie devient plus complexe, la maquette devient moins précise. La reconstruction d'un arbre avec différents diamètres de branches est possible, mais plus les branches sont minces (diamètre < 5 cm), plus la reconstruction sera mauvaise, en termes de détection de branches et de

volume de branches. Ceci est dû à la différence de quantité de points sur la branche par rapport à son diamètre, c'est-à-dire environ 40 points pour un diamètre de 2 cm, 90 points pour 5 cm et 190 points pour 15 cm. Si l'on avait défini un pas de 6 mm à 10 m lors du balayage du SLT, les branches fines auraient été probablement reconstruites (cas des pousses extérieures de 1 cm de diamètre du tilleul argenté taillé - TATP, bien que les pousses au centre ne soient pas reconstruites en raison de l'enchevêtrement de celles-ci) alors qu'avec un pas de 12 mm à 10 m, ce n'est pas toujours le cas (cas des deux marronniers non taillés – M1 et M2, où les petites branches ne sont pas reconstruites). Le même phénomène est observé avec des croisements de branches. De plus, en raison de la complexité géométrique des arbres et du nombre de stations SLT enregistrées autour des arbres, la distribution des points dans le nuage de points peut ne pas être uniforme. Selon les algorithmes de reconstruction, la distribution des points aura plus ou moins d'impacts sur le squelette et sur l'estimation du volume. Enfin, quand il y a beaucoup de croisements et une grande quantité de branches (cas du tilleul argenté taillé avec des pousses - TATP), aucune des méthodes de reconstruction ne donne des résultats précis. C'est la limite commune des algorithmes de reconstruction testés. Reste à déterminer si les maquettes produites ainsi conviennent à l'utilisation de RATP.

CRITERES DE COMPARAISONS		TreeArchitecture	PlantScan3D	SimpleTree
Sensibilité des algorithmes au :	Bruit de mesure	●	●	●
	Nuage incomplet	●	●	●
Capacité des algorithmes à reconstruire :	Nombre de branches	●	●	●
	Longueur des branches	●	●	●
	Différentes épaisseurs de branches	●	●	●
	Beaucoup de branches proches	●	●	●
	Croisement de branches	●	●	●
	DBH	●	●	●
	Volume de bois	●	●	●
Ergonomie des algorithmes	Facilité d'utilisation	●	●	●
	Performance	●	●	●

Tableau 3.5 – Récapitulatifs des critères de comparaisons étudiés pour évaluer qualitativement et quantitativement les algorithmes : TreeArchitecture ; PlantScan3D et SimpleTree.

Un autre critère important à analyser est l'ergonomie des algorithmes. PlantScan3D et SimpleTree fournissent une interface utilisateur ergonomique. PlantScan3D n'a besoin que de deux paramètres en entrée, alors que les autres algorithmes nécessitent une vingtaine de paramètres. Le temps de traitement est le plus court avec PlantScan3D. Pour un processeur Intel Core I7, avec une RAM de 16 Go, il faut 5 minutes pour reconstruire un arbre de 700 000 points et quelques secondes pour 50 000 points, 10 heures et 15 minutes pour TreeArchitecture et 4 heures et 5 minutes pour SimpleTree. Il est important de noter que les développeurs de PlantScan3D et de SimpleTree améliorent continuellement leur algorithme, tandis que TreeArchitecture reste un développement sous Matlab (MathWorks), créé par des étudiants dans le cadre de projets de fin d'études successifs. Au cours de notre étude, de

nouvelles versions des autres algorithmes ont émergé. Une meilleure méthode de squelettisation (Preuksakarn, 2012) sera bientôt incluse dans l'outil *open source*, PlantScan3D. Concernant SimpleTree, une nouvelle version est apparue en 2016, ne nécessitant aucun paramètre en entrée, par ailleurs disponible sous le système d'exploitation Windows. Cette nouvelle version de SimpleTree devrait certainement résoudre les erreurs de reconstruction dues à un éventuel mauvais paramétrage de la part de l'utilisateur.

➤ **Maquettes qui seront finalement utilisées avec RATP**

L'objectif de cette étude est de reconstruire la couronne foliaire du Georges' tree (tilleul argenté non taillé) de manière à extraire l'ensemble des caractéristiques relatives au feuillage (LAD, angles d'inclinaison) nécessaires au fonctionnement du modèle RATP. De plus, nous avons cherché à reconstruire une maquette détaillée (feuillage pris en compte explicitement) qui permet de reproduire la spatialisation du feuillage fidèlement à la réalité par rapport à une maquette globale, afin de tester le potentiel de RATP dans une configuration optimale.

Suite aux travaux sur la reconstruction du bois d'un arbre, forcés de constater que notre outil TreeArchitecture ne fournit pas les meilleurs résultats, nous avons décidé de nous tourner plutôt vers l'utilisation de l'outil PlantScan3D qui semble répondre davantage à nos attentes. Globalement, il ressort des analyses effectuées, que cette méthode est celle qui détecte le plus de branches. De plus, la longueur des branches dans la maquette créée est aussi la mieux respectée. Le format d'export permet une hiérarchisation des branches efficace et de reconstruire le feuillage de l'arbre à partir des relations allométriques que nous souhaitons utiliser. Enfin, cet outil est simple d'utilisation et le temps de traitement par arbre est très rapide. Les travaux exposés dans cette sous-partie 3.1.2.3, ont fait l'objet d'un article pour la conférence 3D-ARCH de l'ISPRS (Bournez et al., 2017).

Le processus mis en place pour finalement aboutir à une maquette 3D détaillée du feuillage du tilleul argenté non taillé, adaptée à l'utilisation de RATP est illustré dans la Figure 3.3. A partir du nuage de points de l'arbre, une maquette de référence du bois a été reconstruite par digitalisation, et une autre a été obtenue automatiquement à partir de l'algorithme PlantScan3D. Puis, les fines branches potentiellement porteuses de feuilles ont été isolées en s'aidant de l'ordre de ramification obtenu à l'issue de la reconstruction de l'algorithme. En parallèle, nous avons établi des relations allométriques, relatives par exemple à la surface foliaire totale par pousse suivant leur longueur (Annexe F, page 177). Concernant les angles d'inclinaison des feuilles, nous n'avons pas étudié la possibilité de les extraire à partir du nuage de points de l'arbre, c'est pourquoi des valeurs issues d'observations visuelles sur le terrain ont été utilisées. La reconstruction du feuillage par pousse a ainsi pu être menée à partir des relations allométriques et de la maquette 3D de chacune des pousses. Finalement, en regroupant le feuillage reconstruit sur l'ensemble des pousses, nous obtenons la maquette complète du feuillage du tilleul argenté non taillé, dont nous souhaitons simuler le fonctionnement avec le modèle RATP.

La maquette de référence sera utilisée avec RATP pour permettre l'évaluation des simulations du modèle dans la meilleure des configurations que nous avons pu produire (Chapitre 4, partie 4.3). La maquette obtenue automatiquement servira dans une étude de sensibilité effectuée avec RATP (Chapitre 4, partie 4.2).

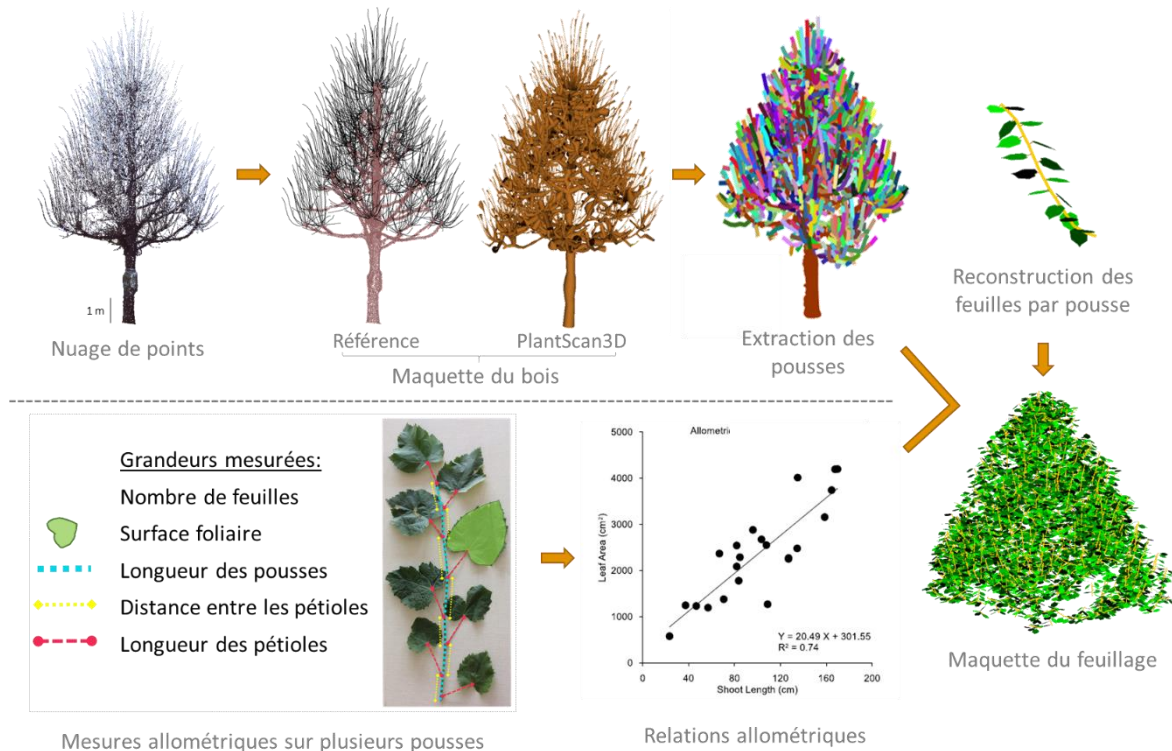


Figure 3.3 – Processus de reconstruction mis en place pour aboutir à une maquette détaillée d'un arbre adaptée à l'utilisation du modèle RATP.

Maintenant que nous avons vu comment reconstruire des maquettes d'arbres détaillées pour une utilisation dans RATP, nous allons nous pencher sur la reconstruction des arbres à travers des maquettes globales, utilisables dans LASER/F.

3.1.3. Reconstruction 3D globale d'un arbre

Dans cette partie vont être présentées les méthodes existantes pour reconstruire en trois dimensions une maquette globale d'un arbre, ainsi que la méthode mise en place au cours de cette thèse. A partir d'un nuage de points, des informations simples relatives à l'arbre étudié peuvent être extraites : la hauteur de l'arbre, la hauteur de la base de la couronne foliaire et son diamètre. Dans un premier temps, nous exposerons les méthodes d'extraction d'informations en trois dimensions, telles que le volume et la forme de la couronne foliaire, qui nous seront nécessaires pour créer la maquette. Ensuite, nous aborderons des méthodes d'extraction de caractéristiques structurales du feuillage (LAI, LAD). Enfin, le processus mis en place au cours de cette thèse pour reconstruire une maquette globale, adaptée à une utilisation dans le modèle microclimatique LASER/F, sera détaillé.

3.1.3.1. Méthode de reconstruction du volume de la couronne foliaire

On retrouve dans la littérature deux catégories de méthodes automatiques pour reconstruire le volume et la géométrie de la couronne foliaire d'un arbre à partir d'un nuage de points.

La première catégorie de méthodes est basée sur des additions de surfaces ou de volumes par le biais de tranches ou voxels. L'utilisation de tranches s'entend grâce à une segmentation du nuage de points en tranches espacées d'une même distance. Puis, la surface de chaque tranche est calculée avant de multiplier chaque surface par l'espacement entre chaque tranche.

La somme des volumes des tranches permet d'obtenir le volume de la couronne foliaire. La segmentation en tranches peut être effectuée soit verticalement (Lee & Ehsani, 2008 ; Rosell Polo et al., 2009) soit horizontalement (Miranda-Fuentes et al., 2015 ; Xu et al., 2013). La solution la plus utilisée pour calculer les surfaces est le calcul d'une enveloppe convexe qui se rapproche le plus possible du nuage de points (Lee & Ehsani, 2008 ; Miranda-Fuentes et al., 2015 ; Xu et al., 2013). L'utilisation de cette fonction permet aussi d'extraire la géométrie de chaque tranche et ainsi de reconstruire la couronne foliaire. La méthode utilisant les voxels consiste à segmenter le nuage de points en voxels, avant de sommer le volume de chacun pour obtenir le volume de la couronne foliaire. La combinaison de tous les voxels permet une représentation globale du houppier de l'arbre. La précision du volume et de la maquette obtenus avec cette catégorie de méthodes dépend principalement de l'espacement entre les tranches pour la première méthode, ou de la dimension des voxels pour la deuxième méthode.

La seconde catégorie de méthodes utilise la totalité du nuage de points pour reconstruire directement une enveloppe convexe en trois dimensions de la couronne foliaire (Auat Cheein et al., 2015 ; Hackenberg et al., 2014 ; Rahman et al., 2015). Une enveloppe convexe est un maillage qui représente le plus petit ensemble convexe contenant l'ensemble des points du nuage. L'avantage certain de cette méthode par rapport aux autres est la simplicité des traitements, n'ayant pas besoin d'effectuer de segmentations au préalable, mise à part une segmentation du tronc. En revanche, cette méthode surestime le volume de la couronne en prenant en compte des volumes vides de feuilles, ce qui est également le cas pour la première catégorie de méthodes. Cette surestimation de volume peut être diminuée par le calcul d'enveloppe concave à la place d'enveloppe convexe. Plusieurs méthodes permettent de déterminer une enveloppe concave : Zhu et al. (2008) calculent un « Alpha Shape » alors que Owers et al. (2018) utilisent la méthode de « Poisson ».

Cette catégorie de méthodes est plus directe que la première catégorie de méthodes. Cependant, suivant la complexité de l'enveloppe reconstruite, le nombre de faces constituant l'enveloppe d'un arbre va varier. Lorsque le nombre de faces est trop important, notamment avec une enveloppe concave, le temps de calcul nécessaire au modèle microclimatique LASER/F pour simuler le fonctionnement d'un arbre va considérablement augmenter. Nous allons nous intéresser maintenant, à l'association d'informations, avec la maquette 3D de la couronne foliaire, relatives au feuillage

3.1.3.2. Méthodes d'extraction d'informations relatives au feuillage

La connaissance de la géométrie de l'enveloppe de la couronne foliaire n'est pas suffisante pour simuler l'évapotranspiration ou l'ombre portée d'un arbre avec des modèles numériques de simulation. Des caractéristiques structurelles relatives au feuillage (LAI, LAD, angles d'inclinaison) sont nécessaires pour pouvoir déterminer l'atténuation du rayonnement au sein de la couronne ou encore l'intensité de l'ombre portée au sol (Da Silva et al., 2012 ; Green, 1993 ; Sinoquet et al., 2001 ; Y. P. Wang & Jarvis, 1990).

L'indice de surface foliaire (LAI) et la densité foliaire (LAD) d'arbres isolés sont des variables clés, pouvant indépendamment être utilisées pour modéliser différents processus physiques qui lient la végétation au climat, tels que la photosynthèse et l'évapotranspiration générées par un couvert (Bréda, 2003 ; Caldwell et al., 1986 ; Sinoquet et al., 2007). Le LAI est défini par Watson (1947) comme la moitié de la surface foliaire totale par unité de surface au sol ($LAI = TLA/PLA$, avec TLA (*Total Leaf Area*) la surface foliaire totale de l'arbre et PLA (*Projected Leaf Area*) la surface foliaire projetée, alors que la LAD est la moitié de la surface foliaire totale contenue dans le volume de la couronne foliaire ($LAD = TLA/Volume$

de la couronne) (Jupp et al., 2009 ; Li et al., 1995). Ces deux caractéristiques sont assez similaires, à la différence près que l'on doit déterminer soit la surface (2D) de la couronne projetée au sol, soit le volume (3D) de la couronne. Dans les deux cas, nous sommes capables avec plus ou moins de précision de déterminer ces deux caractéristiques à partir du nuage de points d'un arbre. Pour la détermination de la PLA, la projection au sol du nuage de points de l'arbre feuillu permettrait d'obtenir une valeur de PLA qui se rapproche de la référence suivant si le nuage de points est complet ou non. D'une autre manière, la projection de l'enveloppe 3D de la couronne reconstruite (PEA : *Projected Envelope Area*), serait aussi une solution pour extraire une valeur de PLA propre à la maquette 3D globale de l'arbre. Néanmoins, la difficulté commune au calcul du LAI ou de la LAD est la détermination de la TLA contenue dans la couronne.

L'extraction de la TLA a beaucoup été étudiée pour les milieux forestiers ou la canopée est continue. Mais de plus en plus d'études cherchent à obtenir le LAI pour des arbres isolés, plus communs en zones urbaines que les forêts. Jonckheere et al. (2004) et Weiss et al. (2004) présentent un résumé des méthodes qui sont apparues pour extraire la TLA. Ces méthodes de mesure peuvent être classées en méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes, telles que la récolte des feuilles ou la mesure allométrique (Annexe F, page 177), par lesquelles est mesurée la surface de chaque feuille, peuvent être utilisées pour mesurer un arbre individuel et sont considérées comme plus précises que les méthodes indirectes (Colaizzi et al., 2017). Cependant, les méthodes directes sont destructives et demandent beaucoup de temps. Les méthodes indirectes, dans lesquelles la surface foliaire est déduite des mesures d'autres variables, telles que la portion de trous dans la couronne ou la transmission de la lumière à travers la couronne, sont efficaces, non destructives et automatisables; ainsi, ces méthodes sont largement utilisées (Ryu et al., 2010). Les méthodes indirectes terrestres, utilisent la photographie hémisphérique ou bien la lasergrammétrie. Danson et al. (2007) et Ramirez et al. (2013) montrent que ces deux méthodes sont équivalentes, avec en plus une information 3D dans le cas de l'emploi du laser, ce qui est un avantage pour le cas d'arbres isolés. Le scanner laser terrestre étant utilisé dans cette étude pour reconstruire l'enveloppe de la couronne foliaire (sous-partie 3.1.3.1, page 47) et le bois de l'arbre (sous-partie 3.1.2.1, page 32) nous nous intéressons uniquement aux méthodes utilisant le LiDAR pour extraire la surface foliaire totale d'un couvert.

Au cours de la dernière décennie, trois catégories de méthodes visant à fournir la surface foliaire d'un arbre individuel en utilisant un SLT ont émergé (Hu et al., 2018b) : la méthode basée sur un calcul de régression, la méthode basée sur l'emploi de voxels et la méthode basée sur la probabilité de portions de trous dans le nuage de points de la couronne. Bien que la dernière méthode semble plus efficace que les autres et plus explorée dans la communauté scientifique, ces trois catégories de méthodes présentent encore des inconvénients et doivent être encore améliorées pour une application sur des arbres isolés. A l'issue de cet état de l'art, des choix ont été effectués sur les méthodes utilisées pour reconstruire une maquette globale d'arbre. Ces choix sont présentés dans la sous-partie suivante, qui va décrire la chaîne de traitements mise en place pour atteindre cet objectif.

3.1.3.3. Processus de reconstruction globale mis en place

L'objectif de créer une maquette globale de la couronne foliaire est de pouvoir intégrer des arbres dans le modèle microclimatique LASER/F de manière à être capable de reproduire leur ombre portée et leur évapotranspiration dans leur environnement urbain (bâtiments alentours). Pour permettre ces simulations grâce à une maquette globale, l'emprise de la couronne doit

être connue ainsi que la quantité de feuilles présentes dans cette couronne. Bien que la spatialisation du feuillage dans la couronne s'avère importante, elle n'est pas étudiée dans cette partie puisque LASER/F ne peut prendre en compte qu'une spatialisation aléatoire globale. Il en est de même pour les angles d'inclinaison des feuilles. Nous allons voir dans cette partie, le processus mis en place pour reconstruire en trois dimensions une maquette globale d'un arbre (représentation de la couronne et de la quantité de feuilles) de manière à ce qu'elle soit la plus réaliste possible et utilisable dans LASER/F.

➤ Reconstruction de la forme de la couronne

Parmi les méthodes vues précédemment, nous choisissons celle qui consiste à reconstruire une enveloppe de la couronne de l'arbre (Hu et al., 2018b), car c'est la seule possibilité de représentation de l'arbre dans le modèle LASER/F. Un algorithme nommé « TreeCrown » a été développé sous Matlab pour permettre la reconstruction globale de la géométrie de la couronne foliaire (Bournez, 2015) et vient compléter TreeArchitecture. Ainsi, TreeArchitecture (sous-partie 3.1.2.3) et TreeCrown sont deux outils que l'on peut utiliser à la suite l'un de l'autre ou séparément. A partir du nuage de points de l'arbre feuillu, une segmentation basée sur un histogramme de fréquence des points suivant leur élévation (Rahman et al., 2015) est réalisée pour séparer la couronne foliaire du tronc. Ensuite, la fonction « alphaShape » de Matlab est utilisée pour reconstruire l'enveloppe convexe de la couronne foliaire. L'enveloppe convexe surestime le volume de la couronne foliaire. Par exemple, dans le cas du tilleul argenté, un écart de 20 m³ est observé entre le volume d'une enveloppe convexe et celui d'une enveloppe concave. Mais une maquette avec une enveloppe concave, qui épouse mieux la tortuosité du feuillage, est composée d'un nombre trop important de faces pour pouvoir être gérée par LASER/F. Pour pouvoir mieux approximer la répartition spatiale de la couronne foliaire d'un tilleul argenté, 40 % du volume depuis le centre de la couronne n'a pas été pris en compte (zone vide de feuilles) pour spatialiser le feuillage. Ce choix permet de reproduire la concentration des feuilles de cet arbre qui devient plus dense en s'approchant de l'enveloppe de la couronne (Chapitre 2, sous-partie 2.2.1.2). Le tronc de l'arbre est pris en compte à grande échelle puisqu'il a aussi un impact radiatif sur l'environnement. Il est représenté par un cylindre allant du sol jusqu'aux premières faces de l'enveloppe convexe, dont le diamètre est déterminé par ajustement d'un cercle à 1.3 m de hauteur. Enfin, une surface de sol plane lui est associée pour représenter la superficie comprenant les racines de l'arbre. Elle est dimensionnée suivant l'emprise de la couronne foliaire projetée perpendiculairement au sol (PEA). Ainsi, la maquette 3D globale de l'arbre intégrée dans LASER/F est un maillage composé d'une part de la couronne foliaire et du tronc et d'autre part d'une surface de sol (Figure 3.4).

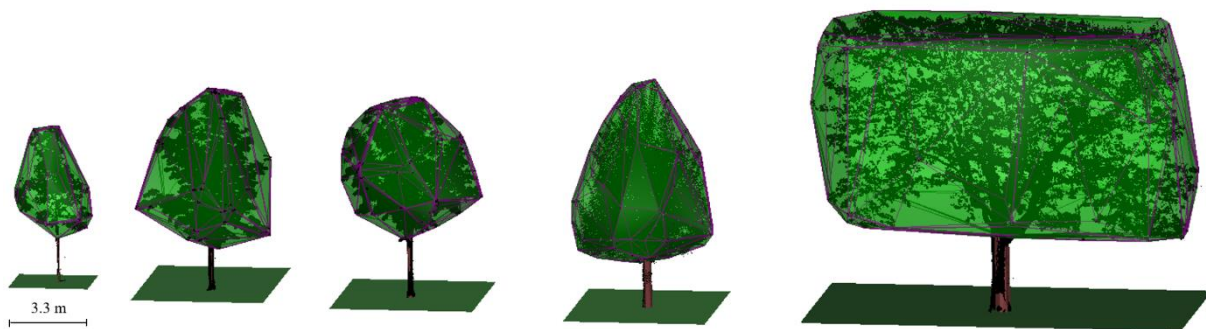


Figure 3.4 – Maquettes 3D globales (couronne, tronc et surface de sol) réalisées à partir des nuages de points d'un échantillon d'arbre feuillu (points noirs au sein des enveloppes – environ 100 000 points pour un tilleul argenté).

En plus de reconstruire la géométrie de l'arbre, TreeCrown permet l'extraction d'informations telles que le DBH et la PEA. La comparaison des valeurs extraites à des valeurs de référence a pu être effectuée pour le DBH (précision de 1 cm) mais pas pour le volume de la couronne foliaire et sa surface projetée au sol.

➤ **Extraction de caractéristiques structurelles liées au feuillage**

Pour indiquer à LASER/F la quantité de feuilles présentes dans l'enveloppe convexe de la couronne d'un arbre, la détermination du LAI est nécessaire. Le processus de reconstruction menant à une maquette détaillée, présenté dans la partie 3.1.2.3, est un moyen indirect d'obtenir cette valeur. En effet, la maquette détaillée du feuillage permet d'extraire la surface foliaire totale présente dans la couronne ainsi que la surface de feuillage projetée au sol. Cependant, cette méthode va à l'encontre de la simplicité cherchée avec la reconstruction globale d'un arbre, car elle est longue et fastidieuse à mettre en place. C'est pour cette raison que nous avons cherché à extraire directement le LAI du nuage de points sans passer par une étape de reconstruction 3D détaillée.

Cet objectif a été visé par Ronghai Hu dans le cadre de sa thèse de doctorat, effectuée dans le laboratoire ICube avec l'équipe TRIO (Hu, 2018). Son sujet a porté sur le développement d'une méthode d'extraction de la surface foliaire totale et par conséquent du LAI et de la LAD d'arbres à partir de nuages de points obtenus par lasergrammétrie terrestre et aérienne. La méthode qu'il a développée est appelée « PATH model : *Path length distribution model* » et se base sur ses précédents travaux (Hu et al., 2014). L'avantage de cette méthode, par rapport à celles présentées dans la partie 3.1.3.2, est qu'elle estime les caractéristiques structurelles en utilisant la distribution de la longueur du faisceau laser qui traverse le feuillage et la portions de trous présents dans ce feuillage avec la loi de Beer-Lambert. Pour ce faire, la reconstruction d'une enveloppe 3D convexe ou concave de la couronne foliaire est réalisée. Pour cela, la méthode de reconstruction globale décrite précédemment a été utilisée dans ses travaux. Pour plus de détails sur la méthode PATH, se référer à l'article Hu et al. (2018b).

➤ **Evaluation de la surface foliaire totale obtenue**

La collaboration qui a vu le jour entre nos deux équipes de recherche, a permis de mener à bien l'évaluation de la méthode PATH par rapport à notre méthode de reconstruction détaillée du feuillage, que nous appellerons ici « méthode allométrique ». Cette évaluation a été réalisée sur des tilleuls argentés du jardin du Palais Universitaire.

La méthode PATH et la méthode allométrique ont été tout d'abord utilisées afin de déterminer la TLA du Georges' tree. Cette détermination a été réalisée à trois périodes différentes : le 3 juillet 2013, le 27 juin 2016 et le 6 juillet 2017. La méthode PATH a été appliquée en utilisant une enveloppe convexe et une enveloppe concave. La Figure 3.5 illustre les résultats obtenus à l'issue de cette comparaison. Il ressort de cette étude que l'utilisation d'une enveloppe concave avec la méthode PATH permet de déterminer des TLA généralement concordantes avec celles obtenues avec la méthode allométrique, avec une surestimation d'environ 5 à 18 m² (3 % à 18 %). L'utilisation de l'enveloppe convexe avec la méthode PATH fournit des résultats un peu plus éloignés, avec une sous-estimation des TLA d'environ 50 à 80 m² (29 % à 43 %) par rapport aux TLA obtenues avec la méthode allométrique. Cette partie de notre étude a fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique de l'ISPRS « Journal of Photogrammetry and Remote Sensing » de Elsevier (Hu et al., 2018b).

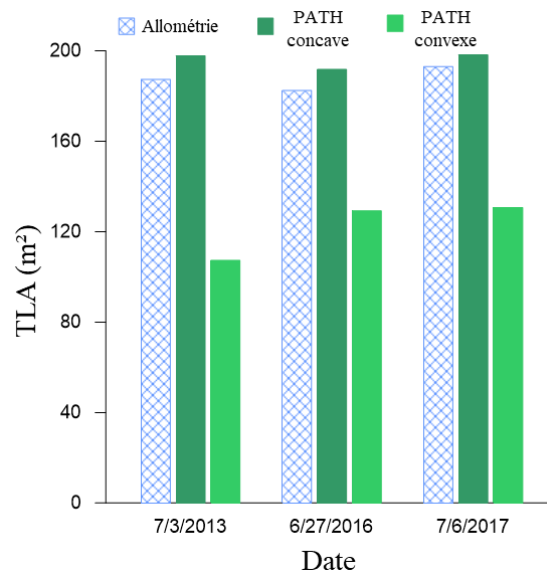


Figure 3.5 – Comparaison de la surface foliaire totale (TLA – m²) du Georges' tree à trois périodes différentes, extraite à partir du nuage de points SLT avec : la méthode allométrique (TLA obtenue à partir de la maquette détaillée d'un arbre) ; la méthode PATH avec une enveloppe concave ; et de la méthode PATH avec une enveloppe convexe.

Nous avons ensuite voulu comparer la sensibilité de nos deux méthodes d'extraction de la TLA suivant deux facteurs influant sur la qualité du nuage de points (trous, densité de points, etc.) de l'arbre utilisé en entrée par ces méthodes, qui sont :

- La densité de points du nuage.
- Le nombre de stations SLT utilisées pour acquérir le nuage de points de l'arbre.

Les résultats obtenus lors de l'analyse de l'impact de la densité du nuage de points utilisé pour extraire la TLA, sont présentés dans la Figure 3.6.

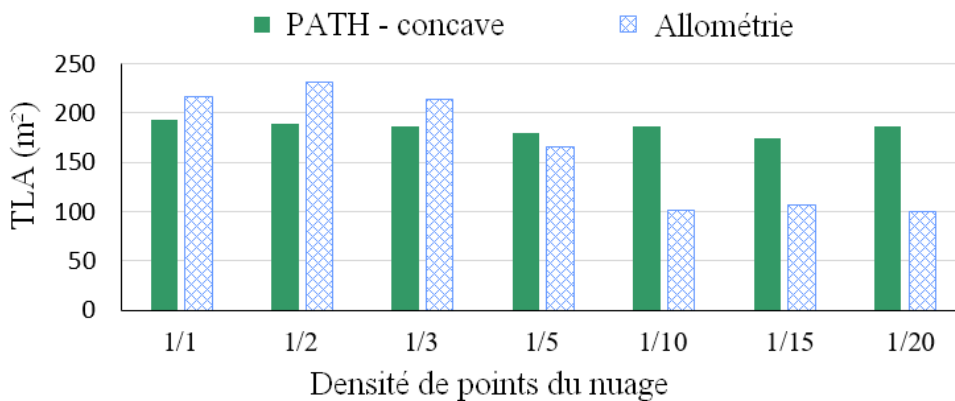


Figure 3.6 – Analyse de sensibilité de l'extraction du LAI avec la méthode PATH et la méthode allométrique, selon la densité du nuage de points utilisé pour l'extraction. (1/1) représente le nuage de points original où l'on prend en compte tous les points et (1/5) signifie que l'on a gardé 1 point tous les 5 points.

Comme le montre cette figure, la TLA obtenue avec la méthode PATH présente peu de variations lorsque la densité du nuage de points change, avec un écart-type de 5,6 m². Cependant, la TLA extraite avec la méthode allométrique varie beaucoup lorsque la densité change, avec un écart-type de 54,6 m², ce qui représente 10 fois l'écart-type obtenu avec la méthode PATH. Ainsi, la méthode PATH est moins sensible au changement de densité de

points du nuage que la méthode allométrique. La sensibilité des méthodes au nombre de stations SLT utilisées semble, quant à elle, identique quelle que soit la méthode employée. Actuellement, nous travaillons sur la rédaction d'une prochaine publication scientifique qui reprendra ces analyses de sensibilité (Hu et al., 2018a).

Ainsi, l'ensemble de ces analyses nous montre que la méthode PATH semble une solution adéquate pour extraire rapidement la TLA et par conséquent le LAI, sans passer par une reconstruction détaillée du feuillage. Un autre avantage de cette méthode est qu'elle semble pouvoir spatialiser le LAI dans la couronne suivant l'altitude. Cette possibilité pourra s'avérer utile lorsqu'il sera nécessaire de spatialiser le feuillage dans une maquette globale.

Dans l'objectif d'évaluer les capacités du modèle LASER/F à simuler le fonctionnement d'un arbre, nous avons toutefois utilisé le LAI obtenu à partir de la maquette 3D détaillée et non pas celui calculé avec la méthode PATH, car lors de la réalisation des travaux à l'échelle d'un arbre, la méthode PATH n'était pas encore au point.

3.1.4. Conclusion sur la reconstruction 3D d'arbres

Les travaux présentés dans cette partie ont permis de mettre en évidence le potentiel de la lasergrammétrie terrestre pour la création de maquettes 3D d'arbres, détaillées ou globales. Dans les deux cas, nous avons dégagé les méthodes qui nous semblent les plus adéquates en vue de leur utilisation dans les deux modèles numériques de simulation RATP et LASER/F.

La maquette détaillée d'un arbre qui sera utilisée dans RATP est obtenue semi-automatiquement. Tout d'abord, l'outil PlantScan3D, combinant une squelettisation et une reconstruction du volume du bois est employé. Ensuite, le feuillage de l'arbre est rajouté grâce à des relations allométriques permettant une reconstruction précise (Sonohat et al., 2006). Ce processus de reconstruction pourra permettre de reproduire des géométries de feuillages à la fois denses et clairsemés, mais aussi homogènes ou non. Toutefois, les arbres à feuillage non caducs seront plus difficiles à représenter à cause des branches partiellement visibles, voire nullement visibles. Au vu du temps nécessaire pour obtenir ce type de maquettes, seuls quelques arbres pourront être reconstruits en trois dimensions en même temps. Une maquette détaillée ne pourra être utilisée que pour des simulations dans lesquelles aucun objet alentour n'est considéré, car la présence de détails supplémentaires impacterait trop fortement le nombre d'échanges dans la simulation et par conséquent les temps de calculs. Toutefois, il est évident qu'une maquette détaillée permet d'obtenir des résultats plus réalistes sur le fonctionnement d'un arbre qu'une maquette globale.

La maquette globale d'un arbre attendue dans LASER/F est définie par une enveloppe convexe de la couronne foliaire, à laquelle on associe une valeur de LAI. Dans un contexte expérimental, cet indice foliaire est obtenu grâce à la maquette détaillée de l'arbre. Toutefois, nos travaux ont permis d'envisager la possibilité d'extraire ce paramètre directement à partir du nuage de points de l'arbre, avec la méthode développée récemment par Hu et al. (2018b). Le processus de reconstruction d'une maquette globale se trouvera efficace pour reconstruire un arbre avec un feuillage homogène et clairsemé, mais aussi avec les feuillages caducs. Par ailleurs, il permettra de créer des maquettes de plusieurs arbres en même temps beaucoup plus rapidement qu'avec le processus de reconstruction détaillée. Ce type de maquettes globales semble a priori adéquat pour une simulation des échanges entre plusieurs éléments de l'environnement urbain. En effet, une maquette plus détaillée de l'arbre compliquerait et ralentirait les calculs du modèle microclimatique qui prend aussi en compte les bâtiments et le sol. Il semble important de noter que lors de l'étude de très grands arbres, l'emploi du SLT

devra probablement être combiné à des acquisitions aériennes pour disposer de données sur le haut des couronnes foliaires.

3.2. Reconstruction 3D de la zone d'intérêt du jardin du Palais Universitaire

Afin de simuler le rôle que peut jouer la végétation dans la création de microclimats urbains, il s'avère nécessaire de passer de l'échelle d'un arbre à une zone de simulation plus grande, qui prend en compte l'ensemble des interactions ayant un impact sur le bilan d'énergie de toutes les surfaces présentes dans l'environnement urbain.

La surface urbaine se trouve recouverte par des bâtiments, des natures de sol différentes et du mobilier urbain. La majorité de ces éléments sont composés de surfaces minérales. Une forte variabilité de configurations et de compositions des rues et des quartiers se trouve présente en zone urbaine. Les bâtiments représentent une très grande partie de l'occupation des sols en milieu urbain. Ils sont de géométries, de tailles et d'usages variables et sont composés de différents matériaux constituant les façades (murs, fenêtres, balcons) et les toits (tuiles, cheminées). Les surfaces minérales de sols qui recouvrent l'environnement urbain représentent elles aussi une très grande partie de l'occupation du sol en ville. Ils ont des usages différents (routes, trottoirs) et sont donc composés de différents revêtements. En ville, on retrouve aussi le mobilier urbain fixe constitué de divers objets tels que les bancs, poubelles, lampadaires, etc. mais aussi des objets mobiles tels que les véhicules. Enfin, la végétation demeure présente à travers les sols enherbés, les fleurs, les arbustes, les haies, et les arbres. L'ensemble de ces éléments fait varier le bilan d'énergie des surfaces en ville et a donc un impact sur le microclimat urbain. Suivant l'échelle et le niveau de détail souhaité pour simuler le microclimat d'une zone urbaine, tous ces éléments ne seront pas forcément représentés dans la zone de simulation (Nice et al., 2018 ; Simon et al., 2018).

Pour cette étude, trois éléments sont pris en compte : les bâtiments pour lesquels nous distinguerons toit, façade et soubassement, le sol avec une distinction sol bitumineux, sol nu et sol enherbé et enfin les arbres avec leur tronc, leur couronne et leur surface associée de sol naturel. L'environnement urbain a été simplifié pour pouvoir prendre en compte de manière la plus réaliste possible plusieurs arbres dans le modèle microclimatique LASER/F. L'objectif est de réussir à simuler le microclimat au sein du parc du Jardin du Palais Universitaire à Strasbourg, en reproduisant les interactions entre la végétation et son environnement alentour. Dans cette partie, nous allons voir à partir de quelles données la maquette du parc a été reconstruite, ainsi que le processus de reconstruction mis en place.

3.2.1. Données disponibles sur l'Eurométropole de Strasbourg

3.2.1.1. Données aériennes

Jusqu'à présent dans cette thèse, uniquement des données provenant d'acquisitions terrestres ont été utilisées pour la création de maquettes d'arbres isolés. Pour permettre une reconstruction sur une zone plus large, des acquisitions mobiles terrestres ou aériennes doivent être envisagées puisqu'elles permettent d'acquérir plus rapidement de l'information et sur une plus grande superficie.

Il se trouve que le service Géomatique et Connaissance du Territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a fait réaliser des campagnes d'acquisitions par LiDAR aéroporté en 2015 (Figure 3.7) et de photographies aériennes en 2013 (Figure 3.8). Le nuage de points LiDAR est disponible en *open data* sur le site internet <http://3d.strasbourg.eu/>.

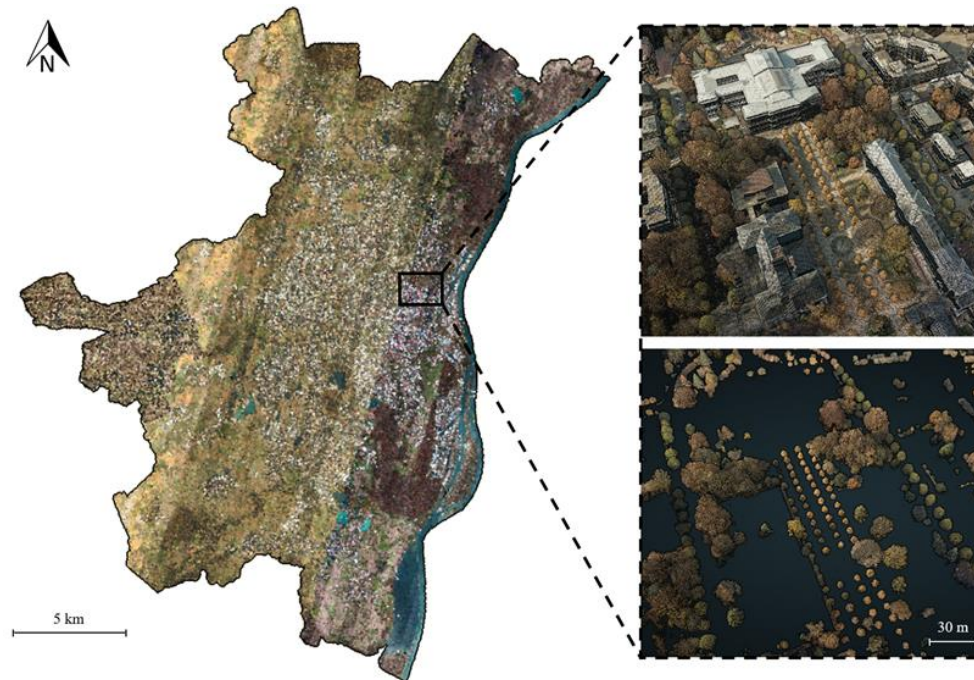


Figure 3.7 – Nuage de points acquis par LiDAR aéroporté multi-échos sur l'ensemble de l'Eurométropole en 2015 et visualisation du nuage de points classifié (haut), dans lequel la végétation a été isolée (bas).



Figure 3.8 – Photographies aériennes acquises sur la ville de Strasbourg en 2013.

Le nuage de points LiDAR provient d'une acquisition aérienne à environ 500 m de hauteur avec le capteur Riegl LMS Q680i à retour d'onde complète. Ce système permettant de mesurer plusieurs échos pour une impulsion laser est de ce fait très intéressant pour caractériser les arbres (Mallet & Bretar, 2007 ; Oshio et al., 2015). Les données transmises par le prestataire sont sous forme de nuage de points multi-échos, géoréférencé avec une précision de 10 cm en planimétrie et altimétrie. Sa densité moyenne est de 20 points / m². Il a été classifié en « Sol », « Toitures », « Végétation », « Pylônes et câbles », « Ouvrages d'art » et « Non classifié » à partir d'un traitement automatique statistique, complété par des corrections manuelles. Les photographies aériennes quant à elles ont été acquises avec la caméra DIMAC à une distance du sol de 1800 m. La résolution pixel au sol des photos est de 9 cm.

3.2.1.2. Maquettes 3D existantes des bâtiments

Sur l'ensemble du territoire français, l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) a mis à disposition une base de données topographique (BD TOPO) contenant une modélisation 3D des bâtiments sous forme vectorielle structurée en objets. Cette dernière a été réalisée par restitution photogrammétrique à partir de prises de vues aériennes. La restitution consiste à pointer manuellement des points d'intérêt dans une vue tridimensionnelle. Le livrable, de précision métrique, est composé des contours extérieurs des bâtiments auxquels on attribue une hauteur de bâtiment. Cette hauteur est prise généralement à l'altitude des gouttières. Ainsi, dans cette maquette 3D de type LOD 0 (LOD : *Level Of Detail* de la norme CityGML) on retrouve des toits plats et une hauteur des bâtiments qui permet de reconstruire les façades par extrapolation de manière à obtenir un LOD 1 (norme CityGML) (Figure 3.9). De plus, la mitoyenneté des bâtiments n'est pas prise en compte et donc plusieurs bâtiments qui sont en réalité accolés ne formeront qu'un objet unique donc un seul bâtiment.

A partir des photographies aériennes présentées dans la sous-partie 3.2.1.1, l'EMS a créé par le même procédé de restitution photogrammétrique que pour la BD TOPO, sa propre maquette 3D des bâtiments de la ville de Strasbourg. La précision de la restitution des toits est d'environ 48 cm. Ensuite, les toits ont été projetés sur un modèle numérique de terrain (MNT) de manière à obtenir les façades des bâtiments. La maquette 3D finale est disponible au format OBJ sous forme d'un maillage objet. Cette maquette 3D de type LOD 2 (norme CityGML) contenant les façades et les pentes de toit est plus détaillée que la BD TOPO (Figure 3.9). De plus, lorsque des bâtiments sont mitoyens ils sont chacun considérés comme des objets.

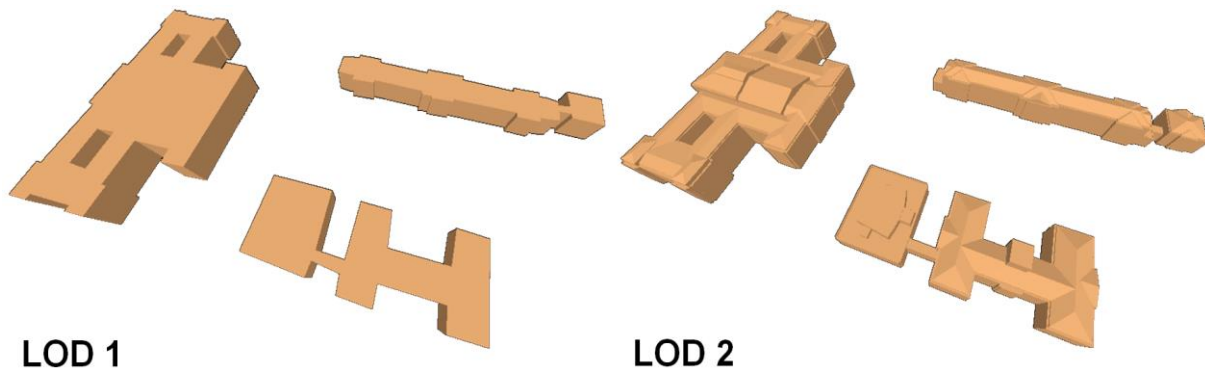


Figure 3.9 – Maquettes 3D des bâtiments de type LOD 1 avec 247 faces (BD TOPO) et de type LOD 2 avec 2344 faces (EMS3D).

3.2.2. Reconstruction de la maquette du jardin du Palais Universitaire

L'ensemble des données exposées a permis de reconstruire la maquette de la zone d'intérêt étudiée dans le jardin du Palais Universitaire. Trois couches de données ont été regroupées pour constituer cette maquette : bâtiments, sols et arbres. Le protocole mis en place pour la reconstruction de cette zone est présenté dans la Figure 3.10. Chaque étape sera détaillée dans les sous-parties suivantes.

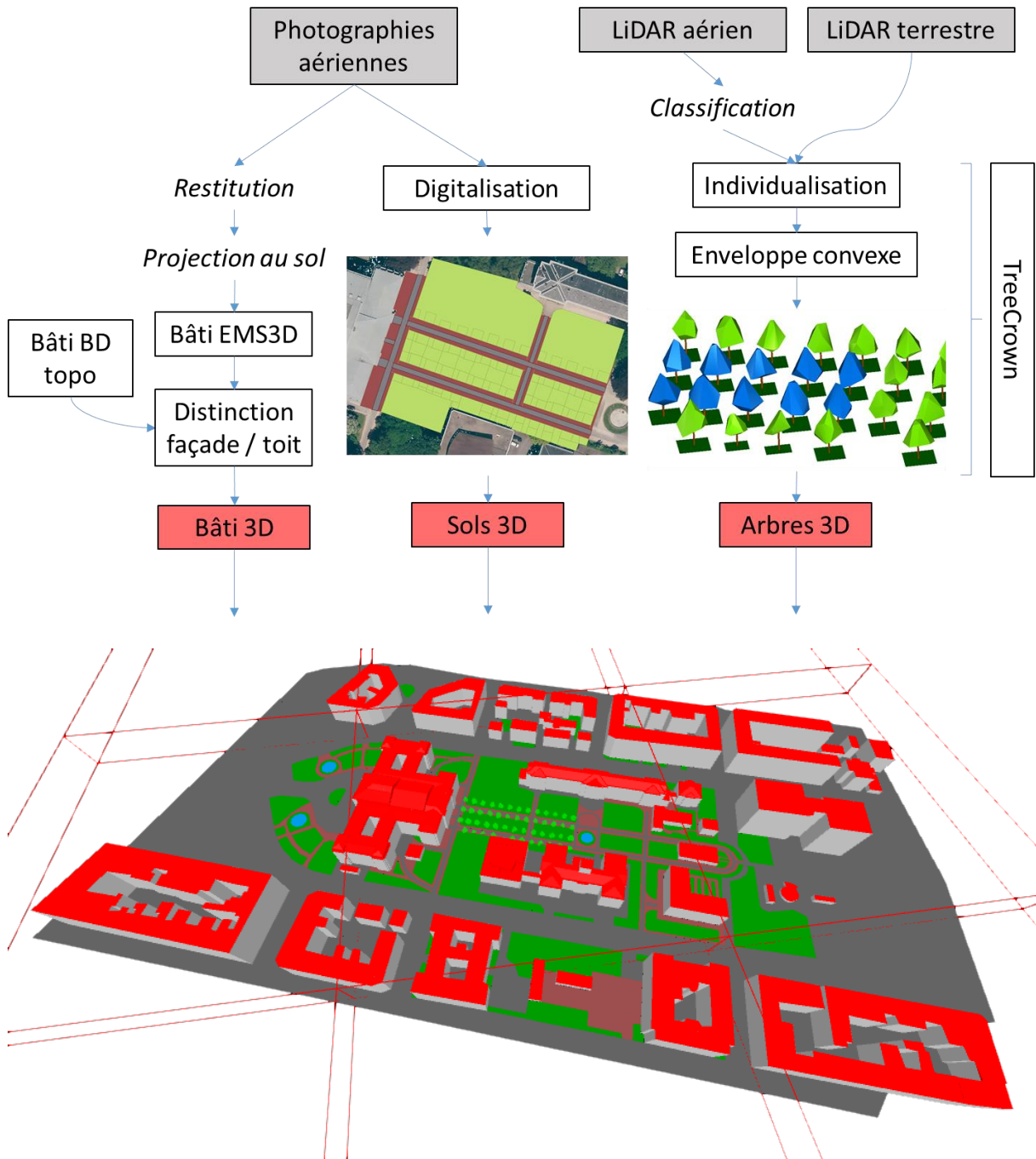


Figure 3.10 – Schéma du protocole de reconstruction 3D du quartier du jardin du Palais Universitaire : reconstruction des bâtiments, reconstruction des sols (distinction entre le bitume (gris), sol nu (marron) et le sol enherbé (vert) et reconstruction des arbres (à partir du SLT (en bleu) et à partir du LiDAR terrestre (en vert), permettant d'aboutir à la maquette 3D intégrée dans le modèle LASER/F. Cette dernière recouvre plus d'une

maille de 250 m x 250 m (délimitation rouge).

La maquette 3D a été reconstruite sur une emprise allant au-delà de la zone d'intérêt pour recréer de manière la plus réaliste possible les masques que l'on peut retrouver au niveau de la zone d'intérêt. Cette emprise permet aussi d'éloigner les frontières de la zone de simulation et donc d'éviter des erreurs dues aux conditions aux limites (création de surfaces fictives dans les zones non reconstruites) lors des simulations avec le modèle numérique LASER/F.

Il s'avère important de décrire les contraintes exigées par LASER/F pour la réalisation de la maquette 3D de la géométrie du parc à travers une liste non exhaustive avant de décrire le protocole mis en place pour l'obtenir. L'ensemble des objets présents dans la scène doit être représenté par un maillage surfacique, discrétisé en facettes. Cette discrétisation peut s'effectuer soit lors du processus de reconstruction, soit automatiquement par le modèle LASER/F. La deuxième option semble cependant préférable, car la triangulation du modèle est optimisée à l'aide de triangles isocèles pour le calcul du bilan d'énergie. On préférera donc reconstruire des faces et laisser le modèle effectuer la triangulation. Les nœuds d'une face doivent être indiqués dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. De plus, les trois premiers nœuds formant une face doivent constituer une forme convexe. Il faut éviter de créer des faces avec des trous et que les faces se recoupent. Enfin, l'ensemble des éléments présents dans la scène doit être codé dans un format particulier propre au modèle LASER/F (Annexe A, page 162).

3.2.2.1. Reconstruction des bâtiments

La zone à modéliser contient une quarantaine de blocs de bâtiments dont trois grands bâtiments isolés autour du centre d'intérêt. Une description de l'enveloppe des bâtiments sans leur structure interne est attendue par le modèle LASER/F et normalement chaque bâtiment doit être individualisé. Pour optimiser les temps de calculs, nous avons choisi de ne pas utiliser les mêmes LOD pour les différents bâtiments présents dans la zone de simulation (Figure 3.9 et Figure 3.10). En effet, plus le LOD est faible, moins il y aura de faces dans la scène et donc plus rapide sera le temps de calcul avec LASER/F. Les pentes de toit pouvant avoir de l'importance dans les simulations, les trois bâtiments autour de la zone d'intérêt sont représentés par des LOD 2 (EMS3D) alors que les autres bâtiments plus éloignés sont représentés avec des LOD 1 (BD TOPO). Ainsi, les bâtiments extérieurs ne sont pas individualisés car le LOD 1 ne le permet pas. A propos des types des faces, une distinction est faite entre les faces de toit, de façade et de soubassement. Les altitudes des sommets de chaque face sont étudiées pour réaliser ces distinctions. Les fichiers OBJ des bâtiments 3D ont été transformés au format 3DS sous Sketchup Pro pour pouvoir être intégrés à LASER/F.

3.2.2.2. Reconstruction des sols

Un MNT peut être utilisé dans LASER/F pour modéliser le sol de la zone de simulation. Une jonction parfaite doit être réalisée entre chaque surface de sol constituant le MNT et les objets alentours de manière à éviter le recouvrement de différentes faces. Dans ce cas d'étude, étant donné que la topographie de la zone d'étude est relativement plane, nous avons considéré le sol avec une altitude moyenne unique pour simplifier l'étape de reconstruction. La surface de sol peut être divisée en plusieurs objets de différents types. Ici, seul le bitume, le sol nu et le sol enherbé ont été distingués. Pour ce faire, à partir d'une photographie aérienne, une digitalisation manuelle de ces différents types de sols a été réalisée (Figure 3.10) sous le logiciel *open source* QGIS (développeurs de QGIS). L'emprise des bâtiments a été intégrée à

QGIS de manière à pouvoir assurer la jonction entre les bâtiments et le sol dans la maquette. L'export dans QGIS étant au format SHP (*shapefile*), l'intégration de la maquette 3D dans Sketchup Pro (Trimble) a permis un export en 3DS (Autodesk – *3DS Max file*) lisible par LASER/F.

3.2.2.3. Reconstruction des arbres

La maquette d'un arbre dans LASER/F doit être composée d'une couronne, d'une valeur de LAI et d'une surface de sol associée. La représentation du tronc n'est que superflue. La surface de sol ne peut être que naturelle (sol nu ou enherbé). L'arbre dans le modèle doit s'intégrer parfaitement à la zone de simulation, c'est-à-dire que la surface de sol associée ne doit pas se superposer au sol déjà existant mais doit être intégrée à celui-ci.

A l'échelle d'un quartier, on retrouve à la fois des arbres isolés mais aussi des groupements d'arbres (Figure 3.11a). La représentation de ces groupements dans la zone de simulation soulève de nombreuses questions :

- Comment représenter les couronnes entremêlées ?
- Comment représenter les superpositions de couronnes ?
- Avec quel niveau de détail représenter les groupements d'arbres : en un ensemble d'arbres individuels ou en un seul arbre ?

De plus, ce changement d'échelle a pour conséquence la prise en compte de plus de faces dans la zone de simulation, due à la présence d'autres éléments que les arbres. Il est donc important de se poser la question du niveau de détail de la représentation de l'ensemble des objets présents dans la scène, en s'attardant plus particulièrement sur les arbres qui sont composés de beaucoup plus de faces que tout autre objet dans la scène.

L'EMS nous a fourni des maquettes 3D représentant la géométrie de la couronne des arbres présents dans notre zone d'étude (Figure 3.11b). Tout comme les maquettes que nous obtenons avec l'algorithme TreeCrown, ces maquettes sont composées de maillages du tronc et de l'enveloppe de la couronne foliaire d'un arbre. En dehors du fait qu'elles soient pour certaines irréalistes, les formes des couronnes sont composées d'environ 1000 faces, ce qui est trop élevé en vue d'un import de plusieurs arbres dans LASER/F. De plus, lorsque les arbres sont très proches, au point de constituer un groupement d'arbres, les couronnes se superposent et sont individualisées. Or, dans LASER/F la superposition des couronnes entraînera des simulations fausses.

Pour toutes ces raisons, nous avons essayé d'améliorer notre algorithme TreeCrown. Les travaux d'un étudiant en Projet de Recherche Technologique à l'INSA de Strasbourg ont permis d'avancer un peu sur la problématique de reconstruction 3D d'arbres à partir de LiDAR aéroporté, sur une grande zone urbaine en représentant à la fois des arbres isolés et des groupements d'arbres. Une amélioration de l'algorithme TreeCrown a été proposée permettant de réaliser des maquettes 3D d'arbres à différentes échelles (échelle d'une rue ou d'un quartier) en adaptant leur niveau de détail (modification du nombre de faces, maquettes de groupements d'arbres). Cependant, pour l'instant, les maquettes obtenues (Figure 3.11c), ne sont pas forcément meilleures que celles de l'EMS. L'impact des différents LOD des maquettes 3D des arbres sur les simulations du modèle LASER/F devra être étudié en prenant en compte les maquettes de l'EMS et les différents LOD que nous pouvons créer avec TreeCrown. Seulement après cette étude nous pourrions entrevoir de continuer ou non l'automatisation des processus de reconstruction de TreeCrown pour espérer reconstruire les

arbres d'un quartier. Sinon, il faudra envisager d'adapter les maquettes 3D de l'EMS pour une utilisation dans LASER/F.

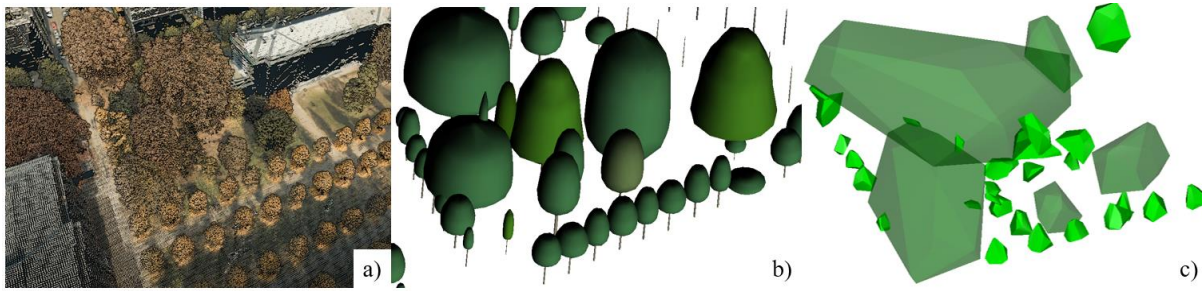


Figure 3.11 – Problématique de la reconstruction 3D de groupement d'arbres : a) nuage de points LiDAR, b) maquette 3D EMS3D et c) maquette 3D obtenue avec TreeCrown

Comme les capteurs météorologiques, qui permettront l'évaluation des simulations avec LASER/F, se trouvent entre les deux rangées centrales de tilleuls argentés (Chapitre 2, partie 2.2) seuls ces derniers arbres ont été représentés dans la maquette 3D finale. Ainsi, 49 tilleuls argentés isolés ont été reproduits en trois dimensions. Une comparaison entre les maquettes obtenues avec le nuage de points SLT et celles obtenues avec le nuage de points LiDAR aéroporté a permis de mettre en évidence la différence de densité de points entre les deux jeux de données et l'absence de points à la base de la couronne avec les données aériennes. Ainsi, tout comme pour les bâtiments, nous avons décidé de reconstruire les dix premiers arbres autour des capteurs météorologiques à partir des données terrestres pour assurer la réalité des maquettes de ces couronnes d'arbres (Figure 3.10 – arbres en bleu). Les maquettes des autres arbres sont créées à partir des données aériennes (Figure 3.10 – arbres en vert). Contrairement aux simulations sur un seul arbre, dans le cas du quartier, une simplification du nombre de faces obtenues après le calcul de chaque enveloppe convexe a dû être réalisée. Ainsi, seulement 20 faces par arbre ont été gardées. Un LAI identique pour les 49 tilleuls argentés a été imposé, puisque LASER/F fonctionne avec une unique valeur de LAI par espèce d'arbres. Cette valeur de LAI provient de la maquette du feuillage explicite du Georges' tree. La méthode de [Hu et al. \(2018a\)](#) n'étant à l'époque pas encore au point, elle n'a pas été utilisée pour déterminer ce LAI.

3.2.3. Conclusion sur la reconstruction de l'environnement urbain

Les travaux présentés dans cette partie ont tout d'abord permis de montrer qu'il est possible de reconstruire en trois dimensions des villes à partir de données lasergrammétriques et photogrammétriques aériennes. Ensuite, ces travaux ont mis en avant le potentiel de telles données pour la reconstruction d'une maquette adaptée à l'utilisation d'un modèle microclimatique, le modèle LASER/F. Le rapprochement avec l'Eurométropole de Strasbourg, qui a permis ces reconstructions, nous donne l'occasion de montrer que de telles données peuvent s'avérer utiles pour une application en climatologie urbaine, sachant que de plus en plus de grandes villes disposent de ce type d'informations.

La maquette finale reconstruite, présentée dans la Figure 3.10, est composée de trois couches de données : bâtiments, sols et arbres. La maquette des bâtiments et des différents types de sols a été principalement réalisée à partir des photographies aériennes alors que pour les arbres, l'utilisation du LiDAR aéroporté a permis de reconstruire la majorité des arbres présents dans la scène. Cette maquette s'étend sur plus d'une maille de 250 m x 250 m pour

permettre de repousser les limites des simulations de LASER/F au plus loin de la zone d'intérêt.

Rendre le processus de reconstruction de l'environnement urbain automatique n'était pas l'objectif de cette étude, mais il sera toujours possible de l'envisager par la suite. Ce constat ouvre le champ d'application au modèle LASER/F sur plusieurs quartiers, bien que pour l'instant il soit plus aisé de réaliser des maquettes sur des zones non arborées, car la problématique du niveau de détail des arbres à l'échelle d'un quartier n'a pas été abordée dans cette étude.

Enfin, uniquement l'aspect géométrique de la maquette a été étudié ici. Nous verrons dans le Chapitre 5, qu'il est aussi important d'associer à chaque objet de cette maquette des informations sur leur composition (matériaux, revêtements, etc.). L'extraction automatique de telles informations à partir de données lasergrammétriques et/ou photogrammétriques devra être envisagée dans de futurs travaux.

3.3. Conclusion du Chapitre 3

Dans ce chapitre, le protocole mis en place pour aboutir aux maquettes 3D nécessaires à l'utilisation des modèles RATP et LASER/F a été présenté. Nos reconstructions sont basées, pour la plupart, sur des nuages de points acquis par techniques terrestres ou aériennes, mais aussi sur des photographies aériennes. Elles reproduisent les objets étudiés à une date précise.

La première partie du chapitre a porté sur la reconstruction de maquettes 3D d'arbres isolés. A l'issue d'un état de l'art sur les travaux existants, deux types de maquettes ont été produites semi-automatiquement : une maquette détaillée avec un feuillage explicite pour une utilisation dans RATP et une maquette globale avec un feuillage implicite pour LASER/F. Dans les deux cas, le tilleul argenté Georges' tree a été reconstruit. La deuxième partie du chapitre a exposé le processus de reconstruction semi-automatique mis en place pour reconstruire la zone d'intérêt du jardin du Palais Universitaire ainsi que ses alentours, à travers une maquette 3D. Cette maquette représente les bâtiments, les sols et les arbres de manière globale.

Des aspects de la reconstruction 3D d'objets urbains restent à améliorer. Pour autant, nous avons répondu au premier objectif de cette thèse qui était de mettre en place une chaîne de traitements pour reconstruire des maquettes 3D d'arbre en vue de leur intégration dans les modèles microclimatiques utilisés. Nous allons ainsi pouvoir passer à la suite des travaux. Dans les chapitres suivants, l'utilisation de ces maquettes comme données en entrée aux modèles numériques de simulation RATP et LASER/F va être présentée. De même, l'impact des différents niveaux de détails des maquettes d'arbres sur les simulations sera étudié.

Chapitre 4. Simulation numérique à l'échelle d'un arbre

4.1. Paramétrage des modèles pour simuler le fonctionnement d'un arbre.....	64
4.1.1. Paramétrage des caractéristiques structurelles	64
4.1.2. Paramétrage des caractéristiques optiques	65
4.1.3. Paramétrage des caractéristiques physiologiques.....	66
4.1.4. Conclusion sur les différences de paramétrage entre RATP et LASER/F	67
4.2. Etude de la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par RATP au paramétrage	68
4.2.1. Introduction	69
4.2.2. Matériels et méthodes.....	69
4.2.2.1. Méthodes de reconstruction des LOD.....	69
4.2.2.2. Caractéristiques du feuillage de chaque LOD.....	72
4.2.2.3. Analyses statistiques	72
4.2.3. Résultats	73
4.2.3.1. Comparaison des caractéristiques du feuillage entre les LOD.....	73
4.2.3.2. Comparaison de l'évapotranspiration simulée à partir des différents LOD	76
4.2.3.3. Relation entre les différences de taux d'évapotranspiration et les différences de caractéristiques des LOD	77
4.2.4. Discussion et conclusion	79
4.3. Potentiel des modèles pour simuler le taux d'évapotranspiration d'un arbre...	82
4.3.1. Comparaison des simulations entre LASER/F et RATP.....	82
4.3.1.1. Matériels et méthodes	82
4.3.1.2. Résultats	84
4.3.1.3. Discussion	89
4.3.2. Comparaison des simulations à une mesure de flux de sève.....	91
4.3.2.1. Matériels et méthodes	91
4.3.2.2. Résultats	91
4.3.2.3. Discussion	93
4.3.3. Conclusion sur le potentiel des modèles à simuler le comportement d'un arbre	95
4.4. Conclusion du Chapitre 4	96

Un des objectifs de cette étude s'avère, à terme, d'être capable de simuler le microclimat d'une zone urbaine végétalisée à l'échelle d'une rue ou d'un quartier avec le modèle LASER/F. Avant de prendre en compte l'environnement urbain et sa diversité d'arbres en termes d'espèces, de quantité et de forme, l'étude des interactions à l'échelle d'un arbre semble tout d'abord nécessaire. Ainsi et à travers ce chapitre, nous souhaitons évaluer le potentiel du nouveau module de végétation intégré dans le modèle microclimatique LASER/F afin de simuler le fonctionnement d'un arbre, et déterminer quelles informations sont importantes à prendre en compte pour améliorer cette simulation.

La démarche entreprise consiste tout d'abord à comparer le modèle LASER/F à un modèle écophysologique, le modèle RATP, qui est dédié à ce type d'échelles. Dans un premier temps, les différences au niveau du feuillage de l'arbre (représentation spatiale, fonctionnement) pris en compte entre les deux modèles seront explicitées. Puis, la sensibilité de l'évapotranspiration simulée à ces différentes caractéristiques sera étudiée avec le modèle RATP. Cette analyse nous permettra finalement de comprendre les résultats des comparaisons des deux modèles à des mesures de terrain.

Les questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans ce chapitre sont :

- Comment paramétrer un modèle numérique à l'échelle d'un arbre ?
- Quelles informations sont strictement nécessaires pour obtenir une simulation réaliste du fonctionnement d'un arbre ?
- Quel est le potentiel du nouveau module de végétation intégré dans LASER/F par rapport au modèle écophysologique RATP ?
- Quelle est la qualité des simulations des deux modèles, à l'échelle d'un arbre urbain, par rapport à des mesures de terrain ?

4.1. Paramétrage des modèles pour simuler le fonctionnement d'un arbre

Dans ce chapitre, nous cherchons à reproduire numériquement le phénomène d'évapotranspiration d'un arbre qui a lieu en période estivale. L'arbre sur lequel ont été appliqués les modèles RATP et LASER/F est le Georges' tree, un tilleul argenté taillé, localisé dans la zone d'étude (Chapitre 2, partie 2.2). Comme il a été indiqué dans le Chapitre 2, afin de simuler le fonctionnement d'un arbre, les modèles numériques nécessitent la connaissance de trois types de caractéristiques relatives à son feuillage : structurelles, optiques et physiologiques. Dans cette partie, nous présentons comment les caractéristiques relatives au feuillage d'un tilleul argenté sont paramétrées dans les deux modèles.

4.1.1. Paramétrage des caractéristiques structurelles

Deux maquettes différentes du tilleul argenté ont été réalisées pour l'étude comparative de l'évapotranspiration simulée par les deux modèles. Une maquette détaillée et une maquette globale du feuillage ont été reconstruites, respectivement pour RATP et pour LASER/F. La description de la reconstruction de ces maquettes a été intégralement présentée dans le Chapitre 3.

Les caractéristiques structurelles des deux maquettes obtenues à l'issue de ces reconstructions sont présentées dans le Tableau 4.1.

Modèle	PLA/PEA (m ²)	Volume (m ³)	TLA (m ²)	LAI (m ² /m ²)	LAD (m ² /m ³)	Inclinaison moyenne
RATP	20,9 (PLA)	38,8	233,6	11,2	6,0	32°
LASER/F	23,7 (PEA)	60,4	265,5	11,2	4,4	60°

Tableau 4.1 – Caractéristiques structurelles de la couronne foliaire du tilleul argenté modélisée dans RATP et dans LASER/F.

La même valeur de LAI a été introduite dans les deux modèles (Chapitre 3, sous-partie 3.1.2.3), c'est-à-dire imposée dans LASER/F. Les valeurs de surface ou d'enveloppe foliaire projetée au sol (PLA – m² et PEA – m²) diffèrent de 2,8 m² entre les deux modèles, la quantité totale de surface foliaire (TLA) varie légèrement de 31,9 m², soit en moyenne de 13 %. L'écart le plus important entre les deux maquettes est le volume de la couronne foliaire et par conséquent la LAD. Le volume de LASER/F correspond au volume de la couronne entière de 101,4 m³ moins le volume vide de feuilles soustrait, qui est d'environ 40,6 m³ (40 % du volume total), soit 60,8 m³. Ainsi, le volume de feuillage pris en compte dans RATP est 36 % plus faible que celui pris en compte dans LASER/F. Cet écart résulte de la différence de spatialisation du feuillage dans les deux maquettes. En effet, l'approche par voxel utilisée dans RATP, avec des voxels d'une dimension de 20 cm, permet de spatialiser au mieux le feuillage autour des branches, alors que l'approche par enveloppe utilisée dans LASER/F surestime la répartition spatiale de la couronne foliaire. Pour les deux modèles, la répartition des angles d'inclinaison des feuilles est réalisée à partir d'une loi normale. La valeur moyenne des angles d'inclinaison est de 32° dans RATP et de 60° dans LASER/F.

L'évolution de la couronne d'un arbre est importante de début avril jusqu'à la fin de l'été en octobre, puisque les pousses porteuses des feuilles grandissent en même temps que l'apparition du feuillage. Afin de prendre en compte l'évolution de la couronne, de début juin à octobre, dans les simulations, il est nécessaire d'effectuer autant de simulations qu'il y a de phases d'évolution. Pour simplifier les simulations opérées avec les deux modèles, aucune évolution du feuillage n'a été prise en compte. Uniquement le feuillage arrivé à maturité, c'est-à-dire en fin d'été, a été reconstruit pour les deux modèles.

4.1.2. Paramétrage des caractéristiques optiques

Les caractéristiques optiques utilisées dans RATP ont été mesurées sur des pommiers dans un verger par l'INRA, alors que celles employées dans LASER/F correspondent à celles généralement observées sur les végétaux (Campbell & Norman, 2012) et sont donc identiques quelle que soit l'espèce d'arbres étudiée avec le modèle.

Le Tableau 4.2 présente les caractéristiques optiques définies pour une feuille, utilisées pour chacun des modèles : coefficients de réflexion (R.), de transmission (T.) et d'absorption (A.). Ces coefficients suivent la relation suivante : $R. + T. + A. = 1$. D'après les valeurs de ces coefficients, nous pouvons en déduire qu'une feuille dans LASER/F absorbera plus de rayonnement solaire visible (PAR et NIR) que dans RATP. Par conséquent le rayonnement visible sera plus réfléchi et transmis avec une feuille dans RATP que dans LASER/F. Pour ce qui est de l'infrarouge, il est géré quasiment de la même manière entre les deux modèles.

Modèle	PAR			NIR			IR		
	R.	T.	A.	R.	T.	A.	R.	T.	A.
RATP	0,10 (R. + T.)		0,90	0,96	0,04		0		1
LASER/F	0,05	0,15	0,80	0,25	0,55	0,20	0,03	0	0,97

Tableau 4.2 – Caractéristiques optiques d'une feuille dans les deux modèles : coefficient de réflexion (R.), de transmission (T.) et d'absorption (A.) suivant les longueurs d'onde du spectre solaire (PAR, NIR et IR).

4.1.3. Paramétrage des caractéristiques physiologiques

Pour rappel, les caractéristiques physiologiques d'un feuillage permettent de reproduire la régulation du taux d'évapotranspiration émis par celui-ci. Cette régulation est prise en compte par les modèles numériques de simulation en calculant la conductance stomatique qui dépend de fonctions de réponses aux conditions météorologiques et à l'état physiologique des feuilles.

Les caractéristiques physiologiques du feuillage employées dans LASER/F sont identiques, quelle que soit l'espèce d'arbres prise en compte dans la simulation et la régulation s'inspire des concepts publiés par [Noilhan et Mahfouf \(1996\)](#). Dans le cas de RATP, le modèle peut prendre en compte les caractéristiques propres au tilleul argenté étudié. Notre saison d'étude étant la période estivale, les mesures permettant d'obtenir les paramètres des fonctions de réponse ont été réalisées en été. Ces paramètres ont été obtenus par l'INRA de Clermont-Ferrand suite à des mesures directement réalisées sur le tilleul argenté avec un analyseur d'échanges gazeux infrarouge (LICOR-6400). Toutefois, ce type de mesures est fastidieux à réaliser. Il a donc été difficile d'obtenir toutes les données relatives à l'arbre étudié. Seule la fonction de réponse au PAR a été mesurée sur le tilleul argenté car le rayonnement est un des facteurs météorologiques qui agit le plus sur l'évapotranspiration des feuilles. Ainsi, dans RATP, la fonction de réponse au rayonnement est paramétrée par rapport au tilleul argenté considéré, en revanche toutes les autres fonctions sont paramétrées par rapport à un pommier en verger (seules données disponibles).

Les différences de conductances stomatiques (gs) entre les deux modèles, selon chaque facteur météorologique (PAR, température de l'air, CO₂, VPD et quantité d'eau dans le sol) sont présentées dans la Figure 4.1. Plus la conductance stomatique est importante, plus le taux d'évapotranspiration de l'arbre est important. D'après l'interprétation de la Figure 4.1, nous pouvons en déduire pour chaque facteur les points suivants :

- LASER/F va avoir une conductance stomatique supérieure à celle de RATP lorsque la quantité de rayonnement arrivant sur le feuillage est inférieure à 550,00 W/m². En revanche, au-delà de 550,00 W/m² de rayonnement incident, la conductance stomatique de LASER/F va devenir inférieure à celle de RATP. Le seuil sera autour de 0,8 avec LASER/F et atteindra 1 avec RATP.
- En général, la conductance stomatique est plus importante avec LASER/F qu'avec RATP, lorsque la température de l'air est comprise entre 2,5 °C et 47,5 °C. Ce phénomène est inversé lorsque les températures sont inférieures à 2,5 °C et supérieures à 47,5 °C. Au-delà d'une température de l'air de 25,0 °C, les stomates se ferment, ce qui induit une résistance stomatique dans les deux modèles.
- Pour les deux modèles, plus le déficit de pression de vapeur d'eau (VPD) augmente, plus la conductance stomatique du feuillage diminue. Cependant, pour RATP, un seuil

avec une conductance de 100 % est observé pour un VPD inférieur à 1500 Pa. La conductance calculée dans LASER/F est dans tous les cas inférieure à celle calculée dans RATP lorsque le VPD augmente.

- Pour LASER/F, la conductance est conditionnée par l'eau du sol, par conséquent, plus la réserve utile d'eau dans le sol est importante, plus la conductance stomatique sera importante, avec une augmentation exponentielle. Lorsque la réserve utile est de 1, la conductance est de 1. Dans RATP, la conductance n'est pas conditionnée par les variations d'eau dans le sol, bien que nous ayons vu qu'une solution semble permettre de pallier ce point (Chapitre 2). Ainsi, dans cette étude, le sol est constamment considéré comme gorgé d'eau par le modèle.
- Enfin, concernant la conductance stomatique à la pression partielle de CO_2 dans l'air, LASER/F la fixe à une valeur de 0,83. En effet, LASER/F prend en compte une valeur constante de CO_2 dans l'air de 40 Pa au cours des simulations. Pour RATP, en-dessous de 30 Pa de CO_2 , la conductance est maximale, alors qu'au-dessus de 30 Pa de CO_2 elle diminue exponentiellement. A partir de 40 Pa de CO_2 , la conductance stomatique à ce facteur est plus importante avec LASER/F.

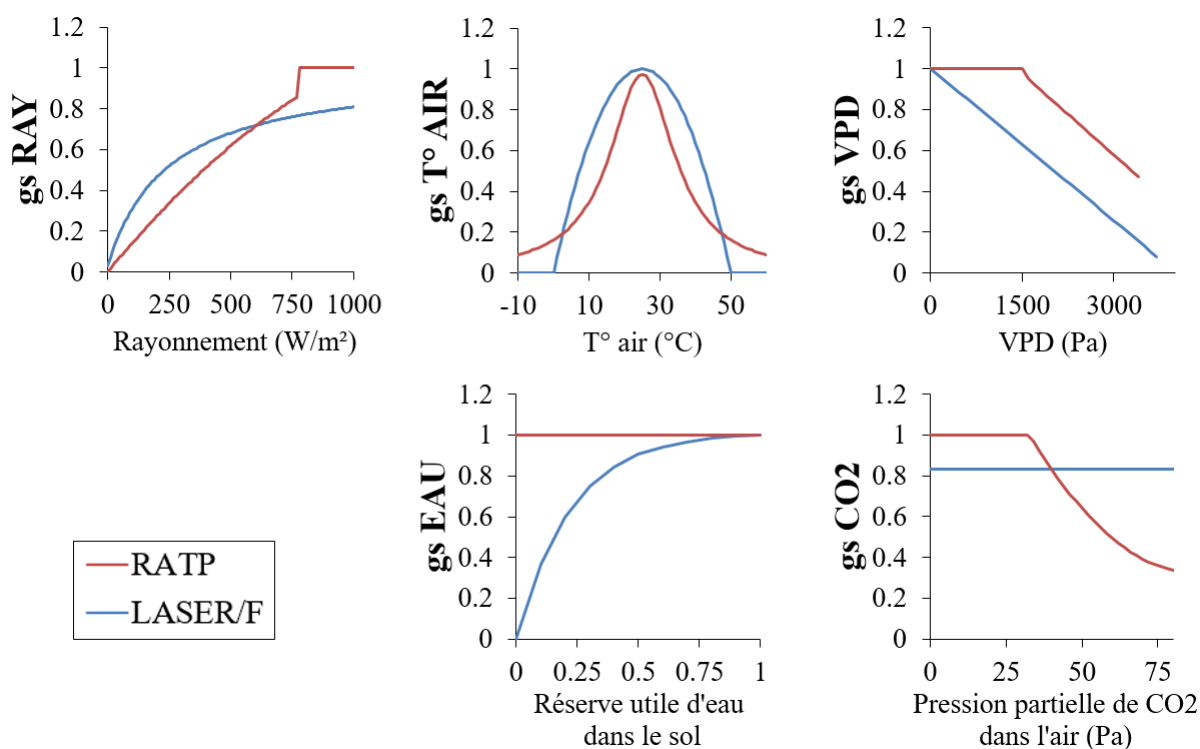


Figure 4.1 – Conductance stomatique (g_s) de chaque modèle, RATP (en rouge) et LASER/F (en bleu) en fonction de facteurs météorologiques : rayonnement (RAY - W/m^2), température de l'air ($T^\circ\text{AIR}$ - $^\circ\text{C}$), déficit de pression de vapeur d'eau (VPD - Pa), réserve utile d'eau dans le sol (EAU) et pression partielle de CO_2 dans l'air (CO_2 - Pa).

4.1.4. Conclusion sur les différences de paramétrage entre RATP et LASER/F

Nous venons de voir dans cette partie comment RATP et LASER/F ont été paramétrés au niveau de la couronne foliaire, en vue d'une application des modèles pour reproduire le fonctionnement d'un tilleul argenté. Les fichiers employés en entrée pour chacun des modèles sont présentés en Annexe A, page 162 et Annexe B, page 166. Le paramétrage a été réalisé à

partir des données disponibles pour cette étude. Les différences de paramétrage relatives aux caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques ont été mises en évidence. D'autres différences relatives à des caractéristiques du feuillage peuvent être constatées entre les deux modèles, telles qu'au niveau de la régulation aérodynamique de la vapeur d'eau dans l'air en fonction de la stabilité de l'air et de la vitesse du vent. Cependant, nous resterons sur cette liste exhaustive présentant les caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques prises en compte. Ces dernières sont considérées comme primordiales pour simuler le taux d'évapotranspiration d'un arbre. Au vu de l'ensemble des divergences que l'on peut constater entre les deux modèles, ce paramétrage hétérogène sera pris en compte lors de l'évaluation des simulations obtenues.

4.2. Etude de la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par RATP au paramétrage

La simulation du taux d'évapotranspiration d'un arbre avec un modèle numérique est un processus complexe nécessitant de nombreux paramètres, tels que les caractéristiques relatives au feuillage, présentées dans la partie précédente. Ces paramètres peuvent être mesurés ou estimés. Pour une application sur plusieurs arbres, il serait intéressant de déterminer s'il est nécessaire de mesurer l'ensemble de ces paramètres sur chacun des arbres ou bien si des estimations ou valeurs moyennes peuvent être suffisantes. De la même manière, il serait plus efficace de savoir si ces paramètres doivent être déterminés de manière très précise (comme RATP peut prendre en compte) ou non (telle que pour LASER/F). Pour cela, il est nécessaire de connaître l'impact que peuvent apporter des imprécisions de paramétrage sur les simulations. Dans des cas où les processus mis en jeu sont simples, un calcul de transmission des erreurs permet de quantifier cet impact. Etant donné la complexité des processus (mesures, reconstruction 3D et calculs) des simulations numériques, il semble fastidieux de réaliser un tel calcul. Une étude empirique de sensibilité des simulations au paramétrage des modèles est dans ce cas une alternative.

A travers l'utilisation du modèle RATP développé pour simuler le fonctionnement d'un arbre, deux études de sensibilité ont été menées. La première étude, présentée dans la suite de cette partie, consiste à analyser l'impact des variations des caractéristiques structurelles d'une maquette en faisant varier son niveau de détail (LOD : *Level of Detail*). Plusieurs LOD sont testés, allant du LOD détaillé pris en compte dans RATP au LOD global pris en compte dans LASER/F. Ces travaux ont été présentés à la conférence ISPRS (Bournez et al., 2016) et dans la revue scientifique *Urban Forestry & Urban Greening* de Elsevier (Bournez et al., 2019). La deuxième étude de sensibilité, présentée dans l'Annexe I, page 192, porte sur l'impact des variations de caractéristiques optiques et physiologiques du feuillage sur les simulations. A défaut d'avoir fait varier chaque caractéristique (Tableau 4.2 et Figure 4.1) indépendamment, une analyse plus rapide a été réalisée en évaluant l'impact de la différence de paramétrage entre RATP et LASER/F.

Plusieurs objectifs sont visés à travers ces deux études :

- Comprendre l'impact des différences de caractéristiques entre RATP et LASER/F sur la simulation du taux d'évapotranspiration d'un arbre, afin de mieux interpréter les différences de résultats obtenus entre les deux modèles.
- Identifier quelles sont les caractéristiques les plus pertinentes à mesurer pour simuler correctement le taux d'évapotranspiration d'un arbre.

- Plus précisément, concernant seulement la reconstruction 3D :
 - o Etudier quelle est la meilleure stratégie de reconstruction à adopter.
 - o Définir quelles sont les caractéristiques essentielles à déterminer pour engendrer des simulations correctes avec un modèle global de type LASER/F.

4.2.1. Introduction

La capacité des arbres à intercepter la lumière est fortement liée à leur géométrie, qui détermine la surface et l'intensité de l'ombre portée et, indirectement, leur taux d'évapotranspiration (Ross, 1981). Par conséquent, l'intégration des arbres dans des modèles numériques soulève la question du LOD minimal requis pour la reconstruction de leur géométrie. Cette géométrie doit permettre une estimation précise de l'interception de la lumière et par conséquent des processus d'ombrage et de refroidissement par évapotranspiration. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le LOD de la reconstruction des arbres et la pertinence des processus simulés.

Les travaux proposés dans cette sous-partie présentent une étude de l'impact du LOD de la maquette du feuillage d'un arbre sur la simulation de son effet rafraîchissant par évapotranspiration. La couronne du tilleul argenté étudié a été reconstruite suivant plusieurs maquettes feuillées pour différents LOD. Pour ce faire, différentes méthodes de reconstruction à partir de données SLT ont été utilisées. Le taux d'évapotranspiration obtenu pour chaque maquette d'arbre a été estimé avec le modèle RATP car il permet de prendre en compte les différences de feuillage entre les maquettes testées. La performance de chaque maquette en termes d'évapotranspiration a été comparée à l'évapotranspiration estimée à partir d'une maquette de référence. Le lien entre les différences de taux d'évapotranspiration et les caractéristiques de chaque maquette, dites essentielles pour piloter l'interception de la lumière d'un arbre individuel, a été établi. En plus de déterminer la meilleure stratégie de reconstruction à adopter, cette étude a mis en évidence les caractéristiques pertinentes à mesurer sur le terrain pour assurer une bonne estimation du taux d'évapotranspiration d'un arbre sans devoir passer par un niveau de détail de reconstruction très élevé.

Les différents processus conduisant à la simulation du taux d'évapotranspiration du tilleul argenté à partir de plusieurs LOD de maquettes de l'arbre sont exposés. Ensuite, sur la base des résultats obtenus pour chaque maquette, l'impact du LOD sur les caractéristiques relatives au feuillage des maquettes et sur l'évapotranspiration simulée est étudié. Une corrélation entre les différences de taux d'évapotranspiration et les caractéristiques du feuillage est également analysée. Enfin, une discussion sur les avantages et les inconvénients des méthodes de reconstruction d'arbres en fonction des taux d'évapotranspiration simulés est présentée.

4.2.2. Matériels et méthodes

4.2.2.1. Méthodes de reconstruction des LOD

Pour cette étude, deux reconstructions différentes de l'arbre étudié ont tout d'abord été envisagées : a) une première reconstruction où la structuration spatiale du feuillage est préservée, comme peut le prendre en compte RATP, et b) une deuxième où le houppier est approximé via une enveloppe dans laquelle le feuillage est uniformément réparti, comme utilisée par LASER/F. Cette deuxième approche sera également privilégiée lors de la simulation des taux d'évapotranspiration de plusieurs arbres simultanément. Des maquettes avec des LOD intermédiaires ont également été réalisées afin de tester l'influence de certains

paramètres sur l'évapotranspiration simulée. Pour l'ensemble des LOD, des maquettes 3D d'arbres où le feuillage est explicitement spatialisé ont été construites. Ces maquettes 3D reconstituées peuvent se classer en trois groupes selon la méthode de reconstruction utilisée (Figure 4.2). Le groupe I est composé des maquettes où la surface foliaire a été reconstruite à partir de la structure des branches. Le groupe II contient des maquettes basées sur des reconstructions d'enveloppes telles que les enveloppes 3D convexes / concaves. Le groupe III est constitué de maquettes basées sur des reconstructions de voxels. Au final, un total de 15 maquettes du même arbre avec différents LOD ont été produites.

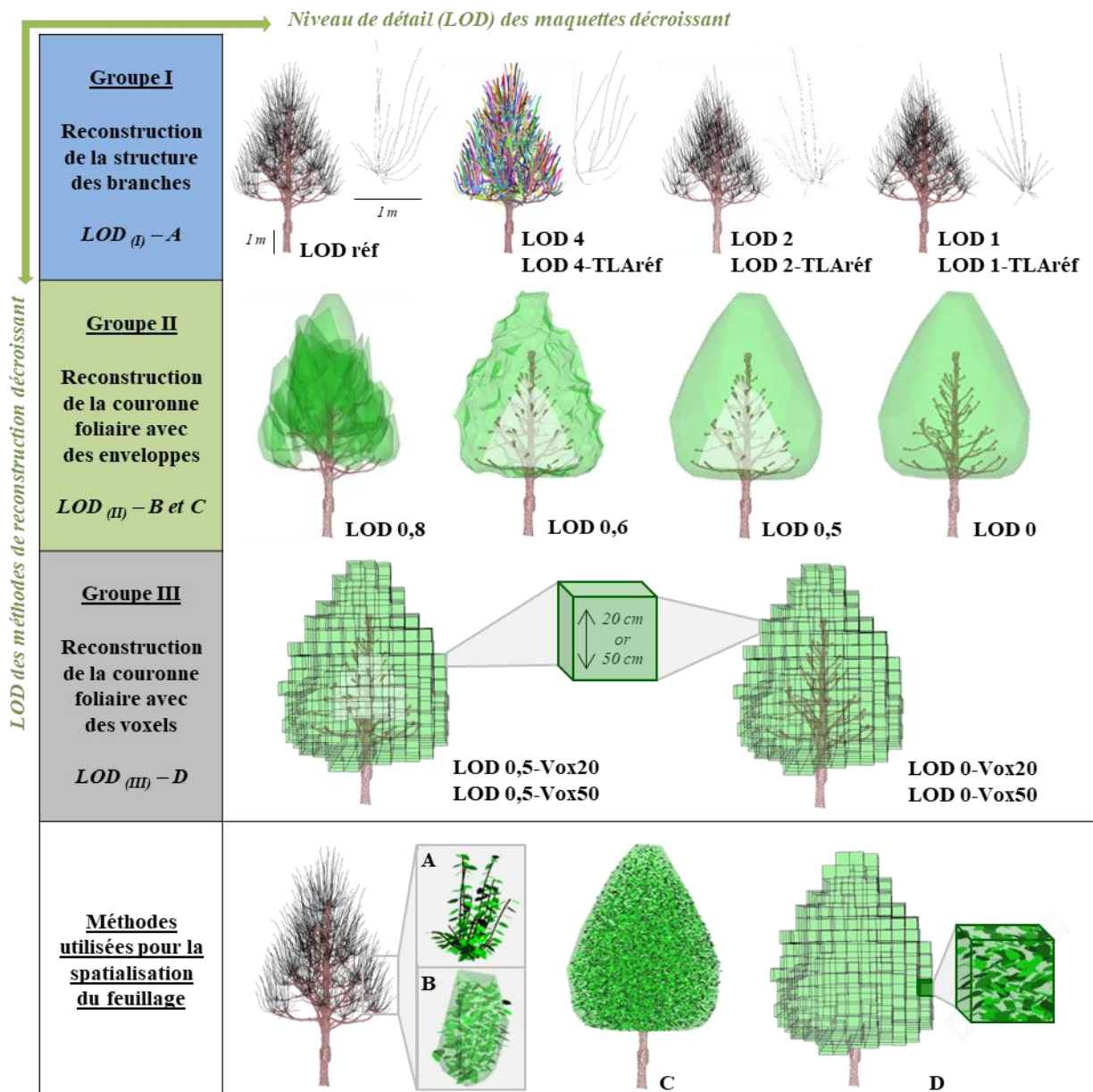


Figure 4.2 – Maquettes produites selon trois groupes de méthodes de reconstruction basées sur la reconstruction : de la structure des branches (groupe I), d'enveloppes (groupe II) et de voxels (groupe III). Description de la méthode de spatialisation du feuillage : à partir de relations allométriques autour des pousses (A), uniforme par tête de chat (B) et par enveloppe de la couronne (C).

Le premier groupe contient les maquettes les plus détaillées et proches de la réalité, puisque ces dernières sont issues d'une première étape de reconstruction de la structure des branches, puis une deuxième étape de reconstruction des feuilles autour des pousses végétales de

l'arbre. Les méthodes mises en œuvre suivent le principe de reconstruction détaillée présenté dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.2.3, à savoir, pour mémoire : une squelettisation des branches à partir d'un nuage de points de l'arbre sans feuilles, puis une spatialisation des feuilles autour des pousses à l'aide de relations allométriques. Sept maquettes représentées dans la première rangée de la Figure 4.2 composent ce premier groupe. Une maquette de référence appelée LOD réf_(I) a été réalisée par numérisation manuelle des pousses à l'intérieur du nuage de points. Le LOD réf_(I) fournit donc une maquette des pousses très fidèle à l'arbre réel, avec leur position, leur nombre (919 pousses), leur longueur (958,9 m) et leur courbure réelle. La seconde maquette de ce groupe est la maquette LOD 4_(I). Le squelette du LOD 4_(I) est très proche du squelette de référence mais avec quelques simplifications au niveau du nombre (1326 pousses) et de la longueur (925,5 m) des pousses reconstruites. Ces différences sont dues à la méthode de reconstruction utilisée pour obtenir ce LOD 4_(I). En effet, pour cette maquette, l'algorithme de squelettisation automatique de Xu et al. (2007) a été choisi. Ce processus automatique engendre une surestimation du nombre de branches de 44 % et une sous-estimation de la longueur totale de 3 % par rapport à la maquette de référence. Concernant le LOD 2_(I), le nombre (1092), la longueur (851,0), et la position des pousses sont approximés. Cette approximation représente +19 % de pousses et -11 % de longueur de pousses, par rapport à la référence. Enfin, en plus des caractéristiques précédentes, le LOD 1_(I) considère les pousses rectilignes à la place des pousses courbes. Le nombre de pousses reconstruites est par conséquent égal à celui du LOD 2_(I) et la longueur totale de pousses est réduite à 822,2 m, ce qui représente -3 % et -14 %, respectivement comparé au LOD 2_(I) et à la référence. Les méthodes semi-automatiques utilisées pour générer les deux dernières maquettes ont été présentées dans Bournez et al. (2016). Comme l'illustre la Figure 4.2, les conséquences de ces généralisations sont que les caractéristiques des pousses (longueur, position, etc.) sont différentes d'une maquette à l'autre, même pour une même tête de chat. En conséquence, la surface foliaire totale de chaque maquette varie également. Afin d'exclure l'effet de variation de la TLA dans les analyses, trois copies des LOD 4_(I), LOD 2_(I) et LOD 1_(I), appelés LOD 4-TLAréf_(I), LOD 2-TLAréf_(I) et LOD 1-TLAréf_(I), ont été produites de manière à reproduire la même TLA que celle de la maquette de référence.

Le deuxième groupe de méthodes de reconstruction utilise une méthodologie plus grossière que celle employée pour le groupe précédent, avec une approche basée sur la reconstruction d'enveloppes. Tout d'abord, comme pour la reconstruction globale d'un arbre présentée dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.3.3, le processus de reconstruction implique la création d'une enveloppe convexe ou concave. Cette dernière permet de réduire l'importance des zones vides de feuilles retrouvées dans l'enveloppe convexe et ainsi permet une reconstruction plus réaliste de la forme de la couronne. Ensuite, les feuilles sont uniformément réparties dans l'enveloppe créée. Comme illustré dans la deuxième rangée de la Figure 4.2, ce second groupe contient quatre maquettes appelées LOD 0,8_(II), LOD 0,6_(II), LOD 0,5_(II) et LOD 0_(II). Ces maquettes diffèrent par l'utilisation de différents types d'enveloppes pour caractériser la géométrie de la couronne. La maquette est plus grossière du LOD 0,8_(II) au LOD 0_(II). Pour le LOD 0,8_(II), une enveloppe est créée pour englober les pousses présentes sur chaque tête de chat de l'arbre. Cette étape est réalisée à partir du nuage de points de l'arbre sans feuilles. La même surface foliaire est uniformément distribuée dans chaque enveloppe. Concernant la création des autres maquettes, le nuage de points de l'arbre feuillu est utilisé pour les calculs d'enveloppes. Pour le LOD 0,6_(II) et le LOD 0,5_(II) les feuilles sont situées dans une enveloppe qui englobe la totalité de la couronne (enveloppe vert foncé - Figure 4.2) à l'exception de la partie centrale qui est considérée comme exempte de feuilles (enveloppe vert clair - Figure 4.2). Cette zone vide de feuilles est déduite à partir de la position des extrémités des branches de l'arbre. La principale différence entre le LOD 0,6_(II) et le LOD 0,5_(II) est le type

d'enveloppes (concave pour le LOD 0,6_(II) et convexe pour le LOD 0,5_(II)). Enfin, pour le LOD 0_(II), les feuilles sont spatialisées dans l'intégralité de l'enveloppe convexe de la couronne.

Concernant le troisième groupe de méthodes de reconstruction, une approche basée sur la reconstruction de voxels a été utilisée pour créer quatre maquettes : LOD 0,5-Vox20_(III), LOD 0-Vox20_(III), LOD 0,5-Vox50_(III) et LOD 0-Vox50_(III). Le nuage de points de la couronne feuillue est discrétisé en plusieurs voxels selon une taille de voxel fixée (largeur = longueur) : 20 cm et 50 cm. La précision des maquettes créées dépend de la taille de voxel utilisée. La surface foliaire est uniformément répartie dans chaque voxel. La troisième rangée de la Figure 4.2 présente les maquettes LOD 0,5-Vox50_(III) et LOD 0-Vox50_(III), créées avec une taille de voxel de 50 cm et avec un volume avec ou sans feuilles, respectivement, comme dans le deuxième groupe.

Pour les 15 maquettes, la même distribution angulaire des feuilles (inclinaison et azimut) a été considérée. De plus, la TLA du LOD réf_(I) est utilisée pour la reconstruction de toutes les maquettes, sauf pour le LOD 4_(I), le LOD 2_(I) et le LOD 1_(I), afin d'exclure l'effet de variation de la TLA dans les analyses. Les maquettes créées ne diffèrent donc que du point de vue du volume de la couronne et de la répartition des feuilles à l'intérieur de la couronne.

4.2.2.2. Caractéristiques du feuillage de chaque LOD

Afin d'analyser l'impact des différents LOD sur les caractéristiques du feuillage en fonction de sa distribution spatiale (caractéristiques structurelles) et de sa capacité à intercepter la lumière (caractéristiques radiatives), plusieurs caractéristiques ont été calculées et sont présentées dans le Tableau 4.3. Sur la base d'une discrétisation de chaque maquette en voxels de 20 cm, la PLA, le volume et la TLA ont été extraits. Sur la base de ces caractéristiques primaires, le LAI et la LAD ont également été calculés. Pour les propriétés d'interception de la lumière, deux caractéristiques ont été calculées selon la méthodologie de [Sinoquet et al. \(2007\)](#) : le μ (facteur d'agrégation) et le STAR (*Silhouette-to-Total Area Ratio*). Le STAR est le rapport de la surface foliaire visible sur la surface foliaire totale permettant de caractériser la distribution de la lumière dans la couronne foliaire. Le STAR est une valeur intégrée au ciel qui caractérise les propriétés d'interception globales des arbres. Il se calcule suivant l'équation [2] suivante :

$$STAR = \sum_{\Omega=1}^{46} \omega_{\Omega} STAR_{\Omega} \quad [2]$$

où ω_{Ω} et $STAR_{\Omega}$ sont le poids et la valeur de STAR, respectivement, associés à la direction Ω . Les ω_{Ω} sont calculés en fonction de la distribution du rayonnement dans le ciel (*Standard OverCast*). Le μ représente l'effet de la distribution non aléatoire et non uniforme de la LAD dans la couronne. Une dispersion uniforme ($\mu = 1$) est rarement retrouvée dans les couronnes d'arbres, habituellement elles présentent plutôt une dispersion agrégée des feuilles ($\mu < 1$).

4.2.2.3. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques entreprises dans cette étude ont été réalisées avec le logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc.).

Une interprétation des différentes caractéristiques entre LOD a été réalisée grâce à la création de graphiques en « boîte à moustaches ». Pour un groupe de caractéristiques, ces boîtes permettent de représenter l'intervalle contenant 50 % des valeurs, mais aussi les deux valeurs extrêmes, la médiane et la moyenne. A ce graphique, a été ajoutée une analyse de variance (ANOVA) suivie d'un test de Fisher dit LSD (*Least Square – Significant Difference*) pour indiquer si statistiquement les valeurs sont différentes. Au final, cette analyse permet de comparer les caractéristiques moyennes du feuillage des maquettes des trois groupes de méthodes de reconstruction. Dans chaque groupe, quatre maquettes ($n = 4$) ont été utilisées afin de disposer du même nombre d'échantillons pour chaque groupe. Dans les graphiques, les lettres (a, b, et ab) permettent d'indiquer si les groupes sont différents statistiquement les uns par rapport aux autres. Lorsque deux groupes ont une même lettre, cela signifie qu'ils sont statistiquement identiques et *vice versa*. Un groupe portant une lettre « ab » signifie qu'il est statistiquement identique aux groupes « a » et à « b », mais « a » et « b » sont différents. La contrainte de fiabilité des statistiques est fixée à 5 %, c'est-à-dire que l'on considère deux groupes différents lorsque les différences sont supérieures à 5 %.

Des analyses de régressions linéaires multiples ont été effectuées pour relier les écarts de l'évapotranspiration simulée entre les 14 maquettes et le cas de référence aux caractéristiques du feuillage. Des méthodes à la fois ascendantes et descendantes ont été utilisées. Pour la méthode ascendante, les variables sont ajoutées une à une, si elles améliorent significativement l'ajustement de la régression. Dans le cas de la méthode descendante, les variables sont retirées une à une. Les analyses statistiques ont été comparées en termes de coefficients de détermination (R^2) et d'erreur moyenne absolue (MAE : *Mean Absolute Error*). Dans le cas de l'analyse de régression linéaire simple, la MAE, la variance (MSE : *Mean Square Error*), le coefficient de Mallow (Cp), la pente (a), l'ordonnée à l'origine (b) et le R^2 de la régression ont été estimés. Les formules pour calculer chacune de ces grandeurs statistiques sont présentées en Annexe H, page 191. La signification de chaque régression linéaire simple a été évaluée avec un test de Fisher avec une valeur p de contraintes de fiabilité des statistiques fixée à 5 %.

4.2.3. Résultats

Pour effectuer ces analyses, les simulations RATP ont été réalisées sur 19 journées de l'été 2014. Un pas de temps d'une heure a été choisi pour assurer une importante variabilité du taux d'évapotranspiration simulé. Le processus de discrétisation en voxels de 20 cm des maquettes est identique à celui présenté dans la sous-partie 4.1.1. Les propriétés optiques et physiologiques des feuillages sont identiques pour chaque maquette (sous-parties 4.1.2 et 4.1.3). Pour chaque pas météorologique, le taux d'évapotranspiration de l'arbre à travers chaque maquette est calculé en sommant le taux d'évapotranspiration pour l'ensemble des voxels. Pour chacune de ces 15 maquettes, des analyses ont été effectuées par rapport : (i) aux caractéristiques des feuillages ; (ii) aux taux d'évapotranspirations obtenus avec RATP ; et (iii) à la relation entre feuillage et taux d'évapotranspiration.

4.2.3.1. Comparaison des caractéristiques du feuillage entre les LOD

Les trois groupes de méthodes de reconstruction conduisent définitivement à différentes maquettes de la couronne d'un arbre (Figure 4.2), avec différentes caractéristiques (Tableau 4.3). La Figure 4.3 permet de confirmer ce constat. Elle illustre une comparaison statistique entre les valeurs moyennes relatives aux caractéristiques des maquettes obtenues

dans chaque groupe. Pour garantir le même nombre d'échantillons entre les groupes lors de cette analyse statistique, les LOD 4₍₁₎, LOD 2₍₁₎ et LOD 1₍₁₎ n'ont pas été pris en compte.

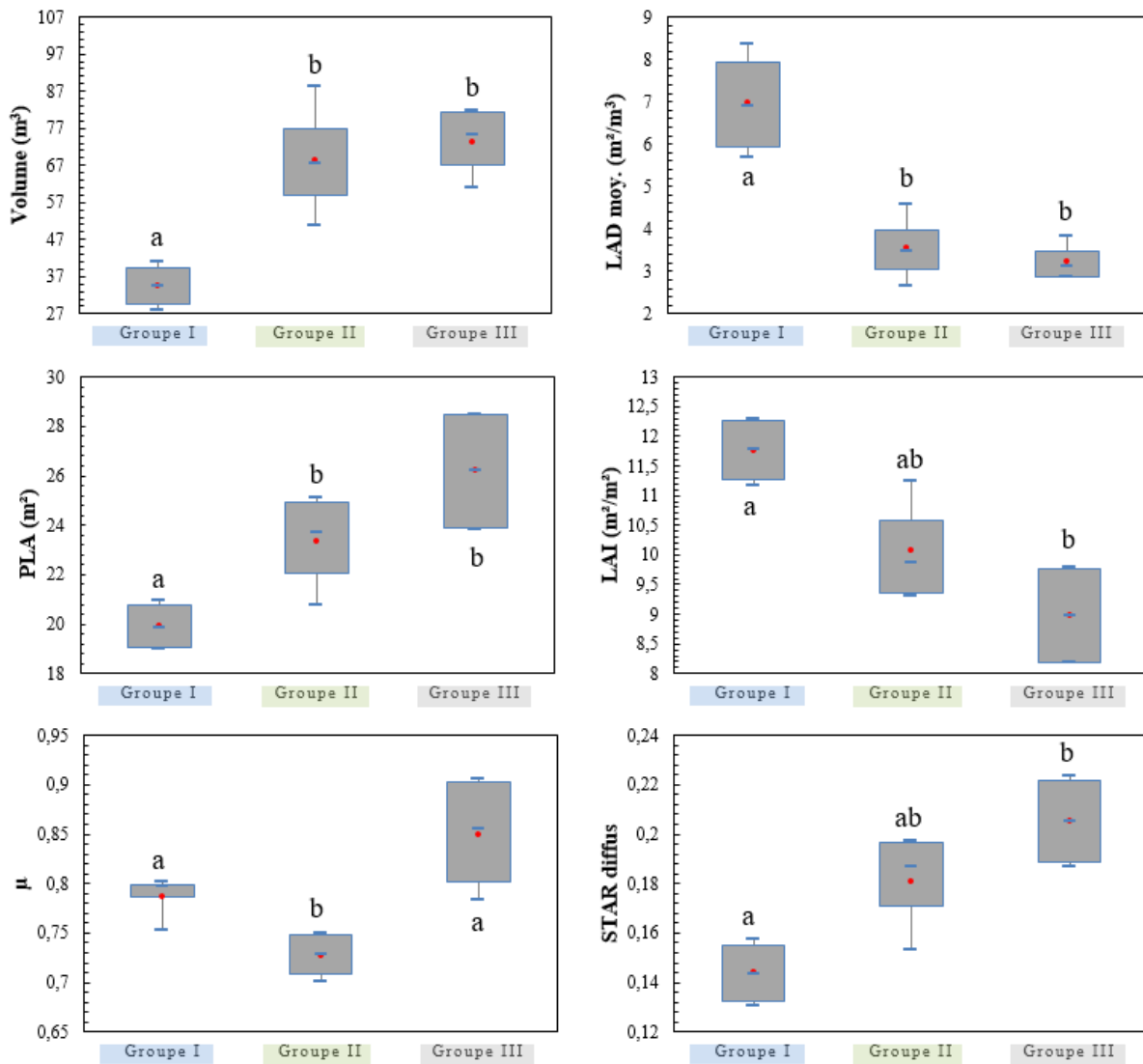


Figure 4.3 – Caractéristiques des couronnes foliaires pour chacun des trois groupes de méthodes de reconstruction d'arbres, telles que le volume (m³), la surface foliaire projetée (PLA - m²), l'indice foliaire (LAI), la densité foliaire (LAD moyenne - m²/m³), le facteur d'agrégation (μ) et le STAR.

Comme le montre la Figure 4.3, les maquettes reconstruites à partir de la structure des branches (groupe I) présentent des volumes de couronne et des PLA plus petits que les maquettes dont la forme est estimée par des enveloppes (groupe II) ou des voxels (groupe III). C'est le contraire lorsque que l'on considère les valeurs de LAD. En se référant au Tableau 4.3, ce résultat semble logique, puisque la TLA est constante entre les maquettes (en moyenne 233,6 m² pour le groupe I et 233,4 m² pour le groupe II et III), alors que le volume des couronnes diminue (en moyenne 34,4 m³, 68,5 m³ et 73,3 m³, respectivement pour le groupe I, II et III). L'utilisation d'enveloppes ou de voxels n'entraîne pas de différences significatives entre les caractéristiques, à l'exception du μ (en moyenne 0,73 et 0,85, respectivement pour le groupe II et le groupe III). Quand bien même les valeurs de LAI et de STAR sont différentes pour tous les groupes, cette différence est seulement significative entre les maquettes avec des voxels et celles avec la structure des branches. Par groupe, le LAI le

Lorsque l'on se concentre sur les variations de ces caractéristiques par groupe entre toutes les maquettes, des tendances différentes selon les LOD apparaissent (Tableau 4.3). Pour les maquettes reconstruites à partir de la structure des branches, plus le LOD de la maquette diminue, plus le volume, la PLA et le STAR diminuent. Inversement, la LAD et le facteur d'agrégation augmentent. Le LAI semble à peu près constant suivant les LOD. La cause de ce phénomène ne peut pas être la TLA, car les maquettes ayant les mêmes valeurs de TLA ($LOD-TLA_{réf(I)}$) présentent les mêmes tendances. Toujours dans le groupe I, le passage de pousses courbes ($LOD 2_{(I)}$) à des pousses rectilignes ($LOD 1_{(I)}$) ne modifie quasiment pas les valeurs des caractéristiques, contrairement aux changements induits par le passage du $LOD 4_{(I)}$ au $LOD 2_{(I)}$ jusqu'au $LOD 1_{(I)}$. Pour les maquettes reconstruites à partir d'une enveloppe, les tendances sont inversées, à l'exception du cas du μ . En effet, les valeurs du volume, du PLA, du STAR et du μ augmentent, et les valeurs de la LAD et du LAI diminuent lorsque le LOD des maquettes diminue. Enfin, pour les maquettes reconstruites avec des voxels, la variation de la taille du voxel a un effet plus important sur les valeurs des caractéristiques que lorsqu'on prend en compte l'espace sans feuilles dans la couronne de l'arbre ($LOD 0,5_{(III)}$ par rapport au $LOD 0_{(III)}$). Lorsque la taille du voxel diminue, le volume, le PLA, le STAR et le μ diminuent, tandis que la LAD et le LAI augmentent.

4.2.3.2. Comparaison de l'évapotranspiration simulée à partir des différents LOD

Pour estimer l'impact du LOD sur le taux d'évapotranspiration total de l'arbre, les taux d'évapotranspiration horaires de chaque LOD ont été analysés par rapport aux taux d'évapotranspiration horaires calculés avec le cas de référence ($LOD_{réf(I)}$). Pour illustrer l'écart obtenu par rapport au $LOD_{réf(I)}$, les valeurs moyennes par groupe des taux d'évapotranspiration horaires par rapport aux valeurs obtenues avec le $LOD_{réf(I)}$ sont présentées dans la Figure 4.4. Une régression linéaire avec l'ordonnée forcée à zéro a été effectuée pour chaque LOD. Les pentes, a_T , de chaque régression linéaire et les pourcentages d'écarts d'évapotranspiration par rapport à la maquette de référence sont énumérées dans les deux dernières lignes du Tableau 4.3. Les coefficients R^2 ne sont pas indiqués dans le Tableau 4.3, parce qu'ils sont tous supérieurs à 0,99. Les sont données par maquette et par groupe de reconstruction.

Cette analyse montre que l'écart du taux d'évapotranspiration par rapport au cas de référence dépend du groupe de reconstruction. En effet, les valeurs moyennes d' a_T obtenues pour chaque groupe sont bien distinctes (Tableau 4.3). Le groupe produisant le meilleur résultat est le premier, basé sur la reconstruction de la structure des branches, avec un écart moyen du taux d'évapotranspiration par rapport à la référence de -7 % (de -13 % à 2 % entre les LOD). Le troisième groupe, utilisant la voxelisation du nuage de points de l'arbre feuillu, donne les plus mauvais résultats, avec un écart moyen de 30 % (de 16 % à 44 % entre les LOD). Le groupe II utilisant la reconstruction d'enveloppes se situe au milieu avec un écart moyen de 10 % (de -6 % à 20 % entre les LOD).

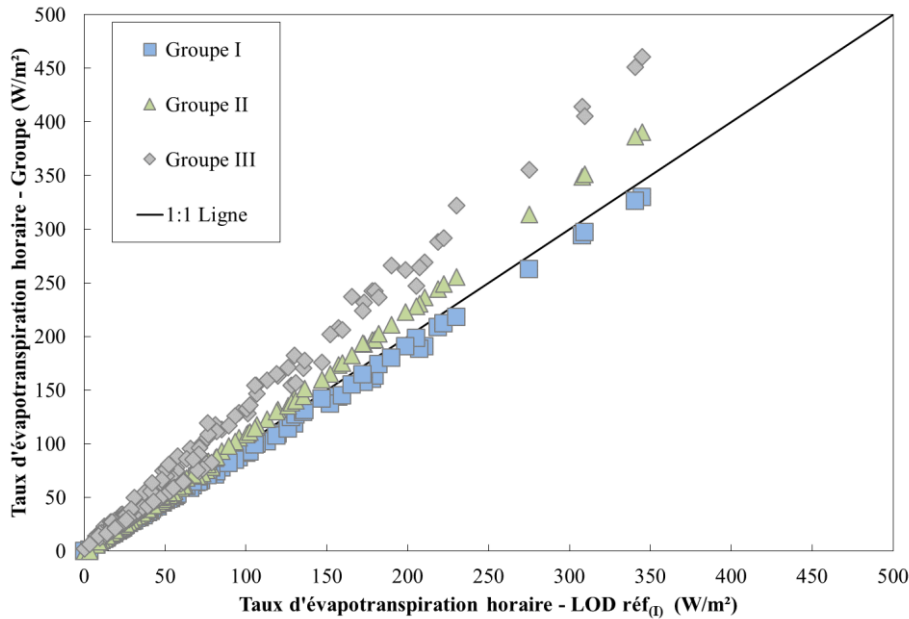


Figure 4.4 – Comparaison des performances évaporatives des maquettes par groupe de méthodes de reconstruction par rapport au cas de référence (LOD réf_(I)). Les pentes, a_T , des courbes de régression linéaire obtenues pour chaque maquette et chaque groupe sont énumérées dans le Tableau 4.3.

Dans le Tableau 4.3, on peut également noter que l'intra-variabilité du taux d'évapotranspiration est élevée pour un groupe de reconstruction donné. Cela montre la sensibilité du taux d'évapotranspiration d'un arbre à plusieurs caractéristiques relatives au feuillage. Le taux d'évapotranspiration simulé avec le LOD 4_(I) diffère des simulations obtenues avec le LOD 2_(I) et le LOD 1_(I). En particulier, le LOD4-TLA_{réf(I)} avec la même TLA que la référence fournit une très bonne estimation du taux d'évapotranspiration de l'arbre. En revanche, la prise en compte de pousses courbes ou rectilignes (LOD 2_(I) par rapport au LOD 1_(I)) ne modifie pas le taux total d'évapotranspiration simulé. Entre les LOD basés sur la reconstruction d'enveloppes, les taux d'évapotranspiration simulés avec le LOD 0,5_(II) et le LOD 0_(II) s'écartent plus du cas de référence que les taux d'évapotranspiration simulés avec le LOD 0,8_(II) et le LOD 0,6_(II). De plus, l'espace vide de feuilles représenté dans la couronne du LOD 0,5_(II) n'a pas d'impact sur le taux d'évapotranspiration puisque le taux d'évapotranspiration simulé avec la couronne remplie de feuilles du LOD 0_(II) est similaire. A noter que les simulations obtenues avec le LOD 0,8_(II) et le LOD 0,6_(II) sont plus proches de la référence que celles obtenues avec les LOD 2_(I) et les LOD 1_(I). Ce résultat montre l'importance de conserver la forme réelle de la couronne de l'arbre. Enfin, la taille du voxel (LOD-Vox50_(III) par rapport au LOD-Vox20_(III)) a un effet plus important sur le taux d'évapotranspiration que la prise en compte de l'espace vide de feuilles dans la partie interne de la couronne (LOD 0,5_(III) par rapport au LOD 0_(III)).

4.2.3.3. Relation entre les différences de taux d'évapotranspiration et les différences de caractéristiques des LOD

Une première analyse a été réalisée pour lier les différences de taux d'évapotranspiration simulés entre les LOD et la référence (pentes a_T) avec les caractéristiques du feuillage des différents LOD. Pour ce faire, une analyse de régression multiple par étape a été effectuée entre les caractéristiques structurales et les valeurs de pente a_T en prenant en compte les 15

maquettes. La relation qui lie ces caractéristiques et qui fournit les meilleures grandeurs statistiques est une combinaison du volume de la couronne (V), de la PLA et du LAI :

$$a_T = 0,15708 - 0,00209307 \times V + 0,0588658 \times PLA - 0,0274783 \times LAI \quad [3]$$

avec un R^2 ajusté de 0,99 et une MAE de 0,01. Les méthodes de régression ascendantes et descendantes ont donné les mêmes résultats. Cependant, puisque le LAI est directement lié à la PLA ($LAI = TLA / PLA$) et puisque la PLA est plus facile à mesurer sur le terrain que le LAI, ce dernier a été retiré de l'analyse. La relation qui permet de traduire les meilleures grandeurs statistiques a ainsi été obtenue avec le V et la PLA uniquement :

$$a_T = -0,349398 - 0,00209135 \times V + 0,0687618 \times PLA \quad [4]$$

avec un R^2 ajusté de 0,99 et une MAE de 0,02. Cependant, avec ce modèle, deux caractéristiques doivent être mesurées sur le terrain pour espérer simuler correctement le fonctionnement d'un arbre. De plus, la matrice de corrélation entre les variables a révélé des corrélations élevées entre la PLA et le V (coefficient de corrélation = - 0,94).

Afin de déterminer si l'évapotranspiration peut être obtenue avec une seule caractéristique et de déterminer laquelle est la plus pertinente, des analyses de régressions simples ont été effectuées entre les pentes a_T (obtenues par des régressions linéaires simples entre l'évapotranspiration simulée avec chaque LOD et le LOD réf_(I)) et les caractéristiques structurelles et radiatives de chaque LOD. Les valeurs ajustées des R^2 , MSE, MAE, Cp, a et b de chaque régression linéaire sont énumérées dans le Tableau 4.4. Toutes les régressions linéaires sont significatives (valeur p < 5 %). Puisque la PLA et le STAR sont les principales caractéristiques qui peuvent expliquer à elles seules les valeurs d' a_T avec les meilleurs coefficients R^2 , les relations entre a_T et PLA, et a_T et STAR sont reportées dans la Figure 4.5.

Caractéristiques	MSE	MAE	R^2	Cp	a	b
PLA	0,001	0,02	0,98	1191,46	0,0558	-0,1702
STAR	0,001	0,03	0,97	1759,81	6,1167	0,0282
LAI	0,004	0,05	0,90	6139,43	-0,1380	2,5094
Volume	0,007	0,06	0,81	11374,90	0,0077	0,6699
LAD moy,	0,009	0,07	0,74	15477,20	-0,0813	1,4847
μ	0,026	0,13	0,29	42662,50	1,7093	-0,2685

Tableau 4.4 – Analyse de régression multiple entre les pentes a_T ($LOD = a_T LOD_{ref(I)} -$ voir Tableau 4.3), et les caractéristiques des maquettes telles que le PLA, le STAR, le LAI, le Volume, la LAD moyenne et le μ .

En s'appuyant sur les résultats présentés dans le Tableau 4.4 et illustrés dans la Figure 4.5, nous pouvons affirmer qu'une augmentation du taux d'évapotranspiration de l'arbre est corrélée avec une augmentation de la PLA et du STAR. Cette observation indique que les écarts obtenus par rapport au taux d'évapotranspiration du cas de référence peuvent être expliqués par la différence de capacité d'interception de la lumière par la couronne de l'arbre en fonction des LOD. Ainsi, les maquettes de l'arbre ayant des valeurs de STAR et de PLA faibles, c'est-à-dire pour les LOD_(I) et le LOD 0,8_(II), conduisent à des sous-estimations du taux d'évapotranspiration par rapport au cas de référence. D'un autre côté, les maquettes de l'arbre avec des valeurs élevées de STAR et de PLA (c'est-à-dire pour les LOD du groupe II et III, excepté pour le LOD 0,8_(II)) surestiment le taux d'évapotranspiration par rapport au cas

de référence. Le LOD 4_(I) et le LOD 4-TLAréf_(I) impliquent un taux d'évapotranspiration inverse par rapport à ceux obtenus avec les LOD du groupe I. Le même comportement est observé pour le LOD 0,8_(II) par rapport aux LOD du groupe II. Ces constats peuvent être expliqués par leurs différences de caractéristiques par rapport aux maquettes de leur groupe. Le LOD 4_(I) et le LOD 4-TLAréf_(I) ont presque la même PLA que la référence mais un STAR plus important. Ces LOD impliquent un taux de transpiration presque similaire au cas de référence, avec une surestimation de 2 % avec le LOD 4_(I). Contrairement aux LOD du groupe II, le LOD 0,8_(II) a une PLA et un STAR plus faibles que le cas de référence. Ce constat implique par conséquent un taux d'évapotranspiration sous-estimé de 6 % par rapport au cas de référence. Pour les maquettes LOD 4_(I) au LOD 1_(I), la fixation de la valeur de TLA à celle du LOD réf_(I), a conduit à une diminution des valeurs de STAR et, par conséquent, à une diminution du taux d'évapotranspiration, alors que la PLA reste constante. Parmi les LOD obtenus avec les reconstructions d'enveloppes, le LOD 0,8_(II) donne les meilleurs résultats avec des valeurs de PLA, STAR et a_T proches des valeurs de référence.

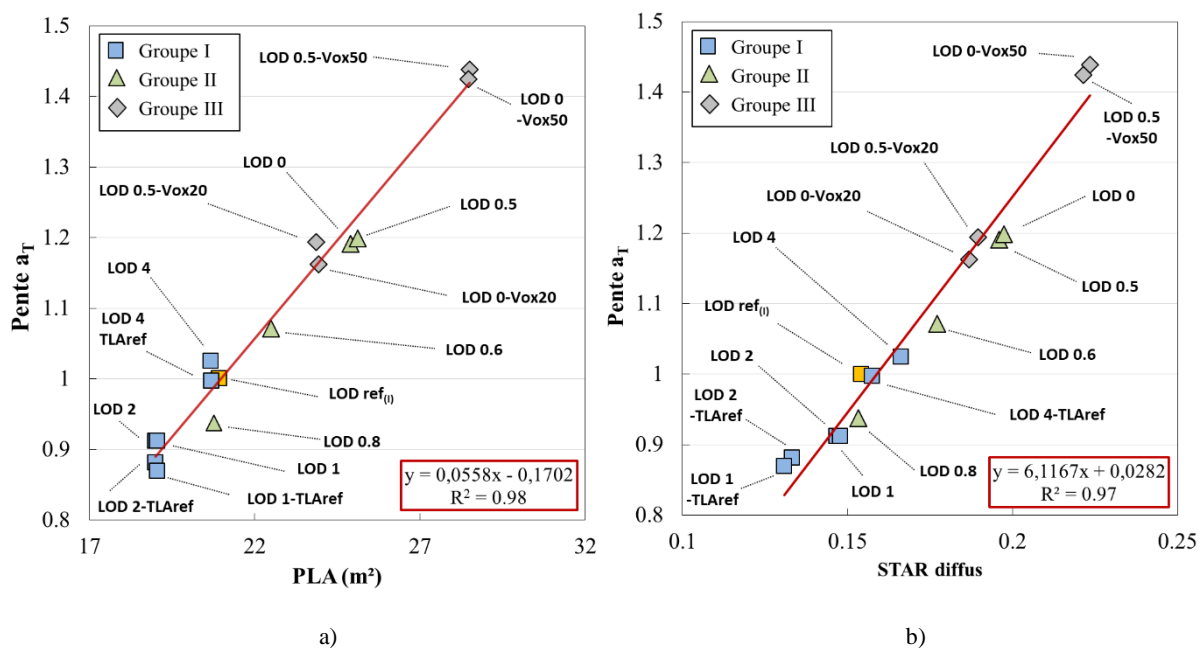


Figure 4.5 – Comparaison de la pente a_T obtenue pour chaque maquette ($LOD = a_T LOD_{réf(I)}$ – voir Tableau 4.3) par rapport à deux caractéristiques de couronne déduites de chaque maquette : a) la PLA et b) le STAR. Les paramètres statistiques de la régression (ligne rouge) sont reportés dans le Tableau 4.4.

4.2.4. Discussion et conclusion

L'analyse des maquettes de différents niveaux de détails créées dans cette étude a montré que les méthodes de reconstruction proposées dans le groupe I fournissent des caractéristiques de distribution de la surface foliaire plus proches du cas de référence que le permettent les maquettes créées avec les méthodes de reconstruction des groupes II et III (Figure 4.3). De nombreuses études théoriques ont montré la forte corrélation entre les propriétés du feuillage et la capacité d'interception de la lumière des arbres 3D homogènes ou complexes (Ross, 1981 ; Sinoquet et al., 2007). Ainsi, la meilleure capacité d'interception de la lumière (valeurs de STAR) des maquettes d'arbres reconstruites à partir de la structure des branches (Tableau 4.3 et Figure 4.5b) est probablement directement liée aux caractéristiques du feuillage des maquettes de ce groupe. Dans la littérature, la relation entre le taux d'évapotranspiration de l'arbre et la maquette de sa couronne n'a pas été étudiée en profondeur. En effet,

l'évapotranspiration résulte d'un couplage entre la réponse physiologique des feuilles et le microclimat (Campbell & Norman, 2012 ; Monteith & Unsworth, 1990). Par conséquent, la seule manière d'étudier cette relation est d'utiliser des modèles numériques qui spatialisent la surface des feuilles et le microclimat (Green, 1993 ; Saudreau et al., 2013). L'utilisation du modèle RATP dans cette étude permet de mener de telles investigations. L'analyse de la performance évaporative de chaque maquette par rapport au cas de référence indique que les maquettes du groupe I entraînent de meilleures estimations du taux d'évapotranspiration (écart de -7 % par rapport à la référence) qu'avec les maquettes des groupes II et III (écarts de 10 % et 30 % respectivement, par rapport à la référence). Afin d'expliquer ces différences, une analyse de régression entre l'écart du taux d'évapotranspiration simulé par rapport au cas de référence et les caractéristiques des feuillages a été effectuée pour corrélérer l'écart du taux d'évapotranspiration avec ces caractéristiques. Les résultats ont révélé que le volume de la couronne de l'arbre, la PLA et le STAR sont fortement corrélés avec ces écarts et, par conséquent, avec le taux d'évapotranspiration de l'arbre entier (Tableau 4.4). Ces résultats soutiennent ceux du travail expérimental de Kong et al. (2016) sur l'effet rafraîchissant des arbres urbains. Ils ont signalé que le volume de la couronne des arbres et l'ombre (PLA) fournissent une bonne indication de l'impact climatique de la canopée des arbres par les effets de l'évapotranspiration et de l'ombrage. Ces caractéristiques sont donc cruciales pour estimer le fonctionnement des arbres ou bien les services écosystémiques qu'ils fournissent (tels que l'effet de refroidissement dans les zones urbaines) sur la base de caractéristiques structurelles qui peuvent être facilement estimées à partir de mesures de terrain.

Au vu des analyses précédentes, l'approche par reconstruction détaillée de la structure des branches (groupe I) devrait être utilisée pour créer des maquettes afin de simuler avec précision le taux d'évapotranspiration des arbres par rapport au cas de référence. Notre étude montre également que la maquette qui donne les meilleurs résultats (LOD 4_(I)) est basée sur une reconstruction automatique des pousses à l'aide du logiciel PlantScan3D (Chapitre 3, sous-partie 3.1.2.3). De ce fait, la méthode de reconstruction du LOD 4_(I) peut être appliquée à d'autres géométries d'arbres et peut fournir des maquettes d'arbres satisfaisantes pour la simulation de leur évapotranspiration. Cependant, cette méthode de reconstruction présente certains inconvénients et nécessite l'application d'une méthodologie contraignante. Par exemple, les arbres sans feuilles plutôt que les arbres feuillus doivent être considérés en raison de l'occlusion de la structure ramifiée par une densité foliaire importante. De plus, toutes les branches de l'arbre ne portent pas forcément de feuilles. Dans ce cas, une méthodologie doit être développée pour ne reconstruire que les pousses pouvant porter des feuilles. Enfin, des informations sur la distribution de la surface foliaire et la distribution de l'angle foliaire sur les pousses doivent être fournies afin de reconstruire le feuillage.

Etant donnée la complexité de reconstruire des maquettes du groupe I, des méthodes de reconstruction alternatives et plus simples doivent être envisagées. C'est la raison pour laquelle, les méthodes de reconstruction avec des enveloppes (groupe II) et des voxels (groupe III) doivent être approfondies davantage, quand bien même nos résultats montrent qu'elles ne fonctionnent pas aussi bien que l'approche avec la structure des branches (groupe I). En effet, ce sont les seules méthodes adéquates lorsque les reconstructions du groupe I ne sont pas applicables. C'est le cas lorsque les arbres ont une forte LAD ou lorsqu'un grand nombre d'arbres doit être analysé sur une période donnée. L'utilisation d'une enveloppe concave (7 % d'écart d'évapotranspiration de la référence avec le LOD 0,6_(II)) plutôt qu'une enveloppe convexe (19 % d'écart avec le LOD 0,5_(II)) ou l'utilisation de petits voxels (environ 18 % d'écart avec les LOD -Vox20_(III)) plutôt que de grands voxels (environ 43 % d'écart avec les LOD-Vox50_(III)) conduisent à de meilleurs résultats pour toutes les caractéristiques. En effet, ils favorisent des formes de couronnes reconstruites qui suivent de plus près la tortuosité

de la couronne réelle. Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures sur l'estimation du volume par les voxels (Béland et al., 2014 ; Sinoquet et al., 2005). Cependant, comme une couronne d'arbre a une géométrie fractale¹¹, la sensibilité du volume suivant le choix de la taille du voxel peut être plus ou moins prononcée. Cela nécessite un choix a priori difficile de la taille du voxel (Da Silva et al., 2008 ; Sinoquet et al., 2005). Parmi les maquettes basées sur la reconstruction d'enveloppes, l'utilisation d'une enveloppe par tête de chat (LOD 0,8_(II)) est efficace, car cette méthode favorise une couronne d'arbre proche du cas de référence (-6 % d'écart d'évapotranspiration par rapport à la référence). Cependant, il semble difficile d'extraire ces têtes de chat feuillues sans connaître la structure des branches (Da Silva et al., 2008).

Les analyses précédentes nous amènent à conclure que les écarts de taux d'évapotranspiration sont effectivement liés au type d'approches de reconstruction d'arbres mis en place. Les méthodes utilisées dans le groupe I peuvent être liées à une première approche basée sur une méthodologie ascendante (« bottom-up »). Dans celle-ci, la distribution de la surface foliaire émerge de la reconstruction de la structure ramifiée qui porte les feuilles. Les méthodes utilisées dans les groupes II et III peuvent être associées à une seconde approche basée sur un concept descendant (« top-down »). Dans celui-ci, la reconstruction de la couronne de manière simplifiée à travers une enveloppe est d'abord effectuée et les informations locales sur les feuilles sont ajoutées dans un deuxième temps. Les informations sur les feuilles peuvent être déduites de données acquises par lasergrammétrie terrestre. L'approche ascendante semble permettre la reconstruction de caractéristiques plus détaillées dans la couronne foliaire que ne le permet l'approche descendante.

Lorsque l'on souhaite simuler le microclimat au sein d'un quartier urbain avec un modèle numérique de simulation, tel que LASER/F, plusieurs arbres doivent généralement être pris en compte. Dans cette situation, selon les limites des approches ascendantes, une approche descendante pour la reconstruction de plusieurs arbres simultanément est majoritairement employée. Cependant, et comme souligné dans cette étude, l'approche descendante conduit à une surestimation de 7 % à 44 % (sans considérer l'exception du LOD 0,8_(II)) de l'effet de refroidissement d'un arbre, ce qui peut impliquer un impact significatif sur le bilan énergétique lorsque plusieurs arbres sont considérés. Dans l'objectif de comparer les simulations entre RATP et LASER/F, la maquette de référence (LOD réf_(I)) est employée dans RATP. En revanche, avec LASER/F la maquette intégrée est plutôt équivalente à un LOD 0,5_(II). Dans l'étude qui vient d'être présentée, le LOD 0,5_(II) conduit à une surestimation de 19 % du taux d'évapotranspiration estimé par rapport au LOD réf_(I). Par conséquent, nous pouvons nous attendre à une différence d'une telle intensité entre les simulations RATP et LASER/F. Pour améliorer les simulations obtenues avec les maquettes des groupes II et III, les méthodes de reconstruction des approches descendantes doivent être améliorées. Nous avons vu que les caractéristiques pertinentes à mesurer qui ressortent de cette étude sont le volume et la PLA. Ces caractéristiques sont simples à mesurer à partir d'un nuage de points. Cependant, avec l'utilisation de maquettes globales, il est difficile de conserver la précision de ces mesures. Ce constat est d'autant plus marqué lorsque le modèle numérique employé (LASER/F) ne peut pas prendre en compte d'enveloppes concaves, qui permettraient de moins surestimer ces caractéristiques. Tout de même, les simulations avec les maquettes des groupes II et III pourraient être améliorées avec une meilleure spatialisation du feuillage dans la couronne. L'objectif de cette étude n'était pas d'effectuer une analyse de sensibilité de toutes les caractéristiques d'entrée liées à la maquette de l'arbre sur l'évapotranspiration simulée. C'est la raison pour laquelle, à ce stade et pour toutes les maquettes des groupes II et III, le

¹¹ Géométrie fractale : géométrie observée identique à n'importe quelle échelle.

nuage de points n'a pas été utilisé pour déduire des caractéristiques structurelles telles que la TLA, la LAD et le LAI. De plus, la surface foliaire était uniformément distribuée à l'intérieur du volume des couronnes. Ainsi, l'efficacité des LOD inférieurs à 1 (groupe II et III) quant à leur capacité à reproduire les caractéristiques structurelles et les traits fonctionnels pourrait être grandement améliorée. Cette amélioration pourrait s'établir grâce à la connaissance de l'information sur la distribution des feuilles dans la couronne des arbres. Ainsi, comme déjà évoqué dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.3.3, nos travaux méritent d'être poursuivis dans le sens de l'extraction des caractéristiques structurelles directement à partir des données SLT. Nous pourrions même envisager de spatialiser le LAI dans la couronne foliaire.

Le paramétrage de LASER/F est aussi différent de celui de RATP au niveau des caractéristiques optiques et physiologiques. Une deuxième étude de sensibilité relative à l'impact de la différence de paramétrage des caractéristiques optiques et physiologiques entre RATP et LASER/F sur les simulations de RATP a été présentée en Annexe I, page 192. Il ressort de cette étude, en comparant l'ensemble des grandeurs statistiques calculées, que la différence de paramétrage physiologique a plus d'impact sur l'évapotranspiration simulée que la différence de paramétrage structurel entre les maquettes LOD réf(I) et LOD 0,5(II). La relation établie est polynomiale. En revanche, l'impact de la différence de caractéristiques optiques est le plus faible par rapport aux deux autres configurations et cet impact est linéaire. Ainsi, se pose la question de la nécessité de rendre LASER/F adaptable à chaque espèce d'arbres étudiée au regard des caractéristiques physiologiques. Il faudrait approfondir davantage cette étude afin de distinguer les fonctions de réponse aux conditions météorologiques qui ont le plus d'impact sur les simulations.

Les éléments mis en avant dans cette discussion seront utilisés dans l'analyse des simulations obtenues avec le modèle LASER/F, présentée dans la partie suivante.

4.3. Potentiel des modèles pour simuler le taux d'évapotranspiration d'un arbre

Le développement du module de végétation dans LASER/F a pour objectif de permettre la simulation du microclimat d'un quartier végétalisé. Auparavant, il semble nécessaire d'évaluer le potentiel du modèle LASER/F à simuler le fonctionnement d'un arbre isolé. Dans cette dernière partie, nous allons tout d'abord confronter les capacités du modèle LASER/F à celles du modèle écophysologique RATP à simuler le taux d'évapotranspiration d'un tilleul argenté. Puis, les résultats des deux modèles seront comparés à une mesure de terrain.

4.3.1. Comparaison des simulations entre LASER/F et RATP

4.3.1.1. Matériels et méthodes

Cette comparaison entre LASER/F et RATP vise deux objectifs. Le premier est d'évaluer le potentiel du modèle LASER/F par rapport au modèle RATP avec le meilleur paramétrage possible des caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques du feuillage. Dans cette étude, RATP est considéré comme le modèle de référence puisqu'il a déjà été validé sur d'autres espèces d'arbres à partir de mesures de terrain. Le deuxième objectif consiste à étudier l'impact de la différence de paramétrage optique et physiologique entre les deux modèles sur les simulations.

Trois comparaisons sont donc réalisées pour mener à bien cette nouvelle étude :

- Dans la première étude comparative, les modèles LASER/F et RATP ont été préalablement paramétrés pour un tilleul argenté. Cela correspond au paramétrage décrit dans la partie 4.1. Nous parlerons de « cas n°1 » pour ce paramétrage.
- Dans la deuxième étude comparative, LASER/F est paramétré de la même manière que précédemment, contrairement à RATP. Dans ce « cas n°2 » le paramétrage des caractéristiques physiologiques effectué pour LASER/F est appliqué à RATP.
- Dans la troisième étude comparative, le paramétrage des caractéristiques physiologiques et optiques de RATP est identique à celui de LASER/F. Il s'agit du « cas n°3 ».

A noter que pour les trois cas, nous avons considéré les arbres en confort hydrique, puisque RATP ne peut pas prendre en compte la quantité d'eau présente dans le sol pour ses simulations.

L'élément de comparaison est le taux d'évapotranspiration du tilleul argenté simulé par chaque modèle dans les trois configurations. De plus, une comparaison sur la base de la température de surface moyenne du feuillage simulée par RATP (température moyenne des voxels) et par LASER/F (température moyenne de l'objet) est effectuée. Les simulations ont été réalisées avec un pas de temps horaire. Pour analyser les résultats, une étude statistique a été menée avec le logiciel Excel (Microsoft). Des régressions linéaires simples ont été calculées afin d'étudier la corrélation entre chacune des simulations. Les régressions ont été comparées à l'aide des grandeurs statistiques suivantes : le coefficient de détermination R^2 , l'erreur moyenne quadratique des résidus (RMSE : *Root Mean Square Error*), la MAE, l'erreur moyenne (MBE : *Mean Bias Error*) et l'un index d'accord (*dr* : *refined index of agreement*). Willmott et al. (2012) ont mis au point ce dernier indice statistique. Il est souvent utilisé en climatologie pour la comparaison de simulations issues de plusieurs modèles (Grimmond et al., 2010). Le *dr* est une grandeur statistique située entre -1 et 1 et reliée aux variations de la MAE. Plus l'indice est proche de 1, meilleure est la relation établie. Le R^2 fournit une information sur la variabilité prise en compte par la régression, c'est-à-dire sur le degré de correspondance entre la forme générale des simulations. Il permet de savoir si le modèle de régression est bien ajusté à la tendance liant les deux variables. La RMSE fournit la dispersion de l'évapotranspiration simulée par un modèle par rapport à l'autre modèle. Les formules utilisées pour calculer ces grandeurs statistiques sont décrites en Annexe H, page 191. Au cours des journées, le taux d'évapotranspiration passe de 0 à 300 W/m², il serait donc judicieux de normaliser l'ensemble de ces grandeurs statistiques pour les fournir en pourcentage et non plus en W/m². Cependant, comme les modèles simulent souvent un taux quasi nul la nuit et durant les journées non ensoleillées, ce pourcentage ne pourra être représentatif de l'ensemble des heures au cours de la journée. Ainsi, nous ne raisonnerons pas en pourcentages. Des dynamiques journalières ont aussi été comparées afin d'évaluer le potentiel des modèles suivant les conditions météorologiques. Les grandeurs statistiques présentées précédemment ont là aussi été calculées. Les résultats des simulations sont en W/m² par rapport à la surface de la couronne foliaire projetée au sol pour le taux d'évapotranspiration et en degrés Celsius pour la température de surface du feuillage.

Pour mener à bien cette étude, une longue série de 103 journées a été choisie de manière à disposer d'une forte variabilité de taux d'évapotranspiration simulé. L'ensemble de la sélection concerne trois périodes d'été où l'évapotranspiration d'un arbre est la plus importante, du 14 juin 2014 au 23 juillet 2014 (39 jours), du 28 août 2014 au 30 septembre 2014 (33 jours) et du 9 septembre 2015 au 11 octobre 2015 (31 jours). La première période

concerne le début d'été où le feuillage commence à croître et les deux autres périodes concernent la fin de l'été où le feuillage a atteint sa maturité juste avant qu'il ne chute pendant l'automne. Ces dates ont été choisies en fonction des disponibilités des mesures météorologiques. De plus, elles sont représentatives de l'hétérogénéité des conditions météorologiques que l'on peut retrouver en été à Strasbourg avec : 15 % de journées totalement ensoleillées, 29 % de journées pluvieuses, 2 % de journées caniculaires et une moyenne de température de l'air de 21,0 °C et 16,0 °C, respectivement le jour et la nuit. Lors des premières journées de simulations, le sol est très sec. Pour ce qui est des comparaisons de quelques dynamiques journalières simulées, deux journées ont été choisies. La première journée est nuageuse (14 juin 2014) alors que la deuxième journée est ensoleillée (16 juin 2014). Ces journées ont été choisies de telle sorte que toutes les conditions météorologiques (température de l'air, humidité, etc.) sauf le rayonnement incident soient à peu près similaires entre les deux journées. Comme le rayonnement est la condition météorologique qui semble impacter le plus le taux d'évapotranspiration d'un arbre, nous avons voulu travailler uniquement sur cette variation de grandeur. Ces différences d'ensoleillement sont illustrées dans la Figure 4.6, qui présente le rayonnement direct perpendiculaire (W/m^2) et le rayonnement diffus horizontal (W/m^2) mesuré au cours de ces journées.

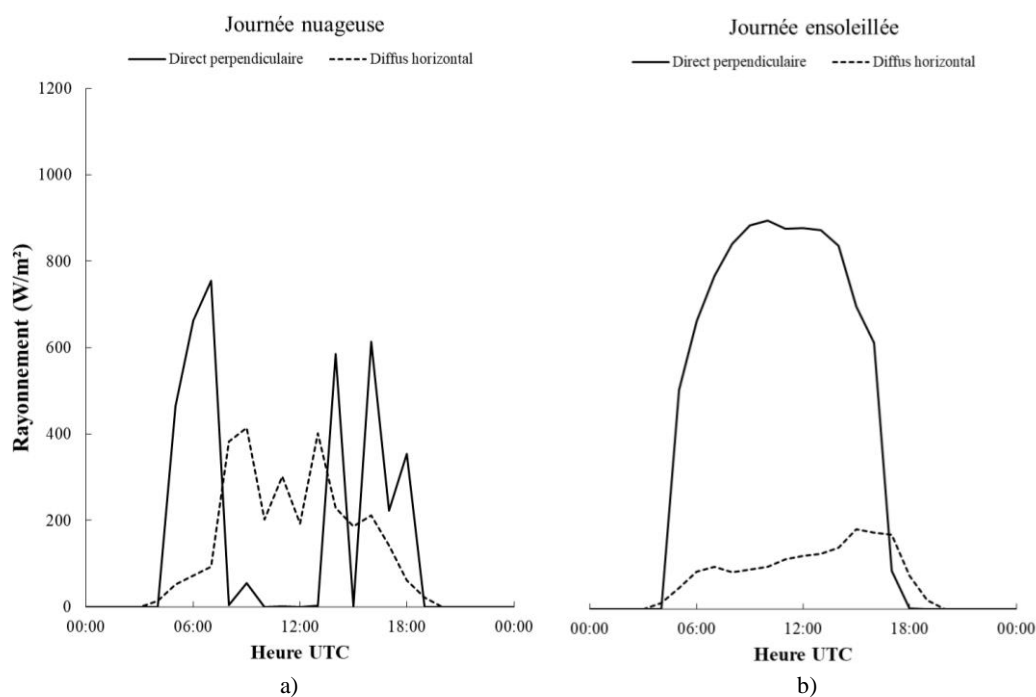


Figure 4.6 – Dynamique journalière du rayonnement incident direct perpendiculaire (ligne continue) et diffus horizontal (ligne pointillée) sur les deux journées sélectionnées : a) journée nuageuse du 14 juin 2014 et b) journée ensoleillée du 16 juin 2014.

4.3.1.2. Résultats

➤ Tendances globale de l'évapotranspiration simulée

La Figure 4.7 présente le taux d'évapotranspiration (ET) simulé avec LASER/F par rapport à celui simulé avec RATP dans le cas n°1 (Figure 4.7a), le cas n°2 (Figure 4.7b) et le cas n°3 (Figure 4.7c). Cette comparaison est réalisée avec le taux d'évapotranspiration obtenu pour chaque pas de temps horaire. Une régression linéaire a été appliquée dans chacun des cas. Les grandeurs statistiques calculées sont indiquées dans les encadrés de la Figure 4.7, pour chacune des régressions.

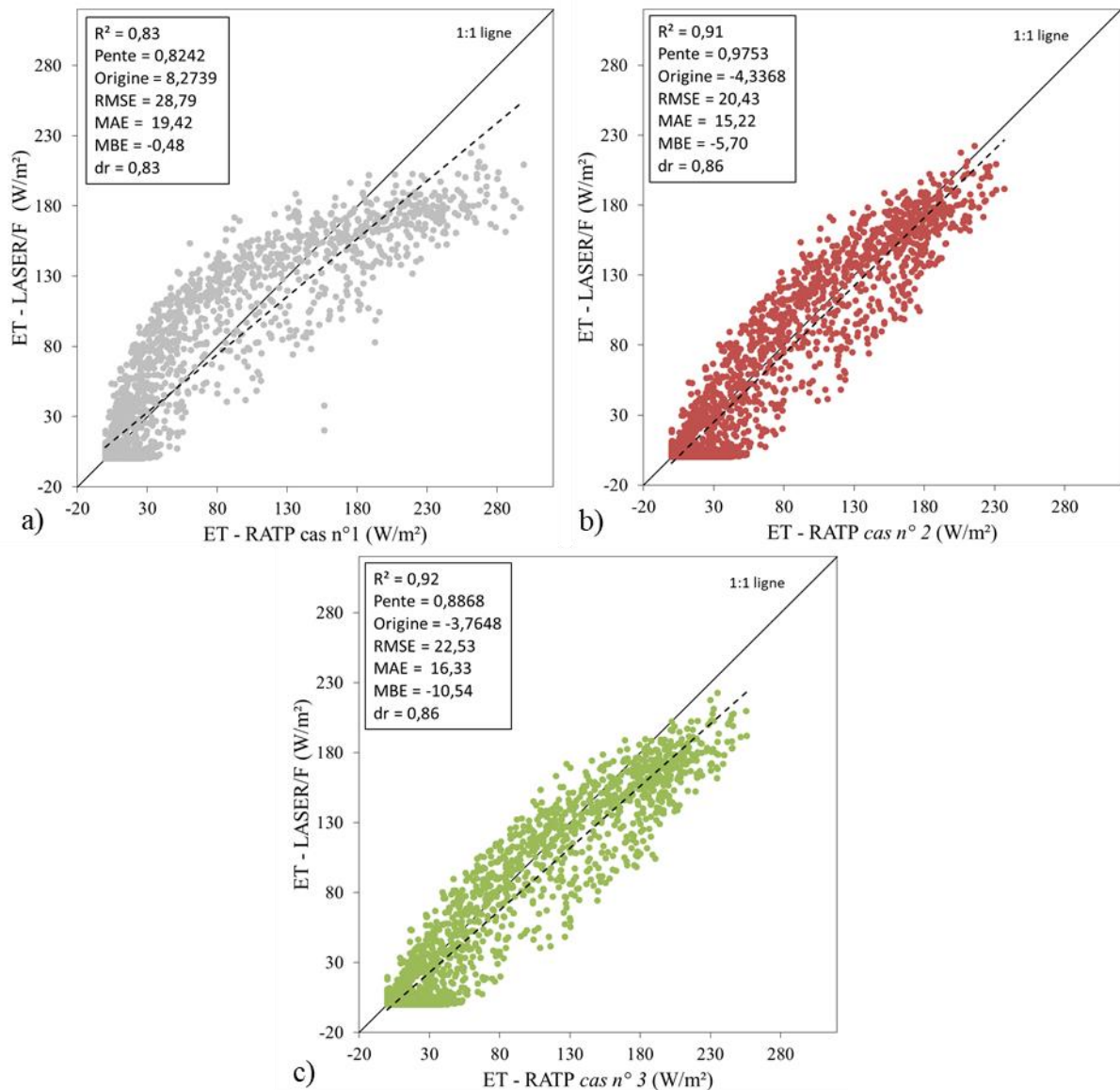


Figure 4.7 – Régressions linéaires simples entre les taux d'évapotranspiration (ET - W/m^2) simulés du tilleul argenté, par pas de temps, avec LASER/F et RATP dans a) le cas n°1, b) le cas n°2 et c) le cas n°3.

Le premier constat encourageant, démontré par la régression de la Figure 4.7a, est la forte cohérence entre les simulations du modèle LASER/F et du modèle RATP (R^2 de 0,83). L'illustration permet de constater une relation à tendance polynomiale avec LASER/F qui surestime en général le taux d'évapotranspiration par rapport à RATP, lorsque celui-ci est faible, et le sous-estime en général lorsque celui-ci est fort. Les simulations obtenues avec le modèle LASER/F engendrent une erreur moyenne (MBE) de $-0,48 W/m^2$ avec une erreur moyenne quadratique (RMSE) de $28,79 W/m^2$.

Dans l'objectif d'étudier l'impact de la différence de paramétrage optique et physiologique entre les deux modèles, les simulations obtenues avec RATP à partir des cas n°1, n°2 et n°3 ont été confrontées à la simulation obtenue avec LASER/F. La régression ajustée entre les modèles LASER/F et RATP est cette fois-ci encore meilleure, avec un R^2 de 0,91 et 0,92 que ce soit dans le cas n°2 et le cas n°3.

Prendre en compte les mêmes caractéristiques physiologiques (cas n°2), ou optiques et physiologiques (cas n°3) pour les deux modèles, permet des simulations plus proches. En

effet, dans les deux cas, la relation entre les simulations des deux modèles est devenue linéaire quelle que soit la valeur du taux d'évapotranspiration de RATP. De plus, les points aberrants que l'on retrouvait lors de conditions météorologiques extrêmes (Figure 4.7a) ne sont plus aberrants à partir du moment où les mêmes caractéristiques physiologiques sont considérées (Figure 4.7b). Toutefois, une erreur systématique est observée entre les deux modèles dans les deux cas. LASER/F sous-estime en moyenne de $5,70 \text{ W/m}^2$ le taux d'évapotranspiration par rapport à RATP avec les mêmes caractéristiques physiologiques ; la sous-estimation est un peu plus importante, de $10,54 \text{ W/m}^2$, lorsque les mêmes caractéristiques physiologiques et optiques sont prises en compte.

➤ Dynamiques journalières de l'évapotranspiration simulée

La Figure 4.8 illustre la dynamique journalière du taux d'évapotranspiration du tilleul argenté simulé par LASER/F (ligne pointillée) et par RATP dans le cas n°1 (ligne continue noire), dans le cas n°2 (ligne continue rouge) et dans le cas n°3 (ligne continue verte). Des grandeurs statistiques, présentées dans le Tableau 4.5 ont été calculées pour chacune de ces périodes. Cette étude des dynamiques journalières apporte un plus à l'analyse statistique globale réalisée précédemment. En effet, elle permet tout d'abord d'évaluer les écarts de simulation entre RATP et LASER/F selon les conditions météorologiques, puis de quantifier l'impact du passage du cas n°1 au cas n°2 au cas n°3 avec RATP.

Une analyse globale est premièrement réalisée à partir des résultats indiqués dans le Tableau 4.5. Le premier constat effectué à partir de ces résultats porte sur la cohérence des simulations entre les modèles RATP et LASER/F avec leur paramétrage d'origine, donc dans le cas n°1. Dans ces configurations, la forme de la dynamique journalière est cohérente entre les simulations par temps nuageux (R^2 de 0,90) et par temps ensoleillé (R^2 de 0,88). En revanche, la MBE est différente pour la journée ensoleillée (MBE de $-20,34 \text{ W/m}^2$) que pour la journée nuageuse (MBE de $4,99 \text{ W/m}^2$). De plus, l'erreur moyenne quadratique entre les simulations est plus importante pour la journée ensoleillée (RMSE de $41,06 \text{ W/m}^2$) que pour la journée nuageuse (RMSE de $23,09 \text{ W/m}^2$). L'une des principales différences entre la journée ensoleillée et la journée nuageuse est la quantité de rayonnement solaire direct incident sur le feuillage. Ainsi, les différences de paramétrage entre RATP et LASER/F ont plus d'impact pour une journée où le soleil contribue beaucoup au fonctionnement de l'arbre.

Le deuxième constat effectué à partir de ces résultats concerne l'impact d'un paramétrage identique des deux modèles du point de vue des caractéristiques optiques et physiologiques du feuillage. Les résultats obtenus dans le cas n°1, le cas n°2 et le cas n°3 sont étudiés. Quel que soit le type de journées, les simulations avec RATP, dans le cas n°2 et le cas n°3, sont plus cohérentes avec les simulations obtenues avec LASER/F, que dans le cas n°1 (R^2 de 0,94 pour la journée nuageuse et R^2 de 0,93-0,94 pour la journée ensoleillée). De plus, nous pouvons constater que le paramétrage identique du point de vue physiologique (cas n°2) entraîne moins de variabilité entre les simulations des deux modèles, par rapport au cas n°1, surtout au niveau de la journée ensoleillée. Enfin, les résultats obtenus dans le cas n°3 sont proches de ceux observés dans le cas n°2, mais pas forcément meilleurs, d'après les grandeurs statistiques.

La Figure 4.8, permet de mettre en évidence certains constats relatifs aux dynamiques journalières. En général, les simulations réalisées avec RATP dans le cas n°2 se rapprochent plus des simulations de LASER/F que dans le cas n°1 en cours de journée. En revanche, c'est l'inverse la nuit. Les simulations obtenues dans le cas n°2 s'éloignent davantage des simulations de LASER/F que dans le cas n°1. Ensuite, sur une période matinale, LASER/F

surestime le taux d'évapotranspiration par rapport aux simulations RATP, à l'inverse du soir. Les dynamiques journalières illustrent également le fait que suivant les conditions météorologiques, dans le cas n°3, les simulations de RATP ne se rapprochent pas forcément des simulations de LASER/F, bien que les mêmes caractéristiques optiques et physiologiques soient prises en compte.

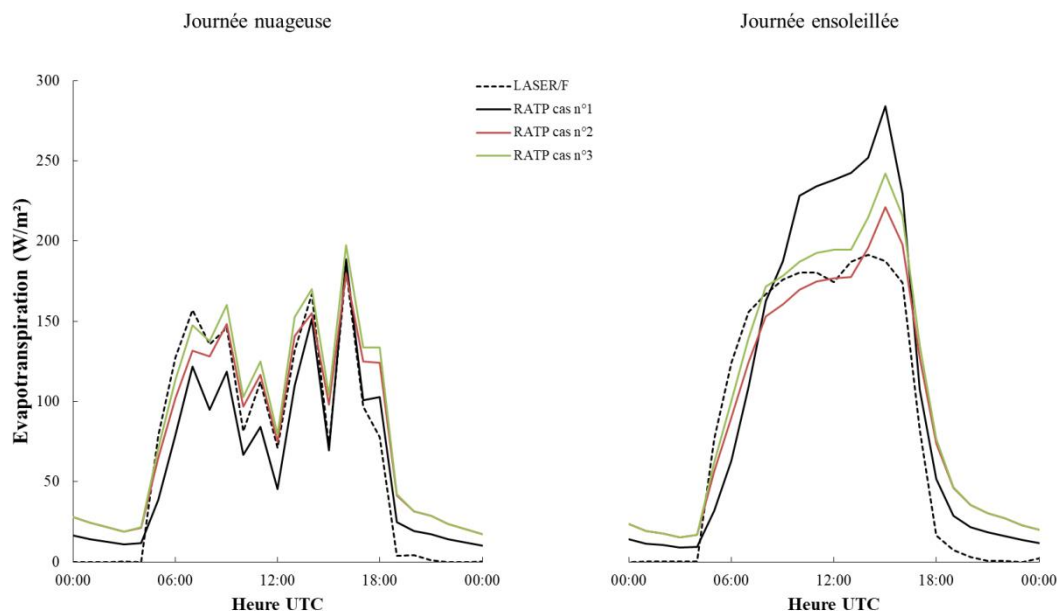


Figure 4.8 – Dynamiques journalières du taux d'évapotranspiration (W/m^2) simulé du tilleul argenté par les modèles : LASER/F (ligne pointillée), RATP cas n°1 (ligne continue noire), RATP cas n°2 (ligne continue rouge) et RATP cas n°3 (ligne continue verte).

Grandeur	Journée nuageuse			Journée ensoleillée		
	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3
R²	0,90	0,94	0,94	0,88	0,93	0,94
RMSE	23,09	22,50	24,14	41,06	26,32	28,76
MAE	20,00	19,61	21,04	33,46	22,90	24,34
MBE	4,99	-12,47	-18,43	-20,34	-11,14	-19,78
dr	0,77	0,79	0,80	0,82	0,87	0,84

Tableau 4.5 – Grandeurs statistiques calculées à l'issue du calcul des régressions linéaires selon le cas n°1, n°2 et n°3 pour une journée nuageuse et ensoleillée.

➤ Tendances globale de la température de surface du feuillage simulée

La Figure 4.9 présente la régression linéaire calculée entre les simulations de la température de surface du feuillage (TS) de LASER/F et celles obtenues avec RATP dans le cas n°2. Seul le cas de paramétrage n°2 a été testé, afin d'écartier les différences de paramétrage physiologique dans l'analyse des écarts, car au vu des résultats précédents, ces caractéristiques semblent influencer de manière significative les simulations. Globalement, les simulations des deux modèles semblent cohérentes entre elles (R^2 de 0,85). En moyenne, la température de surface estimée par LASER/F est inférieure de 1,5 °C (MBE), ce qui n'est pas très important. Toutefois, la RMSE est de 3,7 °C.

Si l'on se concentre plus en détail sur les écarts entre les deux simulations, un phénomène particulier est mis en évidence. En effet, la température est soit surestimée, soit sous-estimée par LASER/F comparée à celle simulée par RATP. Pour les plus petites températures de surface, LASER/F sous-estime la température, alors que pour les plus fortes températures de surfaces, LASER/F surestime la température. Les plus faibles températures de surface sont en général observées la nuit et les plus fortes le jour. De ce constat, nous pouvons avancer l'hypothèse que la température de surface des feuilles produite par LASER/F est surestimée la journée et sous-estimée la nuit comparée à celle produite par RATP.

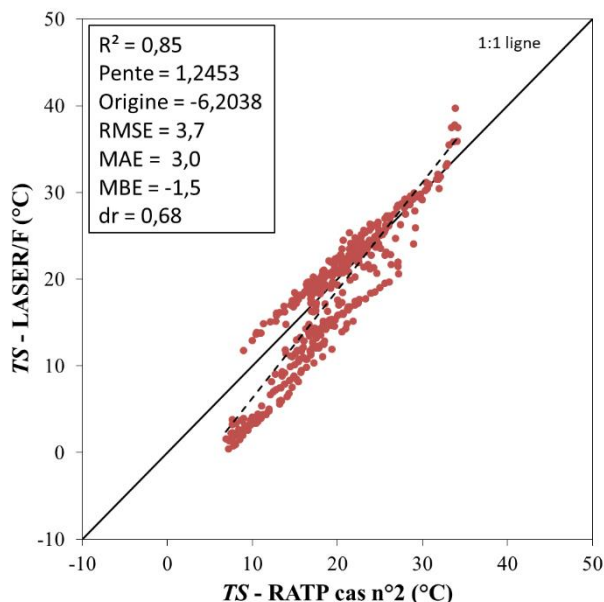


Figure 4.9 – Régression linéaire simple entre la température de surface du feuillage (TS - °C) simulée par LASER/F et celle simulée par RATP dans le cas n°2.

➤ Dynamiques journalières de la température de surface simulée

La Figure 4.10 illustre les dynamiques journalières des températures de surface du feuillage simulées par les modèles. Les résultats de LASER/F sont représentés en ligne pointillée noire, alors que les résultats de RATP (cas n°2) sont représentés en ligne continue rouge. Ces dynamiques concernent les deux types de journées étudiés jusqu'à présent. Les grandeurs statistiques calculées à l'issue de régressions linéaires établies pour les deux journées entre les simulations sont indiquées dans les encadrés de la Figure 4.10. La température de l'air a été ajoutée au graphique (ligne grise avec marqueurs).

Les grandeurs statistiques calculées indiquent une cohérence entre les simulations de LASER/F et de RATP, avec un R^2 de 0,88 pour la journée nuageuse et un R^2 de 0,81 pour la journée ensoleillée. Mais, grâce à une analyse visuelle, nous pouvons confirmer les hypothèses émises précédemment. La température de surface est plus importante en journée avec LASER/F qu'avec RATP (écart maximal d'environ 3,0 °C). A contrario, la nuit, la température de surface est sous-estimée avec LASER/F par rapport à RATP (écart maximal d'environ -6,0 °C). La température de surface simulée par RATP est très proche de la température de l'air mesurée sur le terrain (ligne grise avec marqueurs). Ce constat montre que les simulations de RATP sont plus réalistes que les simulations de LASER/F.

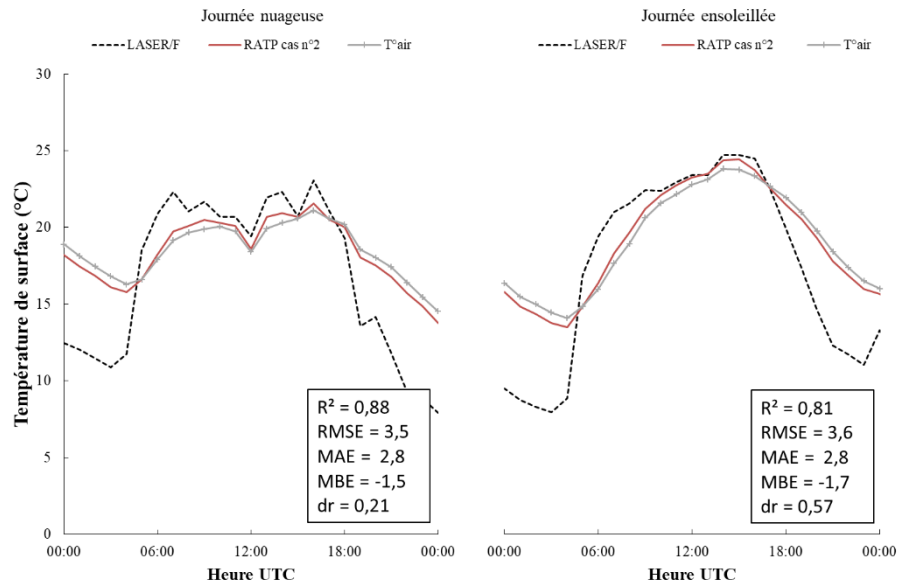


Figure 4.10 – Dynamiques journalières de la température de surface du feuillage du tilleul argenté simulée par les modèles LASER/F (ligne pointillée), RATP cas n°2 (ligne continue rouge) et température de l'air mesurée sur le terrain (ligne grise continue avec marqueurs).

4.3.1.3. Discussion

Dans le cas où les deux modèles de simulations sont paramétrés indépendamment, dans leur meilleure configuration possible (cas n°1), l'analyse du taux d'évapotranspiration simulé révèle que le modèle LASER/F permet d'obtenir des résultats dans l'ensemble cohérents avec ceux calculés par le modèle RATP. La tendance présentée dans la Figure 4.7, liant les deux simulations, est significative. Cependant, un systématisme est observé entre les écarts. Par rapport à RATP, LASER/F aurait tendance à surestimer le taux d'évapotranspiration lorsqu'il est faible (le matin) et à le sous-estimer lorsqu'il est fort (le jour). En revanche, la nuit, où le taux d'évapotranspiration est pourtant faible, LASER/F simule un taux d'évapotranspiration plus faible que RATP. De plus, grâce à la comparaison des simulations sur deux types de journées différentes, nous pouvons observer que les simulations entre les deux modèles sont moins cohérentes pour une journée ensoleillée que pour une journée nuageuse.

Les nombreuses différences de paramétrage (structurelles, optiques et physiologiques) soulignées dans ce chapitre et les différences conceptuelles au niveau de l'absorption du rayonnement par le couvert sont probablement les causes des écarts entre simulations. Pour tenter de comprendre d'où proviennent ces écarts, nous avons répété nos analyses en éliminant progressivement des différences de caractéristiques entre les deux paramétrages des modèles. Lorsque les mêmes caractéristiques physiologiques du feuillage sont utilisées par les deux modèles, sur l'ensemble de la période, les simulations sont plus cohérentes entre elles et c'est aussi le cas lorsque les mêmes caractéristiques physiologiques et optiques sont considérées.

L'étude des dynamiques journalières permet de mettre en évidence que la différence de paramétrage entre RATP et LASER/F a plus d'impact sur une journée ensoleillée que sur une journée nuageuse. Lors d'une journée ensoleillée, le rayonnement solaire pilote principalement le taux d'évapotranspiration d'un arbre, alors que lors d'une journée nuageuse ce sont les autres conditions météorologiques (température de l'air, déficit de pression de vapeur d'eau, etc.) qui le pilotent. Nous pouvons en déduire que la différence initiale de

régulation stomatique en fonction du rayonnement a plus d'impact sur les simulations que les autres différences de régulation stomatique lors d'une journée ensoleillée. Ce constat est appuyé par la tendance de la courbe de régulation stomatique au rayonnement de LASER/F par rapport à RATP (Figure 4.1) qui est équivalente à la différence de relations observées entre le cas n°2 ou le cas n°3 et le cas n°1, au niveau de l'évapotranspiration de l'arbre (Figure 4.7a). Ainsi, le paramétrage identique des caractéristiques physiologiques permet de réduire les écarts de simulations entre les deux modèles. Cependant cette réduction des écarts ne s'observe pas la nuit. La raison pour laquelle le feuillage avec LASER/F émet un taux d'évapotranspiration très bas la nuit par rapport à RATP ne provient donc pas de la différence de paramétrage entre les deux modèles. Concernant les caractéristiques optiques du feuillage, dans cette étude, elles ne semblent pas autant influencer les simulations que les caractéristiques physiologiques.

Les différences de caractéristiques structurelles entre les modèles sont engendrées par l'emploi de maquettes 3D d'arbre de différents niveaux de détails (LOD). La maquette utilisée par RATP est la maquette de référence du tilleul argenté (LOD réf_(I)) alors que la maquette plus globale employée par LASER/F est équivalente à un LOD 0,5_(II) (sous-partie 4.2.2.1). L'impact du LOD de la maquette utilisée par les modèles, sur le taux d'évapotranspiration simulé, a déjà été étudié (sous-partie 4.2.3). Le taux d'évapotranspiration simulé avec RATP à partir du LOD 0,5_(II) est de 19 % supérieur à celui obtenu avec le LOD réf_(I). Or, l'inverse est observé avec LASER/F, qui sous-estime l'évapotranspiration en journée par rapport à RATP. Ce phénomène peut être dû à la différence de spatialisation du LAI entre LASER/F et RATP. D'autres différences de paramétrage entre les deux modèles pourraient expliquer les écarts de simulations (angles d'inclinaison des feuilles, résistance aérodynamique du feuillage, etc.). Cependant, une analyse de l'impact de ces différences sur les simulations n'a pas pu être menée dans cette étude, par manque de temps.

Au-delà du paramétrage des modèles pour la simulation du fonctionnement du tilleul argenté, la divergence de concept (équations résolues) entre les deux modèles est aussi à prendre en compte pour tenter d'expliquer les différences de résultats. Le taux d'évapotranspiration du feuillage est calculé par les modèles en fonction du déficit de pression partielle de vapeur d'eau, qui dépend de la température de surface du feuillage. C'est pourquoi nous avons analysé les températures de surface simulées par les deux modèles. Les écarts de températures de surface simulés entre les deux modèles (Figure 4.10) sont cohérents avec les écarts de taux d'évapotranspiration observés auparavant (Figure 4.8). Ainsi, une surestimation de la température de surface le matin de LASER/F, par rapport à RATP, engendre aussi une surestimation de l'évapotranspiration. De même, la nuit, la température de surface simulée par LASER/F est bien inférieure à celle simulée par RATP, mais aussi à la température de l'air. Dans ces conditions, le déficit de pression de vapeur d'eau est négatif et donc il ne peut pas y avoir d'évapotranspiration simulée, mais au contraire de la condensation. C'est la raison pour laquelle, la nuit, l'évapotranspiration simulée par LASER/F est nulle. Cependant, une telle différence de température n'est pas normale. Il semblerait que le problème provienne d'un mauvais calcul de LASER/F du bilan radiatif dans l'infrarouge relatif au feuillage. La différence d'atténuation du rayonnement dans le couvert entre les deux modèles semble ainsi expliquer ces résultats. Il serait intéressant, dans le futur, d'appliquer le processus de RATP, qui permet d'atténuer le rayonnement infrarouge à travers les voxels et au sein de la couronne, dans LASER/F, pour améliorer les simulations du modèle et essayer de résoudre ce problème.

En quantifiant les écarts entre les simulations du modèle LASER/F et du modèle RATP, nous avons pu mettre en évidence le fort potentiel du nouveau module de fonctionnement d'un arbre intégré dans LASER/F par rapport à RATP. La possibilité de paramétrer certaines

caractéristiques, telles que la régulation stomatique du feuillage au rayonnement incident suivant l'espèce considérée, pourrait permettre d'améliorer les simulations de LASER/F. Tout de même, il faudra par la suite résoudre l'erreur de simulation la nuit, de la température de surface, afin qu'avec ce modèle, les couronnes d'arbres ne réchauffent pas les surfaces alentour en émettant autant de rayonnement infrarouge.

4.3.2. Comparaison des simulations à une mesure de flux de sève

Les taux d'évapotranspiration du tilleul argenté simulés par le modèle RATP et le modèle LASER/F ont été comparés à une mesure de terrain permettant d'obtenir ce flux. L'objectif de cette démarche est d'évaluer la pertinence des simulations par rapport à des mesures. Dans cette étude, LASER/F a pris en compte le bilan d'eau dans le sol pour simuler l'évapotranspiration de l'arbre.

4.3.2.1. Matériels et méthodes

Les simulations obtenues du taux d'évapotranspiration de l'arbre ont été comparées à des mesures de terrain de flux de sève qui permettent de quantifier cette grandeur directement. Au cours de cette thèse, d'autres modèles numériques, tels que Bailey et al. (2016) et Liu et al. (2018) ont eu recours à ce type de comparaisons. Un thermocouple de thermistances (TDTP-30 – Cottbus) a été positionné à 1.30 m dans le tronc et mesure la différence de température entre les thermistances, qui va être reliée au débit de flux de sève et par conséquent à l'évapotranspiration de l'arbre (Ngao et al., 2015). L'incertitude de ces mesures a pu être calculée en réalisant une propagation des erreurs de mesures, en fonction de l'orientation du capteur : sud, est, nord, ouest et des erreurs de calculs.

Le même type d'analyses que dans l'étude présentée dans la sous-partie précédente, a été réalisé. Des régressions linéaires simples ont été établies entre les simulations et la mesure sur l'ensemble de la période de simulation (une centaine de jours répartis sur l'été 2014 et 2015). Pour deux journées types (nuageuse et ensoleillée) les dynamiques journalières simulées et mesurées ont été étudiées. La comparaison de ces régressions et de ces dynamiques est possible grâce au calcul de nombreuses grandeurs statistiques telles que le R^2 , la RMSE, la MAE, la MBE et le dr .

4.3.2.2. Résultats

➤ Tendances globale entre les simulations et la mesure

La Figure 4.11 présente les régressions linéaires simples établies entre les simulations du taux d'évapotranspiration du tilleul argenté et la mesure de flux de sève. La relation entre les simulations obtenues avec RATP et les mesures se trouve Figure 4.11a et avec LASER/F, Figure 4.11b.

D'après l'ensemble des grandeurs statistiques calculées, nous pouvons affirmer que les simulations avec RATP sont plus cohérentes par rapport à la mesure (R^2 de 0,83) que celles issues de LASER/F (R^2 de 0,68). Pour les deux modèles, des points aberrants sont observés lorsque le taux d'évapotranspiration simulé est très faible et le taux mesuré est très fort. Ces aberrations proviennent de la mesure. Lorsque les rayons du soleil atteignent les capteurs, ceux-ci chauffent beaucoup trop. En déterminant le gradient de température anormal, les

mesures peuvent être corrigées. Cette procédure est en cours de réalisation et donc dans cette analyse, ces écarts n'ont pas été corrigés et ne sont donc pas pris en compte.

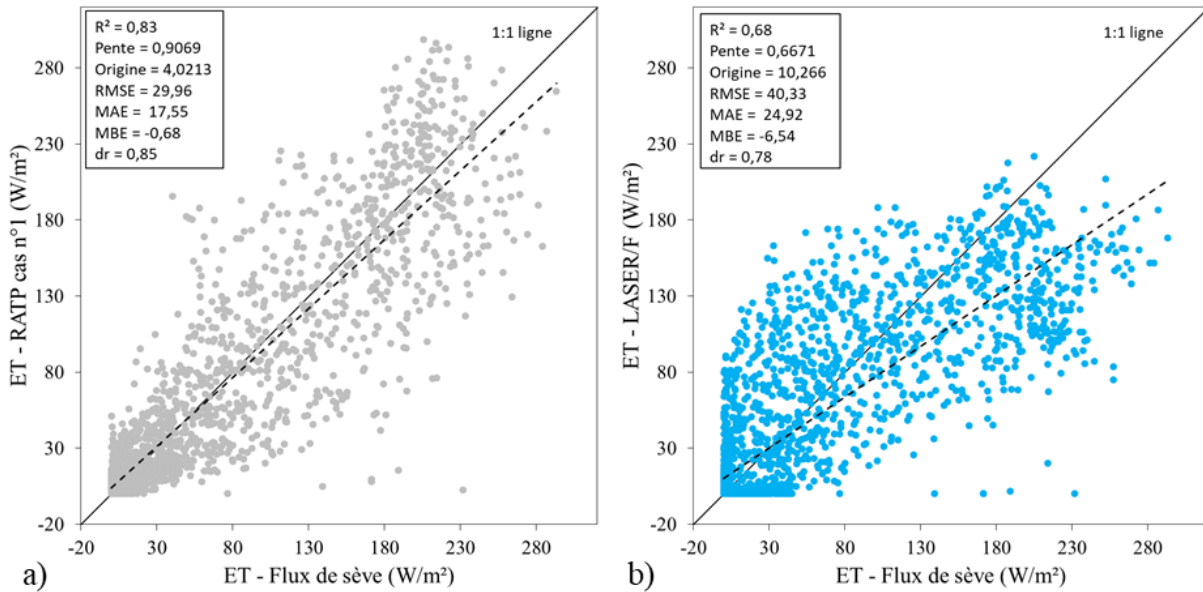


Figure 4.11 – Régressions linéaires simples et grandeurs statistiques calculées entre le taux d'évapotranspiration (ET – W/m²) mesuré par le débit de flux de sève et simulé par : a) le modèle RATP et b) le modèle LASER/F.

➤ **Dynamiques journalières entre les simulations et la mesure**

La Figure 4.12 illustre les dynamiques journalières du taux d'évapotranspiration mesuré (ligne discontinue noire), simulé par RATP (ligne continue noire) et simulé par LASER/F (ligne continue bleue). Ce graphique présente aussi le résultat de LASER/F lorsque le bilan hydrique du sol n'est pas pris en compte dans les simulations (LASER/F_SS – ligne pointillée bleue), comme pour RATP. Les barres d'erreurs grises représentent la précision de la mesure de flux de sève qui représente environ 10 % des mesures. Le Tableau 4.6 contient les grandeurs statistiques en lien avec ces dynamiques.

Lors de la journée ensoleillée, les simulations les plus cohérentes par rapport à la mesure sont celles de RATP (R² de 0,95 pour RATP et R² de 0,81 pour LASER/F et LASER/F_SS). Visuellement, LASER/F_SS est plus proche de la mesure que LASER/F. Pour la journée nuageuse, les écarts de simulation observés entre les différents cas par rapport à la mesure sont à peu près équivalents (R² de 0,71 pour RATP, R² de 0,69 pour LASER/F et R² de 0,70 pour LASER/F_SS). Pour la journée nuageuse, on constate une différence au niveau des pics entre les simulations et les mesures en début de journée. Le matin, la mesure du flux indique que le débit de flux de sève qui engendre l'évapotranspiration commence plus tard que ce qui est simulé. La nuit, aucune évapotranspiration n'est simulée par LASER/F, alors qu'avec RATP un flux en moyenne de 15,00 W/m² est observé. Concernant la mesure, le flux devient nul tardivement dans la nuit.

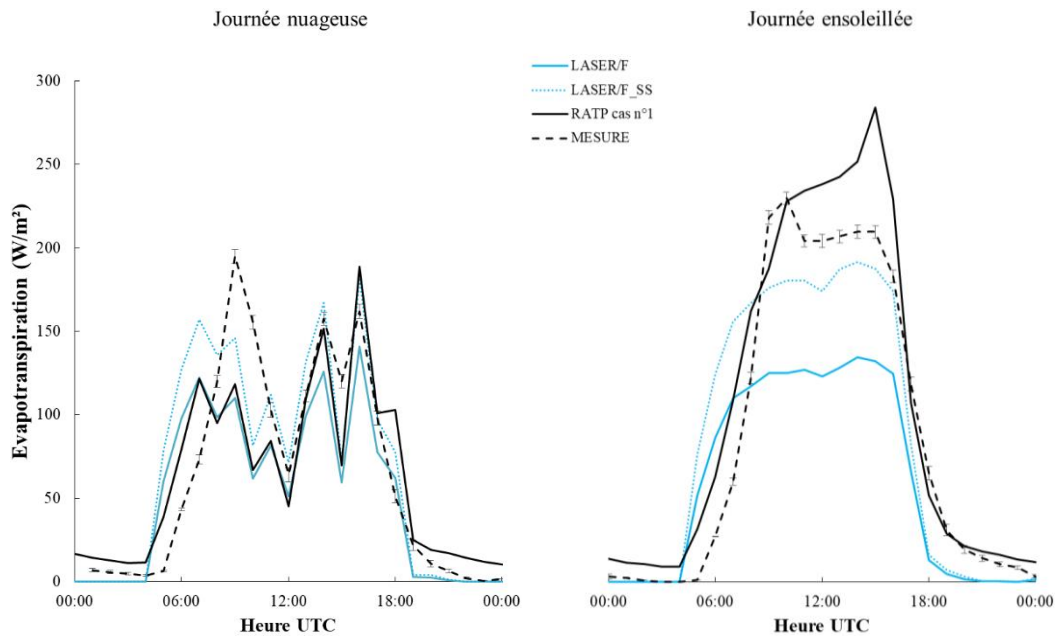


Figure 4.12 – Dynamiques journalières du taux d'évapotranspiration ($LE - W/m^2$) du tilleul argenté mesuré par les flux de sève (ligne pointillée) et simulé par RATP (ligne noire continue) et par LASER/F dans le cas où le bilan hydrique du sol est pris en compte (ligne bleue continue) ou pas (ligne bleue pointillée).

Grandeur	Journée nuageuse			Journée ensoleillée		
	RATP	LASER/F	LASER/F_SS	RATP	LASER/F	LASER/F_SS
R²	0,71	0,69	0,70	0,95	0,81	0,81
RMSE	33,17	36,41	36,48	29,44	53,62	39,84
MAE	23,57	25,58	24,26	22,57	41,55	28,78
MBE	-0,21	-11,52	4,78	17,64	-28,25	-2,71
dr	0,78	0,76	0,77	0,86	0,74	0,82

Tableau 4.6 – Grandeurs statistiques calculées à l'issue du calcul des régressions linéaires entre les simulations et la mesure, selon le type de journées.

4.3.2.3. Discussion

La mesure de flux de sève est une des meilleures méthodes à ce jour pour mesurer le taux d'évapotranspiration d'un arbre sans passer par une modélisation numérique. Bien que, certaines améliorations quant à son calcul restent encore à apporter, telles que la mesure de la zone du bois conductrice, cette mesure nous permet d'évaluer les capacités de simulation des deux modèles numériques. La nuit, la mesure de flux de sève est artificiellement ramenée à zéro, bien qu'en réalité la conductance stomatique soit à 5 %.

D'après les résultats obtenus à l'issue de cette comparaison entre mesure et simulation du taux d'évapotranspiration du tilleul argenté, il a été mis en évidence que les deux modèles simulent des taux cohérents avec la mesure (Figure 4.11). Le modèle RATP reste tout de même plus pertinent, que le modèle LASER/F, lors de cette comparaison. Les deux modèles sont plus cohérents par rapport à la mesure sur une journée ensoleillée que sur une journée nuageuse. Toutefois, ce n'est pas le cas lorsque LASER/F considère le bilan hydrique du sol, les simulations lors de la journée ensoleillée présentant des valeurs de flux beaucoup moins importantes que celles de la mesure.

D'après l'étude présentée dans la sous-partie 4.3.1.3, seule la conductance stomatique au rayonnement du tilleul argenté est prise en compte dans le modèle RATP. Or, lors d'une journée nuageuse, la régulation stomatique est pilotée par d'autres facteurs que le rayonnement. Ce constat peut ainsi expliquer les différences observées dans le cas d'un ciel couvert, et montre que connaître la régulation stomatique du feuillage à ces autres facteurs (température de l'air, humidité, etc.) permettrait certainement d'améliorer les résultats. Il faut noter également que le modèle LASER/F est le plus cohérent avec la mesure la nuit, puisque ses simulations sont nulles (Figure 4.12). Toutefois, ce résultat provient certainement d'une erreur de calcul de la température de surface des feuilles qu'il faut améliorer dans le modèle LASER/F, comme nous l'avons vu dans la sous-partie 4.3.1.3. Une autre différence de calcul entre les deux modèles est que contrairement à LASER/F, RATP ne prend pas en compte la réserve utile d'eau présente dans le sol. Pour autant, les simulations de RATP sont plus proches de la mesure que celles de LASER/F, est c'est d'autant plus le cas lorsque le bilan hydrique du sol est pris en compte dans LASER/F. Cela montre tout d'abord que l'horizon racinaire de l'arbre utilisé dans le modèle LASER/F ne représente peut-être pas la réalité, ou bien que le contenu en eau dans le sol dans le modèle n'est pas correctement estimé, ou bien que la régulation stomatique du feuillage à la réserve utile d'eau dans le sol est trop importante. Quant à RATP, il simule bien l'évapotranspiration de ce tilleul argenté car il n'est pas en état de stress hydrique, mais dans le cas de sol très sec, les simulations ne seront certainement plus réalistes. Une des constatations effectuées au cours de cette étude, qui n'a pas été présentée, est que le taux d'évapotranspiration simulé est plus important que la mesure en début d'été 2014 par rapport à la fin de l'été 2014. Dans l'analyse des écarts entre mesures et simulations, il faut aussi prendre en compte le fait que la couronne du tilleul argenté évolue au cours de l'été. Or, dans les simulations, la couronne est constante tout au long de la période de simulation. Ainsi, en début d'été, si le taux d'évapotranspiration simulé est plus important que la mesure, cela peut être en partie dû à une surestimation du volume de la couronne foliaire et de la surface foliaire totale dans les modèles.

Quel que soit le modèle utilisé, deux écarts entre les simulations et la mesure apparaissent systématiquement quel que soit le type de journées. Le premier écart consiste en un décalage le matin entre la mesure et les simulations. Avec la mesure, le flux d'évapotranspiration s'active environ une heure plus tard que les flux simulés. Ce décalage pourrait être causé par l'absence d'obstacles (bâtiments) au rayonnement solaire le matin dans les simulations contrairement aux conditions réelles. Toutefois, d'après un test que nous avons réalisé avec LASER/F en prenant en compte l'environnement alentour de l'arbre, nous avons vu que la présence de l'environnement le matin n'explique pas la totalité du décalage observé. Ce décalage doit donc provenir d'une autre cause, que nous pensons être la disposition des capteurs. En effet, les capteurs permettant de mesurer le débit de sève se situent à 1,3 m du sol au niveau du tronc. L'évapotranspiration simulée provient, quant à elle, directement du feuillage de l'arbre. Cette différence spatiale entre le lieu de mesure et le lieu de simulation est donc censée induire un décalage du taux d'évapotranspiration entre la mesure et la simulation (Granier & Bréda, 1996). En effet, le feuillage exerce tout d'abord une demande évaporative, ce qui va activer ensuite le débit de flux de sève dans les branches, puis enfin dans le tronc. Afin de mesurer ce décalage de débit de flux de sève entre les branches et le tronc du tilleul argenté, une expérience avec un capteur de flux de sève sur une branche et un sur le tronc est en cours de réalisation par l'INRA. Ainsi, le décalage d'environ une heure entre les simulations et la mesure peut être expliqué par ce phénomène. Le deuxième écart entre les simulations et la mesure concerne des différences de pics de taux d'évapotranspiration que l'on peut observer lors de journées nuageuses. Le forçage radiatif utilisé par les modèles numériques a été mesuré à environ un kilomètre du lieu où se situe le parc. La couverture nuageuse mesurée à un kilomètre du parc n'est donc pas exactement

identique à celle localisée au niveau du parc. Ainsi, il se peut qu'au niveau du parc aucun nuage ne soit présent alors qu'au point de mesure du forçage radiatif ce soit le contraire, ce qui va créer une chute du taux d'évapotranspiration.

Une étude de précision n'a pas été réalisée dans cette étude afin de déterminer si les simulations constituent une référence pour les mesures ou inversement. La précision effective des mesures de flux de sève a été calculée par nos collègues de l'INRA et a été illustrée dans la Figure 4.12 par les barres d'erreurs. Elle correspond à 10 % des valeurs mesurées sur le terrain. En revanche, la précision des simulations que ce soit celles de RATP ou de LASER/F n'a pas pu être déterminée car elle est trop complexe à calculer et demanderait beaucoup de temps de calcul. En effet, un calcul de propagation des erreurs prenant en compte à la fois la précision des mesures météorologiques, du paramétrage (structurel, optique et physiologique) et des calculs numériques est extrêmement complexe à mettre en œuvre. Beaucoup de variables sont corrélées l'une à l'autre dans ce calcul. De plus, les phénomènes en jeu sont variables dans le temps. C'est pour ces raisons, que dans cette étude, uniquement la sensibilité des résultats des simulations à la précision des données en entrée a été testée (sous-partie 4.3.1). L'impact de la précision des principales caractéristiques relatives à l'arbre étudié a été analysé, et nous a permis de discerner les éléments importants à considérer lorsque l'on souhaite simuler le fonctionnement d'un arbre avec RATP ou LASER/F.

4.3.3. Conclusion sur le potentiel des modèles à simuler le comportement d'un arbre

Cette partie présente une application des modèles numériques RATP et LASER/F sur un arbre urbain, le tilleul argenté. La grandeur simulée étudiée est le taux d'évapotranspiration émis par l'arbre. Les simulations du modèle RATP ont été considérées comme des « références » par rapport à celles du modèle LASER/F. En effet, le modèle RATP a déjà été validé auparavant sur différentes espèces d'arbres. Les deux modèles ont été appliqués sur une centaine de journées estivales très différentes (ensoleillées, nuageuses, pluvieuses). La relation établie entre les simulations provenant des deux modèles est de type polynomial. Il a été montré, à travers cette étude, que cette relation provient du paramétrage physiologique du feuillage qui diffère entre les deux modèles. Lorsque cette différence est ôtée, la relation devient linéaire, cependant des écarts subsistent. La différence de spatialisation du feuillage dans les maquettes des couronnes foliaires utilisées ou de calculs numériques entre les deux modèles sont certainement en cause. Par ailleurs, des erreurs ont pu être décelées grâce à cette étude, comme par exemple, un problème de température de surface du feuillage simulée par LASER/F.

En deuxième partie, les simulations des modèles ont été comparées à une mesure de terrain du débit de flux de sève au niveau du tronc. Même si ces grandeurs ne sont pas tout à fait comparables (ex : lieu de la mesure différent du lieu de la simulation) une cohérence a été démontrée entre les simulations et la mesure. Il a été mis en avant, dans cette étude, que le modèle RATP permet de se rapprocher davantage du débit de flux de sève mesuré que le modèle LASER/F. Une comparaison des simulations sur une journée ensoleillée et une journée nuageuse a permis de mettre en évidence l'importance de paramétrer correctement les fonctions de régulation stomatique au rayonnement. Par conséquent, il serait intéressant de créer une base de données contenant la réponse stomatique au rayonnement des cinq espèces les plus présentes en milieu urbain à Strasbourg, pour pouvoir réaliser des simulations numériques à l'échelle d'un quartier. Des travaux restent encore à réaliser pour connaître

l'importance des autres facteurs météorologiques influençant la régulation stomatique. Pour ce faire, une étude de sensibilité devrait être réalisée avec des données de forçage fictives.

De manière générale, la modélisation numérique nécessite de nombreuses données en entrée. Il n'a pas été possible de déterminer la sensibilité de RATP et LASER/F à la variation de l'ensemble de ces données. Mais le travail a déjà bien été amorcé grâce à cette étude. Tout au moins, il semble maintenant nécessaire de répéter les travaux déjà effectués sur d'autres structures et espèces d'arbres. Au vu des résultats, nous pouvons déjà imaginer que LASER/F parviendra à simuler le taux d'évapotranspiration d'arbres dont la spatialisation est quasi identique à celle du tilleul argentée, c'est-à-dire avec un volume vide de feuilles au centre, et une spatialisation concentrée principalement sur l'extérieur de la couronne foliaire. Dans la mesure où cette géométrie est souvent le résultat de la taille d'un arbre, nous pouvons émettre l'hypothèse que LASER/F arrivera certainement à reproduire le flux émanant d'arbres élagués. Ce constat est un bon point, vu l'importante part d'arbres élagués en milieu urbain. Néanmoins, dans le cas où les arbres présentent une spatialisation du feuillage moins homogène, il sera plus complexe de reproduire avec LASER/F la bonne spatialisation de leur feuillage à partir d'une maquette globale où le feuillage est spatialisé de manière homogène dans la couronne. Au vu de nos analyses, nous pouvons dire que dans ces cas-là, le minimum à représenter sera le volume de la couronne et sa surface projetée au sol pour espérer simuler un taux d'évapotranspiration réaliste.

4.4. Conclusion du Chapitre 4

Dans ce chapitre, les modèles numériques RATP et LASER/F ont été employés à reproduire le taux d'évapotranspiration simulé par le Georges' tree, un arbre en milieu urbain.

Dans un premier temps, les différences de paramétrage entre les deux modèles, pour réaliser cette simulation, ont été exposées. Les différences observées nous ont menés à entreprendre plusieurs analyses de sensibilité avec le modèle RATP, pour premièrement comprendre quels sont les impacts de chacune de ces différences indépendamment sur le flux simulé et par conséquent, pour en déduire les caractéristiques importantes à déterminer pour améliorer les résultats de LASER/F. D'après notre étude, ces caractéristiques sont : le volume et la surface projetée au sol de la couronne foliaire de l'arbre et la fonction de réponse physiologique au rayonnement.

Dans un second temps, les simulations fournies par les deux modèles ont été comparées à des mesures de flux de sève acquises sur le terrain. Il a été montré que les simulations obtenues avec RATP sont cohérentes au regard des mesures. Ainsi, à travers cette thèse, le modèle RATP a été évalué pour la première fois sur ses capacités à simuler l'évapotranspiration d'un arbre urbain. Dans le futur, à défaut de pouvoir réaliser des mesures de flux de sève sur l'ensemble des arbres retrouvés en milieu urbain, le modèle RATP pourra par conséquent servir d'outil de validation des simulations du fonctionnement des arbres obtenues avec le modèle LASER/F. Concernant les simulations du modèle LASER/F, elles sont aussi cohérentes avec la mesure, mais dans une moindre mesure que celles du modèle RATP. Ainsi, à l'issue du développement du module de végétation de LASER/F, la dernière version mise en place, pour l'instant, au cours de cette thèse, semble finalement permettre de simuler correctement l'évapotranspiration d'un tilleul argenté. Ce premier résultat est très encourageant et est destiné à encore s'améliorer, puisqu'il est issu d'une première validation

du module de végétation, qui n'est pas la validation finale, et que le développement du modèle LASER/F va continuer.

Cette thèse a permis d'évaluer le potentiel du nouveau module de végétation intégré dans le modèle microclimatique LASER/F à reproduire le phénomène d'évapotranspiration d'un tilleul argenté. Ce chapitre a donc répondu en partie au deuxième objectif fixé dans cette thèse qui était de simuler avec RATP et LASER/F le fonctionnement d'un arbre et au troisième objectif qui visait à garantir la qualité des résultats. La configuration actuelle des simulations représentait un cas d'étude simple avec un arbre isolé. Dans le chapitre suivant, le modèle LASER/F va être utilisé pour simuler le microclimat au sein d'un parc urbain contenant plusieurs arbres.

Chapitre 5. Extension des simulations à l'échelle d'un parc

5.1. Paramétrage de LASER/F à l'échelle d'un parc	100
5.1.1. Périodes de simulations	100
5.1.2. Maquette de la zone de simulation	102
5.1.2.1. Caractéristiques relatives à la géométrie 3D.....	103
5.1.2.2. Caractéristiques relatives à la typologie des objets.....	103
5.1.3. Complexité du calcul LASER/F.....	104
5.1.3.1. Fragmentation de la maquette	104
5.1.3.2. Calcul de radiosité.....	105
5.2. Comparaison des simulations de LASER/F à des mesures de terrain.....	106
5.2.1. Présentation des grandeurs comparées	107
5.2.2. Résultats et analyses des comparaisons.....	108
5.2.2.1. Comparaisons relatives aux arbres.....	108
5.2.2.2. Comparaisons relatives à l'ensemble du parc	115
5.2.3. Conclusion sur la comparaison des simulations à des mesures de terrain	120
5.3. Utilisation de LASER/F pour l'étude de l'impact de la végétation sur le climat urbain 122	
5.3.1. Interactions des arbres avec l'environnement	123
5.3.1.1. Impact de la végétation sur l'environnement urbain.....	124
5.3.1.2. Impact des arbres sur le confort thermique d'un être humain.....	125
5.3.2. Aménagement de villes « vertes ».....	126
5.3.3. Conclusion relative aux applications futures de LASER/F.....	127
5.4. Conclusion du Chapitre 5	127

Pour rappel, un des objectifs de cette thèse est l'intégration d'un nouveau module de fonctionnement de la végétation (arbres en priorité) dans le modèle microclimatique LASER/F et l'évaluation de la qualité de ses simulations. Le potentiel de ce module pour simuler l'évapotranspiration d'un arbre urbain isolé a été prouvé dans le chapitre précédent, au regard d'une mesure de terrain et par rapport au modèle écophysologique de référence, RATP.

Afin de simuler le rôle que peut jouer la végétation dans les microclimats urbains, il est nécessaire de passer à une zone de simulation plus grande que celle de l'arbre, prenant en

compte les bâtiments, les sols et la végétation. Pour ce faire, un modèle numérique doit considérer la totalité des surfaces présentes entre le sol et la hauteur moyenne des toits pour ensuite simuler l'ensemble des interactions entre les différentes surfaces urbaines qui génèrent le microclimat. Avec son nouveau module de végétation, le modèle LASER/F semble adéquat pour pouvoir réaliser ce type de simulations à l'échelle de la rue ou du quartier.

Ainsi, dans ce chapitre, les capacités du module de végétation de LASER/F à simuler les échanges entre la végétation et l'environnement urbain minéral d'un parc urbain, prenant en compte plusieurs arbres, sont évaluées. Dans un premier temps, le paramétrage nécessaire pour que LASER/F puisse simuler les interactions au sein d'une zone urbaine est exposé. Ensuite, les résultats fournis par le modèle sur plusieurs grandeurs simulées relatives à la végétation sont pour la première fois comparés à des mesures de terrain. Cette évaluation servira de base à de futurs développements et à l'amélioration du module de végétation. Enfin, les applications potentielles de LASER/F en vue d'étudier l'impact de la végétation sur l'environnement alentour seront introduites.

Les questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans ce chapitre sont :

- Comment paramétrer le modèle numérique LASER/F à l'échelle d'un parc ?
- Que valent les simulations du nouveau module de végétation intégré dans le modèle LASER/F au regard des mesures de terrain, à l'échelle d'un parc urbain ?
- Quelles sont les futures applications possibles, du modèle LASER/F, dans l'objectif d'aménagement de villes durables ?

5.1. Paramétrage de LASER/F à l'échelle d'un parc

Dans l'optique d'évaluer le nouveau module de végétation de LASER/F, nous cherchons à reproduire le microclimat au sein du jardin du Palais Universitaire. Plus particulièrement, nous nous concentrons sur un périmètre d'une trentaine de mètres autour du tilleul argenté (Georges' tree) étudié jusqu'à présent. Cette zone se caractérise par une importante variabilité tant en termes de type de surfaces que de positionnement des objets. Cette complexité rend difficile l'obtention de l'ensemble des informations nécessaires au paramétrage (géométrie 3D, propriétés des matériaux, etc.) de la scène de simulation. Dans cette partie, nous allons voir comment le modèle a été paramétré pour simuler le bilan d'énergie avec le maximum de réalisme.

5.1.1. Périodes de simulations

Les périodes de simulations sur lesquelles le modèle LASER/F a été appliqué ont été choisies selon trois critères principaux : premièrement, en fonction de la disponibilité des données météorologiques de forçage ; deuxièmement, en fonction de la disponibilité des mesures de terrain qui permettront l'évaluation des simulations ; troisièmement, en sélectionnant les journées de beau temps, puisque le rayonnement solaire est le paramètre qui a le plus d'influence sur le fonctionnement de la végétation.

Selon ces critères, trois périodes de simulations distinctes ont été retenues pour tester le modèle (Tableau 5.1 et pour plus de détails se référer à l'Annexe J, page 194). Ce sont principalement des périodes ensoleillées, mais avec des différences en termes d'humidité et de température de l'air notamment. La première période (P1), en juin, et la deuxième période (P2), en juillet, ont été choisies pour tester les capacités de LASER/F à réagir selon l'humidité du sol (humide ou sec). La réserve utile d'eau dans le sol n'ayant pu être mesurée, nous l'avons estimée au regard des conditions météorologiques. La troisième période (P3), en octobre, est aussi nécessaire, étant donné que certaines mesures de terrain, qui vont servir de comparaison, ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2015. Ainsi, les comparaisons présentées dans la suite, sont effectuées entre P1 et P2 ; et uniquement lorsqu'il n'y a pas de données disponibles sur ces deux périodes, les comparaisons sont réalisées avec P3.

Chacune de ces périodes est composée de quatre journées très ensoleillées avec peu de passages nuageux, ce qui présente plusieurs avantages : d'abord, les flux seront importants et les signaux seront clairs, puisque les contrastes seront maximums entre les éléments minéraux et végétaux par exemple ; ensuite, l'absence de nuages amène une certaine progressivité dans la simulation et évite de brusques variations de flux qui risqueraient de rendre plus difficile l'analyse des résultats.

DESCRIPTION	P1	P2	P3
Dates	15/06/14 au 19/06/14	16/07/14 au 19/07/14	29/09/15 au 02/10/15
Rayonnement solaire direct (W/m²)	377	405	329
Rayonnement solaire diffus (W/m²)	88	64	28
Rayonnement infrarouge atmosphérique (W/m²)	355	393	310
Humidité de l'air (%)	50 (min : 30)	51 (min : 19)	55 (min : 34)
Température de l'air (°C)	20 (max : 25)	26 (max : 34)	13 (max : 19)
Vitesse du vent (m/s)	1	1	1
Précipitations (mm)	0	0	0
Pression atmosphérique (Pa)	1017	1017	1026
Réserve utile d'eau dans le sol en surface	0 % (<i>début</i>) 0 % (<i>fin</i>)	77 % 3 %	52 % 36 %

Tableau 5.1 – Description des périodes de simulations sur lesquelles le modèle LASER/F a été appliqué à l'échelle du parc. Les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes de chaque grandeur sur la période. La réserve utile d'eau (RU) dans le sol en surface est indiquée à partir de la valeur simulée par le modèle LASER/F en début et fin de période.

La première période concerne les journées du 15 au 19 juin 2014 inclus. La température moyenne de l'air est de 20,0 °C avec une humidité relative moyenne de 50 %. Le sol est très sec au cours de cette période, avec une réserve utile (RU) de 0 % en surface et de 70 % en profondeur. P2 est composée des journées du 16 au 19 juillet 2014 inclus. Ce sont des journées ensoleillées et caniculaires avec une température moyenne de 26,0 °C (max de

34,0 °C) et une humidité moyenne de 51 % (min : 19 %). Le sol est humide au début de cette période de simulation (RU de 77 % en surface), puis il s'assèche progressivement en surface jusqu'à atteindre une réserve utile de 3 % en fin de période. P3 comprend les journées du 29 septembre 2015 au 2 octobre 2015 inclus. La température moyenne de l'air est de 13,0 °C, bien plus fraîche que pour les deux autres périodes de simulations. L'humidité moyenne de l'air est de 55 %. Le sol est humide en profondeur et plus sec en surface (entre 52 % et 36 %). En surface, le sol est donc moins sec que pour P1 et P2 (en fin de période).

5.1.2. Maquette de la zone de simulation

Pour réaliser nos simulations, deux maquettes du parc ont été testées (Figure 5.1). La première maquette (maquette du parc), présentée dans la Figure 5.1a, se concentre uniquement sur la zone d'intérêt, sur une trentaine de mètres autour du Georges' tree. La deuxième maquette (maquette du quartier), illustrée dans la Figure 5.1b, représente l'ensemble du quartier, soit une centaine de mètres autour du Georges' tree. La zone du parc est incluse dans la zone du quartier. Ces maquettes sont caractérisées de manières géométriques et sémantiques. Ces caractéristiques ont été soit mesurées, soit estimées (description dans les deux sous-parties suivantes).

La maquette du quartier a été initialement créée dans l'objectif de simuler le microclimat d'un quartier végétalisé avec LASER/F et de simuler la zone d'influence du parc sur ses alentours. Néanmoins, après avoir testé le modèle sur la maquette du quartier, le temps de calcul d'environ 3.5 h pour réaliser une simulation sur un quart d'heure a semblé déraisonnable. Ainsi, dans l'état actuel, il est nécessaire d'optimiser l'écriture du code de LASER/F si l'on souhaite un jour simuler le microclimat au sein de quartiers urbains végétalisés avec ce modèle. Ce constat nous a poussés à appliquer LASER/F sur une plus petite zone afin d'être en mesure de réaliser notre étude comparative et d'évaluer son potentiel. C'est la raison pour laquelle, la deuxième maquette, celle du parc (Figure 5.1a), a été utilisée.

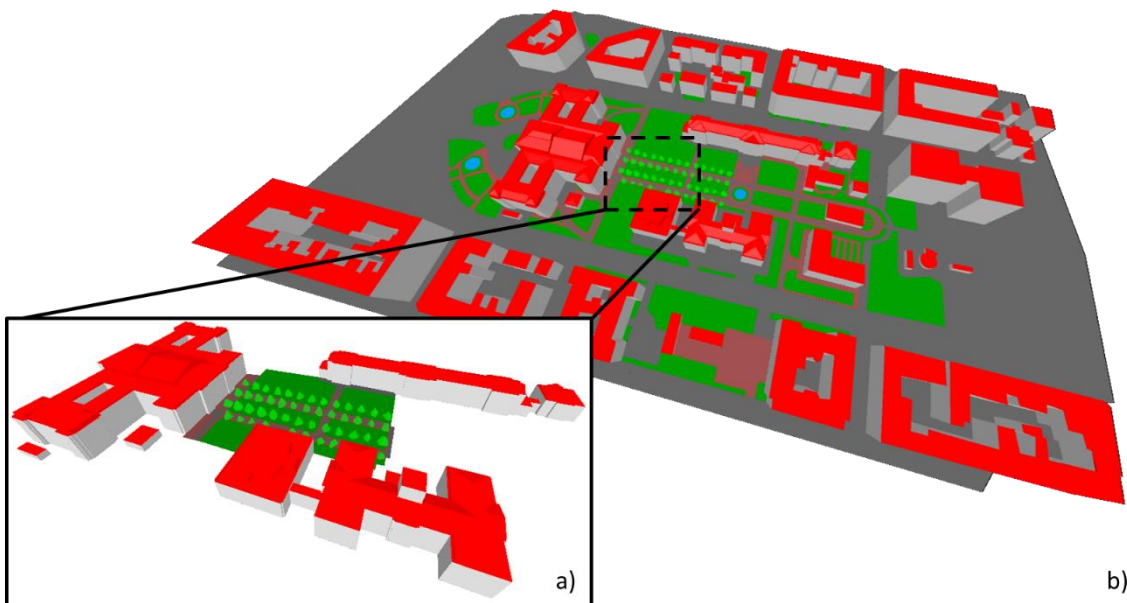


Figure 5.1 – Maquettes autour du jardin du Palais Universitaire testées dans LASER/F : a) maquette du parc et b) maquette du quartier.

5.1.2.1. Caractéristiques relatives à la géométrie 3D

La reconstruction de la maquette du parc a déjà été présentée dans le Chapitre 3, sous-partie 3.2.2. L'obtention de la géométrie de trois types d'objets différents (Figure 5.2) a été nécessaire : six bâtiments, trois types de sols différents (route, sol nu et sol enherbé) et 49 arbres (tilleuls argentés uniquement). La maquette est composée de 77,7 % de bâtiments (dont 46,5 % de murs), de 17,4 % de végétation basse et haute (dont 6,6 % de couronne d'arbres), de 2,8 % de sols nus et de 2,2 % de routes (bitume). La sémantique des objets présents dans la scène a été renseignée manuellement.

Suite à l'analyse des données LiDAR, nous avons constaté que d'une période de simulation à l'autre, les tilleuls argentés ont à peu près une couronne foliaire qui a atteint le même stade de croissance. C'est pourquoi nous avons émis l'hypothèse que les arbres ont un même volume et un même indice de surface foliaire pour ces différentes périodes. Ainsi, pour simplifier les calculs, chaque arbre est représenté avec la même maquette pour les trois périodes de simulation. Chaque couronne d'arbre est également composée de 20 faces afin de simplifier aussi leur géométrie par rapport aux 100 faces utilisées dans le Chapitre 4. La raison de cette simplification est expliquée dans la sous-partie 5.1.3.2 suivante. Par conséquent, la même maquette du parc est utilisée pour réaliser les simulations sur les trois périodes.

L'indice de surface foliaire est identique pour tous les arbres, avec un LAI de 10 (Chapitre 3, sous-partie 3.2.2.3). Ce LAI indique que le feuillage des arbres est très dense. Concernant l'indice de surface foliaire du sol enherbé, l'hypothèse d'un LAI de 1 a été faite, puisqu'il s'agit d'une pelouse tondue.

5.1.2.2. Caractéristiques relatives à la typologie des objets

Les caractéristiques typologiques de chaque surface présente dans la maquette sont à renseigner car elles influent directement sur l'inertie thermique des matériaux ou encore la valeur des flux simulés, comme par exemple, la quantité de rayonnement infrarouge émis. La Figure 5.2 illustre l'ensemble des caractéristiques paramétrées pour le fonctionnement du modèle LASER/F dans le parc.

Il faut souligner ici qu'il est rare de trouver des bases de données ou des archives contenant ce type d'informations pour des quartiers existants et anciens. Pour se procurer ces informations, la mesure de terrain directe ou indirecte semble une solution. L'extraction automatique du matériel et du revêtement constituant une face, à partir de données lasergrammétriques et/ou photogrammétriques, serait un point fort pour faciliter l'application de LASER/F sur divers quartiers. Pour nos simulations, ces informations ont été obtenues de la façon suivante :

- Les caractéristiques du sol naturel ont été établies d'après un carottage effectué dans le sol du parc pour déterminer sa nature globale. Il s'agit de limon sableux composé à 43 % de sables, 39 % de limons et 18 % d'argiles.
- Les propriétés des matériaux constituant les bâtiments ont été définies dans une étude annexe réalisée au sein du laboratoire ICube par [Roupioz et al. \(2018\)](#) en utilisant une caméra thermique.
- Les revêtements en surfaces et les matériaux en profondeur ont été hypothétiquement établis pour la plupart ([Kastendeuch et al., 2017](#)), ou estimés à partir de données provenant d'abaques disponibles dans la littérature ([Pielke Sr, 1984](#)) qui recensent les caractéristiques des matériaux.

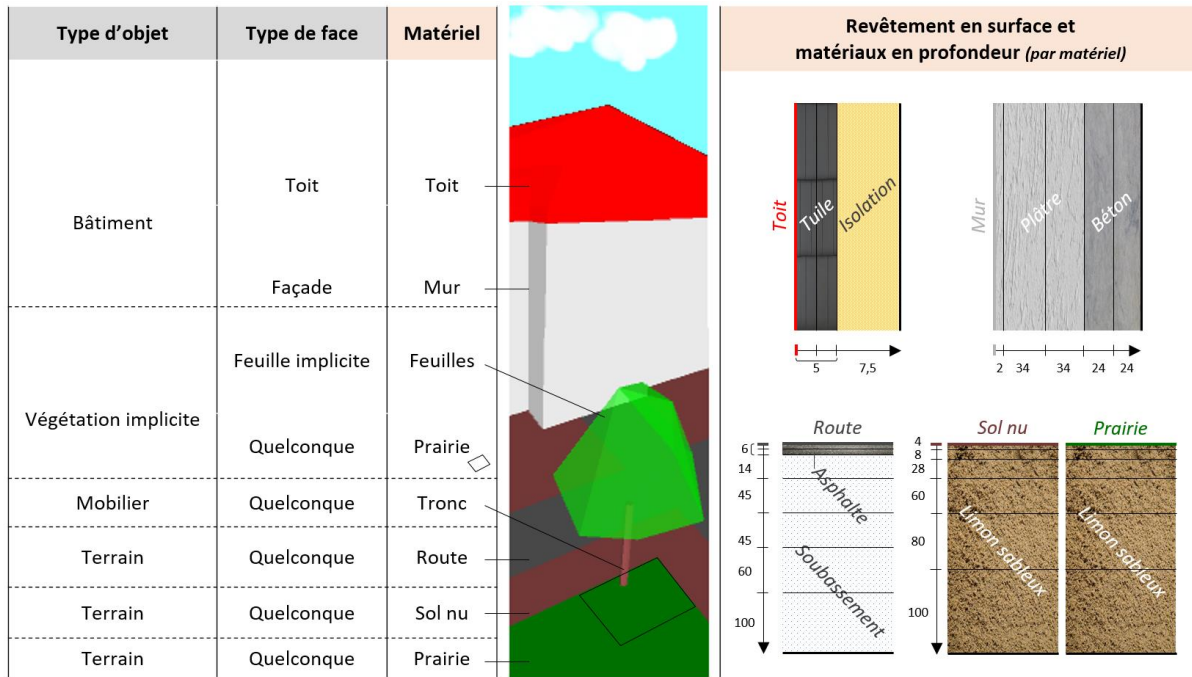


Figure 5.2 – Caractéristiques sémantiques et typologiques attribuées à chaque face de chaque objet.

5.1.3. Complexité du calcul LASER/F

La complexité du calcul LASER/F va bien au-delà des données utilisées en entrée du modèle. Elle se retrouve dans la façon dont on fragmente les faces en facettes, le pas de temps des simulations, l'activation ou non de certaines options de calcul. Chaque paramétrage permet d'augmenter la précision des résultats, mais au détriment du temps de calcul qui augmente lui aussi. Les choix effectués concernant le pas de temps, la fragmentation et le calcul de radiosité sont résumés dans le Tableau 5.2. Un pas de temps de 2 minutes et 30 secondes a été choisi pour garantir la stabilité de la simulation. Quant aux autres paramétrages, plus de détails sont donnés dans les paragraphes suivants.

PARTIES DE CALCULS LASER/F EFFECTUEES	
Fragmentation	0,1 m ² à 60 m ²
Pas de temps	2 min 30 secondes
Calcul de la radiosité	Oui

Tableau 5.2 – Choix réalisés quant à certaines parties de calculs du modèle LASER/F pour la simulation à l'échelle du parc.

5.1.3.1. Fragmentation de la maquette

La possibilité de fragmenter l'ensemble des faces (Figure 5.3) en une multitude de triangles élémentaires (facettes) permet d'augmenter le nombre de points (barycentre de chaque facette) où le bilan d'énergie est calculé par le modèle, et par conséquent d'améliorer l'estimation finale du calcul à l'échelle d'une maille de 250 m x 250 m. La fragmentation a été réalisée de manière progressive avec une superficie de 0,1 m² en partant du centre de la zone d'intérêt où sont localisés les capteurs météorologiques et une superficie maximale de 60 m² en périphérie de la zone de simulation (Figure 5.3c). Ainsi, plus un triangle est proche

du centre d'intérêt, plus sa superficie est petite. Cette fragmentation permet de concentrer les calculs sur la zone d'intérêt, tout en prenant en compte les objets éloignés.

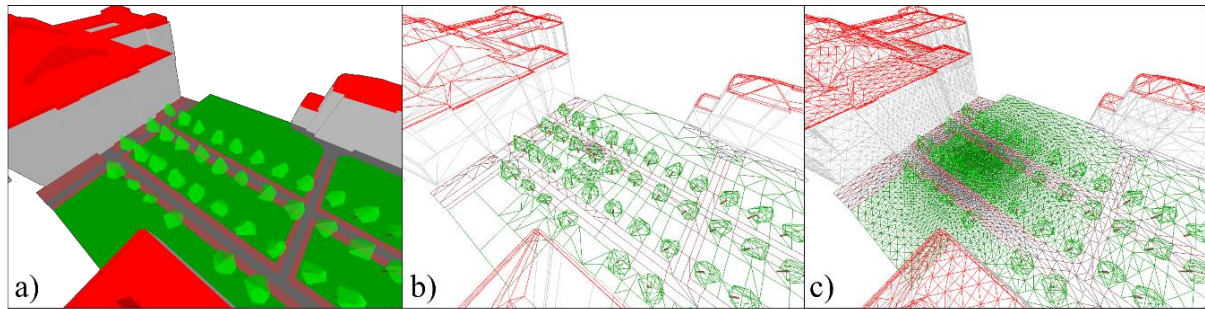


Figure 5.3 – Maquette du parc a) avec la visualisation des différents matériaux, b) la maquette sous forme filaire avant fragmentation et c) la maquette sous forme filaire après fragmentation, en partant du centre de la zone.

5.1.3.2. Calcul de radiosité

Lors d'une simulation, il est possible de calculer l'ensemble des composantes du bilan d'énergie de chaque facette de la scène, et notamment les échanges radiatifs qui s'opèrent entre ces facettes. Ces échanges sont obtenus grâce à un algorithme de radiosité progressive (Kastendeuch et al., 2017 ; Kastendeuch & Najjar, 2009) qui permet en principe d'obtenir d'excellents résultats. Malheureusement, cet algorithme implique un temps de calcul supplémentaire assez conséquent. Ainsi, la nécessité d'activer ou non ce calcul a été étudiée, car il est possible de remplacer cette procédure par une approche simplifiée, mais moins précise.

Le calcul de radiosité est utilisé dans LASER/F pour évaluer les échanges radiatifs qui se déroulent entre toutes les facettes constituant la maquette, c'est-à-dire les échanges par réflexion dans les longueurs d'onde du rayonnement solaire ainsi que les échanges par rayonnement infrarouge émis et réfléchi. En fonction de l'activation de cette option ou non, une facette ne recevra pas la même quantité de rayonnement incident en provenance des autres facettes. Ainsi par exemple, pour le rayonnement solaire :

- Lorsque la radiosité est activée, la quantité de rayonnement réfléchi par l'ensemble des facettes visibles est prise en compte. Elle dépend de l'albédo de chaque facette ainsi que des facteurs géométriques (superficie, angle de vue, distance).
- Lorsque la radiosité est désactivée, la quantité de rayonnement réfléchi incident est paramétrée à partir d'une valeur de réflexion moyenne obtenue sur l'ensemble des facettes de la maquette, qui est modulée par la part de terrain visible (TVF : *Terrain View Factor*).

Le même type de raisonnement s'applique pour le rayonnement infrarouge. Pour voir si l'activation de cette option induit de grandes différences au niveau des résultats, une analyse de sensibilité a été réalisée. La Figure 5.4 présente une partie des comparaisons obtenues. Cette analyse a révélé que désactiver le calcul de radiosité a un fort impact sur les échanges radiatifs au sein de la scène. En effet, lorsque l'on compare les simulations avec et sans radiosité dans la Figure 5.4a, nous pouvons voir que sans radiosité, le rayonnement net mesuré à 40 cm du sol enherbé est plus important la journée (écart maximal de 100,00 W/m²) et moins important en début de matinée et de soirée (écart maximal de -50,00 W/m²). De manière plus détaillée, la désactivation de la radiosité entraîne une diminution (écart maximal de -80,00 W/m²) du rayonnement solaire réfléchi par le sol enherbé le jour et une

augmentation (écart maximal de 20,00 W/m²) de ce rayonnement, en début de matinée et de soirée (Figure 5.4b). La somme du rayonnement infrarouge émis et réfléchi mesuré est quant à elle plus importante au cours de la journée (écart maximal de 40,00 W/m²) sans radiosité que avec radiosité.

Cet impact sur les échanges radiatifs a pour conséquence des répercussions sur le bilan d'énergie. Nous avons constaté que la température de surface, le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur sensible sont aussi plus importants avec la désactivation du calcul de radiosité. Quant à l'évapotranspiration émise par la végétation, l'impact n'est que secondaire.

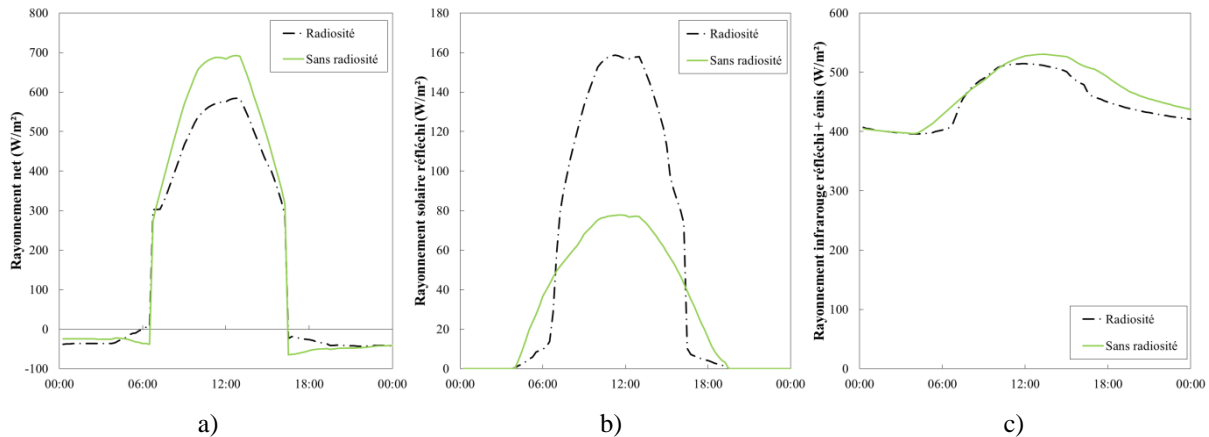


Figure 5.4 – Comparisons des simulations du modèle LASER/F avec l'activation du calcul de radiosité (trait pointillé noir) et avec la désactivation du calcul de radiosité (trait continu vert). Trois flux radiatifs sont présentés : a) le rayonnement net, b) le rayonnement solaire réfléchi et c) le rayonnement infrarouge (réfléchi + émis). Ces mesures proviennent d'un capteur implanté dans la maquette à 40 cm du sol enherbé.

Cette analyse nous a conduits à conserver l'option de radiosité progressive, mais au prix de temps de calcul plus importants. En conséquence, le nombre de faces, par arbre, dans la maquette, a été réduit, de 100 à 20 faces, pour tenter d'obtenir des temps de calculs plus raisonnables. Pour pallier ces concessions, il semblerait judicieux qu'un informaticien optimise le code de LASER/F en le récrivant dans un langage plus adapté.

5.2. Comparaison des simulations de LASER/F à des mesures de terrain

Le modèle LASER/F a été appliqué sur la zone du parc afin de simuler les interactions entre l'environnement urbain et la végétation, sur les trois périodes météorologiques considérées. Le but est de reproduire les effets bénéfiques de la végétation ( vapotranspiration, ombres portées, température de surface faible). Afin d'évaluer, pour la première fois, les simulations du module de végétation de LASER/F, nous avons procédé à une comparaison de certains résultats obtenus avec le modèle à des mesures de terrain. Dans cette étude, les mesures ne sont pas considérées comme des vérités absolues, étant donné que nous ne connaissons pour chaque capteur, que la précision théorique annoncée par le constructeur et non la précision effective sur le terrain (précisions théoriques indiquées dans l'Annexe C, page 168). Pour cette raison, nous n'employons pas le terme de « validation » des simulations du modèle LASER/F, mais plutôt celui de « comparaison ». Les mesures que nous allons utiliser ont été obtenues lors de plusieurs campagnes expérimentales réalisées dans le parc (Chapitre 2).

5.2.1. Présentation des grandeurs comparées

Les comparaisons entre simulations et mesures de terrain ont été réalisées à partir de mesures issues de plusieurs capteurs. La Figure 5.5 permet de localiser la position des différents capteurs dans la zone du parc. Le Tableau 5.3 donne une liste exhaustive de l'ensemble des grandeurs comparées. Il faut noter que pour pouvoir réaliser ces comparaisons, des capteurs fictifs ont été introduits dans la simulation exactement aux mêmes endroits que les capteurs réels. Les nuages de points géoréférencés, obtenus avec le scanner laser terrestre, nous ont permis d'identifier la position exacte de tous les capteurs. Pour plus de détails sur les mesures de terrain utilisées et l'intégration des capteurs fictifs dans LASER/F, se référer à l'Annexe C, page 168.

Les comparaisons simulations / mesures ont été effectuées sur trois aspects concernant : (i) le sol enherbé ; (ii) les arbres et (iii) l'ensemble du parc (Figure 5.5 et Tableau 5.3).

VOLET	GRANDEUR COMPAREE	CAPTEUR ASSOCIE SUR LE TERRAIN
SOL ENHERBE	Température de surface	Bilan-mètre à quatre composantes à 40 cm et radio-thermomètre à 4 m
	Rayonnement net	Bilan-mètre à quatre composantes à 40 cm
	Températures dans le sol	Profil de sept thermistances mesurant la température dans le sol
	Flux de chaleur dans le sol	Flux-mètre à 8 cm dans le sol
	Evapotranspiration	Chambre à transpiration
ARBRE	Température de surface	Radio-thermomètre proche d'une couronne d'arbre
	Evapotranspiration	Flux de sève avec des thermocouples à 1,3 m sur six troncs
PARC	Rayonnement montant	Pyranomètre et pyrgéomètre à 17 m sur un mat
	Flux de chaleur sensible	Anémomètre sonique et analyseur de gaz à 17 m
	Flux de chaleur latente	Anémomètre sonique et analyseur de gaz à 17 m
	Indice de confort thermique	Globe gris et globe noir au milieu de la scène à 2 m

Tableau 5.3 – Grandeurs simulées par LASER/F comparées aux grandeurs mesurées sur le terrain et les capteurs utilisés pour obtenir ces mesures.

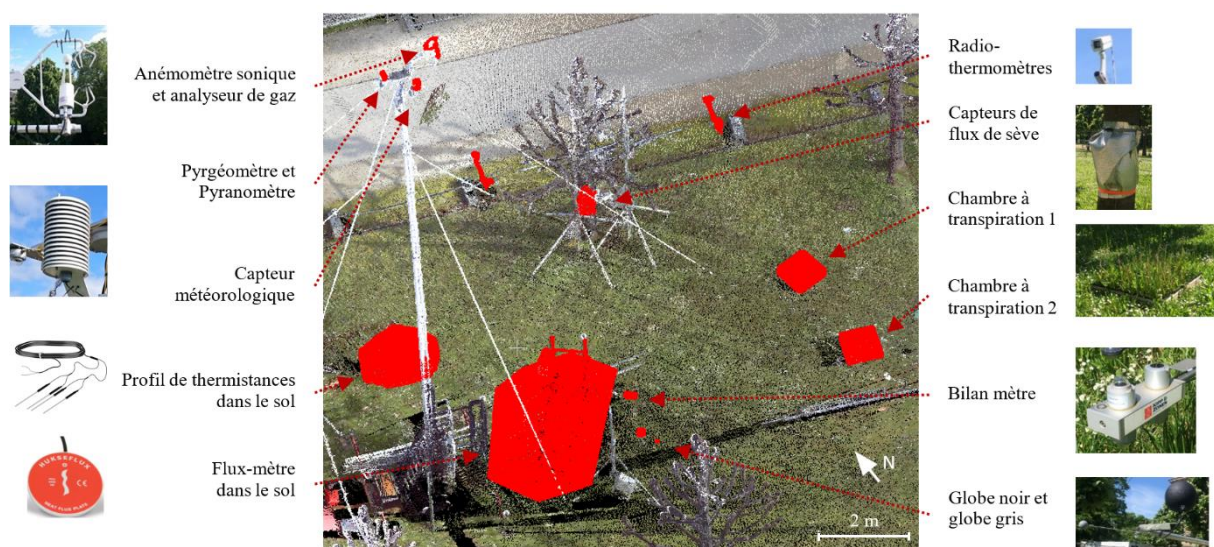


Figure 5.5 – Illustration des capteurs utilisés pour obtenir les mesures de terrain comparatives et leur localisation dans la zone d'étude. La position des capteurs est illustrée en rouge dans un nuage de points SLT.

Parmi l'ensemble de ces comparaisons, seules celles relatives à la végétation et plus particulièrement aux arbres, sont présentées dans la partie suivante. L'objectif principal de cette thèse à travers l'utilisation de LASER/F est d'évaluer la capacité du nouveau module de fonctionnement de la végétation à simuler l'évapotranspiration de la végétation. C'est la raison pour laquelle, les comparaisons liées à cette grandeur sont mises en avant dans cette étude. Les comparaisons relatives aux autres flux du bilan d'énergie sont abordées dans une moindre mesure. Les comparaisons liées au sol enherbé sont présentées en Annexe K.1, page 201. Enfin, les comparaisons relatives à l'ensemble du parc, plus particulièrement à une zone englobant plusieurs arbres et les sols, sont présentées à la suite des comparaisons qui concernent les arbres.

5.2.2. Résultats et analyses des comparaisons

Au cours de cette thèse, les résultats produits par différentes versions successives (une dizaine, dont deux majeures) du module de végétation de LASER/F ont été comparés, chaque fois, aux mesures de terrain. Les analyses qui en sont ressorties ont permis d'avancer dans le développement du modèle. Dans ce chapitre, nous présentons les comparaisons relatives à la dernière version de LASER/F datant de mai 2018. Les résultats obtenus avec la version antérieure à celle utilisée dans ce chapitre, ont fait l'objet d'un article et ont été présentés lors de la conférence de l'Association Internationale de Climatologie (Bournez et al., 2018).

Pour analyser les comparaisons entre les simulations et les mesures, une étude statistique a été menée avec le logiciel Excel (Microsoft). Des régressions linéaires simples ont été calculées afin d'étudier la cohérence entre les simulations et les mesures. Les régressions ont été comparées à l'aide des grandeurs statistiques R^2 , RMSE, MAE, MBE et dr (voir les formules dans l'Annexe H, page 191). Pour l'analyse globale des résultats, nous nous baserons sur le coefficient de détermination R^2 qui indique s'il y a une relation entre les grandeurs simulées et mesurées. À cette analyse statistique globale vient s'ajouter une analyse visuelle des dynamiques journalières des grandeurs simulées et mesurées. Bien que le pas de temps des simulations est de 2 minutes et 30 secondes, les analyses ont été réalisées uniquement par heure, afin d'effectuer des comparaisons uniquement aux pas de temps pour lesquels le forçage météorologique est appliqué.

5.2.2.1. Comparaisons relatives aux arbres

Les comparaisons relatives aux arbres ont été réalisées sur six tilleuls argentés, lors de P1 et P2, pour l'évapotranspiration, et sur le Georges' tree, lors de P3, pour la température de surface du feuillage. Les grandeurs statistiques représentatives des résultats obtenus sont détaillées dans le Tableau 5.4.

Grandeur	ET	TS
R^2	0,65	0,69
RMSE	100,46	4,2
MBE	-54,95	-0,8
MAE	59,43	3,7
dr	0,70	0,06

Tableau 5.4 – Grandeurs statistiques calculées pour la comparaison relative à l'évapotranspiration (ET) des six tilleuls argentés sur l'ensemble des périodes de simulations (P1, P2 et P3) et relative à la température de surface (TS) de deux zones de feuillage du Georges' tree sur la période 3.

➤ Flux d'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) simulée par LASER/F pour les arbres a été comparée avec les mesures de flux de sève (Figure 5.6). Ces comparaisons ont été effectuées sur six tilleuls argentés. Les dynamiques journalières visibles dans la Figure 5.6 représentent la moyenne des flux en prenant en compte les six arbres et l'écart-type par rapport à cette moyenne. Nous avons choisi de représenter la moyenne des flux pour simplifier l'étude comparative.

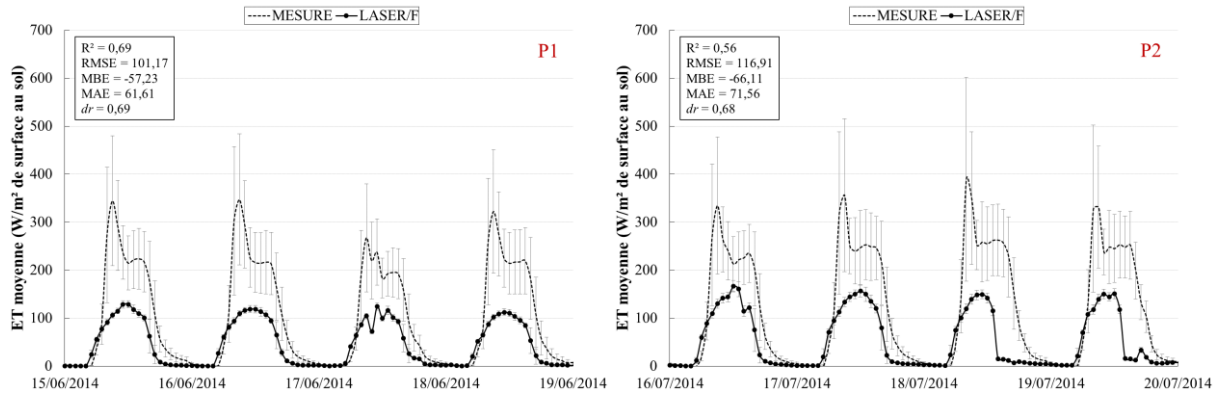


Figure 5.6 – Dynamiques journalières de l'évapotranspiration (ET) moyenne sur les six tilleuls argentés simulée et mesurée, avec les écart-types associés, pour les périodes P1 et P2.

Analyse de la mesure

L'analyse des mesures de l'évapotranspiration soulève deux remarques :

- Des pics matinaux de l'évapotranspiration sont observés chaque matin pendant une heure environ. Comme il a été expliqué dans la sous-partie 4.3.2.2 du Chapitre 4, page 91, ils sont dus à un biais instrumental qui est en train d'être examiné et corrigé. Il ne faudra donc pas faire cas de ces pics dans les analyses.
- La variabilité de l'évapotranspiration des six arbres est beaucoup plus importante avec la mesure qu'avec la simulation.
- L'évapotranspiration mesurée entre les six arbres est très variable, contrairement à la simulation. En effet, entre 8 h et 17 h, l'écart type des six mesures est de 72,91 W/m², alors que l'écart type des six simulations est de 10,64 W/m².

La raison de l'importante variabilité des mesures a été tout d'abord cherchée à travers la géométrie des six tilleuls argentés. Or, aucune relation n'a été trouvée entre le PEA de chaque arbre et le taux d'évapotranspiration simulé. De même, le diamètre réel du tronc de chaque arbre étant quasi identique, cela ne peut pas expliquer cette variabilité. L'analyse de la spatialisaiton des arbres dans l'environnement urbain, par rapport à l'environnement alentour, n'a pas donné de conclusion. La question de la provenance de la variabilité des mesures reste à ce jour en suspens.

Comparaison entre la période où le sol est sec et celle où le sol est humide

Concernant la comparaison des simulations avec les mesures sur l'ensemble des périodes de simulations, une bonne corrélation a été trouvée entre les deux avec un R² de 0,65. Lorsque les périodes sont analysées séparément, la période où le sol est sec (P1) se distingue statistiquement légèrement de la période où le sol est humide (P2) avec un R² de 0,69 pour P1 et de 0,56 pour P2. L'analyse des dynamiques journalières entre les deux périodes permet de comprendre l'origine de cette différence.

- Lors des deux dernières journées de P2, la simulation chute brutalement en fin de journée par rapport à la mesure. Au vu des conditions météorologiques (Annexe J,

page 194), cette chute pourrait être attribuée à l'humidité et à la température de l'air. En effet, elles atteignent toutes deux leur valeur extrême (humidité de 19 % et température de 34,0 °C) à la fin de la journée du 18 juillet 2014. La résistance stomatique à l'humidité et à la température de l'air est donc peut-être trop importante. Ce point mérite d'être approfondi.

- Néanmoins, le changement de condition météorologique qui semble expliquer le plus cette diminution du taux d'évapotranspiration est la diminution du rayonnement direct et l'augmentation du rayonnement diffus en ces fins de journées. Cette corrélation entre les deux phénomènes (météorologique et simulation), montre que la conductance stomatique du feuillage des arbres est trop sensible aux variations du rayonnement direct. Ce constat rejoint celui auquel nous étions arrivés à l'issue de l'étude à l'échelle de l'arbre (Chapitre 4). Ainsi, dans le futur, il faudrait connaître la conductance stomatique du feuillage étudié, liée au rayonnement.

Ensuite, il semblerait que le modèle réagisse correctement aux différences d'humidité dans le sol, entre P1 et P2. En effet, lorsque les dynamiques journalières moyennes de l'évapotranspiration simulée sont comparées aux mesures, les écarts entre P1 et P2 sont globalement cohérents. De plus, ces graphiques montrent que les tilleuls argentés ne sont pas stressés par les conditions hydriques, que ce soit avec la mesure ou la simulation. Effectivement, lorsque le sol s'assèche en surface lors de P2, une diminution très faible de l'évapotranspiration simulée est remarquée en parallèle. Ainsi, ces constats amènent à supposer que l'horizon racinaire dans le modèle et que la régulation stomatique de l'arbre, liée à la réserve utile d'eau dans le sol, correspondent à la réalité.

Comparaison des dynamiques journalières entre la simulation et la mesure

Un dernier point important à étudier est la différence de comportement entre les simulations et les mesures entre le jour et la nuit. Globalement, le modèle sous-estime l'évapotranspiration par rapport à la mesure, avec une MBE de -54,95 W/m² et une RMSE de 100,46 W/m². De manière plus détaillée, le flux simulé le matin (de 4 h à 7 h) a tendance à être surestimé de 5,90 W/m² en moyenne +/- 16,06 W/m² par le modèle, et sous-estimé de 94,01 W/m² en moyenne +/- 67,11 W/m² au cours de la journée (de 7 h à 20 h). La nuit, les taux simulés et mesurés sont nuls. Les paragraphes suivants présentent des explications sur les raisons de ces résultats.

Interprétation des résultats

La comparaison de l'évapotranspiration d'un arbre simulée par LASER/F à des mesures de flux de sève a déjà été réalisée sur le Georges' tree uniquement (sans l'environnement urbain autour), sur une centaine de journées (Chapitre 4, sous-partie 4.3.2, page 91). Les résultats obtenus avec LASER/F à l'échelle d'un arbre (Etude 1 – E1) étaient meilleurs que ceux présentés, ici, à l'échelle du parc (Etude 2 – E2). Il a été montré que LASER/F est capable de simuler correctement la dynamique de l'évapotranspiration de cet arbre (R² de 0,68). Il a aussi été montré que le potentiel du modèle LASER/F se rapprocherait des capacités du modèle RATP (R² de 0,83) si la conductance stomatique du feuillage était paramétrée en fonction de l'espèce d'arbres étudiée. Dans l'étude actuelle (E2), le taux d'évapotranspiration simulé, de 4 h à 20 h, est en moyenne de -51,25 W/m² +/- 35,74 W/m² inférieur, par rapport à celui de E1.

Pour comprendre davantage les différences de résultats entre les deux études (E2 et E1), une analyse comparative a été réalisée sur l'évapotranspiration du Georges' tree simulée par LASER/F et mesurée, pour la journée du 17 juillet 2014 (Figure 5.7). La Figure 5.7 présente le taux d'évapotranspiration simulé du Georges' tree, lors de : i) E1, lorsque seul cet arbre est

pris en compte, avec une enveloppe constituée de 100 faces, ii) E2, lorsque le quartier est pris en compte, avec 20 faces par arbre et iii) E3, lorsque seul le Georges' tree est pris en compte, mais avec une enveloppe comprenant 20 faces. La comparaison entre E2 et E3, soulève deux constats relatifs à l'impact de l'insertion de l'environnement urbain sur l'évapotranspiration du Georges' tree, simulée avec LASER/F :

- Tout d'abord, nous pouvons clairement voir l'impact des objets alentours (arbres, bâtiment du Palais Universitaire) sur l'évapotranspiration de l'arbre, le matin et le soir. L'intégration de l'environnement urbain retarde en effet l'évapotranspiration de l'arbre le matin, avec un écart maximal de $34,29 \text{ W/m}^2$, et l'écourte le soir, avec un écart maximal de $81,33 \text{ W/m}^2$. L'ombre du bâtiment du Palais Universitaire engendre une diminution brutale du flux simulé. Ainsi, en E2, le moment où l'évapotranspiration de l'arbre débute le matin est plus réaliste par rapport aux mesures, mais un décalage est toujours perceptible. Ce décalage observé le matin, a été expliqué, dans E1, par l'inertie de la mesure de flux de sève par rapport à la simulation. Quant au flux le soir, la dynamique de la simulation est plus cohérente par rapport à la mesure que lorsque les bâtiments n'étaient pas pris en compte (E1 et E3).
- Ensuite, le jour, l'insertion de l'environnement urbain n'a presque aucun effet sur la quantité de flux simulé par cet arbre. Seul un écart de $1,77 \text{ W/m}^2$ +/- $6,10 \text{ W/m}^2$ de 7 h à 17 h est observé, soit $634,43 \text{ W/m}^2$ de flux simulé en moins sur la somme journalière du taux d'évapotranspiration lors de E2 par rapport à E1. Cet impact minime est dû à la localisation de l'arbre, qui est trop éloigné des bâtiments pour en ressentir l'effet.

Ainsi, l'insertion de l'environnement urbain dans E2, n'explique pas la diminution globale, sur la journée, du taux d'évapotranspiration, observée entre E1 et E2. Par conséquent, l'écart observé dans E2 est simplement dû à une différence de paramétrage entre les deux études, retrouvée entre E1 et E3. Nous allons maintenant étudier ce point plus en détail.

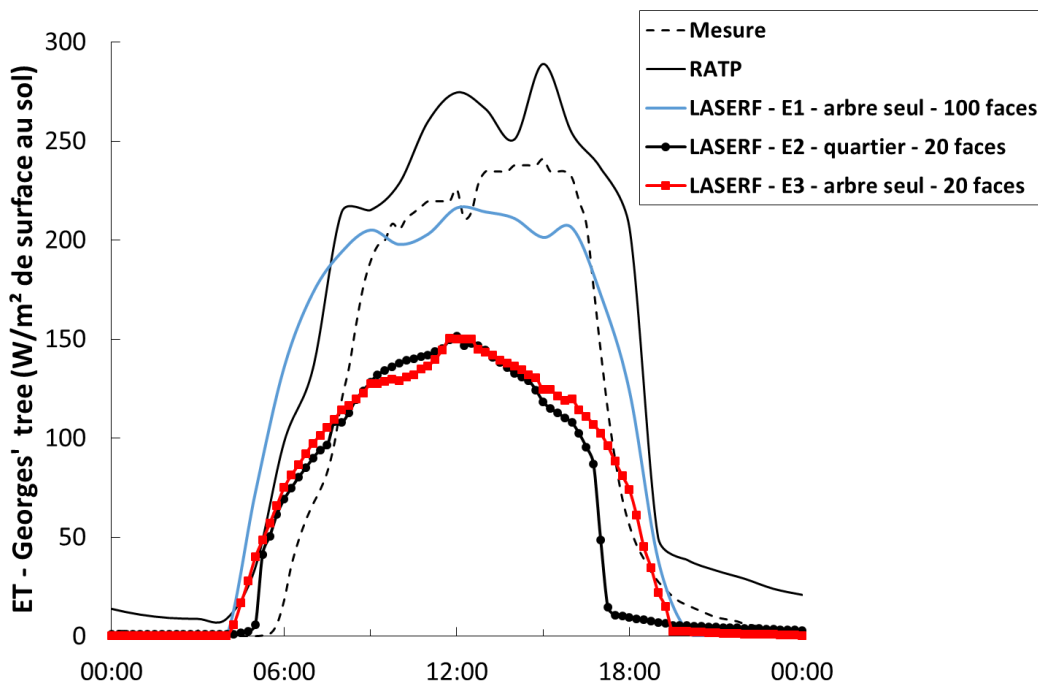


Figure 5.7 – Dynamique journalière du taux d'évapotranspiration du Georges' tree, lors de la journée du 17 juillet 2014 : mesuré (en pointillé), simulé par RATP (en continu noir) et simulé par LASER/F dans le cas : i) E1 – de l'étude à l'échelle de l'arbre avec 100 faces constituant la couronne (en continu bleu), ii) E2 – de l'étude à l'échelle du quartier avec 20 faces (en noir, avec marqueurs ronds) et iii) E3 – de l'étude à l'échelle de l'arbre avec 20 faces (en rouge, avec marqueurs carrés).

Etude	PEA (m ²)	Volume (m ³)	TLA (m ²)	LAI (m ² /m ²)	LAD (m ² /m ³)	Nombre de faces
E1	23,7	60,4 (101,4 total)	265,5	11,2	4,4	100
E2	20,94	30,25 (50,42 total)	209,44	10	6,9	20

Tableau 5.5 – Différences de caractéristiques relatives à la maquette 3D de la couronne du Georges' tree entre l'étude 1 (E1 – à l'échelle de l'arbre - Chapitre 4) et l'étude 2 (E2 – à l'échelle du parc – Chapitre 5). Les caractéristiques sont la surface de l'enveloppe projetée au sol (PEA), le volume, la surface foliaire totale (TLA), l'indice de surface foliaire (LAI), la densité foliaire (LAD) et le nombre de faces par couronne.

Le Tableau 5.5 présente les différences de caractéristiques relatives à la couronne du Georges' tree entre E1 et E2. Les caractéristiques sont plus faibles pour E2 que pour E1, avec -2,76 m² de PEA, -30,15 m³ de Volume, -56,06 m² de TLA et par conséquent -1,2 de LAI et +2,5 de LAD. Ces différences sont causées par le cumul de trois changements relatifs à la reconstruction de la couronne du Georges' tree :

- Le LAI de l'arbre a été modifié de manière à correspondre davantage à l'état de maturité du feuillage représentatif des trois périodes de simulations étudiées dans E2. En effet, lorsque nous avons commencé l'étude E1, nous avons utilisé la seule maquette disponible, c'est-à-dire une maquette représentative de l'état de maturité du 24/10/2013. En revanche, pour E2 nous avons considéré qu'une maquette représentative de l'état de maturité du 03/07/2013 était plus cohérente avec les périodes de simulations étudiées. Ainsi, il est normal d'observer une diminution du LAI entre E1 et E2.
- L'enveloppe 3D de la couronne foliaire a été modifiée pour les mêmes raisons que précédemment. Néanmoins, nous souhaitons obtenir ces maquettes à partir d'une seule campagne d'acquisition SLT. Une seule date d'acquisition correspondait à ces critères. C'est la raison pour laquelle, l'état de maturité du 27/06/2016 a été pris en compte dans E2. Ainsi, il est normal d'observer une diminution du volume et de la PEA entre E1 et E2.
- Enfin, pour que LASER/F puisse fonctionner à l'échelle du quartier, la réduction du nombre de faces par arbre s'est avérée primordiale. La couronne, qui était composée de 100 faces, en contient maintenant 20. Pour simplifier le processus de reconstruction 3D, cette simplification a toujours été effectuée à partir du nuage de points de chaque arbre. Par conséquent, le volume et la PEA de la couronne diminuent forcément entre E1 et E2. Nous nous sommes rendus compte trop tard que la méthode adoptée pour simplifier le nombre de faces dans la couronne n'était sans doute pas la meilleure. Comme nous allons le voir dans la suite, cette simplification pourrait être réalisée en gardant le PEA ou le volume de l'arbre initial, au détriment de la forme de la couronne.

Les différences de caractéristiques entre E1 et E2, retrouvées sur l'ensemble des arbres présents dans la scène, engendrent logiquement une diminution du taux d'évapotranspiration émis par ces arbres. Ces résultats montrent l'importance du paramétrage lié à la géométrie de la couronne foliaire des arbres. Ainsi, pour réaliser des simulations sur la totalité d'une période d'été, la représentation de la croissance de la couronne foliaire sera très importante, au moins au début et à la fin de la période. Actuellement, le modèle LASER/F peut utiliser un LAI qui varie au cours du temps. En revanche, le volume de la couronne ne peut varier dans une même simulation ; il en va de même pour le modèle RATP.

Amélioration de la géométrie des arbres dans LASER/F

Au vu des conclusions précédentes, un travail a été entrepris sur l'optimisation de la maquette 3D de l'enveloppe de la couronne foliaire de manière à simuler correctement les flux tout en simplifiant au maximum la maquette utilisée. Pour ce faire, une étude de sensibilité du taux d'évapotranspiration d'un arbre simulé par LASER/F en fonction de la variabilité de nombreux critères géométriques, liés à la couronne, a été réalisée (se référer à l'Annexe L, page 211) :

- Cette étude a montré que la diminution du volume et de la PEA de la couronne foliaire, en même temps, engendre une très forte diminution de l'évapotranspiration. Ce constat rejoint celui établi dans le Chapitre 4, sous-partie 4.2. Il avait été mis en évidence que la PEA et le volume sont les grandeurs les plus importantes à déterminer pour simuler correctement l'évapotranspiration.
- Cette analyse de sensibilité nous a montré aussi que l'augmentation du volume sans changement de la PEA aurait un plus faible impact sur le flux. C'est pourquoi, nous émettons l'hypothèse qu'une détermination moins précise de la hauteur de la couronne plutôt que de son diamètre aurait moins d'impact sur le flux simulé.
- Enfin, dans le cas du tilleul argenté taillé en forme de tête de chat, cette étude a montré qu'une représentation sphérique ou cubique de la couronne pourrait s'avérer une solution pour simplifier la maquette 3D tout en préservant la quantité de flux simulé.

L'ensemble de cette étude de sensibilité a été réalisé avec des versions antérieures de LASER/F. Les conclusions effectuées nécessitent donc d'être vérifiées. Par la suite, il faudra pousser davantage ce type d'analyses afin de déterminer comment simplifier au mieux la complexité des arbres dans LASER/F.

La température de surface du feuillage impacte sur son rayonnement net, qui impacte lui-même sur le taux d'évapotranspiration de l'arbre. Ainsi, une analyse de la température de surface simulée va maintenant être effectuée pour comprendre davantage les résultats précédents.

➤ Température de surface

La température de surface (TS) du feuillage du Georges' tree, simulée par LASER/F a été comparée à la température de brillance de ce feuillage mesurée avec les radios-thermomètres (Figure 5.8). Une comparaison est réalisée pour le feuillage à l'est et une autre pour le feuillage à l'ouest. L'installation du radio-thermomètre ayant été effectuée uniquement en 2015, seule la période P3 peut être utilisée. La température de l'air mesurée par un capteur météorologique à 2 m de hauteur a été ajoutée à cette comparaison.

Nous savons que les surfaces dans LASER/F sont homogènes, c'est-à-dire qu'il y a uniquement du feuillage et donc pas d'air, alors qu'en réalité les deux sont présents dans la couronne d'un arbre. Mais, cette comparaison, entre température de surface simulée et température de brillance mesurée, est possible dans ce cas d'étude. En effet, l'émissivité des feuilles dans le domaine spectral du capteur (8-14 μm) est connue comme très proche de l'unité. De plus les capteurs étant très proches du feuillage, l'atténuation du rayonnement due à la transmission atmosphérique est négligeable. Nous nous trouvons donc dans une situation où la température de brillance est quasi équivalente à la température de surface et peut donc se trouver comparée aux sorties du modèle LASER/F.

Globalement, une corrélation existe entre les simulations et les mesures (R^2 de 0,69). Pour pouvoir interpréter au mieux les résultats, il est nécessaire de distinguer la température de surface à l'est et à l'ouest. Dans ce cas, les simulations sont plus proches des mesures à l'ouest (R^2 de 0,84) qu'à l'est (R^2 de 0,69). La température de surface simulée à l'est est en moyenne inférieure à la mesure de $1,1\text{ °C} \pm 4,6\text{ °C}$, alors qu'à l'ouest l'écart moyen est de $-0,5\text{ °C} \pm 3,8\text{ °C}$. De manière plus détaillée, on observe que lorsque le feuillage est éclairé, la température est surestimée par LASER/F avec un écart maximum de $12,8\text{ °C}$ à l'est et de $6,2\text{ °C}$ à l'ouest. Lorsque le feuillage est à l'ombre, LASER/F sous-estime la température de surface avec un écart maximum la nuit de $-6,0\text{ °C}$ quel que soit le côté du feuillage pris en compte. Dans la suite, nous allons essayer de comprendre pourquoi LASER/F simule ces résultats.

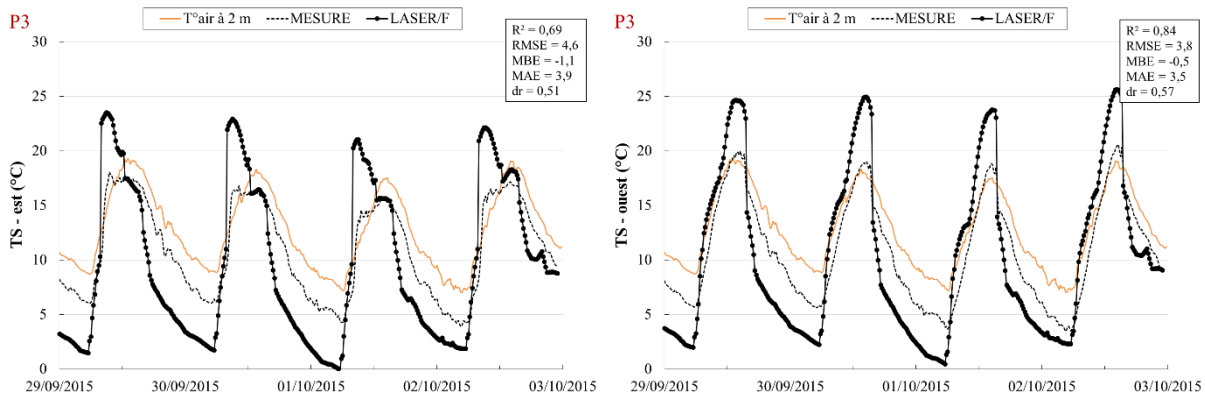


Figure 5.8 – Dynamiques journalières de la température de surface du feuillage (TS) à l'est et à l'ouest sur la période P3, simulée et mesurée, ainsi que la température de l'air mesurée à deux mètres de hauteur (en jaune).

Il est communément admis que la température des feuilles à l'ombre est environ égale à la température de l'air et qu'au soleil la température des feuilles est d'environ $2,0\text{ °C}$ supérieure à la température des feuilles à l'ombre. De plus la température des feuilles la nuit est environ égale à la température de l'air (Idso et al., 1981 ; Linacre, 1964). Or, un écart en moyenne de $-2,0\text{ °C}$ ($-3,5\text{ °C}$ max) et de $-2,8\text{ °C}$ ($-7,9\text{ °C}$ de max), est observé respectivement entre la température de brillance mesurée et la température de l'air et entre la température de surface simulée et la température de l'air. Il semblerait donc que la simulation et la mesure sous-estiment toutes les deux la température du feuillage. Lors de P3 (mois d'octobre), l'écart observé entre la mesure et la température de l'air est plus important que l'écart observé au mois de juillet ou août. La température de l'air est plus basse au mois d'octobre qu'au mois de juillet ou août. Le problème de mesure peut provenir de la calibration en laboratoire des capteurs avec un corps noir. En effet, celle-ci est moins fiable pour les températures basses en raison de la difficulté d'atteindre des valeurs pour la température du corps noir très en dessous de la température ambiante (de l'ordre de $20,0\text{ °C}$). Donc, les valeurs obtenues lors de journées fraîches s'avèrent moins exactes que lors de journées chaudes. Bailey et al. (2016) insistent sur la difficulté de mesurer la température de surface du feuillage.

Nous retiendrons, toutefois, que le modèle LASER/F simule un feuillage trop chaud, lorsque le rayonnement direct l'atteint et trop froid, le reste du temps, par rapport à la température de l'air. Lors de la comparaison des simulations de LASER/F avec celles de RATP (Chapitre 4, partie 4.3, page 82), nous avons déjà observé ce même phénomène. Au-delà d'erreurs provenant de l'imprécision du paramétrage des arbres dans le modèle (émissivité et conductances physiologiques), il semblerait que le problème provienne principalement d'une mauvaise estimation du rayonnement infrarouge absorbé et émis par le feuillage. Le feuillage se comporte comme si toutes les feuilles émettaient librement leur rayonnement infrarouge, or

une partie de celui-ci est absorbée par les feuilles voisines. La nuit, le rayonnement infrarouge émis est donc trop important et par conséquent la température de surface est très faible. Ce phénomène n'est que très peu perceptible le jour, car le rayonnement direct prédomine par rapport au rayonnement infrarouge émis dans le bilan radiatif. Des corrections restent à entreprendre dans le code pour résoudre ce problème, qui explique par conséquent, une évapotranspiration nulle des arbres, la nuit.

Dans le but d'interpréter davantage les points forts et les faiblesses du module de fonctionnement de l'arbre dans LASER/F, d'autres composantes simulées du bilan d'énergie sont analysées dans la partie suivante.

5.2.2.2. Comparaisons relatives à l'ensemble du parc

L'analyse des flux émanant d'une zone plus large du parc est intéressante, puisque ces flux traduisent les capacités du modèle à simuler correctement plusieurs types d'objets. La zone traitée ici est illustrée dans le Tableau 5.6 par un encadré rose. Cette zone a été définie selon l'emprise supposée des capteurs, localisés à 17 m de hauteur, utilisés pour cette étude comparative (Annexe C.2, page 168). Comme cette zone comprend plusieurs arbres et du sol enherbé, nous allons pouvoir approfondir l'évaluation de la capacité de LASER/F à reproduire le fonctionnement des arbres et aussi du sol enherbé. Les grandeurs statistiques représentatives des résultats obtenus sur l'ensemble des périodes (P1, P2 et P3) sont détaillées dans le Tableau 5.6. L'étude comparative présentée dans la suite concerne les périodes 1 et 2.

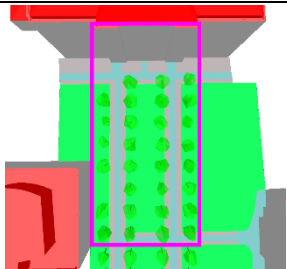
ZONE	Grandeur	LE _{zone}	S _{zone}	RN _{zone}	Solaire _{zone} ↑	IR _{zone} ↑
	R ²	0,85	0,89	0,97	0,98	0,95
	RMSE	64,07	39,95	41,51	32,30	28,42
	MBE	-31,84	23,46	2,17	-20,20	19,40
	MAE	39,41	32,30	20,39	20,32	20,50
	<i>dr</i>	0,76	0,76	0,96	0,78	0,69

Tableau 5.6 – Grandeurs statistiques calculées sur l'ensemble des périodes de simulation pour les comparaisons relatives à l'ensemble de la zone (encadré rose dans l'illustration) : flux de chaleur latente (LE_{zone}), flux de chaleur sensible (S_{zone}), rayonnement net (RN_{zone}), rayonnement solaire montant (Solaire_{zone}↑), et rayonnement infrarouge montant (IR_{zone}↑).

➤ Flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente (LE_{zone}), provenant d'une certaine emprise du parc, a pu être comparé à des mesures effectuées par l'analyseur de gaz et l'anémomètre sonique à 17 m de hauteur (Tableau 5.6 et Figure 5.9). Cette emprise comprend des arbres, du sol enherbé, du sol nu et du bitume. Statistiquement, une forte relation est observée globalement entre le flux simulé et le flux mesuré avec un R² de 0,85. Il en est de même lorsque le sol est sec (R² de 0,86) ou humide (R² de 0,88).

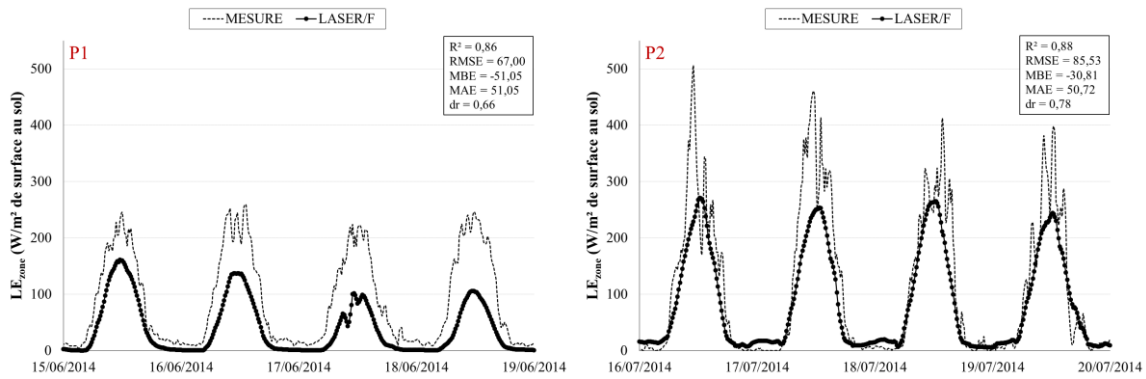


Figure 5.9 – Dynamiques journalières du flux de chaleur latente (LE_{zone}) simulé, comparé à la mesure sur P1 et P2.

Comparaison simulations/mesures sur les périodes diurnes

En général, l'évapotranspiration est moins importante lors de P1 que lors de P2. Ce constat est cohérent puisque le sol en P1 est très sec alors qu'en P2 il est totalement humide en début de période et s'assèche avec les jours. Ce dernier point est bien visible avec la diminution du flux mesuré lors de P2. De manière plus détaillée, la journée, le flux simulé lors de P1 est plus sous-estimé par rapport à la mesure (MBE de $-51,05 \text{ W/m}^2$) que ne l'est le flux simulé lors de P2 (MBE de $-30,81 \text{ W/m}^2$). Comme il a été montré précédemment, l'évapotranspiration simulée par les arbres, lors de P1, est légèrement inférieure à celle simulée lors de P2, ce qui ne peut donc pas expliquer seulement la différence entre les deux périodes.

Ainsi, cet écart est dû à l'évapotranspiration du sol enherbé, étudiée en Annexe K.1, page 201 :

- En effet, tout d'abord, la simulation et la mesure de l'évapotranspiration du sol enherbé, lors de P1, sont bien inférieures à celles observées lors de P2 (en moyenne de $145,35 \text{ W/m}^2$).
- De plus, lors de P2, l'évapotranspiration du sol enherbé est même surestimée par rapport à la mesure (MBE de $47,35 \text{ W/m}^2$).
- Enfin, la même diminution du flux simulé est observée entre l'évapotranspiration du sol enherbé et celle de l'ensemble de la zone. Cette diminution est liée à une diminution du rayonnement solaire direct (Annexe J, page 194). Nous avons vu dans la comparaison effectuée dans l'Annexe K.1, qu'avec LASER/F, la pelouse semble trop sensible aux variations du rayonnement direct.

Comparaison simulations/mesures sur les périodes nocturnes

La nuit (de 20 h à 4 h), que ce soit pour la mesure ou la simulation, le flux de chaleur latente est très faible, de l'ordre de 0 à $13,97 \text{ W/m}^2$ en moyenne. Ce taux positif avec la simulation, doit provenir de l'évapotranspiration émise par le sol enherbé, puisque la nuit, nous avons montré que l'évapotranspiration des arbres est nulle :

- L'analyse présentée en Annexe K.1, montre bien que l'évapotranspiration du sol enherbé, la nuit, simulée par LASER/F, est nulle lors de P1, alors qu'elle est légèrement positive lors de P2 (environ $15,00 \text{ W/m}^2$).
- Cette différence de flux entre les arbres et la pelouse, peut provenir de l'énergie stockée dans le sol le jour, qui apporte de l'énergie la nuit en surface et donc permet encore d'émettre un flux.

- De plus, une légère différence de flux est observée entre P1 et P2, entre la simulation et la mesure. Elle peut provenir d'une imprécision dans la simulation, de l'humidité du sol ou bien d'une imprécision de mesure.

Le sujet de l'évapotranspiration de la végétation, la nuit, est un débat chez les scientifiques. La seule théorie approuvée est que ce flux est très faible par rapport au jour. Nous ne nous attarderons donc pas plus sur l'évapotranspiration de la végétation en période nocturne.

Comparaison du taux d'évapotranspiration provenant des arbres et de la pelouse

Les mesures de terrain ont montré que, ramené à la surface projetée au sol, le taux d'évapotranspiration d'un tilleul argenté est normalement équivalent au taux d'évapotranspiration émis par la même surface de sol enherbé. En effet, l'étude comparative relative aux tilleuls argentés (Figure 5.7) et l'étude comparative relative au sol enherbé présent dans le parc (Annexe K.1, page 201) montrent que, l'évapotranspiration maximale atteinte par le sol enherbé est équivalente à l'évapotranspiration maximale atteinte par les arbres (environ 250,00 W/m²). Ce constat est à considérer uniquement dans le cas d'un tilleul argenté avec un LAI d'environ 11 et d'une surface de sol enherbé avec un LAI d'environ 1. Ces résultats sont vrais lorsque le sol est humide, mais pas lorsque le sol est sec. En effet, normalement, l'arbre puise l'eau plus en profondeur dans le sol que l'herbe (Jackson et al., 1996). Comme le sol s'assèche très lentement en profondeur, il souffre moins rapidement de stress hydrique. Il est donc capable d'émettre plus longtemps de l'évapotranspiration lorsque le sol s'assèche, ce qui lui confère un effet rafraîchissant de l'air plus longtemps que celui de l'herbe.

Dans LASER/F, bien que l'équivalence d'évapotranspiration entre un arbre et le sol enherbé, pour 1 m² de sol ne soit pas tout à fait retrouvée, le fonctionnement de la végétation (arbre et sol enherbé) est cohérent, que ce soit lorsque le sol est sec ou humide ou entre le jour et la nuit. Il reste maintenant à savoir si le modèle fonctionne bien par rapport à d'autres flux.

➤ Flux de chaleur sensible

Le flux de chaleur sensible (S_{zone}), provenant d'une certaine emprise, a été comparé au flux mesuré par l'analyseur de gaz et l'anémomètre sonique situés à 17 m de hauteur sur le mât (Tableau 5.6 et Figure 5.10). Statistiquement, sur l'ensemble des périodes, la relation entre le flux simulé et mesuré est forte (R^2 de 0,89). Lorsque les périodes sont traitées séparément, la relation est toujours très bonne, mais plus faible avec P2 (R^2 de 0,72) qu'avec P1 (R^2 de 0,96).

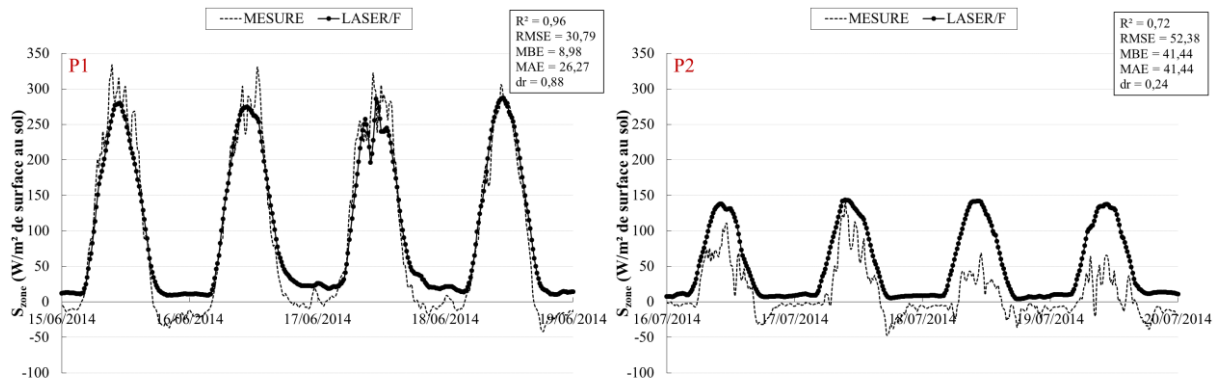


Figure 5.10 – Dynamiques journalières du flux de chaleur sensible (S_{zone}) simulé, comparé à la mesure sur P1 et P2.

Comparaison simulations/mesures sur les périodes diurnes

Le jour, le flux de chaleur sensible est plus important en P1 qu'en P2, quasiment le double, que ce soit pour la simulation ou la mesure. Ce comportement semble réaliste et cohérent par rapport aux analyses précédentes sur le flux de chaleur latente. En effet, lors de P1, le sol étant sec, l'herbe n'est plus capable d'émettre un fort flux de chaleur latente pour réguler sa température de surface. Par conséquent, elle chauffe plus et émet donc plus de flux de chaleur sensible. C'est l'inverse pour P2 avec un sol humide. L'écart entre le flux simulé et mesuré est très faible lors de P1 (MBE de $-3,63 \text{ W/m}^2$). Ceci montre que globalement les températures de surfaces des éléments présents dans la scène sont correctement estimées. Le problème détecté précédemment, à propos de la température de surface du feuillage des arbres se compense dans ce cas, avec les surfaces ombragées et éclairées. Les différences entre la simulation et la mesure (MBE de $55,98 \text{ W/m}^2$), lors de P2, n'ont pas encore été expliquées à ce jour.

Comparaison simulations/mesures sur les périodes nocturnes

La nuit (de 20 h à 4 h), avec la mesure, un phénomène d'inversion thermique a lieu. Le pic plus intense (maximum de $46,93 \text{ W/m}^2$) observé en début de soirée est lié à la présence de végétation dans la zone et à sa conductance stomatique :

- À partir de 17 h, les températures de surfaces des éléments naturels (majoritairement présents dans la zone étudiée) deviennent inférieures à la température de l'air et donc le flux de chaleur sensible s'inverse.
- Néanmoins, le rayonnement solaire contribue toujours au flux de chaleur latente. Par conséquent, la température de surface de la végétation baisse encore plus. Ce refroidissement dure jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de rayonnement solaire et que la plante régule sa température de surface.
- La température de surface de la végétation étant légèrement inférieure à la température de l'air la nuit, les mesures semblent réalistes.

Ce phénomène n'est pas observé avec la simulation. De plus, l'inversion thermique n'est pas non plus simulée (MBE la nuit de $15,93 \text{ W/m}^2$ alors que la mesure est à $-10,45 \text{ W/m}^2$). Ce n'est pas la végétation qui est en cause, puisque le feuillage des arbres a une température de surface simulée bien inférieure à la température de l'air et puisque la température de surface du sol enherbé est quasi équivalente à la température de l'air (Annexe K.1, page 201). Dans ce cas, seules les températures de surfaces simulées des éléments artificiels (bitume et façade) présents dans la scène peuvent être en cause, puisqu'elles sont supérieures à la température de l'air la nuit. Or, d'après une comparaison simulation / mesure, la température de surface du bitume ne semble pas beaucoup surestimée par rapport à la mesure. Ainsi, nous émettons l'hypothèse que ce flux de chaleur sensible positif simulé la nuit est dû à l'emprise du capteur dans la simulation, qui prend trop en compte le flux émanant de la façade du Palais Universitaire par rapport à la mesure.

➤ Rayonnement net

Le rayonnement net simulé provenant de l'ensemble de la zone du parc (RN_{zone}), a été comparé au rayonnement net mesuré par les capteurs de rayonnement situés à 17 m de hauteur par rapport au sol (Tableau 5.6 et Figure 5.11a). Sur l'ensemble des périodes de simulation, comme sur chaque période, le rayonnement net simulé est très corrélé à celui mesuré (R^2 de

0,97, 0,95 et 0,98, respectivement pour l'ensemble des périodes, P1 et P2). Aucune différence significative n'est observée entre P1 et P2.

La Figure 5.11b illustre le rayonnement solaire montant ($\text{Solaire}_{\text{zone}\uparrow}$) et le rayonnement infrarouge montant ($\text{IR}_{\text{zone}\uparrow}$) provenant de l'ensemble de la zone. La relation entre la simulation et la mesure est là aussi très forte avec un R^2 de 0,98 pour le solaire montant et de 0,95 pour l'infrarouge montant. Les comparaisons réalisées par période montrent que quelle que soit la période, la simulation est toujours autant corrélée à la mesure et aucune différence significative n'est observée entre P1 et P2. Cependant, l'analyse des résultats le jour par rapport à la nuit, montre que le jour, un phénomène de compensation se produit ce qui amène à un rayonnement net provenant de la zone réaliste.

Le jour, le rayonnement solaire montant simulé est sous-estimé par rapport à la mesure (MBE de $-34,54 \text{ W/m}^2$). Cette sous-estimation signifie que certaines surfaces ne sont pas assez réfléchissantes. Quant au rayonnement infrarouge montant simulé, il est surestimé par rapport à la mesure (MBE de $31,26 \text{ W/m}^2$). Les surfaces sont soit trop chaudes, soit elles ont une émissivité trop importante. L'analyse des simulations au niveau du sol enherbé, présentée en Annexe K.1, page 201, expose les mêmes différences de dynamiques entre les simulations et les mesures relatives au rayonnement net et à ses composantes. Ainsi, il semblerait que le résultat constaté sur l'ensemble du parc provienne en partie d'un mauvais paramétrage relatif au sol enherbé (réserve utile d'eau, LAI, etc.).

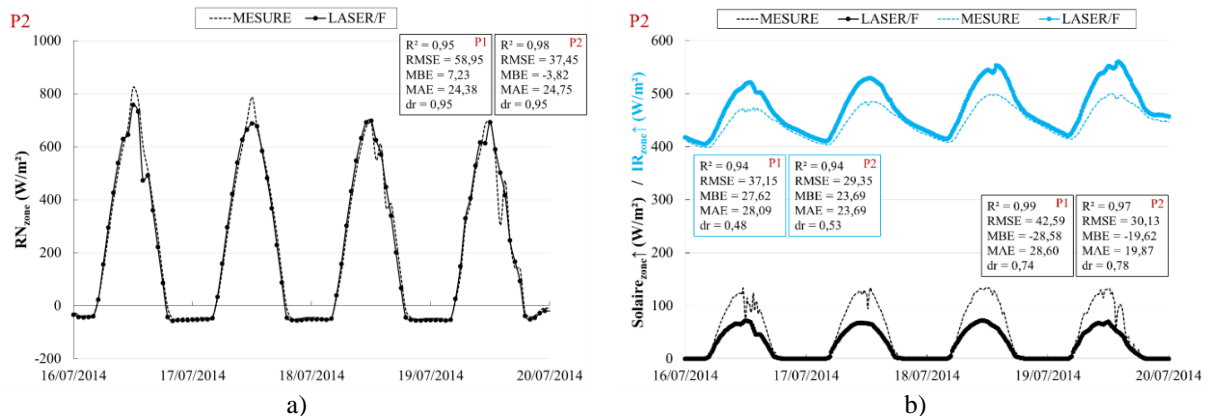


Figure 5.11 – Dynamiques journalières simulées et mesurées du : a) rayonnement net émis par la zone (RN_{zone}) ; b) rayonnement solaire montant émis par la zone (en noir - $\text{Solaire}_{\text{zone}\uparrow}$) et rayonnement infrarouge montant émis par la zone (en bleu - $\text{IR}_{\text{zone}\uparrow}$) sur P1 et P2.

Cette dernière étude comparative a montré la cohérence et le lien entre les flux simulés émanant de l'ensemble de la zone et les flux simulés provenant des arbres et du sol enherbé. Il semble par conséquent, que les résultats constatés sur quelques arbres et quelques mètres carrés de sol enherbé, se retrouvent sur les autres objets de ce type. Les résultats sont donc homogènes quelle que soit la surface étudiée dans la scène. Il faut tout de même noter que ces comparaisons sont à prendre avec précautions, puisque le champ de vision des capteurs fictifs, mesurant des flux sur une emprise large, intégrés dans la scène, n'est pas totalement identique à celui retrouvé sur le terrain. De plus, la maquette 3D du parc utilisée pour les simulations n'est pas représentative de l'ensemble des objets réellement visibles dans la scène à une hauteur de 17 m. De nombreux arbres et bâtiments sont manquants. Mais ces obstacles étant éloignés, ils ne sont pas censés beaucoup impacter la quantité de flux reçu par les capteurs, à l'exception peut-être des groupements d'arbres proches du centre, qui peuvent impliquer une variation de la quantité de flux reçu. Néanmoins, il a tout de même été intéressant de pouvoir

constater le comportement du modèle sur une emprise plus large que celle d'une zone enherbée ou de quelques arbres.

5.2.3. Conclusion sur la comparaison des simulations à des mesures de terrain

L'étude présentée dans cette partie a permis de tester pour la première fois le potentiel du module de végétation (haute – arbre et basse – pelouse), intégré dans le modèle microclimatique LASER/F, à simuler des flux relatifs à la végétation, implantée dans un parc urbain. Cette étude a été réalisée grâce à une confrontation des résultats du modèle à des mesures de terrain. La première partie de la comparaison, présentée dans l'Annexe K.1, page 201, a traité les flux provenant du sol enherbé. La deuxième partie de la comparaison a porté sur les simulations relatives au fonctionnement des arbres – des tilleuls argentés. Et la troisième partie a concerné les flux émanant de l'ensemble de la zone d'étude.

Trois flux et la température de surface permettent d'obtenir le bilan d'énergie d'une feuille. Deux de ces grandeurs ont pu être étudiées : la température de surface sur le Georges' tree et l'évapotranspiration sur six tilleuls argentés. Concernant le sol enherbé, cinq flux permettent d'obtenir son bilan d'énergie. Trois de ces flux, ainsi que la température de surface et la température du sol en profondeur ont été comparés à des mesures de terrain. Enfin, le rayonnement net, le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente émanant de l'ensemble du parc ont été analysés. L'étude comparative a été effectuée sur trois périodes différentes, soit une douzaine de journées. Nous avons analysé la cohérence des flux entre le jour et la nuit, mais aussi lorsque le sol est humide et sec.

L'intérêt, dans l'intégration du module de végétation de LASER/F est de réussir à simuler : i) l'évapotranspiration de la végétation, ii) sa capacité à réguler sa température de surface et par conséquent à moins stocker de chaleur, par rapport aux surfaces artificielles, retrouvées en milieu urbain et iii) les ombres portées des arbres sur les objets alentour. Les conclusions auxquelles nous sommes arrivées à propos de ces trois objectifs sont présentées dans les paragraphes suivants.

Premièrement, concernant l'évapotranspiration de la végétation :

- Le premier constat réalisé montre que dans LASER/F, l'arbre et l'herbe puisent bien de l'eau dans le sol suivant la sécheresse de celui-ci, puis ils la restituent dans l'atmosphère grâce au phénomène d'évapotranspiration.
- Les dynamiques des flux simulés sont cohérentes par rapport aux mesures, il n'y a pas de flux anormaux.
- La nuit, les arbres n'émettent pas d'évapotranspiration, et le sol enherbé émet un léger flux suivant la sécheresse du sol. Ces résultats sont réalistes. Cependant, le résultat des arbres est dû à un problème de calcul de l'infrarouge émis par le feuillage, qui engendre une température de surface du feuillage bien inférieure à la température de l'air, et par conséquent une évapotranspiration nulle. Bien que l'évapotranspiration d'un arbre la nuit est quasi nulle, il convient tout de même de corriger par la suite cette erreur.
- Le jour, les différences de taux observées entre les simulations et les mesures sont dues uniquement à des imprécisions de paramétrage des données en entrée. Ainsi, les résultats sont perfectibles avec un meilleur paramétrage, d'où l'importance de

connaître, pour de futures simulations, la résistance stomatique de l'espèce au rayonnement, la réserve utile d'eau dans le sol et le LAI sur le sol enherbé.

- Le cas de la géométrie 3D des couronnes d'arbres est plus complexe. Nous avons vu que l'évapotranspiration faible des arbres provient essentiellement de la géométrie trop simplifiée de l'enveloppe 3D de la couronne foliaire qui engendre un volume et une PEA faible. Il a été montré qu'augmenter le nombre de faces par arbre permettrait de résoudre ce problème. Cependant, actuellement, à l'échelle du parc, il est impossible de considérer un tel cas pour raison de performances informatiques. Il est donc nécessaire de soit envisager une autre méthode de reconstruction 3D globale, par des formes géométriques très simplifiées, soit de repenser totalement à la manière dont est intégré l'arbre dans le modèle, pour aussi améliorer le calcul de transmission du rayonnement dans le couvert.

Deuxièmement, concernant la capacité de la végétation à réguler sa température et à stocker moins de chaleur :

- La végétation dans LASER/F régule sa température au cours de la journée. Par conséquent, le jour, sa température est logiquement bien inférieure à la température des surfaces minérales artificielles.
- Le sol enherbé semble se comporter correctement, au cours de la journée. Néanmoins, nous avons constaté un problème de bilan d'énergie non bouclé, qui devra être résolu.
- La nuit, la température de surface du feuillage d'un arbre est beaucoup trop basse, dans LASER/F, et ceci est dû à un rayonnement infrarouge émis par le feuillage qui est beaucoup trop important. Par conséquent, actuellement, avec les simulations, le feuillage réchauffe les objets alentour en leur apportant de l'énergie par rayonnement infrarouge. Il est par conséquent important de résoudre ce problème de formalisme, qui engendre aussi une évapotranspiration nulle, la nuit.
- D'après l'analyse des flux émanant de l'ensemble de la zone, nous avons montré que la végétation dans LASER/F ne stocke que très peu de chaleur en journée et par conséquent elle contribue au rafraîchissement de l'atmosphère la nuit. En effet, contrairement aux surfaces minérales artificielles, sa température de surface est plus faible que celle de l'air et par conséquent un flux de chaleur sensible de l'atmosphère vers la végétation apparaît, ce qui refroidit l'atmosphère. Néanmoins, le rafraîchissement engendré par les arbres est trop important, à cause de la température de surface du feuillage beaucoup trop faible.

Troisièmement, concernant l'ombre portée des arbres :

- D'après la cohérence entre les simulations et les mesures des valeurs d'indice de confort thermique (Annexe K.2, page 201) et des flux émanant de l'ensemble de la zone, nous pouvons en conclure que l'ombre portée des arbres est correctement simulée dans LASER/F.
- Néanmoins, nous soupçonnons que le coefficient de transmission du rayonnement solaire, à travers la couronne d'un arbre, ne soit pas assez important, ce qui rend l'ombre trop intense. Il sera important par la suite d'effectuer davantage de tests, pour vérifier cela, et peut-être envisager de revoir le formalisme du modèle concernant ce calcul d'atténuation du rayonnement à travers le couvert.

Les travaux de comparaisons à des mesures de terrain doivent être poursuivis et approfondis en continuant principalement à cibler les trois objectifs de simulation à terme de LASER/F. D'autres mesures pour compléter le bilan d'énergie mesuré devront certainement être acquises, telles que la mesure du flux de chaleur sensible émis par le sol. Les analyses de

sensibilité du modèle à son paramétrage, effectuées au cours de cette thèse, devront être contrôlées afin d'identifier quels paramètres impactent le plus les flux et par conséquent sont les plus importants à mesurer.

A l'issue des travaux réalisés au cours de cette thèse, nous avons décidé d'optimiser le code LASER/F et nous allons tenter d'intégrer un nouveau module d'arbre plus complexe, reprenant le principe de voxels du modèle RATP. Ce nouveau module est en cours d'intégration grâce à un chercheur postdoctoral informaticien. Ses travaux ont pour objectifs : i) d'optimiser le code LASER/F en le réécrivant dans un langage plus adapté, en vue de réaliser des simulations à l'échelle d'un quartier, ii) de résoudre le problème de transmission du rayonnement du feuillage à travers le couvert et iii) d'améliorer la représentation de la spatialisation du feuillage des arbres. Ce dernier point amènera à repenser la chaîne de traitements permettant d'aboutir à la reconstruction 3D globale de l'arbre. Nous devons trouver le moyen de spatialiser le LAI ou la LAD à travers les voxels représentant la couronne foliaire, sans avoir à passer par une reconstruction détaillée. Pour ce faire, la méthode PATH présentée dans l'article [Hu et al. \(2018b\)](#) pourra être utilisée et améliorée.

Au cours de cette thèse, d'autres modèles microclimatiques (ENVI-met, VTUF-3D) simulant l'évapotranspiration de la végétation, plus particulièrement des arbres, ont été développés ou améliorés et validés à l'aide de mesures de terrain ([Bailey et al., 2016](#) ; [Liu et al., 2018](#) ; [Nice et al., 2018](#) ; [Simon et al., 2018](#)). Pour l'instant, nous ne pouvons confronter les résultats de LASER/F à ces autres modèles existants, en raison de zones d'études non comparables. Par la suite, une fois que le module de végétation de LASER/F aura été amélioré, cette comparaison pourra faire l'objet d'une future étude.

5.3. Utilisation de LASER/F pour l'étude de l'impact de la végétation sur le climat urbain

Démontrer exactement comment les villes doivent être végétalisées est primordial pour que l'effet rafraîchissant des arbres recherché soit optimal ([Bowler et al., 2010](#)). En effet, cet effet varie en fonction du nombre, du type et de la distribution spatiale des arbres dans le milieu urbain. Pour cela, un outil de modélisation approprié paraît la solution pour fournir des évaluations quantitatives solides de l'efficacité des arbres en termes d'atténuation de la chaleur en fonction de l'eau disponible dans le sol. Ce type d'outils peut s'avérer utile pour proposer des conseils d'aménagements urbains sur la façon d'utiliser efficacement les arbres pour améliorer le confort thermique des habitants.

Dans cette partie, nous n'avons pas pu résister à l'envie de donner un aperçu du potentiel de LASER/F à effectuer ce genre d'exercice. Premièrement, nous donnerons des exemples d'interactions bénéfiques de la végétation avec l'environnement urbain, qui peuvent être simulés par LASER/F. Deuxièmement, nous listerons de façon non exhaustive les nombreux travaux existants dans la littérature, sur le sujet de l'aménagement des villes « vertes », qui donneront des exemples d'applications possibles de LASER/F. Bien évidemment, au vu des conclusions établies dans la partie précédente, les résultats présentés sont pour l'instant à prendre avec précautions. Le module de végétation de LASER/F doit encore être amélioré et entièrement validé par rapport à des mesures de référence. Nous allons voir que quand il en sera ainsi, LASER/F sera un outil adéquat pour prodiguer des conseils aux aménageurs urbains.

5.3.1. Interactions des arbres avec l'environnement

Les interactions entre la végétation et l'environnement urbain simulées par LASER/F ont été calculées sur une journée caniculaire de l'été 2014 (17/07/2014) afin de prouver les effets bénéfiques de la végétation. Aucun stress hydrique n'a été considéré. La spatialisation en trois dimensions des résultats demeure très utile pour visualiser les phénomènes recherchés. L'ensemble des flux simulés peut être représenté de cette manière. Seulement trois grandeurs parmi celles reconnues dans la littérature comme impactant le climat de l'environnement alentour sont étudiées dans la Figure 5.12 : la température de surface (TS), les échanges infrarouges entre les objets (IR) et l'évapotranspiration (ET). Puis, l'impact des arbres sur le confort thermique d'un humain est simulé. L'intensité de ces résultats ne peut être considérée comme juste puisque le modèle comporte encore des erreurs de calculs et de paramétrage. C'est pourquoi nous nous intéressons uniquement à la tendance générale de ces résultats.

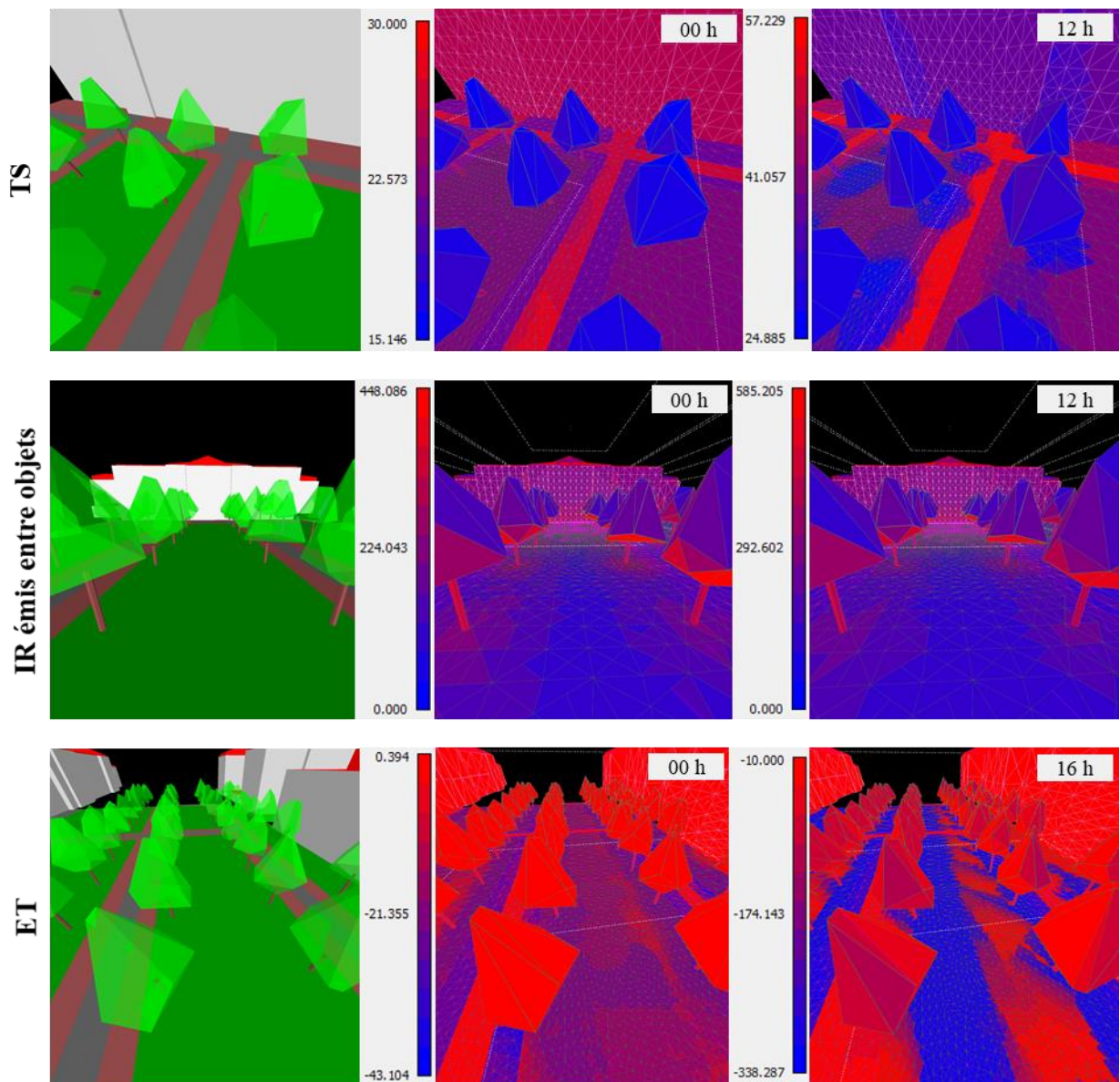


Figure 5.12 – Spatialisation 3D des simulations de LASER/F concernant la température de surface (TS), le rayonnement infrarouge émis entre les objets (IR) et le flux d'évapotranspiration (ET), suivant deux moments dans la journée.

5.3.1.1. Impact de la végétation sur l'environnement urbain

➤ Température de surface

La Figure 5.12 illustre premièrement la spatialisation 3D de la température de surfaces (TS) simulée par LASER/F à minuit et à midi. Le modèle de simulation montre que les sols naturels engendrent des températures de surfaces beaucoup plus fraîches tout au long de la journée (que ce soit à minuit ou à midi) par rapport aux sols artificiels. Par conséquent, il montre que la végétation contribue au rafraîchissement de l'atmosphère et de ce fait à la réduction de l'ICU. Ensuite, la figure représentant la température de surface du sol à midi permet de visualiser l'impact de l'ombre portée des arbres sur cette température. L'ombre permet de rafraîchir significativement tous les types de sols.

Des analyses plus poussées peuvent être réalisées avec LASER/F pour réellement quantifier l'impact bénéfique de la végétation basse et haute sur la température de surface des objets environnants. La Figure 5.13 est le résultat d'une application du modèle pour quantifier cet impact sur trois configurations différentes du jardin du Palais Universitaire, plus ou moins composées de surfaces naturelles et végétales : Cas 1 – place de bitume, Cas 2 – place composée de bitume, de sol nu et de sol enherbé et Cas 3 – ajout d'arbres. Les graphiques représentent l'écart entre les températures de surface observées pour chacun des cas par rapport à celles observées pour le Cas 1 sur : la température de surface moyenne du sol et de la façade du Palais Universitaire. L'effet bénéfique de la végétation est visible tout au long de la journée, puisque les écarts sont toujours négatifs que ce soit pour le Cas 2 ou le Cas 3.

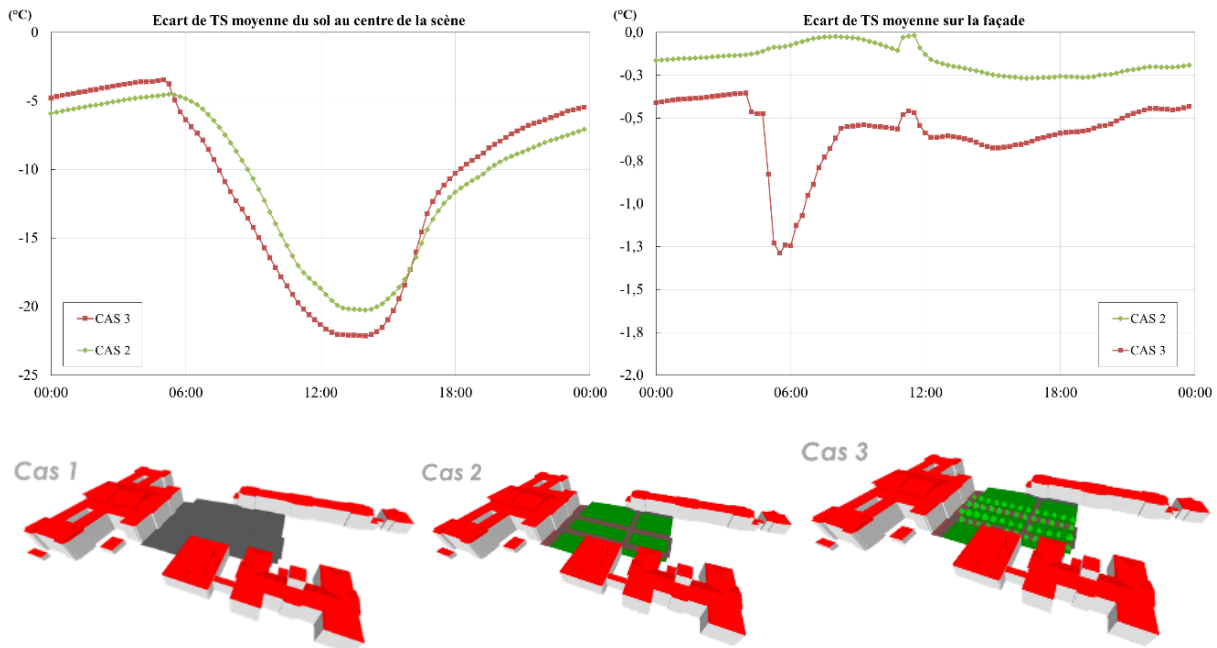


Figure 5.13 – Écart de température de surface moyenne (TS) du sol et de la façade du Palais Universitaire, entre le cas 2 et le cas 1 (vert) et entre le cas 3 et le cas 1 (rouge). Le cas1 représente la scène avec uniquement du bitume, le cas 2 contient du sol nu et de la végétation basse et le cas 3 contient des arbres en plus du cas 2.

Le sol enherbé permet à lui seul de diminuer la température de surface moyenne du sol de 20,3 °C au maximum en journée et de 7,1 °C la nuit et de diminuer la température de surface moyenne de la façade de 0,3 °C au maximum. L'ombre portée des arbres permet de réduire légèrement plus la température de surface du sol en journée avec un écart maximal par rapport au Cas 1 de -22,1 °C. Elle permet aussi de réduire la température de surface de la façade de

0,5 °C en moyenne avec un pic de 1,3 °C le matin à 6h lorsque les arbres font de l'ombre à la façade. Ces réductions de température de surface seraient plus importantes si les arbres étaient plus grands. De plus, l'impact de l'ombre portée des arbres sur la température de surface serait plus important si le sol avait été uniquement du sol nu ou du bitume. [Decllet-Barreto et al. \(2013\)](#) montrent avec le modèle ENVI-met que des rangées d'arbres permettent de rafraîchir en moyenne le sol de 8,2 °C en journée. Dans la Figure 5.13, nous pouvons aussi observer que la nuit, la température de surface moyenne du sol est supérieure dans le Cas 3 d'environ 1,4 °C à celle du Cas 2. Le modèle permet donc de simuler le piégeage radiatif qu'exerce l'arbre sur son environnement. Ce phénomène est moins visible dans le cas d'étude de [Decllet-Barreto et al. \(2013\)](#) avec une température de surface sous les arbres la nuit de +0,5 °C.

➤ Echanges infrarouges entre les objets

Le phénomène montré précédemment fait l'objet de débats concernant l'effet rafraîchissant des arbres sur l'ICU la nuit ([Saudreau et al., 2015](#)). Certaines études démontrent qu'en s'interposant entre le sol et le ciel, le feuillage d'un arbre empêche un refroidissement radiatif correct du sol en captant et en réémettant une partie du rayonnement infrarouge reçu ([Bowler et al., 2010](#)). La spatialisation des simulations de LASER/F présentée dans la Figure 5.12, va dans ce sens en montrant des échanges infrarouges importants à la base des couronnes foliaires et au pied des arbres, que ce soit la nuit ou la journée. En revanche, l'intensité des échanges simulés (allant jusqu'à 448,09 W/m² et 585,21 W/m², respectivement la nuit et la journée) n'est pas normale et est due à une erreur dans le code de LASER/F mise en avant dans l'étude de comparaison présentée précédemment.

➤ Flux d'évapotranspiration

Le flux d'évapotranspiration (ET) est le deuxième intérêt bénéfique de la végétation en milieu urbain après leur impact radiatif. Du fait combiné de la diminution des températures de surfaces et de l'émission de l'évapotranspiration des végétaux, la végétation permet de diminuer la quantité d'énergie stockée dans le milieu urbain et donc de diminuer le flux de chaleur sensible, ce qui est censé réduire l'ICU. La Figure 5.12 présente la spatialisation des simulations du flux d'évapotranspiration. Cette spatialisation nous permet de voir que le sol enherbé est très sensible au rayonnement direct. En effet, lorsque les arbres font de l'ombre au sol, son flux d'évapotranspiration chute. Cette diminution brutale n'est cependant pas réelle, mais est due à la régulation stomatique de l'herbe, qui est trop sensible au rayonnement, ou bien à l'opacité de la couronne des arbres qui est trop importante. Cette visualisation nous permet aussi de constater que 1 m² d'herbe transpire plus que 1 m² de feuillage.

5.3.1.2. Impact des arbres sur le confort thermique d'un être humain

L'impact rafraîchissant de l'arbre en journée sur un humain peut être caractérisé par la mesure de la température de l'air. Cette grandeur est largement utilisée, car c'est une variable facilement mesurable. Toutefois, la température de l'air n'est pas le meilleur indicateur du confort thermique d'une personne. D'autres indicateurs comme le PET (*Physiological Equivalent Temperature*) ([Matzarakis et al., 1999](#)) ou l'UTCI (*Universal Thermal Comfort Index*) ([Coutts et al., 2016](#)) ont ainsi vu le jour. Ce dernier indice de confort thermique a été introduit dans l'Annexe K.2, page 201. Les simulations du modèle LASER/F, concernant l'UTCI, sont cohérentes par rapport aux mesures de terrain, comme nous l'avons montré dans l'étude comparative présentée en Annexe K.2. La Figure 5.14 présente l'indice de confort

thermique calculé par le modèle LASER/F dans la configuration du cas 2 et du cas 3, c'est-à-dire en l'absence et en présence d'arbres respectivement. Lors d'une journée caniculaire, si un humain se situe à proximité de la couronne d'un arbre (cas d'un tilleul argenté avec un LAI de 8,5), celle-ci va lui permettre de demeurer huit heures à l'ombre et de diminuer son indice de confort thermique de 4,0 °C en moyenne. Pour cet indice, cela signifie que l'ombre de l'arbre permet de diminuer de 2h15 le temps passé en « très fort stress thermique » et de 3h15 le temps passé en « fort stress thermique ». Ce type de résultats est présenté dans les travaux de [Coutts et al. \(2015\)](#). L'impact des arbres sur l'indice de confort thermique est variable selon la densité du feuillage et la position des arbres par rapport à l'environnement minéral alentour.

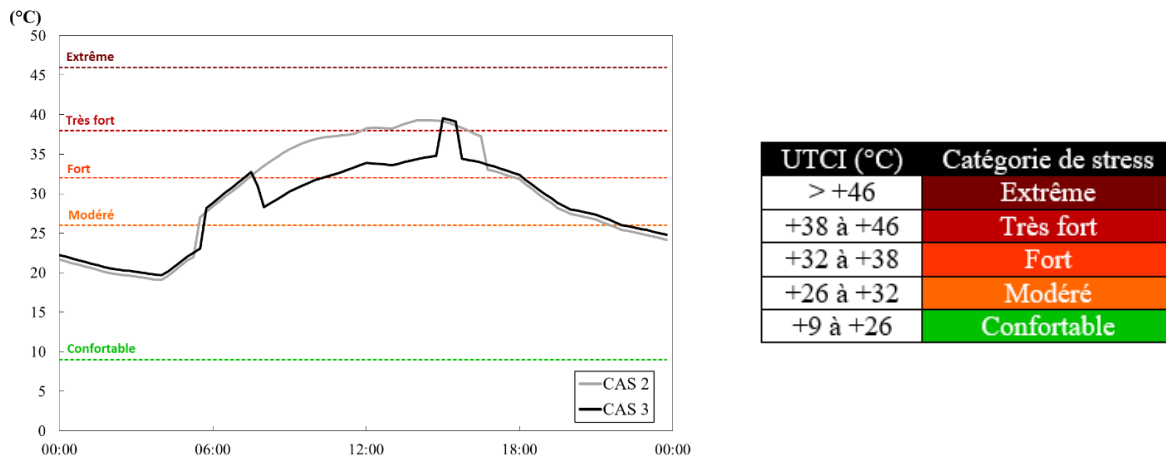


Figure 5.14 – Comparaison de l'UTCI, soit des catégories de stress ([Bröde et al., 2011](#)), selon la présence d'un arbre (cas 3) ou non (cas2).

5.3.2. Aménagement de villes « vertes »

L'ensemble des phénomènes qui viennent d'être mis en évidence sont variables selon les espèces d'arbres implantées en ville, leur spatialisation et l'aménagement urbain qui va impacter le fonctionnement des arbres et la disponibilité en eau du sol. Depuis quelques années, de plus en plus d'études se concentrent sur l'aménagement des villes durables ou villes « vertes » ([Musy, 2014](#)). Les résultats dans Google Scholar montrent qu'en 110 années (entre 1900 et 2010), 23 000 travaux ont été publiés sur le thème de la végétalisation des villes – mots clés « Urban greening – planning », alors que depuis 2011, soit en sept années, 21 500 travaux sont téléchargeables. Le nombre de travaux par année a été multiplié par 14. Malgré cela, très peu d'études à ce jour ont pris en compte l'effet rafraîchissant de la végétation par leur évapotranspiration ([Ryu et al., 2015](#) ; [Wang et al., 2016](#)). Les modèles microclimatiques 3D qui prennent en compte ce flux sont en cours de développement ([Nice et al., 2018](#) ; [Simon et al., 2018](#)). Ainsi, beaucoup d'études sur le rôle de la végétation en ville proviennent de campagnes de mesures de terrain ([de Abreu-Harbach et al., 2015](#)) ou de modèles de simulations qui n'ont pas encore ou très peu été validés en raison de la difficulté d'obtention de mesures permettant cette validation. Comme l'indiquent [Koc et al. \(2018\)](#), la plupart des études simulent le rôle de la végétation sur la température de l'air, la température de surface, et les indices de confort thermique. [Duarte et al. \(2015\)](#), [Declat-Barreto et al. \(2013\)](#), [Hanafi et al. \(2017\)](#) et [Lee et al. \(2016\)](#) cherchent à évaluer ces impacts, pour la plupart avec le modèle ENVI-met, en étudiant différents scénarios d'implémentations d'arbres, tels que les alignements d'arbres ou les regroupements d'arbres. Avec ce modèle, [Rui et al. \(2018\)](#) étudient le potentiel de différents scénarios de densité de végétation basse et haute dans un quartier à travers la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent,

la température radiative moyenne (TMRT) et la concentration de PM10¹². Sodoudi et al. (2018) étudient l'impact que peuvent procurer différentes configurations spatiales d'implantation d'herbes et d'arbres (alignements, damiers, orientation) sur la température de l'air, le vent et le PET. Il est possible avec des modèles de simulations de type CFD de montrer l'effet rafraîchissant des parcs urbains sur la température de l'air et aussi sur la portée de ce rafraîchissement (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003 ; Vidrih & Medved, 2013). Toparlar et al. (2017) simulent un rafraîchissement de l'air de -2,7 °C sur une portée de 407 m entre l'aménagement d'une place composée de bitume et l'aménagement d'un parc urbain.

Avec le modèle LASER/F nous ne pouvons pas envisager pour l'instant de telles simulations puisque le modèle ne simule ni l'écoulement du vent, ni la température de l'air, ni d'interactions entre les mailles, mais uniquement une seule valeur pour chaque flux par maille. Coupler un modèle CFD avec LASER/F n'est pour l'instant pas la priorité. Cependant, le modèle permettra de quantifier l'effet rafraîchissant de la végétation, non seulement par son impact radiatif, mais aussi par son évapotranspiration. N'importe quel scénario d'aménagement sera envisageable que ce soit dans l'aménagement du bâti, du sol ou de la spatialisation d'arbres. L'objectif sera d'abord de pouvoir simuler cela sur le jardin du Palais Universitaire, puis d'étendre les simulations à une maille de 250 m x 250 m. Des scénarios à l'échelle de la ville, comme le font De Munck et al. (2018), ne pourront pas être traités avec LASER/F avant d'établir une passerelle avec le modèle méso-échelle MESO-NH.

5.3.3. Conclusion relative aux applications futures de LASER/F

Dans cette partie, les possibilités d'applications des modèles microclimatiques pour quantifier le potentiel rafraîchissant de la végétation dans l'aménagement de quartiers urbains ont été présentées. De nombreuses équipes de recherche travaillent sur le sujet. Cependant, il est difficile de comparer les résultats de toutes ces études entre elles car elles ont très peu de points en commun, que ce soit par exemple au niveau des modèles, des espèces d'arbres, des matériaux utilisés, de la configuration des quartiers ou encore du climat. De plus, pour que ces études soient pertinentes et justes, il faut continuer d'améliorer les modèles de simulations utilisés et apporter des validations solides des flux qu'ils simulent. La validation du module de fonctionnement de végétation dans LASER/F n'en est qu'à ses débuts. A travers cette partie, nous avons vu le fort potentiel de LASER/F comme outil futur pour l'aménagement de villes « vertes », quand il aura été amélioré. Ce modèle permettra dans le futur de présenter à des aménageurs les interactions entre la végétation et l'environnement à une échelle très fine, telle qu'un arbre. Il permettra aussi de proposer différentes configurations spatiales ou minérales d'aménagement à l'échelle d'une rue, voire d'un quartier et d'analyser leurs impacts sur l'indice de confort thermique d'un habitant et aussi, à l'échelle d'une maille, sur l'ICU. En attendant, la combinaison de simulations et de mesures s'avère une solution alternative pour mener à bien des projets d'intégration de la végétation dans le but de rafraîchir l'environnement urbain.

5.4. Conclusion du Chapitre 5

Dans ce chapitre, le modèle numérique LASER/F a été employé pour reproduire les flux émanant de la zone d'intérêt du parc du jardin du Palais Universitaire. Les arbres mais aussi le sol enherbé ont été considérés dans leur environnement urbain. De nombreuses mesures de

¹² Le PM10 est une particule polluante émise par des activités anthropiques.

terrain ont permis de comparer les flux simulés en lien avec la végétation. Cette comparaison a été divisée en trois parties relatives au sol enherbé, aux arbres et à l'ensemble de la zone. Elle a montré que le module de végétation intégré dans le modèle LASER/F arrive à simuler l'impact radiatif des arbres sur son environnement urbain et l'évapotranspiration de la végétation, cependant l'effet rafraîchissant des arbres la nuit n'est pas encore bien simulé. Des problèmes liés au code ont été soulignés et devront être réglés pour espérer résoudre certaines erreurs dans les simulations. Par ailleurs, le bon paramétrage des caractéristiques structurelles du feuillage d'un arbre, non seulement de son volume mais aussi de l'humidité du sol semble primordial. Dans l'objectif de pouvoir étudier l'impact de la végétation à l'échelle d'un quartier, nous avons décidé d'optimiser le code LASER/F en le réécrivant dans un langage plus récent. Ce changement sera aussi l'occasion d'essayer d'intégrer un nouveau module d'arbres dans le modèle, avoisinant le modèle RATP, pour essayer d'améliorer la prise en compte de la spatialisation du feuillage dans le couvert et l'atténuation du rayonnement.

A l'issue de cette thèse, le module de végétation implanté dans LASER/F a été, pour la première fois, comparé à des mesures de terrain, ce qui a permis de le faire évoluer. Avec les travaux présentés dans le Chapitre 4, le deuxième objectif fixé dans cette thèse (simuler le microclimat d'un parc urbain avec le modèle microclimatique) et le dernier objectif (évaluer la qualité de ces simulations) ont été atteints. De plus, des cas d'applications de LASER/F pour évaluer le rôle de la végétation sur le microclimat du parc ont été entrevus. Ils permettent de se faire une idée quant à l'utilisation que pourront en faire les services techniques des villes françaises dans le cadre d'aménagement de villes durables.

Conclusion générale

Bilan

L'objectif majeur de cette thèse a été d'étudier comment prendre en compte la végétation, et plus particulièrement les arbres dans un modèle microclimatique, afin de simuler les interactions entre la végétation et l'environnement urbain, dans le cas d'un parc végétalisé.

Dans une première partie, nous avons mis en avant les enjeux de l'intégration de la végétation en ville comme solution pour améliorer l'indice de confort thermique des habitants et réduire, à l'échelle de la ville, le phénomène d'îlot de chaleur urbain. La végétalisation des villes doit être réalisée de manière réfléchie dans le but d'optimiser l'apport bénéfique de la végétation (ombre portée et évapotranspiration). Par conséquent, nous avons introduit l'approche existante, utilisée par les scientifiques, pour quantifier l'impact de la végétation sur son environnement alentour. Elle comporte deux méthodes complémentaires, qui consistent à réaliser des campagnes de mesures et des modélisations numériques des phénomènes physiques. Nous avons vu que la coexistence de ces deux méthodes s'avère nécessaire pour comprendre les processus, réaliser des simulations numériques et valider ces simulations. L'objectif de telles simulations est de reproduire l'effet rafraîchissant de la végétation, et plus particulièrement des arbres, de par leur ombre portée sur les surfaces adjacentes, leur température de surface et leur évapotranspiration. Les phénomènes en jeu sont d'intensité variable suivant l'essence et la spatialisation du feuillage dans la couronne de l'arbre. Il est donc nécessaire de prendre en compte la géométrie des arbres et de leur environnement et cela s'avère désormais possible à travers des maquettes numériques en trois dimensions. Nous avons montré que les modèles numériques existants, capables de prendre en compte la végétation, le font soit en s'appuyant sur une géométrie simpliste, soit sans simuler le phénomène d'évapotranspiration, soit sans valider la qualité de leurs simulations.

Depuis 2002, le modèle microclimatique LASER/F, qui vise à simuler le microclimat au sein d'une rue, voire d'un quartier urbain végétalisé, est en cours de développement au sein de l'équipe TRIO. Notre objectif, à travers cette thèse, a été d'intégrer un module de végétation basse (sol enherbé) et haute (arbre) dans ce modèle, afin qu'il soit capable de simuler l'évapotranspiration de la végétation, sa faible température de surface et l'ombre portée des arbres. Dans cette thèse, une approche à deux échelles a été mise en place. Nous avons tout d'abord décidé de nous concentrer sur la simulation du fonctionnement d'un arbre isolé, avant de tenter de simuler les interactions entre la végétation et l'environnement urbain. Des mesures de terrain ont été réalisées dans l'objectif d'évaluer les simulations du modèle microclimatique. Au vu de la difficulté à réaliser des mesures sur la diversité d'arbres présente en ville, nous avons décidé d'utiliser un second modèle numérique, dédié aux simulations du fonctionnement des arbres, le modèle écophysique RATP. Ce modèle a été choisi dans l'objectif d'évaluer les simulations de LASER/F sur plusieurs arbres, mais aussi pour mieux comprendre comment prendre en compte les arbres dans le modèle microclimatique. Ainsi, à l'échelle de l'arbre, le modèle microclimatique LASER/F et le modèle écophysique RATP, ont été employés. Puis, à l'échelle du parc, le modèle LASER/F a été utilisé. Une dizaine de versions du module de végétation de LASER/F, dont deux majeures, ont été développées au cours de cette thèse. Les résultats qui ont été présentés sont ceux provenant de la dernière version, datant de mai 2018.

A l'issue de cette première partie, nous avons été en mesure d'identifier trois missions à mener à bien pour répondre à la problématique de cette thèse. Premièrement, une méthode de reconstruction doit être proposée pour créer les maquettes 3D des éléments étudiés (arbres et environnement urbain) nécessaires aux simulations numériques. Ces maquettes doivent être adaptées au niveau de détail et de précision exigé par les modèles numériques tout en restant fidèles aux objets réels, pour pouvoir reproduire correctement leur fonctionnement. Deuxièmement, le fonctionnement d'un arbre doit être simulé numériquement, tout comme les interactions entre la végétation (arbre et sol enherbé) et l'environnement urbain alentour. Troisièmement, la qualité des simulations doit être étudiée, par confrontation, dans la mesure du possible, à des mesures de terrain. En tant que topographe, j'ai été amenée à me familiariser aux domaines d'études auxquels le sujet de thèse fait appel, en acquérant de nouvelles connaissances dans les domaines de l'écophysiologie des arbres et des processus régissant la climatologie urbaine.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté en détail les deux modèles numériques de simulations utilisés au cours de cette thèse. Après une brève introduction du modèle LASER/F, nous avons décrit le module de végétation intégré au modèle. A la suite de cette description, nous avons insisté sur les différences conceptuelles de la prise en compte d'un arbre entre le module de LASER/F et le modèle RATP. Les différences relatives aux caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques du feuillage d'un arbre ont été étudiées, ainsi que les différences de fonctionnement des modèles. Il en ressort que LASER/F simplifie beaucoup plus ces caractéristiques que RATP. Au niveau de la spatialisation du feuillage, elle est réalisée de manière aléatoire dans un volume global représentant la couronne. Au niveau des caractéristiques optiques et physiologiques, elles sont identiques quelle que soit l'espèce d'arbres étudiée.

Cette partie a aussi été l'occasion de décrire la zone d'étude du parc du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg, ainsi que les arbres étudiés, des tilleuls argentés taillés. Lors de l'étude à l'échelle d'un arbre, nous avons choisi de travailler sur un des tilleuls argentés, et lors de l'étude à l'échelle du parc, nous avons décidé de ne prendre en compte, pour commencer, que les tilleuls argentés. Nous avons présenté aussi les nombreuses mesures de terrain réalisées au centre de la zone d'intérêt. Elles vont permettre d'initialiser les modèles numériques au niveau des conditions météorologiques, mais aussi de comparer les simulations obtenues.

Dans une troisième partie, nous avons abordé la reconstruction en trois dimensions d'un arbre isolé et d'un parc urbain. Comme nous avons décidé de baser nos reconstructions sur des nuages de points, le protocole d'acquisition mis en place à partir d'un scanner laser terrestre a été décrit. Au vu des capacités des modèles RATP et LASER/F, nous avons choisi de créer deux types de maquettes 3D d'arbres isolés : (i) une maquette détaillée, où la spatialisation du feuillage dans la couronne s'accomplit à partir de la maquette du bois de l'arbre, et où le feuillage est explicitement représenté, et (ii) une maquette globale, où la spatialisation du feuillage se produit de manière aléatoire dans une enveloppe convexe à laquelle un indice de surface foliaire est attribué. Dans ce dernier cas, le feuillage se trouve pris en compte de manière implicite dans la couronne. Nous avons proposé un état de l'art, d'une part sur la reconstruction 3D détaillée d'arbres, et d'autre part sur la reconstruction 3D globale d'arbres pour nous permettre d'établir notre propre protocole de reconstruction à partir de nuage de points lasergrammétriques. Les méthodes de reconstruction proposées dans ce travail ont été principalement développées avec le logiciel Matlab : une méthode de reconstruction détaillée du bois et du feuillage de l'arbre (TreeArchitecture) et globale de la couronne foliaire (TreeCrown). TreeArchitecture a été appliqué sur différentes géométries

d'arbres, et confronté à d'autres outils de reconstruction 3D *open source*. A l'issue de cette étude, nous avons finalement décidé d'utiliser l'outil PlantScan3D pour reconstruire la maquette du bois de l'arbre à partir d'une squelettisation automatique. Puis, la maquette du feuillage sur les branches végétatives est produite à partir de relations allométriques, issues de mesures prises directement sur l'arbre étudié. Ainsi, il a été possible de renseigner les informations utiles à RATP, c'est-à-dire, la spatialisation du feuillage à travers une grille de voxels et une densité foliaire par voxel. Pour ce qui est de la maquette globale, une enveloppe convexe a été générée à partir du nuage de points. Cette reconstruction a donné lieu à la création de l'outil TreeCrown. Pour connaître la quantité de feuilles présentes dans la couronne, nous avons pour l'instant utilisé les résultats provenant de la maquette détaillée. Toutefois, nous avons travaillé en collaboration avec un autre doctorant, membre de l'équipe TRIO, sur la possibilité d'extraire cet indice (LAI) directement à partir du nuage de points de l'arbre contenant des feuilles.

En second lieu, nous avons décrit la manière dont nous avons reconstruit le quartier du jardin du Palais Universitaire. Cette reconstruction a été possible en partie grâce à des données fournies par l'Eurométropole de Strasbourg. Trois couches de données ont été intégrées à la maquette 3D du parc. Les maquettes des bâtiments ont été obtenues par la ville à partir de stéréorestitution des toits sur des photographies aériennes. Nous avons reconstruit le sol à partir de digitalisation de photographies aériennes en considérant trois types de sols : le bitume, le sol nu et le sol enherbé. Enfin, les maquettes des arbres ont été obtenues à l'aide de notre outil TreeCrown, que nous avons étendu à plusieurs arbres isolés et à des groupements d'arbres. Au total, 49 tilleuls argentés ont été représentés. La maquette finale obtenue représente une maille de 250 m x 250 m autour de la zone d'intérêt.

Dans une quatrième partie, nous avons appliqué les modèles numériques de simulation, LASER/F et RATP, sur un arbre isolé : un tilleul argenté. Notre attention a été portée sur la capacité des modèles à reproduire le taux d'évapotranspiration de cet arbre urbain, sachant que ce fut le premier cas d'application de RATP à un arbre urbain. Les simulations ont été réalisées sur une centaine de journées estivales. Premièrement, nous avons détaillé les différents paramètres utilisés par LASER/F et RATP pour restituer le fonctionnement d'un arbre. Les différences en termes de caractéristiques structurelles, optiques et physiologiques du feuillage observées entre les deux modèles ont été mises en avant. Cette analyse nous a amenés à réfléchir à l'impact de ces différences sur le taux d'évapotranspiration simulé.

Nous avons donc décidé de réaliser une étude de sensibilité de l'évapotranspiration simulée par le modèle RATP au paramétrage. Puisque notre travail préliminaire a porté principalement sur la reconstruction des maquettes d'arbres, nous nous sommes intéressés à l'impact du niveau de détail de ces maquettes sur l'évapotranspiration simulée. Cette impact n'avait pas été jusqu'à présent étudié en profondeur dans la littérature. Pour ce faire, nous avons élaboré plusieurs maquettes avec différents niveaux de détails, dont une qui représente le niveau de détail utilisé dans RATP et une autre dans LASER/F. Ces maquettes ont été classées selon trois groupes de méthodes de reconstruction basées : (i) sur la reconstruction de la structure de branches, (ii) sur le calcul d'enveloppes et (iii) sur la voxelisation. A l'issue des simulations réalisées pour chaque maquette et une maquette de référence, nous avons procédé à plusieurs analyses. Nous avons mis en avant le potentiel des méthodes de reconstruction basées sur la structure des branches pour simuler avec réalisme l'évapotranspiration d'un arbre. De plus, nous avons montré que lorsque les maquettes sont plus grossières, il s'avère nécessaire de déterminer avec précision le volume, la surface projetée au sol de la couronne foliaire et l'indice de surface foliaire pour espérer reproduire fidèlement à la réalité le taux d'évapotranspiration d'un arbre. Une autre analyse de sensibilité a été réalisée concernant

l'impact des différences de caractéristiques optiques et physiologiques entre les deux modèles. Nous avons mis en avant l'impact significatif des différences de caractéristiques physiologiques et l'impact non significatif des différences de caractéristiques optiques.

Dans un second temps, nous avons comparé l'évapotranspiration simulée par RATP à celle estimée par LASER/F. Une relation polynomiale a été établie entre les deux. Nous avons mis en évidence la surestimation de LASER/F lorsque le flux est faible et la sous-estimation lorsqu'il est fort. Cette différence provient principalement de la différence de caractéristiques physiologiques entre les deux modèles. Un problème de simulation de LASER/F de la température de surface du feuillage a aussi été mis en exergue. Enfin, nous avons comparé les simulations des modèles avec une mesure de flux de sève réalisée sur le terrain. Les simulations du modèle LASER/F sont cohérentes avec la mesure, mais dans une moindre mesure que celles du modèle RATP. Ainsi, d'après ces premiers constats très positifs, nous avons mis en avant le potentiel de ce nouveau module d'arbre intégré dans LASER/F pour simuler le fonctionnement d'un arbre.

Dans une cinquième et dernière partie, nous avons étendu les simulations à l'échelle d'un parc et nous avons étudié plusieurs termes du bilan d'énergie. Pour ce faire, le modèle LASER/F a été appliqué pour la première fois à un parc urbain végétalisé, le parc du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg. Une maille de 250 m x 250 m était envisagée initialement mais n'a pas pu être traitée, par soucis de temps de calcul trop long. Nous avons détaillé les choix effectués au niveau du paramétrage du modèle, pour que ce dernier soit en mesure de réaliser une simulation sur la zone d'intérêt du parc.

Les simulations obtenues sur une douzaine de journées estivales ont été comparées à de nombreuses mesures de terrain (capteur de flux de sève, bilan mètre, capteurs sur un mât à 17 m de hauteur, etc.). La comparaison a été divisée en trois parties relatives au sol enherbé, aux arbres et au parc en général. L'intérêt de cette comparaison a été d'évaluer les capacités du nouveau module de végétation intégré dans LASER/F, qui a pour objectifs de réussir à simuler : i) l'évapotranspiration de la végétation, ii) sa capacité à réguler sa température de surface et par conséquent à moins stocker de chaleur, par rapport aux surfaces artificielles, retrouvées en milieu urbain et iii) les ombres portées des arbres sur les objets alentour. Pour cela, nous avons analysé la cohérence des flux simulés et mesurés entre le jour et la nuit, mais aussi lorsque le sol est humide et sec.

Premièrement, l'analyse de l'évapotranspiration de la végétation a montré que dans LASER/F, l'arbre et l'herbe puisent bien de l'eau dans le sol suivant la sécheresse de celui-ci, puis ils la resituent dans l'atmosphère grâce au phénomène d'évapotranspiration. La nuit l'évapotranspiration est beaucoup plus faible qu'en journée. Les dynamiques des flux simulés sont cohérentes par rapport aux mesures, il n'y a pas de flux anormaux. De plus, nous avons montré l'importance du paramétrage des données en entrée, notamment de la réserve utile d'eau dans le sol et de la régulation stomatique au rayonnement incident. Puis, nous avons mis en avant les limites actuelles de LASER/F à simuler l'évapotranspiration d'un arbre à l'échelle d'un parc urbain. Pour l'instant, lorsque l'environnement urbain est pris en compte, seule une maquette 3D globale, avec très peu de faces, peut être envisagée en entrée au modèle. Or, ce type de maquettes réduit le taux d'évapotranspiration simulé au cours de la journée. Il semble donc nécessaire de, soit envisager une autre forme géométrique pour représenter les arbres, soit de repenser totalement la manière dont est intégré l'arbre dans le modèle. Enfin, nous pensons que la croissance de la couronne foliaire n'est pas à négliger lorsque l'on veut faire des simulations sur plusieurs mois.

Deuxièmement, les analyses ont indiqué que la végétation dans LASER/F régule sa température au cours de la journée. Par conséquent, le jour, sa température est logiquement bien inférieure à la température des surfaces minérales artificielles. Concernant le sol enherbé, bien que son comportement soit réaliste au cours de la journée, nous avons mis à jour un problème de bilan d'énergie non bouclé. Concernant les arbres, nous avons dévoilé un problème dans le calcul du bilan radiatif dans l'infrarouge. Ce problème se trouve surtout lorsque le feuillage est à l'ombre, lorsque le rayonnement infrarouge domine dans le calcul du bilan radiatif. Ce problème explique la température de surface du feuillage beaucoup trop faible par rapport à la température de l'air la nuit, et l'évapotranspiration nulle, la nuit. Ainsi, avec LASER/F, le feuillage réchauffe les objets alentour en leur apportant de l'énergie par rayonnement infrarouge. Néanmoins, la végétation contribue au rafraîchissement de l'atmosphère alentour, avec l'inversion du flux de chaleur sensible. Le rafraîchissement engendré par les arbres est cependant trop important, au vu de l'erreur de température de surface.

Enfin et troisièmement, nous avons montré à travers plusieurs grandeurs comparées, que les ombres portées des arbres semblent correctement simulées sur les surfaces adjacentes. Néanmoins, nous soupçonnons que le coefficient de transmission du rayonnement solaire, à travers la couronne d'un arbre, ne soit pas assez important.

Dans cette cinquième partie, nous avons aussi entrevu quels types d'applications pourront être entrepris à l'avenir avec le modèle LASER/F, une fois que le module de fonctionnement de la végétation aura été amélioré. Cet aperçu a été agrémenté avec des travaux existants dans la littérature. Grâce à l'interface d'utilisation de LASER/F, il sera aisé de montrer comment l'arbre réagit avec son environnement. De plus, différentes configurations de rues ou de quartiers pourront être simulées et pourront ainsi faire de LASER/F un outil d'aide à la décision pour l'aménagement de villes « vertes ». En revanche, le modèle nécessite encore une optimisation du code afin de montrer, par exemple, la distance d'impact d'un parc dans un quartier.

Perspectives

En cette fin de thèse, nous pouvons conclure que les objectifs fixés au départ ont été atteints. Ces travaux ont permis de faire avancer la recherche de l'équipe TRIO et de l'équipe PIAF sur le thème de la représentation 3D des arbres urbains dans les modèles numériques et de la simulation des interactions entre l'arbre et son environnement alentour. Cette thèse a aussi amené à envisager plusieurs perspectives de travail dans l'objectif de simuler le fonctionnement des arbres et le microclimat alentour. Nous avons classé ces perspectives en trois parties qui concernent : le code LASER/F, le processus de reconstruction 3D de l'environnement urbain et l'évaluation de la qualité des simulations.

Le module de végétation basse et haute intégré dans LASER/F doit continuer à être approfondi. Cela doit passer par la correction des erreurs mises en avant telles que la fermeture du bilan d'énergie d'une surface de sol enherbé. Les températures de surfaces du feuillage d'un arbre doivent aussi être améliorées. Nous pouvons imaginer nous inspirer des concepts utilisés dans RATP pour les appliquer à LASER/F, notamment sur le calcul du rayonnement absorbé dans la couronne foliaire. D'autres analyses pourront aussi aider à la compréhension des résultats du modèle, notamment en comparant les simulations du flux de chaleur sensible du sol avec des mesures. Etudier la cohérence des températures de surface

simulées sur l'ensemble du parc avec une mesure issue d'une caméra thermique couplée à un nuage de points de la zone serait aussi très utile. Ces mesures pourraient être comparées ponctuellement à des mesures existantes de radio-thermomètres dirigés vers le sol. Enfin, le code LASER/F mérite d'être optimisé (erreurs, temps de calculs) pour pouvoir fonctionner à l'échelle d'un quartier. Un chercheur postdoctoral informaticien commence déjà à travailler sur le sujet.

Il semble nécessaire de définir l'ordre d'importance de chacun des paramètres à fournir en entrée au modèle (nature du sol, indice de surface foliaire, réserve utile d'eau dans le sol, etc.) pour un paramétrage plus pertinent de celui-ci. Cette étape permettra de simplifier la tâche de paramétrage des utilisateurs par la suite. Pour ce faire, des études de sensibilités sur chaque paramètre en entrée devront être réalisées, dans le même esprit que celles qui ont déjà été réalisées au cours de cette thèse.

Pour continuer d'utiliser LASER/F à l'échelle du parc et dans le futur pour l'employer à l'échelle d'une rue, voire d'un quartier, trois points doivent être améliorés concernant **la prise en compte des arbres et de leur environnement alentour** : (i) la rapidité d'acquisition et de reconstruction de la maquette 3D des arbres, (ii) le niveau de détail de la maquette 3D des arbres et (iii) l'automatisation du processus de reconstruction d'une zone urbaine.

- Tout d'abord, nous pensons qu'il est nécessaire de se tourner vers un mode d'acquisition mobile pour pouvoir reconstruire de manière globale la géométrie de plusieurs arbres en même temps. Dans ce cas, l'extraction de la couronne des arbres pourra se faire avec l'outil TreeCrown, qu'il conviendra d'améliorer au niveau de la segmentation automatique des arbres. Concernant l'extraction automatique de l'indice de surface foliaire par arbre, il faudra étudier si la méthode PATH envisagée dans cette thèse pourra s'appliquer à des nuages de points provenant de données lasergrammétriques mobiles. Nous pourrions tester les reconstructions sur les données mobiles terrestres de l'IGN (Stéréopolis) que nous avons à notre disposition ou peut-être sur des données mobiles aériennes acquises par hélicoptère. Toutefois, les données aériennes devront posséder une densité de points plus importante que celle des données aériennes acquises par avion, que nous avons utilisées dans cette thèse.
- Le deuxième point concerne l'amélioration de la maquette 3D globale des arbres qui contient très peu de faces pour une simulation à l'échelle d'une rue ou d'un parc avec LASER/F. Nous avons vu au cours de cette thèse, qu'à cette échelle, la représentation des arbres utilisée impacte fortement les simulations du taux d'évapotranspiration. Il est probable que nous ne puissions obtenir un meilleur résultat avec si peu de faces par arbre. Deux solutions peuvent être alors envisagées :
 - o Trouver un meilleur compromis entre la précision des simulations et la simplicité des couronnes. L'analyse de sensibilité de LASER/F à la forme de la couronne, présentée en Annexe L, pourra être un point de départ pour cette étude. Etant donné l'importance du volume de la couronne et de sa surface projetée au sol, nous essayerons à travers ces nouvelles maquettes de conserver au maximum ces caractéristiques structurelles.
 - o Ou bien, modifier entièrement le concept du module d'arbre dans LASER/F, en le rendant similaire à celui retrouvé dans RATP. A travers cette thèse, nous avons vu l'importance de la bonne distribution spatiale du feuillage dans la maquette 3D représentant la couronne d'un arbre. Ainsi, l'objectif serait de maintenant représenter les arbres par des voxels dans LASER/F et de spatialiser le LAI dans la couronne. Pour ce dernier point, la méthode PATH pourra être utilisée. Toutefois, nous avons conscience qu'un tel changement de

concept, augmentera les temps de calculs. En effet, en plus des interactions avec l'environnement alentour, il y aura aussi les interactions entre chaque voxel, à l'intérieur de la couronne, à calculer. D'où la nécessité, en parallèle, d'optimiser le code. Cette solution est en cours d'étude par le chercheur postdoctoral informaticien.

Pour finir, seuls des arbres isolés ont été pris en compte dans nos simulations. Or, les parcs urbains sont souvent constitués de groupements d'arbres. Le travail commencé sur l'amélioration de l'outil TreeCrown pour reconstruire des maquettes de groupements d'arbres devra être poursuivi. Il sera nécessaire de réaliser une étude de sensibilité des simulations LASER/F au niveau de détail des maquettes d'arbres pour savoir si nous pouvons considérer un ensemble d'arbres individuels ou en un seul arbre pour représenter ces groupements.

- Finalement, la reconstruction d'une zone urbaine (rue, quartier) dans sa globalité pourra être plus automatisée. Nous pourrions nous inspirer de nombreux travaux sur ce sujet de recherche disponibles dans la littérature.

Nous pouvons envisager deux perspectives concernant l'**évaluation des simulations** de LASER/F :

- Les modèles de simulation ont été uniquement appliqués à la géométrie du tilleul argenté taillé en forme de tête de chat. Quand bien même de nombreux arbres sont taillés en ville, il n'est pas suffisant d'évaluer notre modèle sur un seul type d'arbres. Il semble donc primordial d'évaluer les simulations de LASER/F sur d'autres géométries d'arbres isolés avant une quelconque utilisation des aménageurs. Nous n'avons pas à notre disposition de mesures de flux de sève sur d'autres arbres pour évaluer les nouvelles simulations, mais cette évaluation sera toutefois possible grâce à l'utilisation conjointe du modèle RATP. Il faut noter également que le processus de reconstruction 3D détaillée d'arbres (pour une application de RATP) et globale (pour une application de LASER/F) mis en place au cours de cette thèse est applicable à différentes géométries d'arbres. La seule partie du processus à ne pas avoir été testée sur d'autres arbres est l'extraction de l'indice de surface foliaire à partir du nuage de points d'un arbre feuillu. Nous pouvons envisager de partir des données lasergrammétriques déjà acquises. Cependant, il sera nécessaire de réaliser des mesures allométriques pour chacun des arbres étudiés. Pour simplifier la comparaison des simulations, un même paramétrage des caractéristiques optiques et physiologiques peut être envisagé pour les deux modèles. Cette étude permettra de réellement quantifier l'impact de la spatialisation homogène du feuillage dans LASER/F selon l'arbre étudié.
- Nous pouvons aussi envisager de comparer les simulations du modèle LASER/F avec les simulations d'autres modèles microclimatiques. A ce jour, il nous semble qu'ENVI-met et VTUF-3D sont les modèles les plus proches de LASER/F, en matière de grandeurs simulées (évapotranspiration de la végétation et ombre portée des arbres), d'échelle d'application et de niveau de détail de représentation des arbres. Nous pourrions appliquer les trois modèles sur la même zone d'étude du parc avec les mêmes conditions initiales et de forçage météorologique. Avec une telle comparaison, nous pourrions avoir une idée du potentiel de LASER/F comparé à ces autres modèles.

Comme le traduisent les nombreuses perspectives détaillées ici, l'application de LASER/F pour étudier le rôle de la végétation sur le microclimat urbain n'est pas encore envisageable, car une évaluation plus approfondie des simulations reste à effectuer. Néanmoins, lorsque ce sera le cas, nous pourrions concevoir de montrer la variation de grandeurs suivant la présence

de végétation, telles que la température des surfaces ou l'indice de confort thermique des habitants en tout point de la scène de simulation. L'impact de la présence de végétation pourra être mesuré à l'échelle d'une maille. Avec ce type de modèles, nous pourrions aussi proposer des études d'aménagements de zones urbaines de manière à optimiser l'apport bénéfique que peut avoir la végétation sur le microclimat urbain.

Contributions

Publications

Cette thèse a fait l'objet des publications suivantes :

Publications dans des congrès internationaux

- **Bournez, E.**, Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2016). Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - XXIII ISPRS Congress, Commission III* (Vol. XLI-B8, pp. 257–264). 12 au 19 juillet, 2016, Prague, République Tchèque. *(Présentation poster de la publication)*
- **Bournez, E.**, Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2017). From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Commission II* (Vol. XLII-2/W3, pp. 113–120). 1^{er} au 3 mars, 2017, Nauplie, Grèce. *(Présentation poster de la publication)*
- **Bournez, E.**, Kastendeuch, P., Landes, T., Najjar, G., Saudreau, M., Colin, J., & Ngao, J. (2018). Simulation du rôle de la végétation d'un parc urbain à partir du modèle microclimatique LASER/F: cas d'un parc urbain à Strasbourg. In *Association Internationale de Climatologie - AIC*. 4 au 7 juillet, 2018, Nice, France. *(Présentation orale de la publication)*

Publications dans des journaux

- **Bournez, E.**, Landes, T., Georges, N., Kastendeuch, P., Ngao, J., & Saudreau, M. (2019). Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 1-10.
- Hu, R., **Bournez, E.**, Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J., & Yan, G. (2018). Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 357–368.
- Hu, R., **Bournez, E.**, Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J., & Yan, G. (2018). Comparison of Beer's law-based and 3D reconstruction-based methods for leaf area estimation of isolated trees using terrestrial laser scanning. *(En cours de rédaction)*

Travaux présentés lors de conférences

- **Bournez, E.**, Landes, T., Georges, N., Ngao, J., & Saudreau, M. (2016). From Lidar acquisition to FSPM – Application to 3D Urban Tree Transpiration Modeling. In *IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications - FSPMA 2016*. *(Présenté par Marc Saudreau)*

- **Bournez, E.**, Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., & Georges, N., (2017). Reconstruction 3D d'arbre à partir de données acquises au scanner laser terrestre pour la simulation de l'évapotranspiration d'un arbre. In 1^{er} *Atelier de Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains*. Toulouse, France.
- Kastendeuch, P., Georges, N., **Bournez, E.**, Landes, T., Colin, J., Nerry, F., Ngao, J., Améglia, T., & Saudreau, M. (2018). Characterizing and modeling the cooling effect of trees on the urban microclimate. In *the 2nd annual UrbanMycoServe meeting*. Porto, Portugal (*Présenté par Marc Saudreau*)
- **Bournez, E.**, Landes, T., Kastendeuch, P., Georges, N., & Saudreau, M., (2018). Reconstruction 3D d'un environnement urbain à partir de données photogrammétriques et lasergrammétriques acquises par voies aériennes pour la simulation du microclimat d'un parc urbain. In 2^{ème} *Atelier de Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains*. Strasbourg, France.
- **Bournez, E.**, Kastendeuch, P., Landes, T., Georges, N., Saudreau, M., Colin, J., & Ngao, J., (2018). Simulation of urban vegetation impact based on the microclimate model LASER/F: the case study of a park in Strasbourg. In *10th International Conference on Urban Climate/ 14th Symposium on the Urban Environment*. New-York, Etats-Unis.

Encadrements

Au cours de cette thèse, plusieurs projets ont été menés et ont permis de faire évoluer nos travaux :

- Projet de Recherche Technologique (1 jour par semaine d'octobre à janvier – 2015-2016) : **Coline Thoury**, étudiante en 5^{ème} année de topographie à l'INSA de Strasbourg, Modélisation 3D d'arbres à partir de données LiDAR multi-échos.
- Projet de Fin d'Etudes (6 mois – 2016) : **Marine Lempereur**, étudiante en 5^{ème} année de topographie à l'INSA de Strasbourg, Etude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres.
- Projet de Recherche Technologique (1 jour par semaine d'octobre à janvier – 2017-2018) : **Antoine Gouverneur**, étudiant en 5^{ème} année de topographie à l'INSA de Strasbourg, Reconstruction 3D des sols et des arbres de la ville de Strasbourg à partir de données LiDAR multi-échos.

J'ai également participé à des sessions posters au cours desquelles j'ai présenté mes travaux :

- Journée Posters, Ecole Doctorale MSII, Université de Strasbourg, 17 Octobre 2016, 2^{ème} année de thèse. (*Prix du meilleur poster*)
- Journée de la Recherche de l'INSA de Strasbourg, 23 mars 2017, 2^{ème} année de thèse. (*Prix du meilleur poster*)
- Journée de la Recherche de l'INSA de Strasbourg, 9 mai 2018, 3^{ème} année de thèse.

Références bibliographiques

- Aiteanu, F., & Klein, R. (2014). Hybrid tree reconstruction from inhomogeneous point clouds. *Visual Computer*, 30(6–8), 763–771.
- Åkerblom, M., Raunonen, P., Casella, E., Disney, M. I., Danson, F. M., Gaulton, R., ... Kaasalainen, M. (2018). Non-intersecting leaf insertion algorithm for tree structure models. *Interface Focus*, 8(2), 20170045.
- Albasha, R., Fournier, C., Pradal, C., Prieto, J. A., Louarn, G., & Lebon, E. (2016). HydroShoot: a new FSPM model for simulating hydraulic structure and gas-exchange dynamics of complex plants canopies under water deficit. In *IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modelling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108.
- Ambrosini, D., Galli, G., Mancini, B., Nardi, I., & Sfarra, S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013–7029.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245–255.
- Auat Cheein, F. A., Guivant, J., Sanz, R., Escolà, A., Yandún, F., Torres-Torriti, M., & Rosell-Polo, J. R. (2015). Real-time approaches for characterization of fully and partially scanned canopies in groves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 361–371.
- Bailey, B. N., & Ochoa, M. H. (2018). Semi-direct tree reconstruction using terrestrial LiDAR point cloud data. *Remote Sensing of Environment*, 208, 133–144.
- Bailey, B. N., Stoll, R., Pardyjak, E. R., & Miller, N. E. (2016). A new three-dimensional energy balance model for complex plant canopy geometries: Model development and improved validation strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219, 146–160.
- Béland, M., Baldocchi, D. D., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., & Verstraete, M. M. (2014). On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 82–97.
- Beland, M., Parker, G., Harding, D., Hopkinson, C., Chasmer, L., & Antonarakis, A. (2015). White Paper – On the Use of LiDAR Data at AmeriFlux Sites. In *AmeriFlux Meetings and Workshops* (pp. 1–33).
- Belot, A. (2007). *Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal : développement et validation d'un modèle quasi 3D, DART-EB*. Thèse de doctorat, AgroParisTech.

- Bodnaruk, E. W., Kroll, C. N., Yang, Y., Hirabayashi, S., Nowak, D. J., & Endreny, T. A. (2017). Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landscape and Urban Planning*, *157*, 457–467.
- Boudon, F., Preuksakarn, C., Ferraro, P., Diener, J., Nacry, P., Nikinmaa, E., & Godin, C. (2014). Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems obtained from laser scanning. *Annals of Botany*, *114*(4), 853–862.
- Bournez, E. (2015). *Reconstruction d'arbres en milieu urbain à partir de nuages de points*. Mémoire de Master 2, INSA de Strasbourg.
- Bournez, E., Kastendeuch, P., Landes, T., Najjar, G., Saudreau, M., Colin, J., & Ngao, J. (2018). Simulation du rôle de la végétation d'un parc urbain à partir du modèle microclimatique LASER/F: cas d'un parc urbain à Strasbourg. In *Association Internationale de Climatologie - AIC*. Nice, France.
- Bournez, E., Landes, T., Georges, N., Kastendeuch, P., Ngao, J., & Saudreau, M. (2019). Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. *Urban Forestry & Urban Greening*, *38*, 1–10.
- Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2016). Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - XXIII ISPRS Congress, Commission III* (Vol. XLI-B8, pp. 257–264). Prague, République Tchèque.
- Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2017). From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Commission II* (Vol. XLII-2/W3, pp. 113–120). Nauplie, Grèce.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, *97*(3), 147–155.
- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, *54*(392), 2403–2417.
- Bremer, M., Jochem, A., & Rutzinger, M. (2012). Comparison of Branch Extraction for Deciduous Single Trees in Leaf-on and Leaf-Off Conditions – an Eigenvector Based. *EARSel eProceedings*, *11*(1), 33–43.
- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., ... Havenith, G. (2011). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, *56*(3), 481–494.
- Bruse, M. (2004). ENVI-met v.3.0: Updated Model Overview. *University of Bochum*. Retrieved from www.envi-met.com
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, *13*(3–4), 373–384.

- Bucksch, A. K. (2011). *Revealing the skeleton from imperfect point clouds*. Thèse de doctorat, Delft University of Technology.
- Bucksch, A. K., Lindenbergh, R., & Menenti, M. (2010). SkelTre. Robust skeleton extraction from imperfect point clouds. *The Visual Computer*, 26(10), 1283–1300.
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raumonon, P., Herold, M., ... Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198–208.
- Caldwell, M. M., Meister, H.-P., Tenhunen, J. D., & Lange, O. L. (1986). Canopy structure, light microclimate and leaf gas exchange of *Quercus coccifera* L. in a Portuguese macchia: measurements in different canopy layers and simulations with a canopy model. *Trees*, 1, 25–41.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2012). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Cao, J., Tagliasacchi, A., Olson, M., Zhang, H., & Su, Z. (2010). Point Cloud Skeletons via Laplacian-Based Contraction. In *Shape Modeling International Conference (SMI) - IEEE* (pp. 187–197).
- Clair-Maczulajtys, D., & Bory, G. (1988). Modification de la répartition des glucides de réserve sous l'effand de l'élagage, chez deux arbres d'ornement (*Platanus acerifolia* willd. et *tilia platyphyllos* scop.). *Bulletin de La Societe Botanique de France. Actualites Botaniques*, 135(1), 41–53.
- Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Brauer, D. K., Howell, T. A., Tolk, J. A., & Copeland, K. S. (2017). Allometric method to estimate leaf area index for row crops. *Agronomy Journal*, 109(3), 883–894.
- Colombert, M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Computree. (2018). Computree Project. Retrieved September 1, 2018, from <http://computree.onf.fr/?lang=en>
- Cornea, N. D., Silver, D., Yuan, X., & Balasubramanian, R. (2005). Computing hierarchical curve-skeletons of 3D objects. *Visual Computer*, 21(11), 945–955.
- Côté, J. F., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., & Verstraete, M. M. (2009). The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 1067–1081.
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 477–493.
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1–2), 55–68.
- Da Silva, D., Balandier, P., Boudon, F., Marquier, A., & Godin, C. (2012). Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy: An appraisal of the effect of the

- precision level of crown description. *Annals of Forest Science*, 69(2), 181–193.
- Da Silva, D., Boudon, F., Godin, C., & Sinoquet, H. (2008). Multiscale Framework for Modeling and Analyzing Light Interception By Trees. *Multiscale Modeling & Simulation*, 7(2), 910–933.
- Danson, F. M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., & Allgöwer, B. (2007). Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *Geoscience and Remote Sensing Letters - IEEE*, 4(1), 157–160.
- Dauzat, J., Franck, N., Rapidel, B., Luquet, D., & Vaast, P. (2006). Simulation of Ecophysiological Processes on 3D Virtual Stands with the ARCHIMED Simulation Platform. In *Plant Growth Modeling and Applications, Second International Symposium on IEEE - PMA'06* (pp. 101–108).
- de Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99–109.
- de Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Le Bras, J., & Bonhomme, M. (2018). Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23, 260–286.
- Declet-Barreto, J., Brazel, A. J., Martin, C. A., Chow, W. T. L., & Harlan, S. L. (2013). Creating the park cool island in an inner-city neighborhood: Heat mitigation strategy for Phoenix, AZ. *Urban Ecosystems*, 16(3), 617–635.
- Delagrangé, S., Jauvin, C., & Rochon, P. (2014). PypeTree: a tool for reconstructing tree perennial tissues from point clouds. *Sensors*, 14(3), 4271–4289.
- Delagrangé, S., & Rochon, P. (2011). Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology. *Annals of Botany*, 108(6), 991–1000.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76.
- Disney, M. I., Boni Vicari, M., Burt, A., Calders, K., Lewis, S. L., Raunonen, P., & Wilkes, P. (2018). Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus*, 8(2), 20170048.
- Dones, N., & Adam, B. (2013). 3D Plant Architecture Acquisition. Retrieved September 1, 2018, from https://www6.ara.inra.fr/piaf_eng/Methods/3D-plant-architecture
- Dong, Z. (2015). Skeleton Extraction for Real Trees. *International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT)*, 7(4), 22–30.
- Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. dos S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224–239.
- Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., & Körner, C. (2008). Plant growth modelling and applications: The increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101(8), 1053–1063.

- Godin, C. (2000). Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 57(5), 413–438.
- Gorte, B., & Pfeifer, N. (2004). Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. 35, pp. 929–933).
- Granier, A., & Bréda, N. (1996). Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Annales Des Sciences Forestieres*, 53(2–3), 537–546.
- Grawe, D., Schlünzen, K. H., & Pascheke, F. (2013). Comparison of results of an obstacle resolving microscale model with wind tunnel data. *Atmospheric Environment*, 79, 495–509.
- Green, S. (1993). Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(3–4), 201–221.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., ... Zhang, N. (2011). Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 31(2), 244–272.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., ... Zhang, N. (2010). The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1268–1292.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Doneus, M., & Lerma, J. L. (2016). Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage. In F. Remondino & S. Stylianidis (Eds.), *3D Recording, Documentation and Management in Cultural Heritage* (pp. 305–368). Dunbeath, Caithness, Scotland: Whittles Publishing.
- Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H., & Disney, M. (2014). Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description. *Forests*, 5(5), 1069–1105.
- Hackenberg, J., Spiecker, H., Calders, K., Disney, M., & Raunonen, P. (2015). SimpleTree —An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. *Forests*, 6(11), 4245–4294.
- Hanafi, A., & Alkama, D. (2017). Role of the urban vegetal in improving the thermal comfort of a public place of a contemporary Saharan city. *Energy Procedia*, 119, 139–152.
- Hayot, C. (2014). *Etude des solutions de modélisation d ' un arbre en milieu urbain , en vue de son intégration dans les modèles météorologiques*. Mémoire de Master 2, INSA de Strasbourg.
- Hofierka, J., Gallay, M., Kanuk, J., Šupinský, J., & Šašák, J. (2017). High-resolution urban greenery mapping for micro-climate modelling based on 3D city models. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. 42, pp. 7–12).
- Houghton, J. (2002). *The physics of atmospheres*. Cambridge University Press.

- Howard, L. (1833). *The Climate of London, vol I. Harvey and Darton.*
- Hu, R. (2018). *Estimation cohérente de l'indice de surface foliaire en utilisant des données terrestres et aéroportées.* Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Hu, R., Bournez, E., Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., ... Yan, G. (2018a). Comparison of Beer's law-based and 3D reconstruction-based methods for leaf area estimation of isolated trees using terrestrial laser scanning, (En cours de rédaction).
- Hu, R., Bournez, E., Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., ... Yan, G. (2018b). Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 357–368.
- Hu, R., Yan, G., Mu, X., & Luo, J. (2014). Indirect measurement of leaf area index on the basis of path length distribution. *Remote Sensing of Environment*, 155, 239–247.
- Idso, S. B., Reginato, R. J., Jackson, R. D., & Pinter, P. J. (1981). Foliage and air temperature: evidence for a dynamic “equivalent point.” *Agricultural Meteorology*, 24, 223–226.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)].* IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3), 389–411.
- Jacob, A. (2016). *Etude des températures de surface en zone urbaine – mesures, modélisation et tentative de validation sur la Rue de l'Argonne.* Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg.
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017.
- Jarvis, P. G. (1976). The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 273(927), 596–610.
- Jiang, W., Xu, K., Cheng, Z.-Q., Martin, R. R., & Dang, G. (2013). Curve skeleton extraction by coupled graph contraction and surface clustering. *Graphical Models*, 75(3), 137–148.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., & Weiss, M. (2004). Methods for Leaf Area Index Determination Part I: Theories, Techniques and Instruments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19–35.
- Jonker, R., & Volgenant, A. (1987). A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. *Computing*, 38(4), 325–340.
- Jupp, D. L. B., Culvenor, D. S., Lovell, J. L., Newnham, G. J., Strahler, A. H., & Woodcock, C. E. (2009). Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna®. *Tree Physiology*, 29(2), 171–181.

- Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2009). Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar Energy*, 83(3), 333–341.
- Kastendeuch, P., & Najjar, G. (2015). Simulation of urban fluxes with a 3D canopy model. In *ICUC - 9th International Conference on Urban Climate*. Toulouse, France.
- Kastendeuch, P., Najjar, G., & Colin, J. (2017). Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F. *Urban Climate*, 21, 43–65.
- Kastendeuch, P., Najjar, G., Lacarrere, P., & Colin, J. (2010). Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. Introduction De par l'étendue de leurs surfaces artificielles, et sous certaines conditions. *Climatologie*, 7, 21–37.
- Katsouyanni, K., Pantazopoulou, A., Touloumi, G., Tselepidaki, L., Moustiris, K., Asimakopoulos, D., ... Trichopoulos, D. (1993). Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality. *Archives of Environmental Health*, 48(4), 235–242.
- Koc, C. B., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166, 486–508.
- Kong, F., Yan, W., Zheng, G., Yin, H., Cavan, G., Zhan, W., ... Cheng, L. (2016). Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, 22–34.
- Krayenhoff, E. S., Christen, A., Martilli, A., & Oke, T. R. (2014). A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees. *Boundary-Layer Meteorology*, 151(1), 139–178.
- Lachat, E., Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2015). Assessment of the accuracy of 3D models obtained with DSLR camera and Kinect v2. In *SPIE - Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII* (Vol. 9528, p. 95280G).
- Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., ... Vilà-Guerau De Arellano, J. (1998). The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16(1), 90–109.
- Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2). *Revue XYZ*, 128, 37–49.
- Landes, T., Grussenmeyer, P., & Boulaassal, H. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition , traitement des données et applications (partie 2/2). *Revue XYZ*, 129, 25–38.
- Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., ... Guillemain, S. (2014). Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ*, 141, 55–62.
- Landes, T., Saudreau, M., Najjar, G., Kastendeuch, P., Guillemain, S., Colin, J., & Luhahe, R. (2015). 3D tree architecture modeling from laser scanning for urban microclimate study. In *9th International Conference on Urban Climate - ICUC9, jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France.

- Lee, J. H., Ko, Y., & McPherson, E. G. (2016). The feasibility of remotely sensed data to estimate urban tree dimensions and biomass. *Urban Forestry & Urban Greening*, *16*, 208–220.
- Lee, K. H., & Ehsani, R. (2008). A Laser-Scanning System for Quantification of Tree-Geometric Characteristics. In *The Climate of London* (pp. 1–11). Providence, Rhode Island: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Lee, S. H., & Park, S. U. (2008). A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, *126*(1), 73–102.
- Lempereur, M. (2016). *Etude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres*. Mémoire de Master 2, INSA de Strasbourg.
- Li, R., Bu, G., & Wang, P. (2017). An Automatic Tree Skeleton Extracting Method Based on Point Cloud of Terrestrial Laser Scanner. *International Journal of Optics*, *2017*, 1–19.
- Li, X., Strahler, A. H., & Woodcock, C. E. (1995). Hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing - IEEE*, *33*(2), 466–480.
- Linacre, E. T. (1964). A note on a feature of leaf and air temperatures. *Agricultural Meteorology*, *1*, 66–72.
- Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, *52*(7), 697–713.
- Liss, K., Tooke, T. R., Heyman, E., Coops, N. C., & Christen, A. (2010). Vegetation characteristics at the Vancouver EPiCC experimental sites. *Environmental Prediction in Canadian Cities - EPiCC*, (Technical Report N. 3).
- Liu, Z., Zheng, S., & Zhao, L. (2018). Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area. *Atmosphere*, *9*(5), 198.
- Livny, Y., Pirk, S., Cheng, Z., Yan, F., Deussen, O., Cohen-Or, D., & Chen, B. (2011). Texture-lobes for tree modelling. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *30*(4).
- Livny, Y., Yan, F., Olson, M., Chen, B., Zhang, H., & El-Sana, J. (2010). Automatic Reconstruction of Tree Skeletal Structures from Point Clouds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *29*(6).
- Ma, L., Zheng, G., Eitel, J. U. H., Moskal, L. M., He, W., & Huang, H. (2016). Improved Salient Feature-Based Approach for Automatically Separating Photosynthetic and Nonphotosynthetic Components Within Terrestrial Lidar Point Cloud Data of Forest Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *54*(2), 679–696.
- Macher, H. (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : Reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Mallet, C., & Bretar, F. (2007). Le lidar topographique à retour d'onde complète : état de l'art. *Traitement Du Signal*, *24*(6), 385–410.

- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J. P., ... Tulet, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3–4), 135–157.
- Masson, V., Lion, Y., Peter, A., Pigeon, G., Buyck, J., & Brun, E. (2013). “Grand Paris”: Regional landscape change to adapt city to climate warming. *Climatic Change*, 117(4), 769–782.
- Massonnet, C., Regnard, J. L., Lauri, P. E., Costes, E., & Sinoquet, H. (2008). Contributions of foliage distribution and leaf functions to light interception, transpiration and photosynthetic capacities in two apple cultivars at branch and tree scales. *Tree Physiology*, 28(5), 665–678.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–139.
- Meagher, D. (1982). Geometric modeling using octree encoding. *Computer Graphics and Image Processing*, 19(2), 129–147.
- Mei, J., Zhang, L., Wu, S., Wang, Z., & Zhang, L. (2016). 3D tree modeling from incomplete point clouds via optimization and L1-MST. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(5), 999–1021.
- Mestayer, P., Durand, P., Augustin, P., Bonnefond, J., Benech, B., Campistron, B., ... Drobinski, P. (2003). UBL / CLU-ESCOMPTE: the urban boundary layer field experiment over Marseille and the database. In *International Conference on Urban Air Quality Measurement Modelling and Management* (pp. 392–395). Prague, République Tchèque.
- Miller, J., Morgenroth, J., & Gomez, C. (2015). 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 932–940.
- Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J. L., Gil-Ribes, J. A., & Gil, E. (2015). Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors*, 15(2), 3671–3687.
- Momo Takoudjou, S., Ploton, P., Sonké, B., Hackenberg, J., Griffon, S., de Coligny, F., ... Barbier, N. (2017). Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(4), 905–916.
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (1990). *Principles of environmental physics* (Edward Arn). London.
- Morgenroth, J., & Gomez, C. (2014). Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique—A proof of concept. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(1), 198–203.
- MTES. (2018). Lutte contre la précarité énergétique. Rapport du Ministère de la Transition

- Ecologique et Solidaire. Retrieved September 1, 2018, from <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/lutte-contre-precarite-energetique>
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, *134*, 157–166.
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Guillemain, S., & Prilaux, G. (2017). Centenary of the Battle of Vimy (France, 1917): Preserving the Memory of the Great War through 3D recording of the Maison Blanche souterraine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4(2W2)*, 171–177.
- Musy. (2014). *Une ville verte: Les rôles du végétal en ville* (Editions Q).
- Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P., Ngao, J., Saudreau, M., Landes, T., ... Nerry, F. (2015). A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France. In *9th International Conference on Urban Climate - ICUC9, jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France.
- Najjar, G., Kastendeuch, P., & Grussenmeyer, P. (2010). Topographie et climatologie urbaine. *Revue XYZ*, *123*, 33–40.
- Ngao, J., Adam, B., & Saudreau, M. (2017). Intra-crown spatial variability of leaf temperature and stomatal conductance enhanced by drought in apple tree as assessed by the RATP model. *Agricultural and Forest Meteorology*, *237*, 340–354.
- Ngao, J., Améglio, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Granier, A., & Najjar, G. (2015). Temporal variations of transpiration and latent heat fluxes from isolated linden crowns and lawns in a park at Strasbourg, France. In *9th International Conference on Urban Climate - ICUC9, jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France.
- Nice, K. A., Coutts, A. M., & Tapper, N. J. (2018). Development of the VTUF-3D v1.0 urban micro-climate model to support assessment of urban vegetation influences on human thermal comfort. *Urban Climate*, *24*, 1052–1076.
- Nishimura, N., Nomura, T., Iyota, H., & Kimoto, S. (1998). Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology. *Solar Energy*, *64(4–6)*, 197–207.
- Noilhan, J., & Mahfouf, J. F. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, *13(1–4)*, 145–159.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *108(455)*, 1–24.
- Oshio, H., Asawa, T., Hoyano, A., & Miyasaka, S. (2015). Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, *166*, 116–125.
- Owers, C. J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2018). Terrestrial laser scanning to quantify above-ground biomass of structurally complex coastal wetland vegetation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *204*, 164–176.

- Pfeifer, N., Gorte, B., Winterhalder, D., Sensing, R., & Range, C. (2004). Automatic Reconstruction of Single Trees from Terrestrial Laser Scanner Data. In *Proceedings of 20th ISPRS Congress, Commission V* (Vol. XXXV, pp. 114–119). Istanbul, Turkey.
- Pielke Sr, R. A. (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling* (Academic P). New York.
- Pigeon, G. (2007). *Les échanges surface-atmosphère en zone urbain - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Pons, A., Ruff, V., Massé, C., Martin, S., de Cadenet, P., Griebel, N., & Nguyen, D.-B. (2014). Les Ilots de Fraîcheur dans la ville. *Les Notes de l'ADEUS*, 140.
- Pradal, C., Dufour-Kowalski, S., Boudon, F., Fournier, C., & Godin, C. (2008). OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modeling. *Functional Plant Biology*, 35(10), 751–760.
- Preuksakarn, C. (2012). *Reconstructing Plant Architecture from 3D Laser Scanner Data*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2.
- Quan, L., Tan, P., Zeng, G., Yuan, L., Wang, J., & Kang, S. B. (2006). Image-based Plant Modeling. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3), 599–604.
- Rahman, M. Z. A., Majid, Z., Bakar, M. A. A., Rasib, A. W., & Kadir, W. H. W. (2015). Individual tree measurement in tropical environment using terrestrial laser scanning. *Jurnal Teknologi*, 73(5), 127–133.
- Ramirez, F. A., Armitage, R. P., & Danson, F. M. (2013). Testing the application of terrestrial laser scanning to measure forest canopy gap fraction. *Remote Sensing*, 5(6), 3037–3056.
- Raunonen, P., Casella, E., Calders, K., Murphy, S., Åkerbloma, M., & Kaasalainen, M. (2015). Massive-Scale Tree Modelling From Tls Data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II(3/W4), 189–196.
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., ... Lewis, P. (2013). Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5(2), 491–520.
- Redon, E. C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., & Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 385–411.
- Rizman, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4), 435–447.
- Rosell Polo, J. R., Sanz, R., Llorens, J., Arnó, J., Escolà, A., Ribes-Dasi, M., ... Palacín, J. (2009). A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems Engineering*, 102(2), 128–134.
- Ross, J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands* (Junk W. Pu).

- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., ... Voogt, J. A. (2005). BUBBLE - An urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3–4), 231–261.
- Roupioz, L., Kastendeuch, P., Nerry, F., Colin, J., Najjar, G., & Luhahe, R. (2018). Description and assessment of the building surface temperature modeling in LASER/F. *Energy and Buildings*, 173, 91–102.
- Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Ding, W., & Shen, J. (2018). The impact of green space layouts on microclimate and air quality in residential districts of Nanjing, China. *Forests*, 9(4), 224.
- Ruth, M., & Coelho, D. (2007). Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change. *Climate Policy*, 7(4), 317–336.
- Ryu, Y. H., Bou-Zeid, E., Wang, Z. H., & Smith, J. A. (2016). Realistic Representation of Trees in an Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 159(2), 193–220.
- Ryu, Y., Sonnentag, O., Nilson, T., Vargas, R., Kobayashi, H., Wenk, R., & Baldocchi, D. D. (2010). How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: A multi-instrument and multi-model approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 63–76.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240.
- Santos, T., & Ueda, J. (2013). Automatic 3D plant reconstruction from photographs , segmentation and classification of leaves and internodes using clustering. In *7th International Conference on Functional-Structural Plant Models* (pp. 95–97). Saariselka, Finland.
- Saudreau, M., Kastendeuch, P., Ngao, J., Najjar, G., & Améglio, T. (2015). Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques*, 45, 23–34.
- Saudreau, M., Pincebourde, S., Dassot, M., Adam, B., Loxdale, H. D., & Biron, D. G. (2013). On the canopy structure manipulation to buffer climate change effects on insect herbivore development. *Trees*, 27(1), 239–248.
- Schlünzen, K. H., Grawe, D., Bohnenstengel, S. I., Schlüter, I., & Koppmann, R. (2011). Joint modelling of obstacle induced and mesoscale changes-Current limits and challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 217–225.
- Sellier, D., & Fourcaud, T. (2005). A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. *Journal of Experimental Botany*, 56(416), 1563–1573.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PLoS One*, 6(8), e23777.
- Shahidan, M. F., & Jones, P. (2008). Plant canopy design in modifying urban thermal environment: Theory and guidelines. In *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture - PLEA*. Dublin, Irlande.

- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., & Kira, T. (1964a). A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology*, 14(3), 97–105.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., & Kira, T. (1964b). A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology*, 14(4), 133–139.
- Shlyakhter, I., Rozenoer, M., Dorsey, J., & Teller, S. (2001). Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(3), 53–61.
- Simon, H., Lindén, J., Hoffmann, D., Braun, P., Bruse, M., & Esper, J. (2018). Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. *Landscape and Urban Planning*, 174, 33–40.
- Sinoquet, H., Le Roux, X., Adam, B., Ameglio, T., & Daudet, F. A. (2001). RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. *Plant, Cell & Environment*, 24(4), 395–406.
- Sinoquet, H., & Rivet, P. (1997). Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees*, 11(5), 265–270.
- Sinoquet, H., Sonohat, G., Phattaralerphong, J., & Godin, C. (2005). Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: An analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant, Cell & Environment*, 28(9), 1158–1170.
- Sinoquet, H., Stephan, J., Sonohat, G., Lauri, P. É., & Monney, P. (2007). Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: Assessment with three-dimensional digitized apple trees. *New Phytologist*, 175(1), 94–106.
- Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *Journal of Computational Physics*, 227, 3645–3485.
- Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. (2018). The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 85–96.
- Sonohat, G., Sinoquet, H., Kulandaivelu, V., Combes, D., & Lescourret, F. (2006). Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies. *Tree Physiology*, 26(3), 337–351.
- Stewart, I. D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062–1080.
- Stovall, A. E. L., Vorster, A. G., Anderson, R. S., Evangelista, P. H., & Shugart, H. H. (2017). Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 200, 31–42.
- Tominaga, Y., Sato, Y., & Sadohara, S. (2015). CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: Validation and

- application studies. *Sustainable Cities and Society*, 19, 259–270.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, 38, 303–322.
- van Leeuwen, M., & Nieuwenhuis, M. (2010). Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 749–770.
- Verroust, A., & Lazarus, F. (2000). Extracting Sketeletal Curves from 3D Scattered Data. *The Visual Computer*, 16(1), 15–25.
- Vidrih, B., & Medved, S. (2013). Multiparametric model of urban park cooling island. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(2), 220–229.
- Vinet, J. (2000). *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain . Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Voogt, J. A. (2000). Image Representations of Complete Urban Surface Temperatures. *Geocarto International*, 15(3), 21–32.
- Wang, D., Hollaus, M., & Pfeifer, N. (2017). Feasibility of Machine Learning Methods for Separating Wood and Leaf Points from Terrestrial Laser Scanning Data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2/W4), 157–164.
- Wang, Y. P., & Jarvis, P. G. (1990). Description and validation of an array model - MAESTRO. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51(3–4), 257–280.
- Wang, Z., Zhang, L., Fang, T., Takis Mathiopoulos, P., Qu, H., Chen, D., & Wang, Y. (2014). A Structure-Aware Global Optimization Method for Reconstructing 3-D Tree Models From Terrestrial Laser Scanning Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9), 5653–5669.
- Wang, Z., Zhang, L., Fang, T., Tong, X., Mathiopoulos, P. T., Zhang, L., & Mei, J. (2016). A Local Structure and Direction-Aware Optimization Approach for Three-Dimensional Tree Modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8), 4749–4757.
- Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11(41), 41–76.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 37–53.
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1999). A general model for the structure, and algometry of plant vascular systems. *Nature*, 400(6745), 664.
- WHO. (2016). World Health Organization | Urban Population Growth. Retrieved September 1, 2018, from http://www.who.int/gho/urban_health/situation_trends/urban_population_growth_text/en

- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094.
- Xiangyu, W., Donghui, X., Guangjian, Y., Wuming, Z., Yan, W., & Yiming, C. (2014). 3D reconstruction of a single tree from terrestrial Lidar data. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) - IEEE International* (pp. 796–799).
- Xu, H., Gossett, N., & Chen, B. (2007). Knowledge and Heuristic Based Modeling of Laser-Scanned Trees. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26(4), 1–19.
- Xu, W., Su, Z., Feng, Z., Xu, H., Jiao, Y., & Yan, F. (2013). Comparison of conventional measurement and LiDAR-based measurement for crown structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 242–251.
- Yan, D. M., Wintz, J., Mourrain, B., Wang, W., Boudon, F., & Godin, C. (2009). Efficient and robust reconstruction of botanical branching structure from laser scanned points. *11th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, CAD/Graphics 2009*, 572–575.
- Yurtseven, H., Akgül, M., & Gülci, S. (2017). Modelling single tree structure with terrestrial laser scanner. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS* (Vol. 42, pp. 111–113).
- Zhu, C., Zhang, X., Hu, B., & Jaeger, M. (2008). Reconstruction of tree crown shape from scanned data. In *International Conference on Technologies for E-Learning and Digital Entertainment* (pp. 745–756). Springer, Berlin, Heidelberg.

Table des figures

Figure 1.1 – Spatialisation de l’îlot de chaleur urbain selon la zone d’étude, le jour et la nuit (traduite depuis Voogt (2000)).	4
Figure 1.2 – Schématisation des différents flux d’énergie et de rayonnement au-dessus d’une zone urbaine et rurale pour une journée avec un ciel dégagé (Colombert, 2008). La largeur des flèches permet de se rendre compte de l’importance des flux.	5
Figure 1.3 – Maquettes 3D d’un environnement urbain contenant des arbres, prises en compte dans les modèles microclimatiques : a) SOLENE-N3S (Robitu et al. (2006) et b) ENVI-met (Ambrosini et al., 2014).	11
Figure 2.1 – Schématisation de la géométrie 3D du module de végétation dans LASER/F comprenant le sol enherbé et l’arbre. Le LAI (indice de surface foliaire) donne une idée de la quantité de feuilles sur le sol et dans la couronne foliaire. Les profondeurs racinaires indiquent le niveau maximum de ponction de l’eau.	16
Figure 2.2 – Schématisation du processus de prise en compte du feuillage d’un arbre en trois dimensions dans RATP. La maquette finalement utilisée est constituée de voxels et pour chaque voxel une densité foliaire et un angle d’inclinaison des feuilles sont attribués. Ces informations sont souvent extraites d’une maquette discrète et grâce à son immersion dans une grille de voxels. La couche de voxels la plus basse représente la couche de sol.	18
Figure 2.3 – Prise en compte du feuillage d’un arbre avec a) RATP et avec b) LASER/F.	20
Figure 2.4 – Localisation de la zone d’étude du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg (coordonnées géographiques : 48°35'4.5" N ; 7°45'49.6" E) : a) vue de l’Eurométropole de Strasbourg (source : Géoportail), b) visualisation aérienne (prise de vue par hélicoptère) du parc et de la zone d’intérêt et c) photos au centre des rangées de tilleuls argentés : en hiver (à gauche) et en été (à droite). d) Zoom plus détaillé sur les tilleuls argentés étudiés : photographie des trois étapes de croissance de l’arbre, fraîchement taillé, état feuillu et après chute des feuilles, lorsque les pousses sont nues et e) description de l’architecture de l’arbre avec les têtes de chat aux extrémités de chaque branche.	23
Figure 2.5 – Photographies de différents capteurs utilisés dans la zone d’étude.	25
Figure 3.1 – Acquisition de nuages de points d’arbres (cercles jaunes) avec a) un scanner laser terrestre (étoiles rouges représentant les positions du SLT) sur plusieurs zones : b) jardin du Palais Universitaire ; c) boulevard Leblois et d) boulevard de la Marne. Nuages de points obtenus, après pré-traitement, pour le Georges’ tree : e) feuillu ; f) non feuillu et g) taillé.	31
Figure 3.2 – Echantillon de nuages de points d’arbres : a) marronnier (M1 – 10 000 points) ; b) tilleul argenté taillé (TAT – 57 000 points) ; c) marronnier (M2 – 42 points) ; d) marronnier taillé (MT – 46 000 points) ; e) tilleul argenté taillé avec ses pousses (TATP – 756 000 points) et f) platane taillé (PT – 92 000 points).	39

Figure 3.3 – Processus de reconstruction mis en place pour aboutir à une maquette détaillée d'un arbre adaptée à l'utilisation du modèle RATP.....	47
Figure 3.4 – Maquettes 3D globales (couronne, tronc et surface de sol) réalisées à partir des nuages de points d'un échantillon d'arbre feuillu (points noirs au sein des enveloppes – environ 100 000 points pour un tilleul argenté).....	50
Figure 3.5 – Comparaison de la surface foliaire totale (TLA – m ²) du Georges' tree à trois périodes différentes, extraite à partir du nuage de points SLT avec : la méthode allométrique (TLA obtenue à partir de la maquette détaillée d'un arbre) ; la méthode PATH avec une enveloppe concave ; et de la méthode PATH avec une enveloppe convexe.....	52
Figure 3.6 – Analyse de sensibilité de l'extraction du LAI avec la méthode PATH et la méthode allométrique, selon la densité du nuage de points utilisé pour l'extraction. (1/1) représente le nuage de points original où l'on prend en compte tous les points et (1/5) signifie que l'on a gardé 1 point tous les 5 points.....	52
Figure 3.7 – Nuage de points acquis par LiDAR aéroporté multi-échocs sur l'ensemble de l'Eurométropole en 2015 et visualisation du nuage de points classifié (haut), dans lequel la végétation a été isolée (bas).	55
Figure 3.8 – Photographies aériennes acquises sur la ville de Strasbourg en 2013.....	55
Figure 3.9 – Maquettes 3D des bâtiments de type LOD 1 avec 247 faces (BD TOPO) et de type LOD 2 avec 2344 faces (EMS3D).	56
Figure 3.10 – Schéma du protocole de reconstruction 3D du quartier du jardin du Palais Universitaire : reconstruction des bâtiments, reconstruction des sols (distinction entre le bitume (gris), sol nu (marron) et le sol enherbé (vert) et reconstruction des arbres (à partir du SLT (en bleu) et à partir du LiDAR terrestre (en vert), permettant d'aboutir à la maquette 3D intégrée dans le modèle LASER/F. Cette dernière recouvre plus d'une maille de 250 m x 250 m (délimitation rouge).....	57
Figure 3.11 – Problématique de la reconstruction 3D de groupement d'arbres : a) nuage de points LiDAR, b) maquette 3D EMS3D et c) maquette 3D obtenue avec TreeCrown	60
Figure 4.1 – Conductance stomatique (gs) de chaque modèle, RATP (en rouge) et LASER/F (en bleu) en fonction de facteurs météorologiques : rayonnement (RAY - W/m ²), température de l'air (T°AIR - °C), déficit de pression de vapeur d'eau (VPD - Pa), réserve utile d'eau dans le sol (EAU) et pression partielle de CO ₂ dans l'air (CO ₂ - Pa).	67
Figure 4.2 – Maquettes produites selon trois groupes de méthodes de reconstruction basées sur la reconstruction : de la structure des branches (groupe I), d'enveloppes (groupe II) et de voxels (groupe III). Description de la méthode de spatialisation du feuillage : à partir de relations allométriques autour des pousses (A), uniforme par tête de chat (B) et par enveloppe de la couronne (C).....	70
Figure 4.3 – Caractéristiques des couronnes foliaires pour chacun des trois groupes de méthodes de reconstruction d'arbres, telles que le volume (m ³), la surface foliaire projetée (PLA - m ²), l'indice foliaire (LAI), la densité foliaire (LAD moyenne – m ² /m ³), le facteur d'agrégation (μ) et le STAR.	74

- Figure 4.4 – Comparaison des performances évaporatives des maquettes par groupe de méthodes de reconstruction par rapport au cas de référence (LOD réf₍₁₎). Les pentes, a_T , des courbes de régression linéaire obtenues pour chaque maquette et chaque groupe sont énumérées dans le Tableau 4.3. 77
- Figure 4.5 – Comparaison de la pente a_T obtenue pour chaque maquette ($LOD = a_T LOD_{ref(1)}$ – voir Tableau 4.3) par rapport à deux caractéristiques de couronne déduites de chaque maquette : a) la PLA et b) le STAR. Les paramètres statistiques de la régression (ligne rouge) sont reportés dans le Tableau 4.4. 79
- Figure 4.6 – Dynamique journalière du rayonnement incident direct perpendiculaire (ligne continue) et diffus horizontal (ligne pointillée) sur les deux journées sélectionnées : a) journée nuageuse du 14 juin 2014 et b) journée ensoleillée du 16 juin 2014. 84
- Figure 4.7 – Régressions linéaires simples entre les taux d'évapotranspiration ($ET - W/m^2$) simulés du tilleul argenté, par pas de temps, avec LASER/F et RATP dans a) le cas n°1, b) le cas n°2 et c) le cas n°3. 85
- Figure 4.8 – Dynamiques journalières du taux d'évapotranspiration (W/m^2) simulé du tilleul argenté par les modèles : LASER/F (ligne pointillée), RATP cas n°1 (ligne continue noire), RATP cas n°2 (ligne continue rouge) et RATP cas n°3 (ligne continue verte). 87
- Figure 4.9 – Régression linéaire simple entre la température de surface du feuillage ($TS - ^\circ C$) simulée par LASER/F et celle simulée par RATP dans le cas n°2. 88
- Figure 4.10 – Dynamiques journalières de la température de surface du feuillage du tilleul argenté simulée par les modèles LASER/F (ligne pointillée), RATP cas n°2 (ligne continue rouge) et température de l'air mesurée sur le terrain (ligne grise continue avec marqueurs). . 89
- Figure 4.11 – Régressions linéaires simples et grandeurs statistiques calculées entre le taux d'évapotranspiration ($ET - W/m^2$) mesuré par le débit de flux de sève et simulé par : a) le modèle RATP et b) le modèle LASER/F. 92
- Figure 4.12 – Dynamiques journalières du taux d'évapotranspiration ($LE - W/m^2$) du tilleul argenté mesuré par les flux de sève (ligne pointillée) et simulé par RATP (ligne noire continue) et par LASER/F dans le cas où le bilan hydrique du sol est pris en compte (ligne bleue continue) ou pas (ligne bleue pointillée). 93
- Figure 5.1 – Maquettes autour du jardin du Palais Universitaire testées dans LASER/F : a) maquette du parc et b) maquette du quartier. 102
- Figure 5.2 – Caractéristiques sémantiques et typologiques attribuées à chaque face de chaque objet. 104
- Figure 5.3 – Maquette du parc a) avec la visualisation des différents matériaux, b) la maquette sous forme filaire avant fragmentation et c) la maquette sous forme filaire après fragmentation, en partant du centre de la zone. 105
- Figure 5.4 – Comparaisons des simulations du modèle LASER/F avec l'activation du calcul de radiativité (trait pointillé noir) et avec la désactivation du calcul de radiativité (trait continu vert). Trois flux radiatifs sont présentés : a) le rayonnement net, b) le rayonnement solaire

réfléchi et c) le rayonnement infrarouge (réfléchi + émis). Ces mesures proviennent d'un capteur implanté dans la maquette à 40 cm du sol enherbé.	106
Figure 5.5 – Illustration des capteurs utilisés pour obtenir les mesures de terrain comparatives et leur localisation dans la zone d'étude. La position des capteurs est illustrée en rouge dans un nuage de points SLT.....	107
Figure 5.6 – Dynamiques journalières de l'évapotranspiration (ET) moyenne sur les six tilleuls argentés simulée et mesurée, avec les écart-types associés, pour les périodes P1 et P2.	109
Figure 5.7 – Dynamique journalière du taux d'évapotranspiration du Georges' tree, lors de la journée du 17 juillet 2014 : mesuré (en pointillé), simulé par RATP (en continu noir) et simulé par LASER/F dans le cas : i) E1 – de l'étude à l'échelle de l'arbre avec 100 faces constituant la couronne (en continu bleu), ii) E2 – de l'étude à l'échelle du quartier avec 20 faces (en noir, avec marqueurs ronds) et iii) E3 – de l'étude à l'échelle de l'arbre avec 20 faces (en rouge, avec marqueurs carrés).	111
Figure 5.8 – Dynamiques journalières de la température de surface du feuillage (TS) à l'est et à l'ouest sur la période P3, simulée et mesurée, ainsi que la température de l'air mesurée à deux mètres de hauteur (en jaune).	114
Figure 5.9 – Dynamiques journalières du flux de chaleur latente (LE_{zone}) simulé, comparé à la mesure sur P1 et P2.	116
Figure 5.10 – Dynamiques journalières du flux de chaleur sensible (S_{zone}) simulé, comparé à la mesure sur P1 et P2.	117
Figure 5.11 – Dynamiques journalières simulées et mesurées du : a) rayonnement net émis par la zone (RN_{zone}) ; b) rayonnement solaire montant émis par la zone (en noir - $S_{zone}\uparrow$) et rayonnement infrarouge montant émis par la zone (en bleu - $IR_{zone}\uparrow$) sur P1 et P2.	119
Figure 5.12 – Spatialisation 3D des simulations de LASER/F concernant la température de surface (TS), le rayonnement infrarouge émis entre les objets (IR) et le flux d'évapotranspiration (ET), suivant deux moments dans la journée.	123
Figure 5.13 – Ecart de température de surface moyenne (TS) du sol et de la façade du Palais Universitaire, entre le cas 2 et le cas 1 (vert) et entre le cas 3 et le cas 1 (rouge). Le cas 1 représente la scène avec uniquement du bitume, le cas 2 contient du sol nu et de la végétation basse et le cas 3 contient des arbres en plus du cas 2.	124
Figure 5.14 – Comparaison de l'UTCI, soit des catégories de stress (Bröde et al., 2011), selon la présence d'un arbre (cas 3) ou non (cas2).	126

Table des tableaux

Tableau 3.1 - Caractéristiques structurelles des arbres établies à partir des nuages de points, des observations, des mesures manuelles et des calculs semi-automatiques du volume et de la surface de couronne projetée au sol (*em. = entremêlés).	39
Tableau 3.2 – Maquettes 3D à partir de nuage de points, produites avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree. Les figures sont agrandies dans l'Annexe G, page 179.	41
Tableau 3.3 – Evaluation du nombre et de la longueur totale de branches reconstruites avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree. (B = résultat brut et VP = vrais positifs). L'arbre PT ne possède pas de valeurs de référence car le squelette de référence de cet arbre était trop complexe à obtenir, étant donné la quantité trop importante de branches. Pour les mêmes raisons, les arbres TATP et PT n'ont aucune valeur de VP comptabilisée.	43
Tableau 3.4 – Evaluation du diamètre du tronc (DBH) et du volume de bois obtenus avec TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree.	43
Tableau 3.5 – Récapitulatifs des critères de comparaisons étudiés pour évaluer qualitativement et quantitativement les algorithmes : TreeArchitecture ; PlantScan3D et SimpleTree.	45
Tableau 4.1 – Caractéristiques structurelles de la couronne foliaire du tilleul argenté modélisée dans RATP et dans LASER/F.	65
Tableau 4.2 – Caractéristiques optiques d'une feuille dans les deux modèles : coefficient de réflexion (R.), de transmission (T.) et d'absorption (A.) suivant les longueurs d'onde du spectre solaire (PAR, NIR et IR).	66
Tableau 4.3 – Les caractéristiques structurelles, radiatives et physiologiques de la couronne des 15 maquettes sont présentées selon la méthode de reconstruction utilisée.	75
Tableau 4.4 – Analyse de régression multiple entre les pentes a_T ($LOD = a_T LOD_{ref(1)}$ – voir Tableau 4.3), et les caractéristiques des maquettes telles que le PLA, le STAR, le LAI, le Volume, la LAD moyenne et le μ	78
Tableau 4.5 – Grandeurs statistiques calculées à l'issue du calcul des régressions linéaires selon le cas n°1, n°2 et n°3 pour une journée nuageuse et ensoleillée.	87
Tableau 4.6 – Grandeurs statistiques calculées à l'issue du calcul des régressions linéaires entre les simulations et la mesure, selon le type de journées.	93
Tableau 5.1 – Description des périodes de simulations sur lesquelles le modèle LASER/F a été appliqué à l'échelle du parc. Les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes de chaque grandeur sur la période. La réserve utile d'eau (RU) dans le sol en surface est indiquée à partir de la valeur simulée par le modèle LASER/F en début et fin de période.	101
Tableau 5.2 – Choix réalisés quant à certaines parties de calculs du modèle LASER/F pour la simulation à l'échelle du parc.	104

Tableau 5.3 – Grandeurs simulées par LASER/F comparées aux grandeurs mesurées sur le terrain et les capteurs utilisés pour obtenir ces mesures. 107

Tableau 5.4 – Grandeurs statistiques calculées pour la comparaison relative à l'évapotranspiration (ET) des six tilleuls argentés sur l'ensemble des périodes de simulations (P1, P2 et P3) et relative à la température de surface (TS) de deux zones de feuillage du Georges' tree sur la période 3. 108

Tableau 5.5 – Différences de caractéristiques relatives à la maquette 3D de la couronne du Georges' tree entre l'étude 1 (E1 – à l'échelle de l'arbre - Chapitre 4) et l'étude 2 (E2 – à l'échelle du parc – Chapitre 5). Les caractéristiques sont la surface de l'enveloppe projetée au sol (PEA), le volume, la surface foliaire totale (TLA), l'indice de surface foliaire (LAI), la densité foliaire (LAD) et le nombre de faces par couronne. 112

Tableau 5.6 – Grandeurs statistiques calculées sur l'ensemble des périodes de simulation pour les comparaisons relatives à l'ensemble de la zone (encadré rose dans l'illustration) : flux de chaleur latente (LE_{zone}), flux de chaleur sensible (S_{zone}), rayonnement net (RN_{zone}), rayonnement solaire montant ($Solaire_{zone}\uparrow$), et rayonnement infrarouge montant ($IR_{zone}\uparrow$).. 115

Annexes

Annexe A.	Données en entrée et paramétrage de LASER/F	162
Annexe B.	Données en entrée et paramétrage de RATP	166
Annexe C.	Capteurs météorologiques et physiologiques utilisés.....	168
Annexe D.	Comparaison de méthodes d'acquisitions d'arbres.....	173
Annexe E.	Qualité du nuage de points d'un arbre acquis au SLT	175
Annexe F.	Relations allométriques établies pour le tilleul argenté	177
Annexe G.	Maquettes 3D du bois des arbres étudiés	179
Annexe H.	Formules des grandeurs statistiques utilisées	191
Annexe I.	Sensibilité de RATP au paramétrage optique et physiologique	192
Annexe J.	Données météorologiques utilisées	194
Annexe K.	Simulations de LASER/F à l'échelle du parc par rapport aux mesures	201
Annexe L.	Sensibilité de LASER/F au paramétrage d'un arbre	211
Annexe M.	Sensibilité de LASER/F au paramétrage du sol.....	214

Annexe A. Données en entrée et paramétrage de LASER/F

Les données en entrée nécessaires pour le fonctionnement du modèle LASER/F sont :

- La maquette 3D de la zone de simulation
- La composition et les propriétés physiques des matériaux
- L'indice de surface foliaire pour chaque surface de végétation
- Le forçage météorologique

Le contenu des fichiers comprenant ces données en entrée est détaillé ci-dessous.

- **Fichier .GEO contenant la maquette 3D de la zone de simulation**

```
0; // Altitude du point le plus bas de la scène (m)
7.76352259; // Longitude du centre(°)
48.58458157; // Latitude du centre(°)
138;3281; // Nb total d'objets et de faces dans la scène (faces non obligatoires)
batiment; // Type + milieu de l'objet N°0 *****
Bati6; // Nom
1; // Nb sous-objets
c; // Objet complexe
469; // Nb faces
toit; // Type de la face 0
Toit;4
206.9666748;111.8582687;154.184906
206.9666748;111.8582687;154.6784058
207.4817352;113.3374023;154.6784058
207.4817352;113.3374023;154.184906
toit; // Type de la face 1
Toit;4
207.4817352;113.3374023;154.184906
207.4817352;113.3374023;154.6784058
177.2735443;123.5866013;154.6736145
177.2735443;123.5866013;154.1808014
...
```

La maquette 3D utilisée dans LASER/F est décrite à travers ce fichier GEO. Une description particulière de chaque type d'objets présent dans la scène est effectuée (bâtiment, mobilier, terrain, végétation implicite). Le nombre de faces par objet est indiqué. Puis, chaque face d'un objet est décrite selon son type (toit, façade, quelconque, feuille implicite) et les coordonnées (X, Y, Z) de chacun de ses sommets.

- **Fichier MATERIEL.MAT définissant la composition des surfaces**

```
Numero;Nom;Revetement;Sol;Nb
Couches;Materiau0;DeltaZ0Materiau1;DeltaZ1Materiau2;DeltaZ2Materiau3;DeltaZ3Materiau4;DeltaZ4Ma
teriau5;DeltaZ5Materiau6;DeltaZ6
0;General;0;6;6;0;0.020000;0;0.040000;0;0.140000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
1;Prairie;1;6;6;0;0.020000;0;0.040000;0;0.140000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
2;C3;2;6;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
3;C4;3;6;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
4;Foret;4;6;6;0;0.020000;0;0.040000;0;0.140000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
5;Sol_nu;5;6;6;0;0.020000;0;0.040000;0;0.140000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
6;Irrigation;6;6;6;0;0.020000;0;0.040000;0;0.140000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
```

```

7;Roche;7;0;3;5;0.015000;5;0.075000;5;0.400000;
8;Mur;9;0;5;4;0.010000;4;0.170000;4;0.170000;5;0.120000;5;0.120000;
9;Toit;10;0;3;6;0.025000;6;0.025000;7;0.075000;
10;Vitre;11;0;6;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;
11;Feuilles;12;0;0;
12;Tronc;13;0;3;13;0.025000;13;0.025000;13;0.025000;
13;Eau_flaques;14;0;7;9;0.015000;9;0.200000;9;0.200000;9;0.100000;3;0.100000;3;0.300000;3;0.500000;
14;Route;15;0;7;10;0.015000;10;0.015000;11;0.070000;11;0.225000;11;0.225000;11;0.300000;11;0.550000;
15;Capteur_rayonnement;16;0;0;
16;Eau_mer_riviere;17;0;0;

```

Chaque type de faces renseigné dans le fichier .GEO est associé à un matériel (toit, mur, feuille, prairie, tronc, route, sol nu ...) grâce au fichier .MAT. Ce fichier permet de donner par matériel, le revêtement, la nature du sol, le nombre de couches constituant ce matériel et la nature et l'épaisseur de chacune de ces couches.

- **Fichier REVETEMENT.MAT décrivant les propriétés des revêtements**

```

Numero;Nom;Red;Green;Blue;Type;RootDepth;H_Arbres;Reflection lamb;Emissivite;
0;General;0.500000;0.500000;0.000000;GRAS;0.500000;0.000000;
1;Prairie;0.000000;0.500000;0.000000;GRAS;0.500000;0.000000;
2;C3;1.000000;1.000000;0.000000;C3;1.500000;0.000000;
3;C4;1.000000;0.500000;0.250000;C4;1.500000;0.000000;
4;Foret;0.000000;0.320000;0.000000;TREE;2.000000;20.000000;
5;Sol_nu;0.500000;0.250000;0.250000;NO;
6;Irrigation;0.310000;0.310000;1.000000;IRR;1.500000;0.000000;
7;Roche;0.500000;0.500000;0.500000;ARTIF;-99999;-99999;0.370000;0.900000;
8;Neige_Glace;1.000000;1.000000;1.000000;SNOW;
9;Mur;0.750000;0.750000;0.750000;ARTIF;-99999;-99999;0.200000;0.930000;
10;Toit;1.000000;0.000000;0.000000;ARTIF;-99999;-99999;0.150000;0.980000;
11;Vitre;0.000000;1.000000;1.000000;ARTIF;-99999;-99999;0.200000;0.980000;
12;Feuilles;0.000000;1.000000;0.000000;FOLTREE;2.000000;
13;Tronc;0.500000;0.250000;0.250000;ARTIF;-99999;-99999;0.350000;0.930000;
14;Eau_flaques;0.000000;0.500000;0.750000;WAT;
15;Route;0.320000;0.320000;0.320000;ARTIF;-99999;-99999;0.105000;0.900000;
16;Capteur_rayonnement;1.000000;1.000000;0.000000;CAPT;
17;Eau_mer_riviere;0.000000;0.250000;0.500000;RIV;

```

Dans ce fichier .MAT des informations sur le revêtement de chaque matériel sont décrites, telles que la profondeur racinaire pour les surfaces naturelles, le coefficient de réflexion dans le solaire et l'émissivité.

- **Fichier MATERIAU.MAT décrivant les propriétés des matériaux**

```

Numero;Nom;Conductivite thermique (W/m.K);Chaleur specifique (J/kg.K);Masse volumique (kg/m3);Indice Refraction solaire;Coefficient attenuation lineaire solaire;
0;Undefined;0.100000;1000;1.000000;0.000000;0.000000;
1;Vegetation;0.580000;4190;1000.000000;0.000000;0.000000;
2;Air;0.026000;1000;1.200000;1.000300;0.000000;
3;SolPrairie;1.000000;2100;1000.000000;0.000000;0.000000;
4;Platre;0.400000;500;2650.000000;0.000000;0.000000;
5;Beton;1.000000;840;1922.000000;0.000000;0.000000;
6;Tuile;0.800000;1634;1000.000000;0.000000;0.000000;
7;Isolation;0.040000;3840;10.000000;0.000000;0.000000;
8;Vitre;0.062000;1946;2530.000000;1.500000;0.000100;

```


Année	mois	jour	h	min	direct_perp (W/m ²)	diffus_hor (W/m ²)	iratmo horizontal (W/m ²)	Tair (C)	Hr (%)	Vitesse (m/s)	Direction (deg)	Pliquide (mm)	Psolide (mm)	Pression (hPa)
2014	6	13	9	0	852.625	99.330	365.522	22.319	53.991	1.457	360	0	0	1019.546
2014	6	13	10	0	894.375	87.956	372.100	23.734	49.264	1.958	360	0	0	1019.046

Les conditions initiales de la simulation (la température préalable des surfaces et le contenu en eau du sol) et le forçage météorologique (le rayonnement direct, le diffus atmosphérique, l'infrarouge atmosphérique, l'humidité, la vitesse du vent, la température de l'air à l'extérieur des bâtiments et la pression), ainsi que d'autres détails nécessaires au modèle sont indiqués dans ce fichier.

Annexe B. Données en entrée et paramétrage de RATP

Les données en entrée nécessaires pour le fonctionnement du modèle RATP sont :

- La maquette 3D du feuillage
- Les dimensions de la grille de voxels
- Les caractéristiques du feuillage (structurelles, optiques et physiologiques)
- La discrétisation du ciel
- Le forçage météorologique

Le contenu des fichiers comprenant ces données en entrée est détaillé ci-dessous.

- **Fichier .VGX contenant la maquette 3D du feuillage**

Obj	EchX	EchY	EchZ	TransX	TransY	TransZ	RotX	RotY	RotZ	R	G	B	Pousse
11	17.095	14.632	1	212	270	-494.365	21.62	16.801	234.756	0	234	0	1
11	17.308	14.815	1	188	270	-530.273	8.476	4.789	25.523	0	165	0	1
...													

Chaque ligne du fichier correspond à une feuille de la maquette 3D du feuillage. Pour chaque feuille, plusieurs informations sont renseignées : sa taille (EchX, EchY et EchZ), sa position dans l'espace (TransX, TransY et TransZ) et ses angles de rotation (RotX, RotY et RotZ).

- **Fichier .GRD contenant les dimensions de la grille de voxels**

```
13 13 21! Nombre de voxels en X Y et Z
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5! dx, dy,
(dz(jz),jz=1,njz)! Dimension des voxels en cm selon X, Y et Z
0.0 0.0 0.5! Coordonnées origine de la grille (m)
48.6 7.76 -2.0! Latitude, Longitude et décalage horaire (heures)
0! Angle (°) entre l'axe X et le nord
0! Décalage entre le feuillage le long de l'axe Y
1! Nombre d'entités (de couronnes différentes) dans la grille de voxels
2 0.075 0.20! Nombre de bandes, coefficient de réflexion du sol par bande (plage de longueur d'onde)
```

Ce fichier contient les paramètres de la grille de voxels qui englobe le feuillage, tels que la dimension des voxels, le nombre de voxels en x, y et z et la latitude et longitude du centre de lieu de simulation.

- **Fichier .VEG contenant les caractéristiques du feuillage**

```
0.5739! Facteur d'agrégation du feuillage dans les voxels (1: aléatoire ; <1: agrégé ; >1: homogène)
10! Nombre de classes d'angle d'inclinaison de 10°
0.0731 0.2120 0.3062 0.2585 0.1475 0.0027 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 ! % TLA par classe
2! Nombre de bandes (plages de longueur d'onde)
0.051 0.479! Coefficients de rediffusion dans le PAR et NIR
0.01 0.0071! Paramètres de conductance de la couche limite : ga = A1 vitesse_vent + A2
0. 4.12e-3! Paramètres de Jarvis : effet de la teneur en azote des feuilles : gsmax = A1 Na + A2
1;3;-1.223e-7;7.579e-4;1.0e-4! Paramètre de Jarvis : effet du PAR : fgsPAR = f(PAR, µmol m-2 s-1)
```


1;3;2.32e-4;-4.02e-2;2.07! Paramètre de Jarvis : effet du CO₂ : fgsPAR = f(CA, Pa)
 5;4;0.97498;1.;25.01445;11.150015! Paramètres de Jarvis : effet température de la feuille : fgsPAR = f(LT, °C)
 -0.266e-3;1.3764;1500.! Paramètres de Jarvis : effet du VPD : gsmax = A1 VPD (Pa) + A2, A3=seuil
 20.0;6.! Paramètres de Farquhar : Vcmax25°C (µmol CO₂ m⁻² s⁻¹) = A1 Na (g m⁻²) + A2
 52.0;15.! Paramètres de Farquhar : Jmax25°C (µmol e m⁻² s⁻¹) = A1 Na (g m⁻²) + A2
 0.25;0.05! Paramètres de Farquhar : Rd25°C (µmol CO₂ m⁻² s⁻¹) = A1 Na (g m⁻²) + A2, Rd > 0

Ce fichier comporte les caractéristiques structurelles (facteur d'agrégation, angles d'inclinaison des feuilles), optiques (coefficient de rediffusion) et physiologiques du feuillage (paramètres des fonctions de réponses de la conductance stomatique et de la photosynthèse au microclimat).

- **Fichier .SKV contenant les paramètres de discrétisation du ciel**

46				26.57	0	0.1207	0.014	47.41	72	0.1364	0.0336
9.23	12.23	0.1355	0.0043	26.57	72	0.1207	0.014	47.41	144	0.1364	0.0336
9.23	59.77	0.1355	0.0043	26.57	144	0.1207	0.014	47.41	216	0.1364	0.0336
9.23	84.23	0.1355	0.0043	26.57	216	0.1207	0.014	47.41	288	0.1364	0.0336
9.23	131.77	0.1355	0.0043	26.57	288	0.1207	0.014	52.62	36	0.1442	0.0399
9.23	156.23	0.1355	0.0043	31.08	23.27	0.1375	0.0197	52.62	108	0.1442	0.0399
9.23	203.77	0.1355	0.0043	31.08	48.73	0.1375	0.0197	52.62	180	0.1442	0.0399
9.23	228.23	0.1355	0.0043	31.08	95.27	0.1375	0.0197	52.62	252	0.1442	0.0399
9.23	275.77	0.1355	0.0043	31.08	120.73	0.1375	0.0197	52.62	324	0.1442	0.0399
9.23	300.23	0.1355	0.0043	31.08	167.27	0.1375	0.0197	69.16	0	0.1378	0.0495
9.23	347.77	0.1355	0.0043	31.08	192.73	0.1375	0.0197	69.16	72	0.1378	0.0495
10.81	36	0.1476	0.0055	31.08	239.27	0.1375	0.0197	69.16	144	0.1378	0.0495
10.81	108	0.1476	0.0055	31.08	264.73	0.1375	0.0197	69.16	216	0.1378	0.0495
10.81	180	0.1476	0.0055	31.08	311.27	0.1375	0.0197	69.16	288	0.1378	0.0495
10.81	252	0.1476	0.0055	31.08	336.73	0.1375	0.0197	90	180	0.1196	0.0481
10.81	324	0.1476	0.0055	47.41	0	0.1364	0.0336				
...				...							

Le ciel est discrétisé en 46 directions. Ce fichier contient les paramètres qui définissent chaque secteur : une élévation, un azimut et un poids représentant la fraction de rayonnement diffus sous le ciel dégagé ou couvert. Cette discrétisation est réalisée suivant les travaux de Den Dulk. (1989). *The interpretation of remote sensing, a feasibility study*. Wageningen University.

- **Fichier .MTO contenant le forçage météorologique**

jour	heure	PARglob	PARdif	NIRglob	NIRdif	Ratmos	Tsol	Tair	Eair	CO2air	Vent
164	8	358.3696	60.9852	264.1179	44.9519	359.0	36.0	20.8	1419.1	36.8	1.4
164	9	431.5489	56.9836	320.7011	42.3460	365.5	39.3	22.3	1455.2	36.4	1.5
...											

Les conditions météorologiques, par heure, autour de l'arbre étudié sont renseignées dans ce fichier. Il y a le rayonnement global et diffus dans le PAR et le NIR, le rayonnement atmosphérique, la température de surface du sol et de l'air, la quantité de vapeur d'eau et de CO₂ dans l'air et la vitesse du vent.

Annexe C. Capteurs météorologiques et physiologiques utilisés

Ces capteurs ont été installés en suivant les instructions des constructeurs. Ils ont régulièrement été étalonnés en usine.

C.1. Capteurs utilisés pour le forçage météorologique

- **Pyranomètre et pyrgéomètre sur une monture astronomique**

Une monture astronomique a été positionnée sur le toit d'un bâtiment universitaire à 700 m du site. Cette monture contient un pyranomètre (CMP11 – Kipp & Zonen) et un pyrgéomètre (CGR4 – Kipp & Zonen). Ces deux capteurs permettent de mesurer respectivement le rayonnement solaire (PAR + NIR) dans le direct et le diffus ainsi que le rayonnement infrarouge atmosphérique. Grâce à la monture astronomique, le parcours du soleil dans le ciel est suivi, ce qui permet d'obtenir l'angle zénithal du soleil. Ainsi, ce dispositif permet de mesurer le rayonnement global et diffus perpendiculaire ou à l'horizontal. L'intervalle de mesure est toutes les deux minutes.



Précision constructeur des capteurs :

- < +/- 10 % sur la somme journalière

- **Capteur météorologique**

Un capteur météorologique a été positionné au sommet d'un mât de 17 m de hauteur au centre du parc. Il contient une sonde rotronic (HC253 – Campbell) qui permet de mesurer la température de l'air et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. Ces mesures sont ici disponibles une fois par heure.



Précision constructeur des capteurs :

- Température à +/- 0,1 °C à 20,0 °C
- Humidité à +/- 0,8 % à 23,0 °C

- **Anémomètre sonique**

Un anémomètre sonique (CSAT3 – Campbell) est positionné au sommet d'un mât de 17 m de hauteur au centre du parc. Il mesure la vitesse du vent en trois dimensions. Sa fréquence de mesure est de 20 mesures par secondes. Sur la photographie il correspond à la structure avec des crochets.



Précision constructeur du capteur :

- Vitesse du vent centimétrique

- **Bilan-mètre à quatre composantes**

Un bilan-mètre à quatre composantes (CNR1 – Kipp & Zonen) est positionné à 40 cm du sol enherbé au centre du parc. Pour le forçage météorologique nous nous intéressons au pyrgéomètre (CG3) dirigé vers le bas, car en mesurant le rayonnement infrarouge montant il nous permet de déterminer la température de surface du sol. Une mesure est réalisée tous les quarts d'heure.

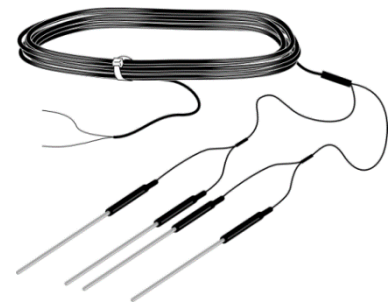


Précision constructeur du capteur :

- +/- 10 % sur la somme journalière

- **Thermistances en profondeur dans le sol**

Entre deux tilleuls argentés, un profil de température du sol est mesuré jusqu'à 1 m de profondeur grâce à des thermistances (T107 – Campbell). Dans notre cas les mesures sont réalisées toutes les heures.



Précision constructeur du capteur :

- +/- 0,3 entre -55,0 °C et 70,0 °C

C.2. Capteurs utilisés pour l'évaluation des simulations numériques de LASER/F et de RATP

Capteurs mesurant des grandeurs relatives au sol enherbé

Nous avons cherché à évaluer le maximum de composantes du bilan d'énergie, d'une zone de sol enherbé, simulées par LASER/F. Pour ce faire, quatre dispositifs, pour la plupart entièrement automatiques, ont été installés sur le terrain.

- **Bilan mètre à quatre composantes**

Le bilan mètre à quatre composantes (CNR1 – Kipp & Zonen), présenté ci-dessus, a permis de mesurer le bilan radiatif à 40 cm du sol enherbé. Ainsi, le rayonnement montant et descendant dans le solaire et l'infrarouge ont été mesurés. Pour cela, deux capteurs sont dirigés vers le haut et deux autres vers le bas. Le CNR1 contient donc deux pyranomètres (CM3 – Kipp & Zonen) et deux pyrgéomètres (CG3 – Kipp & Zonen). La cadence des mesures et leur précision sont les mêmes que précédemment. Dans le modèle LASER/F, un tel capteur fictif a été intégré pour permettre les comparaisons. Ce capteur a un champ de vision de 180°, alors que le champ de vision du CNR1 est de 150°.

- **Thermistances en profondeur dans le sol**

Les thermistances décrites précédemment vont permettre de mesurer la température du sol sur sept niveaux différents (-5 cm, -10 cm, -20 cm, -40 cm, -60 cm, -80 cm et -100 cm). La cadence des mesures et leur précision sont identiques à celles indiquées précédemment. Ces

températures mesurées ont permis d'analyser les simulations de LASER/F, qui donne comme résultat la température en profondeur à la limite et au centre de chaque couche de sol naturel.

- **Flux-mètre**

Un flux-mètre (HFP 01 L – Campbell) est positionné à 8 cm de profondeur dans le sol au centre du parc. Il permet de mesurer un signal qui est proportionnel au flux de chaleur dans le sol. La cadence des mesures a été fixée à 20 minutes. LASER/F fournit toutes les informations nécessaires pour chaque couche de sol pour pouvoir extraire un flux de chaleur dans le sol comparable à celui mesuré sur le terrain.



Précision constructeur du capteur :

- Signal entre -10 % et 5 %

- **Chambres à transpiration**

Deux chambres à transpiration ont été utilisées dans le jardin pour réaliser des mesures de l'évapotranspiration du sol enherbé. Ces chambres sont composées de chacune d'une sonde rotronic (HC253 – Campbell) permettant de mesurer la température et l'humidité de l'air. Ce dispositif manuel consiste à positionner une « cloche hermétique » sur un socle permanent, d'environ 60 cm², pendant deux minutes pour réaliser une mesure. Pour comparer les simulations LASER/F avec ces mesures, l'emprise exacte des deux chambres, une plus proche d'un arbre que l'autre, a été déterminée et correspond à deux faces dans la maquette 3D utilisée pour les simulations.



Précision constructeur des capteurs :

- Température à +/- 0,1 °C à 20,0 °C
- Humidité à +/- 0,8 % à 23,0 °C

- Une station de mesure du **rapport de Bowen** a été positionnée au centre du jardin. En principe, ce dispositif donne une information complète sur le bilan d'énergie de la pelouse, cependant les mesures obtenues ne sont pas encore exploitables et n'ont donc pas été utilisées dans ces travaux.

Capteurs mesurant des grandeurs relatives aux arbres

Deux types de capteurs ont été utilisés pour mesurer des grandeurs relatives au fonctionnement des arbres afin d'évaluer le nouveau module d'arbre de LASER/F.

- **Radio-thermomètres**

Quatre radio-thermomètres (IR120 – Campbell) fixés sur le Georges' tree permettent de mesurer l'irradiance des surfaces visées. Un vise le sol enherbé, un autre le sol nu ainsi que le bitume et les deux derniers sont dirigés vers la couronne du Georges' tree : l'un est orienté vers l'est et l'autre vers l'ouest. Ces capteurs ont un champ de vision de 40° et mesurent donc l'irradiance émise par le feuillage et l'air en même temps. LASER/F permet d'extraire la température de surface de chaque triangle composant la scène de simulation. L'emprise des surfaces visées par les IR120 a été déterminée grâce aux nuages de points lasergrammétriques et les faces correspondantes dans la maquette 3D des arbres ont été repérées. Comme seulement 20 faces représentent l'arbre dans la maquette, la superficie des faces sélectionnées est supérieure à l'emprise réelle des capteurs. Les mesures des IR120 ont été réalisées toutes les 15 minutes.

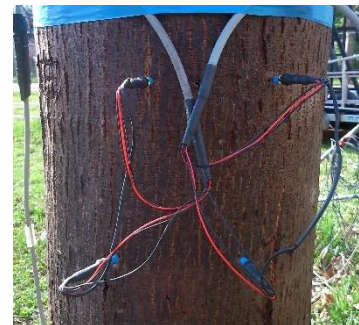


Précision constructeur des capteurs :

- $\pm 0,2$ °C à l'étalonnage
- Mais $\pm 1,0$ °C dans la nature

- **Capteurs de flux de sève**

Sur six tilleuls argentés présents dans le jardin des capteurs de flux de sève ont été installés à 1,3 m sur le tronc. Ils mesurent le débit de flux de sève par arbre qui permet de quantifier leur évapotranspiration. Un thermocouple de thermistances (TDTP-30 – Cottbus) est utilisé pour cela. Le principe de la mesure a déjà été présenté page 91, Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.1. Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes. Cette grandeur mesurée est directement comparable aux simulations, puisque LASER/F permet d'extraire les flux par objet, et donc par arbre. Ces mesures ont été aussi comparées aux simulations de RATP.



Précision constructeur des capteurs :

- Différence de température à $\pm 0,1$ °C

Précision effective :

- Flux à en moyenne ± 10 %

Capteurs mesurant des grandeurs relatives à l'ensemble du parc

Afin de quantifier les flux émanant de l'ensemble de la zone du parc, des capteurs ont été positionnés à une hauteur de 17 m sur un mât au centre de celui-ci.

- **Pyranomètre et pyrgéomètre**

Deux capteurs de rayonnement, le pyranomètre CMP11 et le pyrgéomètre CGR4 (Kipp & Zonen), dirigés vers le bas permettent de mesurer le rayonnement solaire et infrarouge montant du parc. Le champ de vision de ces capteurs de 180° correspond au champ de vision du capteur fictif implanté dans la simulation de LASER/F pour réaliser les comparaisons.



Précision constructeur des capteurs :

- < +/- 10 % sur la somme journalière

- **Anémomètre sonique et analyseur de gaz**

Un anémomètre sonique (CSAT3 – Campbell) et un analyseur de gaz (LI-7500A – LI-COR) sont positionnés au sommet du mât. Comme il a été présenté dans la partie C.1., le premier capteur permet de mesurer la vitesse du vent en trois dimensions. Le deuxième capteur permet de mesurer la quantité de vapeur d'eau dans l'air, ainsi que la concentration en CO₂. La combinaison de ces mesures permet de calculer le flux de chaleur latente et le flux de chaleur sensible émanant de l'emprise du capteur (zone du parc). La fréquence de mesure des capteurs est de 20 mesures par secondes. Pour les comparaisons avec les simulations de LASER/F, un capteur fictif permettant de mesurer l'ensemble de ces flux sur une emprise imposée a été utilisé. Nous avons émis l'hypothèse que cette emprise représentait une superficie rectangulaire au sol de 2 400 m². Toutefois, nous ne savons pas réellement la véritable emprise du dispositif qui est très complexe à déterminer.

Précision constructeur des capteurs :

- Vitesse du vent centimétrique
- Quantité de vapeur d'eau à 0,11 ppm
- Concentration en CO₂ à 0,0047 ppt

- **Globe gris et globe noir**

Un globe noir (BlackGlobe – Campbell) et un globe gris (PT100 - Campbell) ont été installés au centre du jardin à environ 2 m du sol pour mesurer l'indice de confort thermique d'une personne se trouvant en ce lieu. Ces globes contiennent des thermistances qui mesurent une grandeur combinant les effets de la température, de l'humidité et du vent. La cadence des mesures a été fixée à une heure. Dans la simulation de LASER/F, les mêmes types de capteurs ont été implantés pour permettre les comparaisons.



Précision constructeur des capteurs :

- +/- 0,2 °C entre 0 °C et 70,0 °C (globe noir)
- +/- 0,1 °C (globe gris)

Annexe D. Comparaison de méthodes d'acquisitions d'arbres

Au cours de cette thèse, nous avons souhaité suivre le débourrement d'un tilleul argenté au cours de la période estivale. L'objectif fut l'étude de l'évolution de la couronne foliaire, en calculant à chaque fois le volume de la couronne. Pour cela, une fois par semaine, nous avons réalisé une acquisition d'un nuage de points du même arbre (tilleul argenté). Pour éviter d'avoir à utiliser le SLT, nous avons décidé d'utiliser un appareil photo pour réaliser les acquisitions. La reconstruction du volume, ne demandant pas une grande précision dans le nuage de points, nous avons utilisé l'appareil photo d'un Iphone (Apple – 5S) pour réaliser les acquisitions.

Par la suite, nous avons évalué la qualité des acquisitions avec ce capteur. Pour ce faire, nous avons comparé le nuage de points d'un arbre acquis par deux méthodes d'acquisitions différentes et différents capteurs. Les capteurs utilisés étaient : un scanner laser terrestre (FARO Focus 3D X 330), un appareil photo professionnel (CANON EOS 5D) et un appareil photo de portable (Iphone 5s).

Le protocole d'acquisition employé avec le SLT et le traitement des données acquises ont été réalisés selon la description effectuée dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.1.2, page 30. Avec les appareils photos, le protocole a consisté à réaliser plusieurs clichés convergents vers l'arbre étudié et autour. Le traitement des photographies acquises a été réalisé avec le logiciel PhotoScan (Agisoft) par corrélation dense. Le géoréférencement du nuage de points obtenu a été possible grâce à des cibles positionnées sur le tronc de l'arbre et relevées au tachéomètre. La Figure 1 présente le nuage de points du tilleul argenté, obtenu avec les trois capteurs.

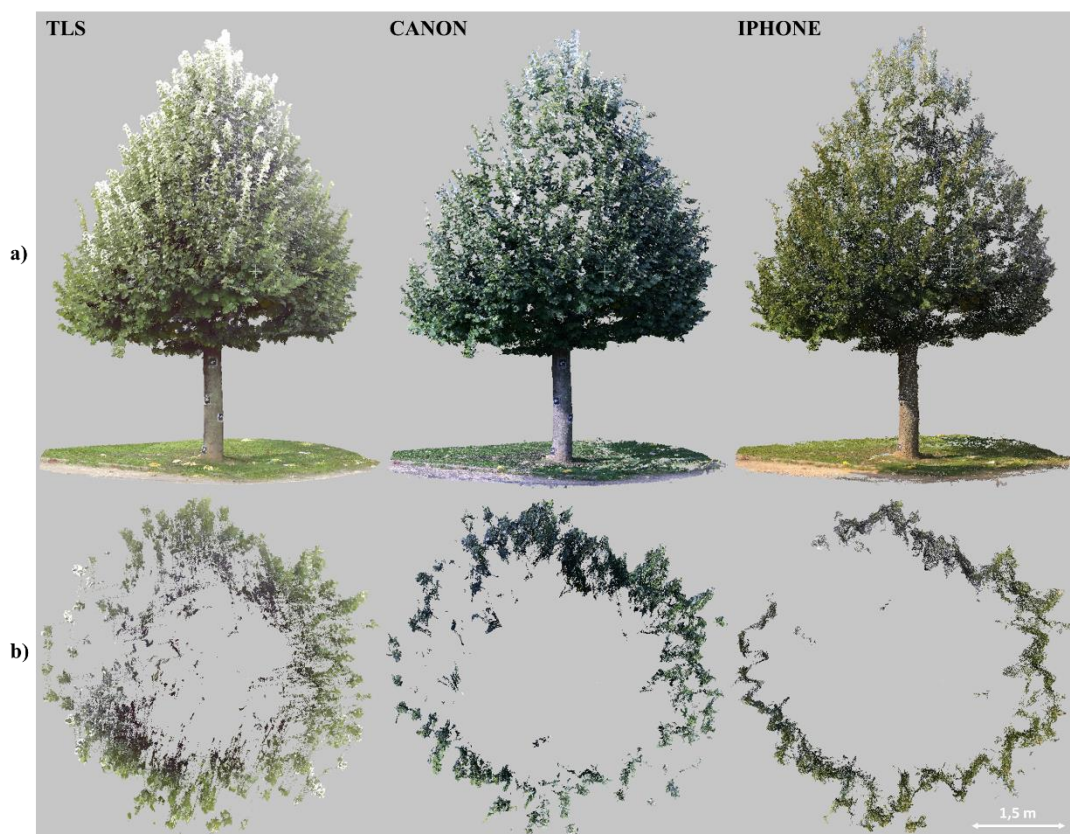


Figure 1 – Nuages de points d'un tilleul argenté obtenus avec le SLT, le CANON et l'Iphone. a) vue de face et b) coupe transversale de la couronne sur 50 cm.

A partir d'une brève analyse, nous pouvons voir que le nuage de points acquis avec le SLT est plus complet (1 830 871 points) que le nuage de points obtenu avec le CANON (1 016 765 points), qui lui-même est plus complet que le nuage de points acquis avec l'Iphone (417 784 points). La coupe transversale montre que la lasergrammétrie permet d'acquérir des points plus à l'intérieur de la couronne que la photogrammétrie. Le CANON permet d'acquérir plus de détails des feuilles, que ne le permet l'Iphone, avec lequel le nuage de points est plus incomplet. Quatre stations ont été nécessaires avec le SLT, pour obtenir ce nuage de points, alors que 37 et 48 prises de vues ont été utilisées avec respectivement, le CANON et l'Iphone.

Annexe E. Qualité du nuage de points d'un arbre acquis au SLT

Au cours de cette thèse, nous avons évalué l'exactitude d'un nuage de points d'un arbre (Georges' tree), acquis avec le scanner laser terrestre (FARO Focus 3D X 330) avec une méthode destructive. Plus précisément, nous cherchions à déterminer si l'acquisition au SLT permettait d'obtenir des points sur l'ensemble de la longueur des pousses et par conséquent, si le nuage de points acquis permettait, d'avoir la vraie longueur des pousses. Pour ce faire, le mode opératoire s'est déroulé sur le terrain et au bureau.

Premièrement, nous avons réalisé une acquisition au SLT de l'arbre en question. A partir du nuage de points obtenu, nous avons sélectionné les pousses de cinq têtes de chat, à partir desquelles nous avons réalisé notre évaluation (Figure 1). Au total, 107 pousses ont été sélectionnées. Le choix des têtes de chat s'est effectué en fonction de leur répartition dans la couronne de l'arbre et aussi en fonction de leur accessibilité.

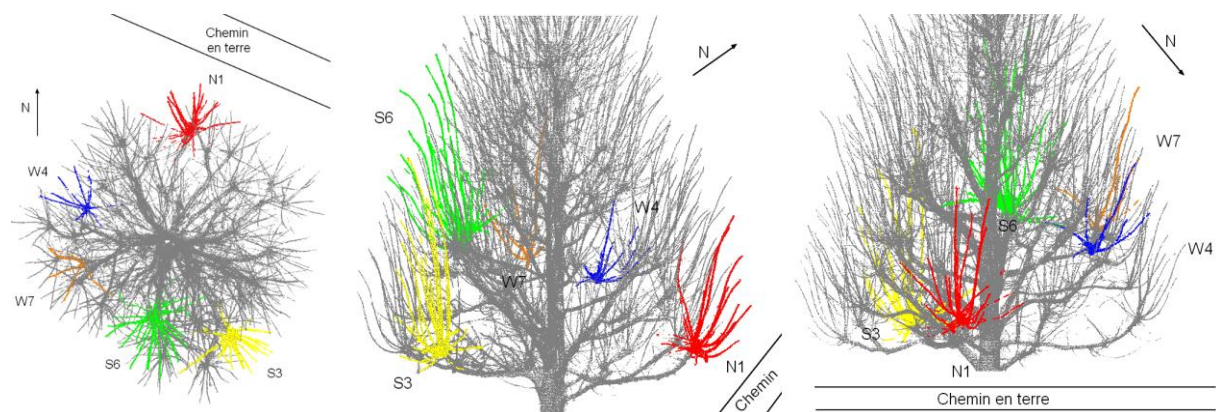


Figure 1 – Croquis, réalisé à partir du nuage de points SLT, permettant de visualiser les cinq têtes de chat choisies.

Puis, nous avons prélevé dans l'arbre chacune des pousses des têtes de chat, en les coupant avec un sécateur (Figure 2a). De plus, chacune des pousses a été numérotée avec une étiquette (Figure 2b). En parallèle, munis d'un ordinateur portable, nous avons segmenté chaque pousse coupée, directement dans le nuage de points SLT (Figures 2a et 2c). Cette étape a été cruciale pour localiser chaque pousse prélevée dans le nuage de points et leur associer la bonne étiquette.

Ensuite, nous avons réalisé les mesures nécessaires à l'évaluation. Pour la mesure de référence, nous avons utilisé un scanner à bras (FaroArm Edge). Chaque pousse coupée a été scannée avec ce scanner, qui permet d'avoir un nuage de points précis en dessous du millimètre. Puis, nous avons digitalisé numériquement le nuage de points de chaque pousse, pour connaître leur longueur de référence. Concernant la mesure sur le nuage de points SLT, à partir de chaque nuage de points des pousses, nous avons aussi procédé à une digitalisation afin de déterminer leur longueur.

Grâce à ces mesures, nous avons ainsi pu évaluer la qualité d'un nuage de points d'un tilleul argenté, acquis avec le SLT dans les conditions d'acquisition décrite dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.1.2, page 30. En enlevant les erreurs de mesure, liées aux nuages de points incomplets, nous avons obtenu **une erreur moyenne de -1 cm** et **une exactitude de +/- 3 cm**.

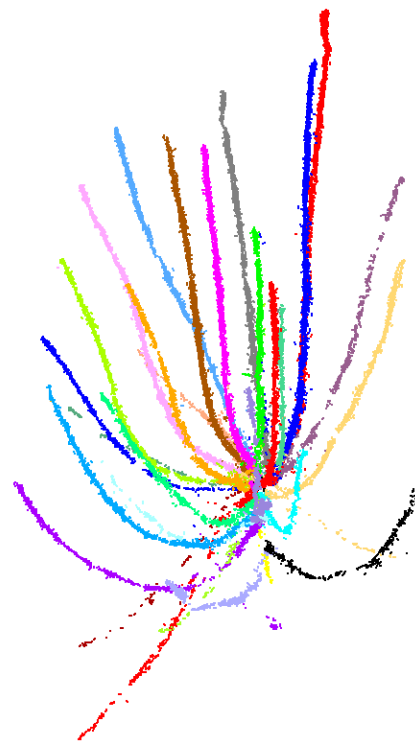
Le scanner utilisé engendre donc un systématisme de -1 cm sur la longueur des pousses et une distribution des erreurs de +/- 3 cm. Dans le cas bien précis de ce tilleul argenté, si l'on considère l'ensemble des pousses acquises, y compris celles incomplètes, l'erreur moyenne obtenue est alors de -5 cm et l'exactitude est de +/- 13 cm.



a)



b)



c)

Figure 2 – Mode opératoire réalisé sur le terrain : a) principe d'acquisition, b) numérotation des pousses réelles et c) en parallèle, segmentation des pousses correspondantes dans le nuage de points SLT.

Annexe F. Relations allométriques établies pour le tilleul argenté

Pour aboutir à une maquette 3D détaillée d'un tilleul argenté, nous utilisons des relations allométriques pour spatialiser le feuillage à partir de la maquette 3D du bois de l'arbre. Dans cette annexe le protocole réalisé pour obtenir ces relations allométriques en trois étapes est présenté.

F.1. Prélèvements réalisés sur le terrain des pousses végétatives

La première étape consiste à prélever sur le terrain suffisamment de pousses végétatives des tilleuls argentés étudiés pour pouvoir calculer par la suite des relations allométriques fiables. Cette opération a été effectuée pendant la période estivale où les arbres sont feuillus. Munis d'un escabeau et d'un sécateur, nous avons prélevé environ 25 pousses réparties sur six tilleuls argentés. Nous avons essayé de prélever des pousses en extérieur et en intérieur de couronne, plus ou moins hautes dans l'arbre et plus ou moins longues pour avoir un échantillon de pousses assez représentatif.

F.2. Mesures effectuées sur les pousses

Pour chaque pousse, leur longueur ainsi que la distance entre les pétioles et la longueur des pétioles ont été mesurées manuellement à l'aide d'un ruban (Figure 1a). De plus, nous avons procédé à un comptage de l'ensemble des feuilles par pousse. Enfin, chaque feuille a été coupée et placée sur une feuille papier rouge à côté d'un carré de référence de 4 cm x 4 cm (Figure 1b). Cette mise en place a permis de mesurer la surface de chaque feuille à partir d'un traitement automatique d'une image prise avec un appareil photo.

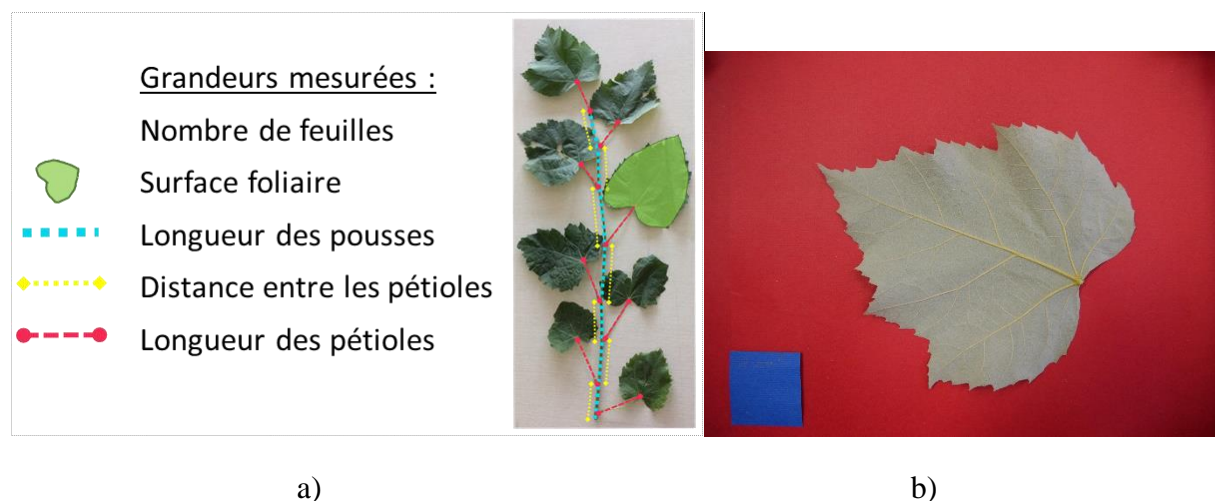


Figure 1 – Mode opératoire : a) mesures réalisées sur chaque pousse et b) photographie réalisée pour chaque feuille.

F.3. Elaboration des relations allométriques

Sur la base de ces mesures, plusieurs relations allométriques ont été établies selon la méthode de [Sonohat et al. \(2006\)](#) :

- Entre le nombre de feuilles par pousse et la longueur de pousse (1)
- Entre la surface totale de feuilles par pousse et la longueur de pousse (2)
- Entre la surface d'une feuille et le rapport de sa longueur (3)
- Entre la longueur d'une feuille et sa largeur (4)
- Entre la longueur du pétiole et la longueur de la feuille

Les relations présentées dans la Figure 2, sont utilisées dans cette thèse pour reconstruire le feuillage explicite des maquettes 3D détaillée d'arbres. Elles ont été établies en août 2013. Des relations allométriques similaires ont été obtenues pour trois autres dates d'acquisition : septembre 2014, début juillet 2017 et fin août 2017.

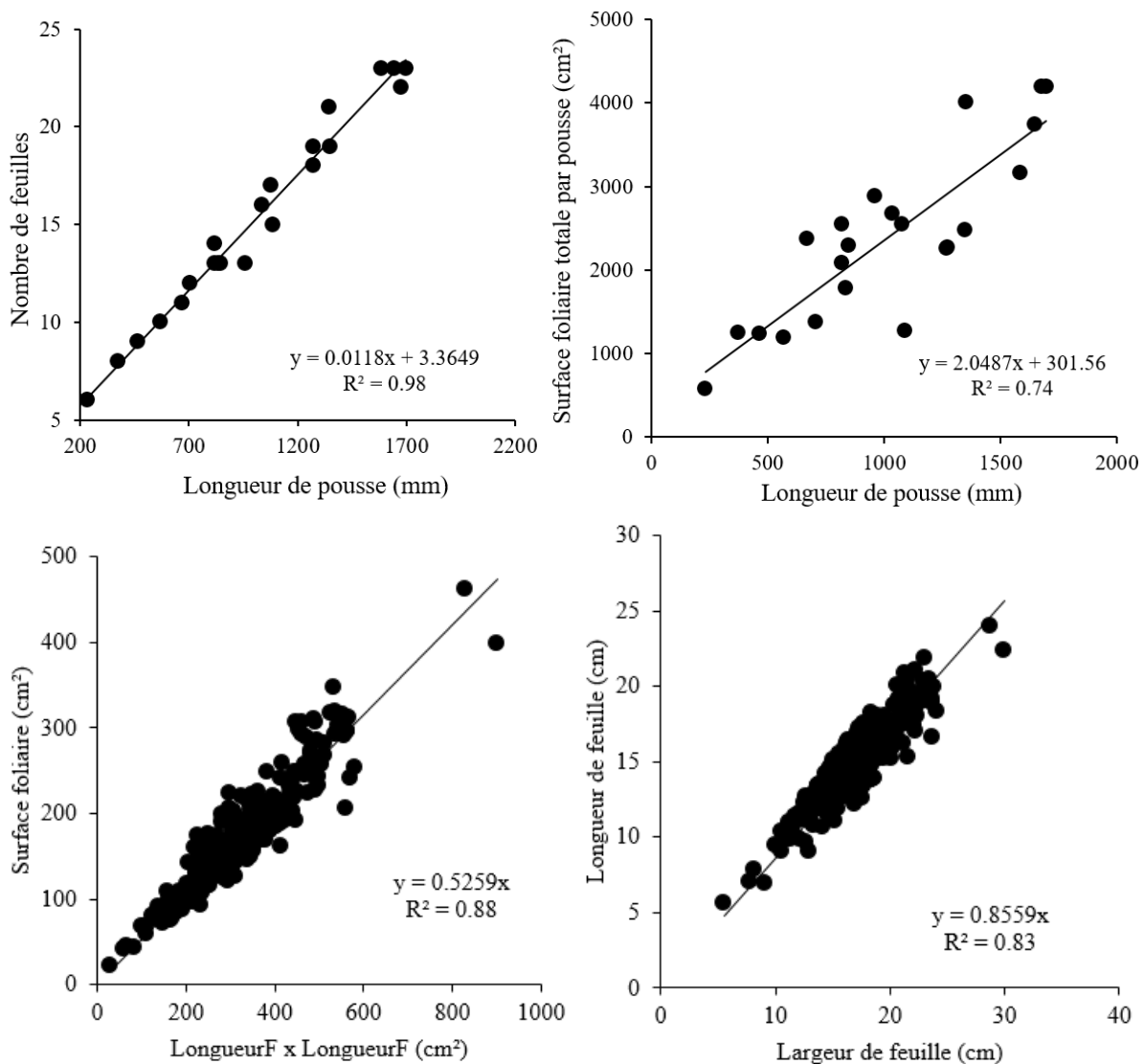


Figure 2 – Relations allométriques calculées et utilisées pour reconstruire le feuillage d'un tilleul argenté.

Annexe G. Maquettes 3D du bois des arbres étudiés

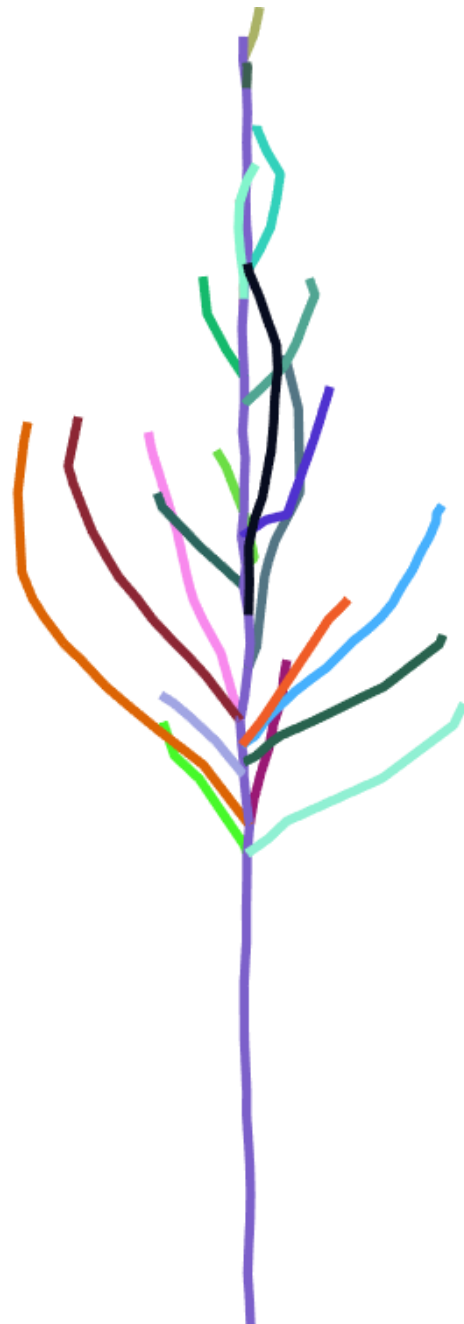
Cette annexe permet de mieux visualiser, pour chaque arbre étudié dans le Chapitre 3, sous-partie 3.1.2., son nuage de points SLT, sa maquette 3D de référence et la maquette 3D reconstruite par chacun des algorithmes : TreeArchitecture, PlantScan3D et SimpleTree.

G.1. Marronnier (M1)

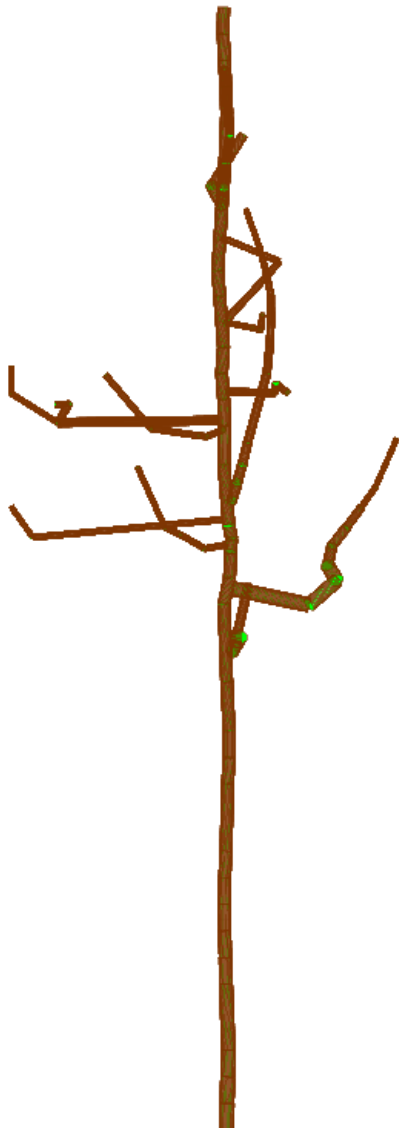
Nuage de points



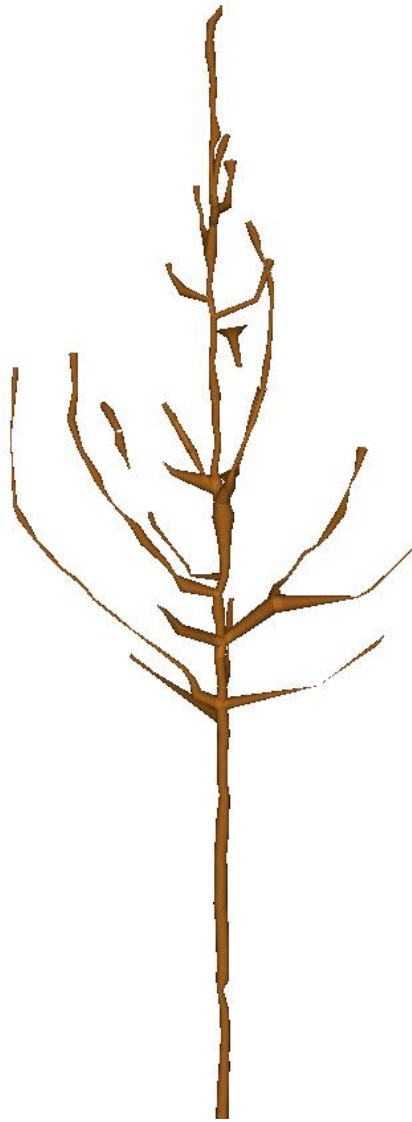
Maquette de référence



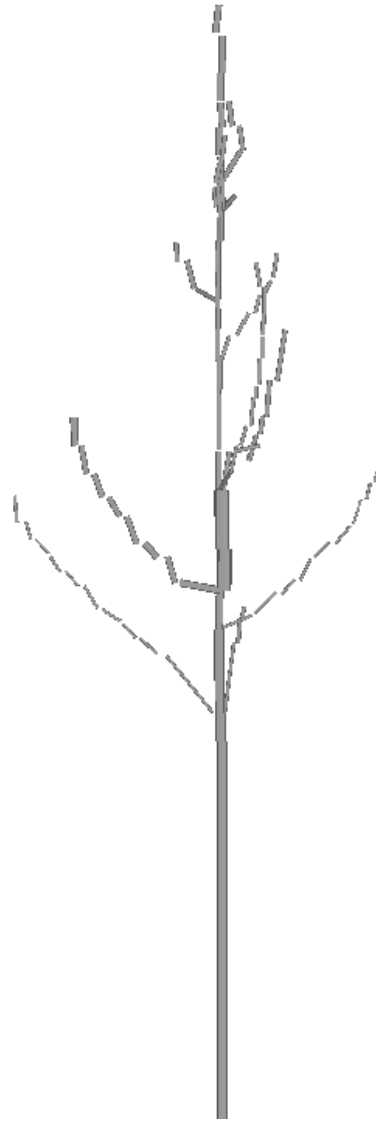
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D

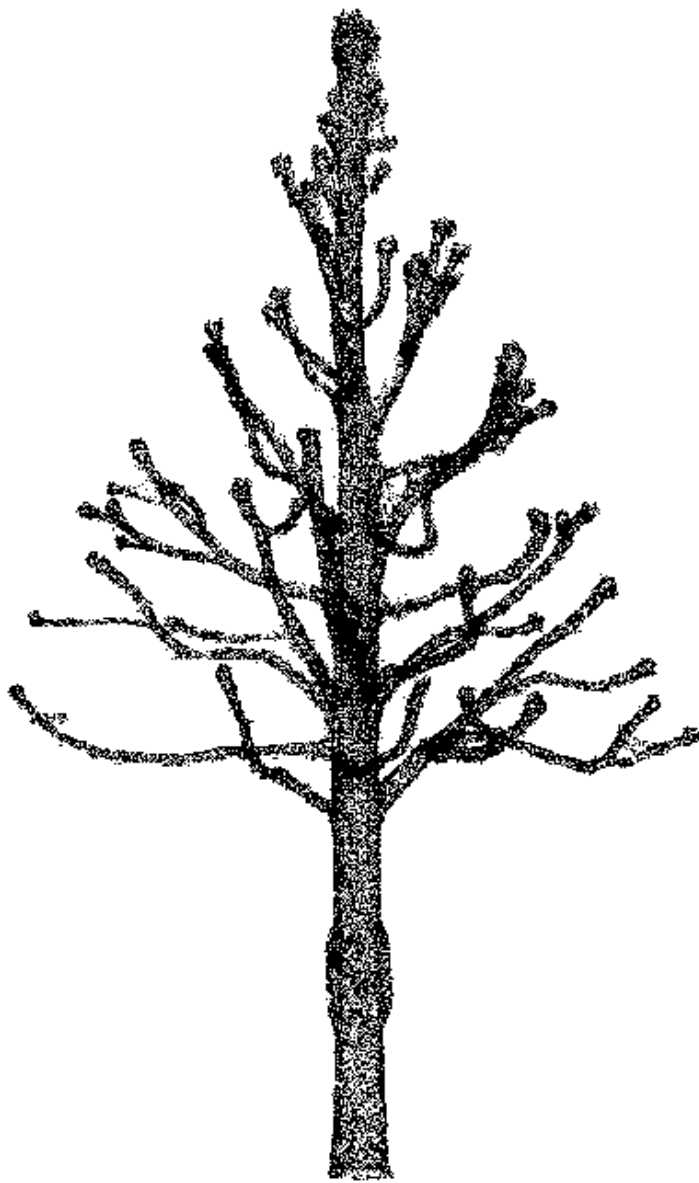


Maquette reconstruite avec SimpleTree

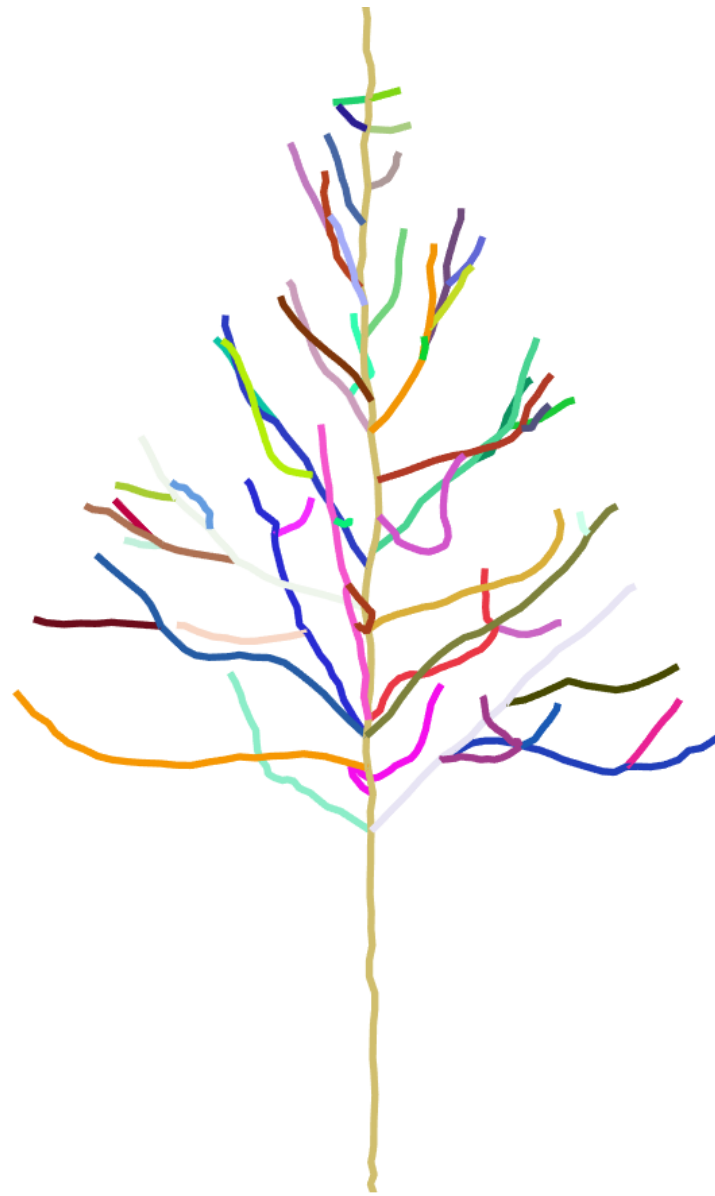


G.2. Tilleul argenté taillé (TAT)

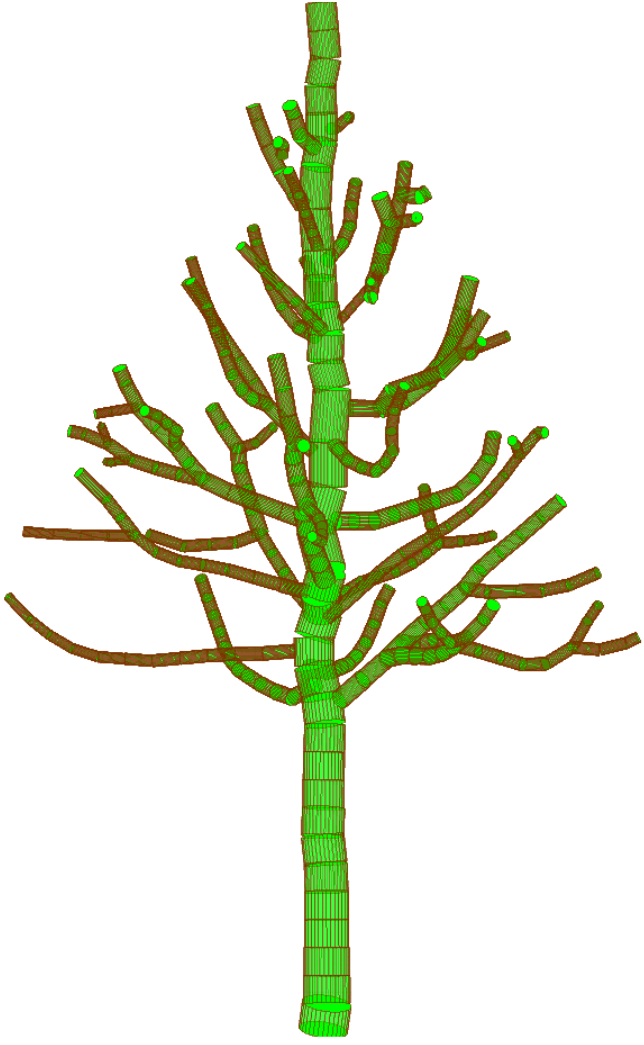
Nuage de points



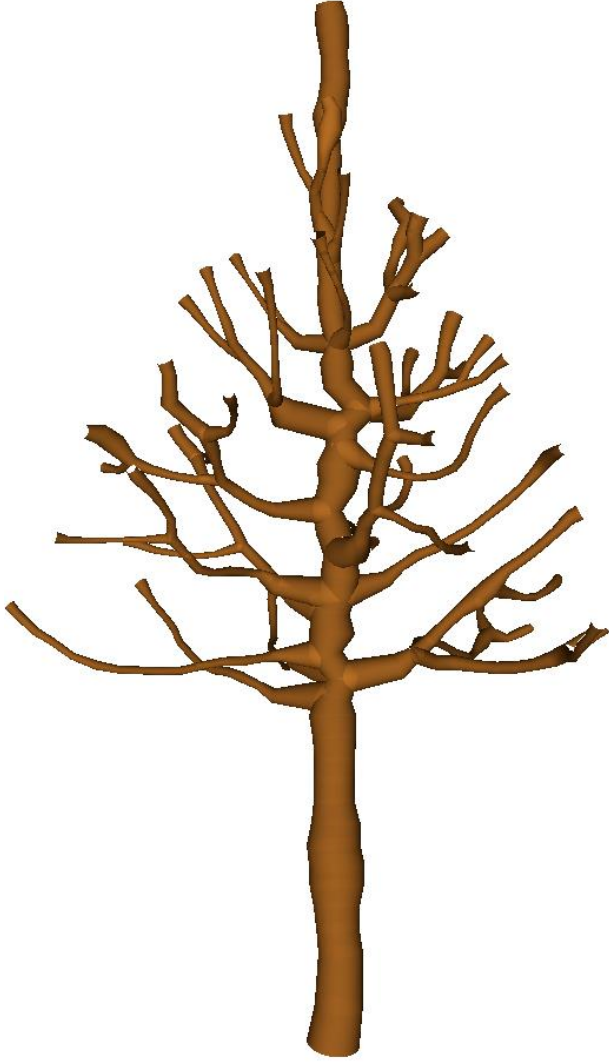
Maquette de référence



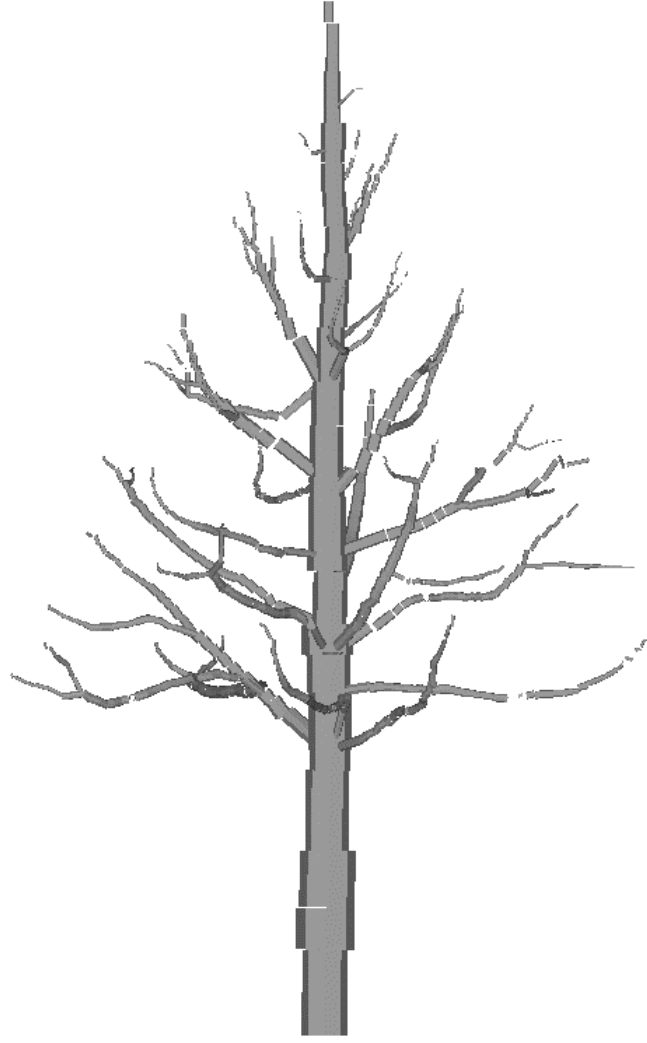
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D

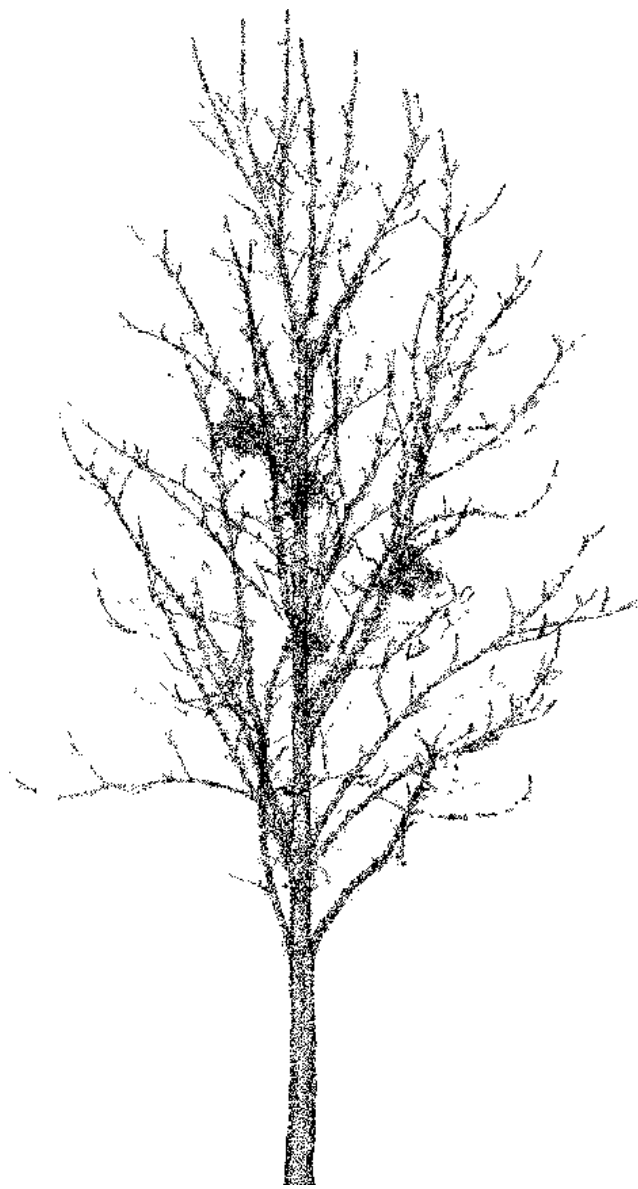


Maquette reconstruite avec SimpleTree

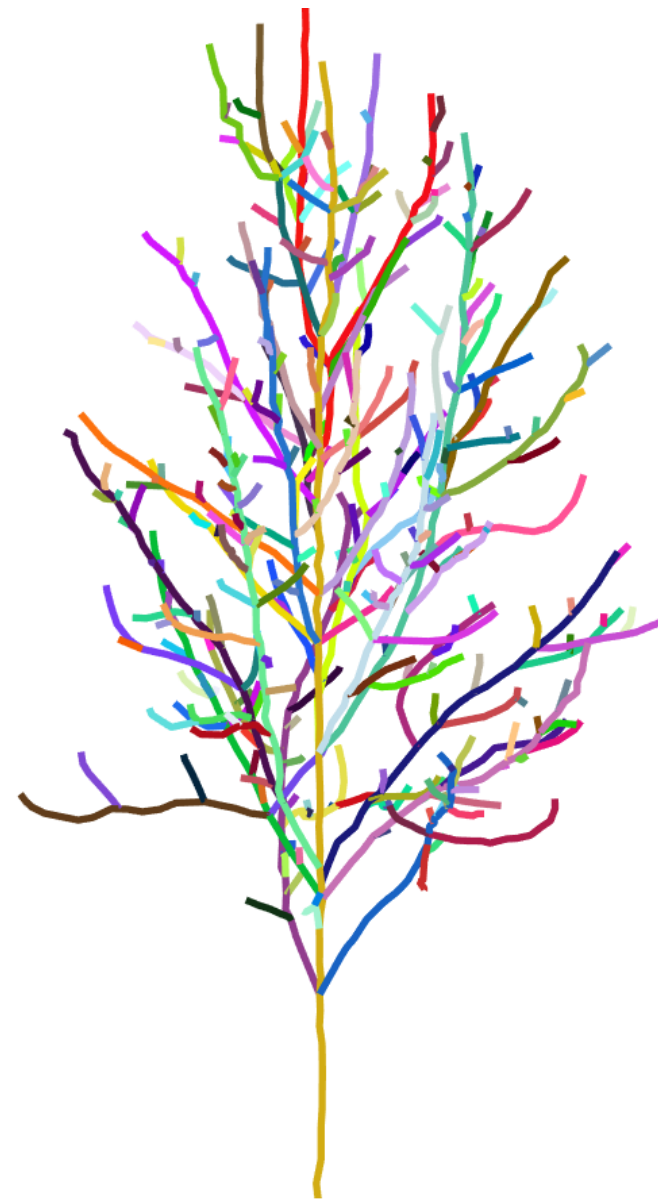


G.3. Marronnier (M2)

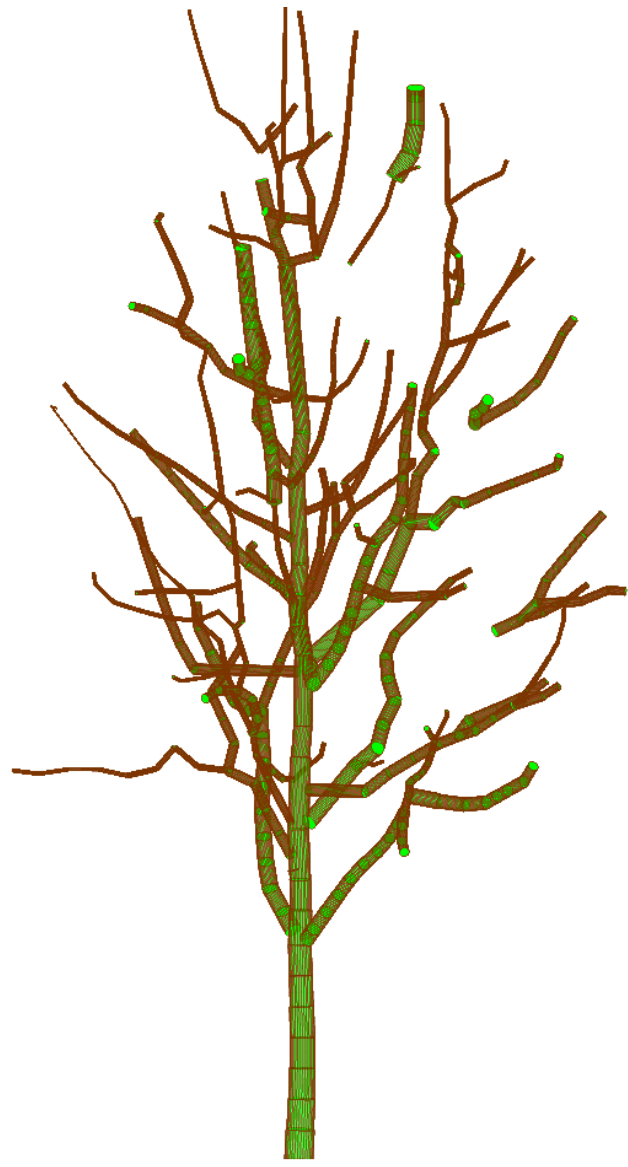
Nuage de points



Maquette de référence



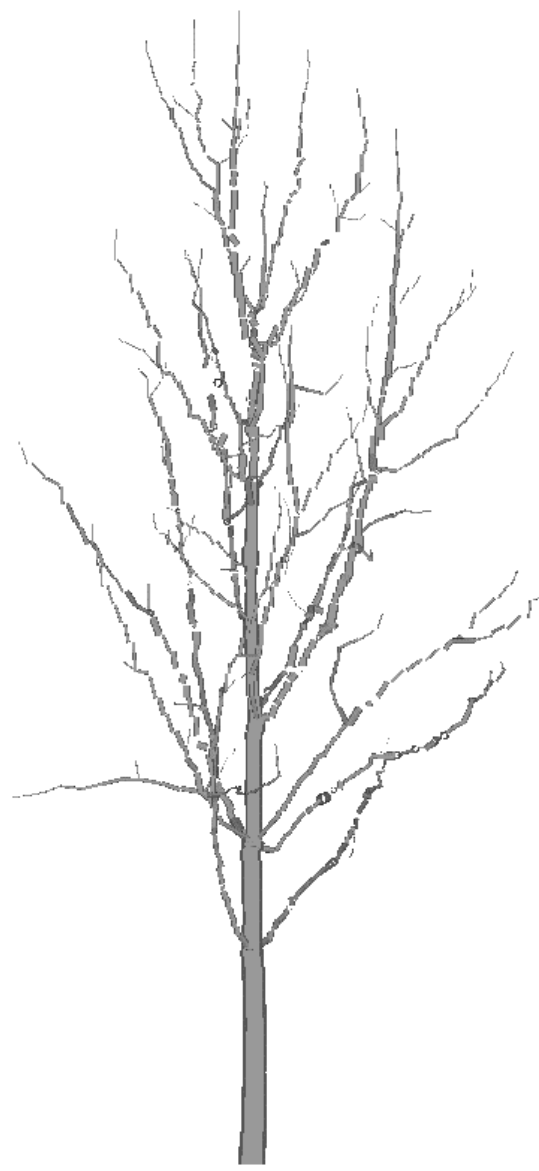
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D

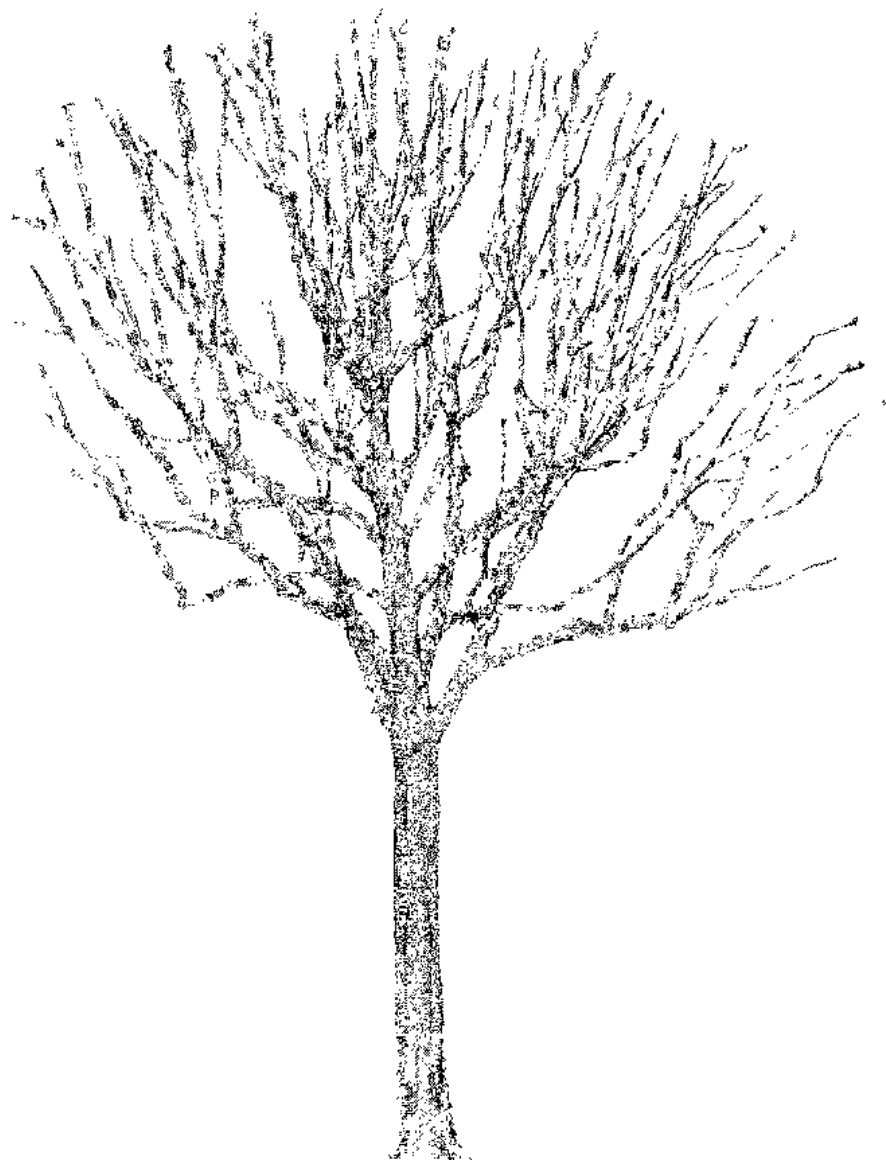


Maquette reconstruite avec SimpleTree

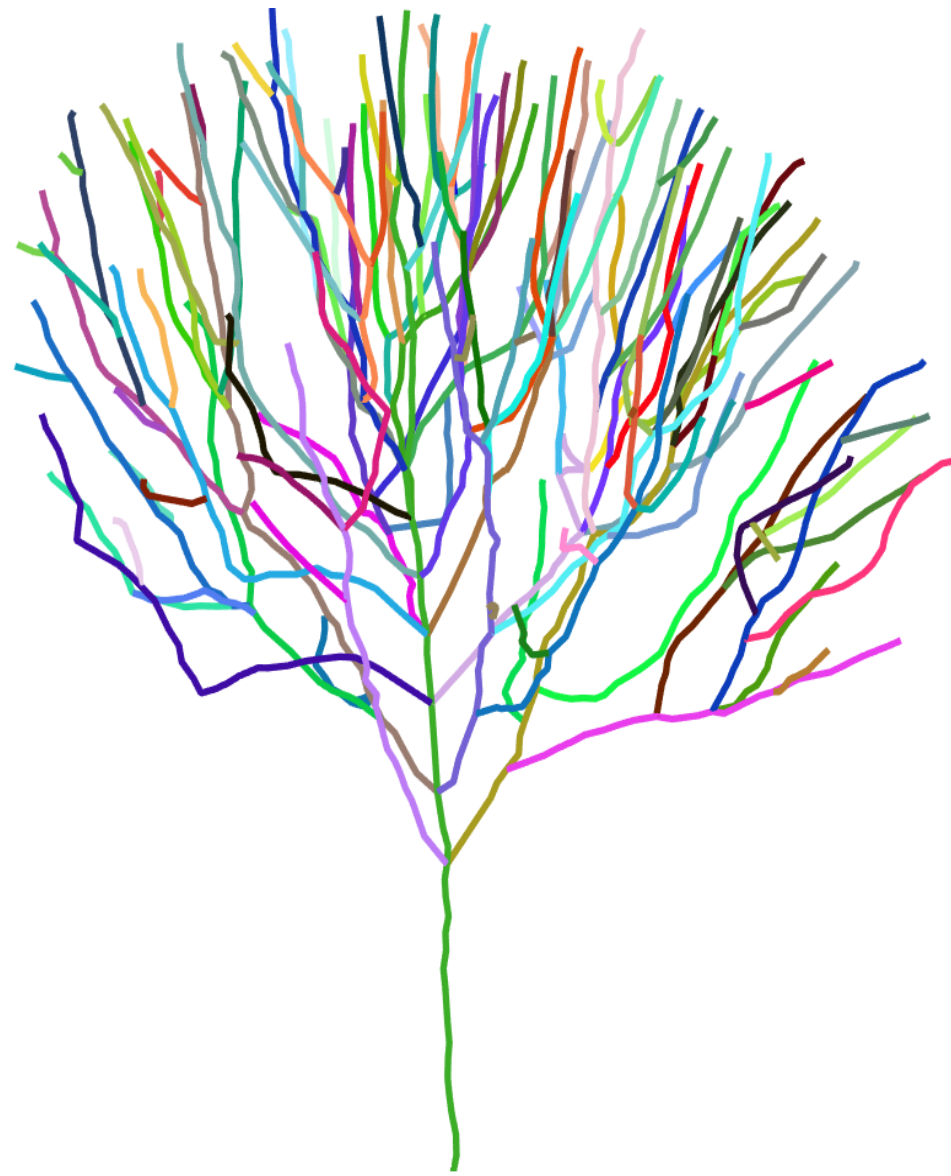


G.4. Marronnier taillé (MT)

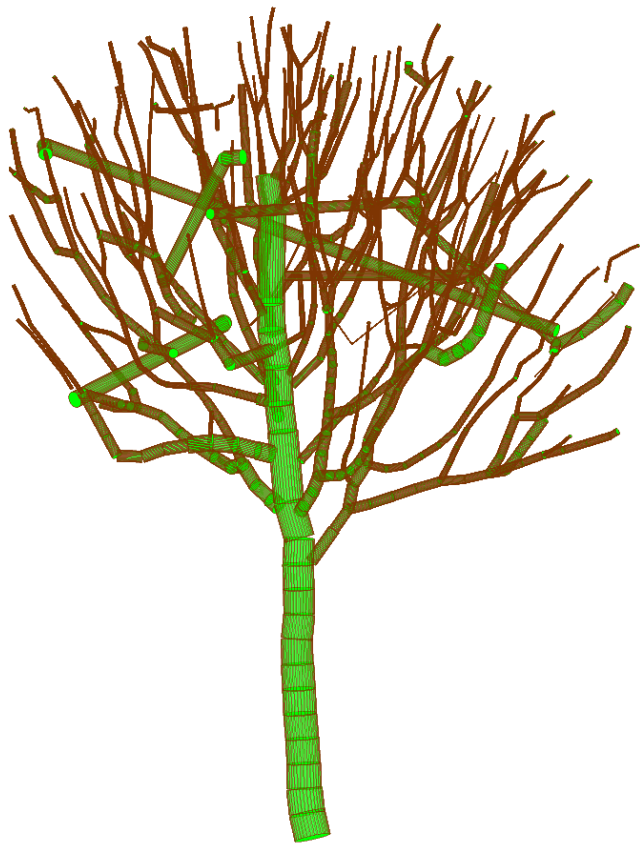
Nuage de points



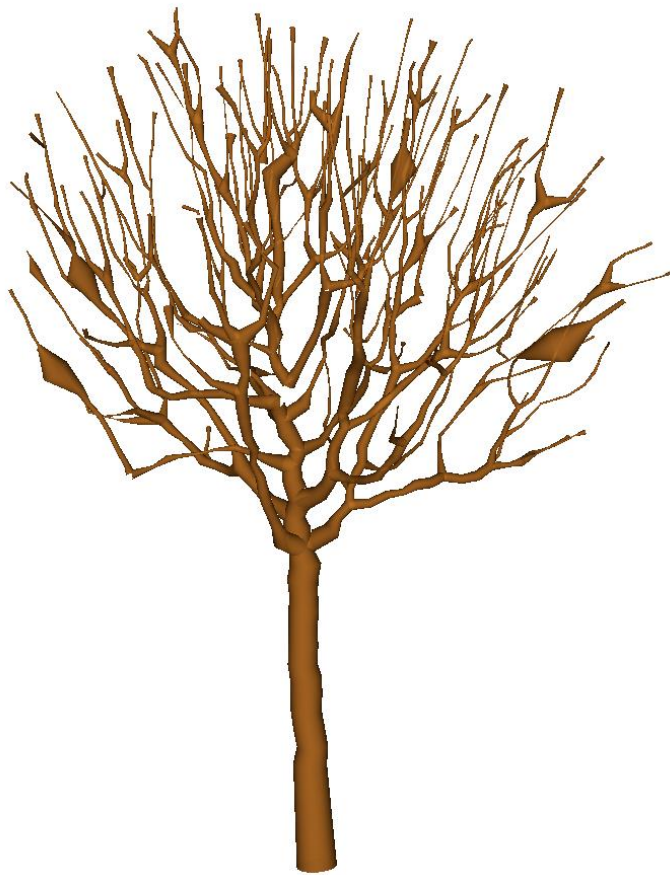
Maquette de référence



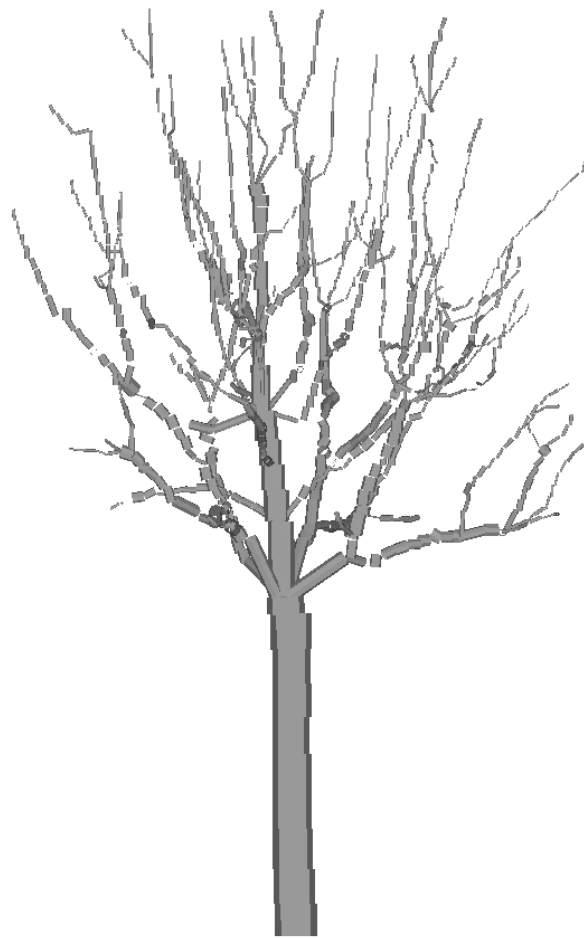
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D

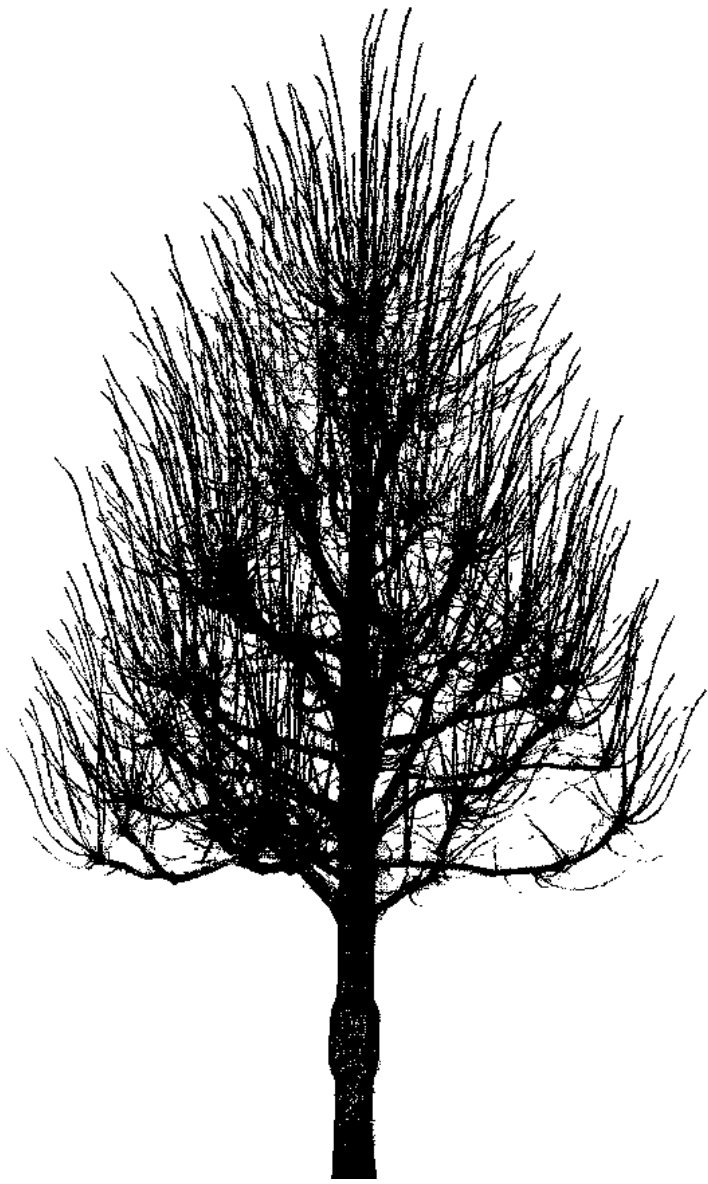


Maquette reconstruite avec SimpleTree

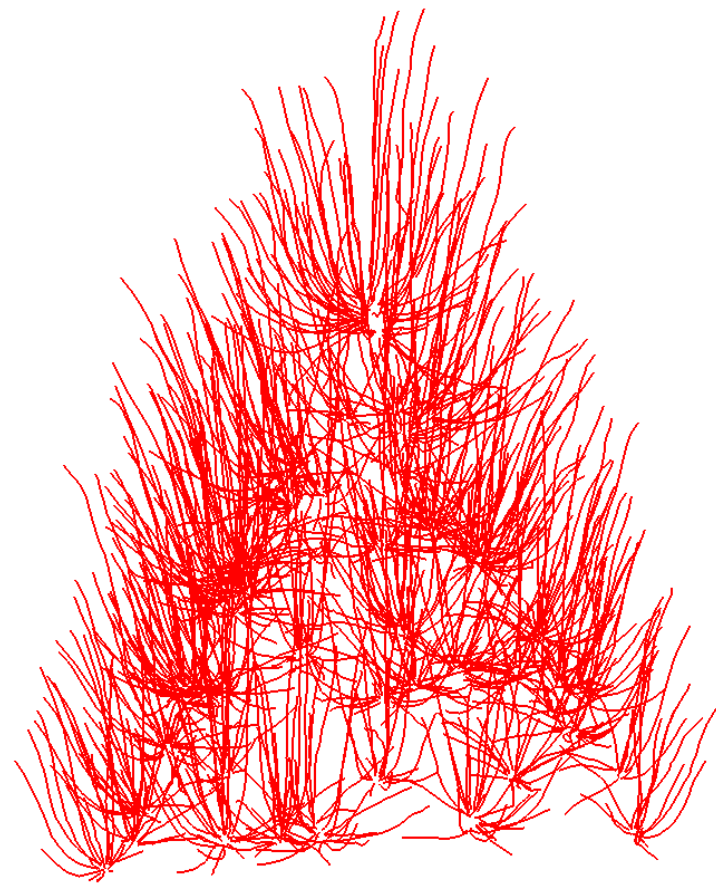


G.5. Tilleul argenté taillé avec ses pousses (TATP)

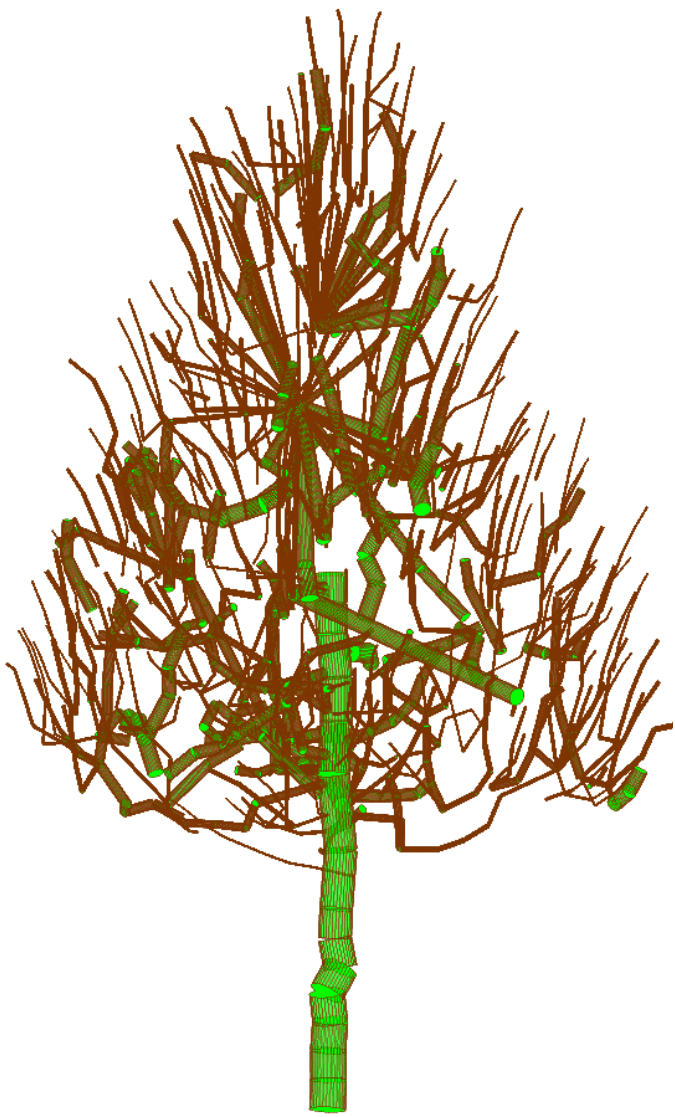
Nuage de points



Maquette de référence



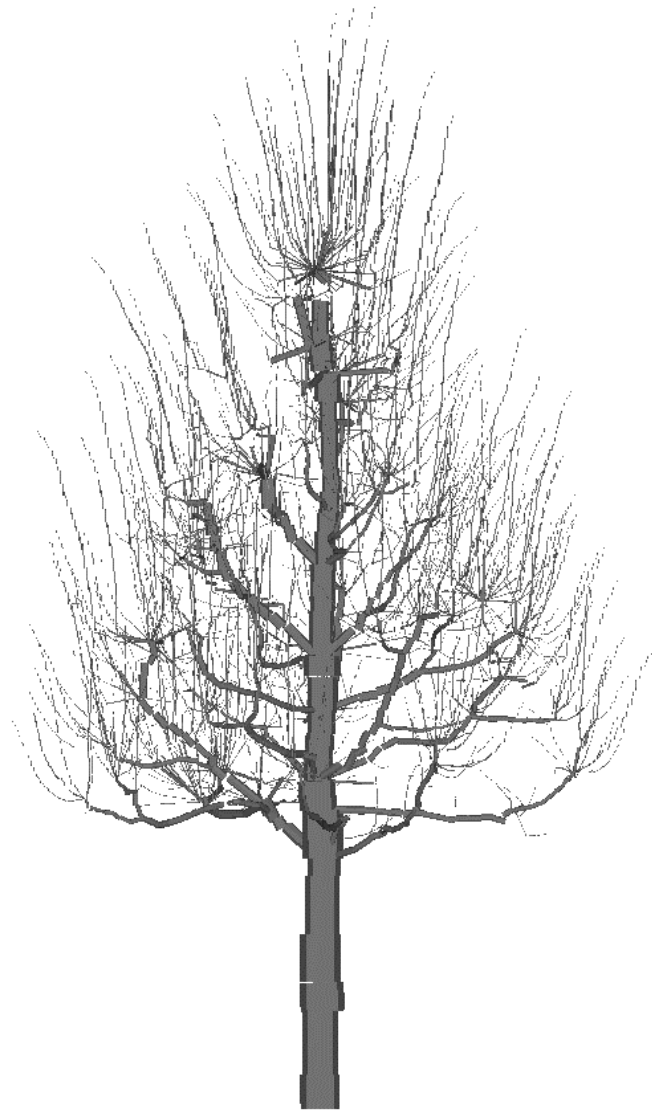
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D

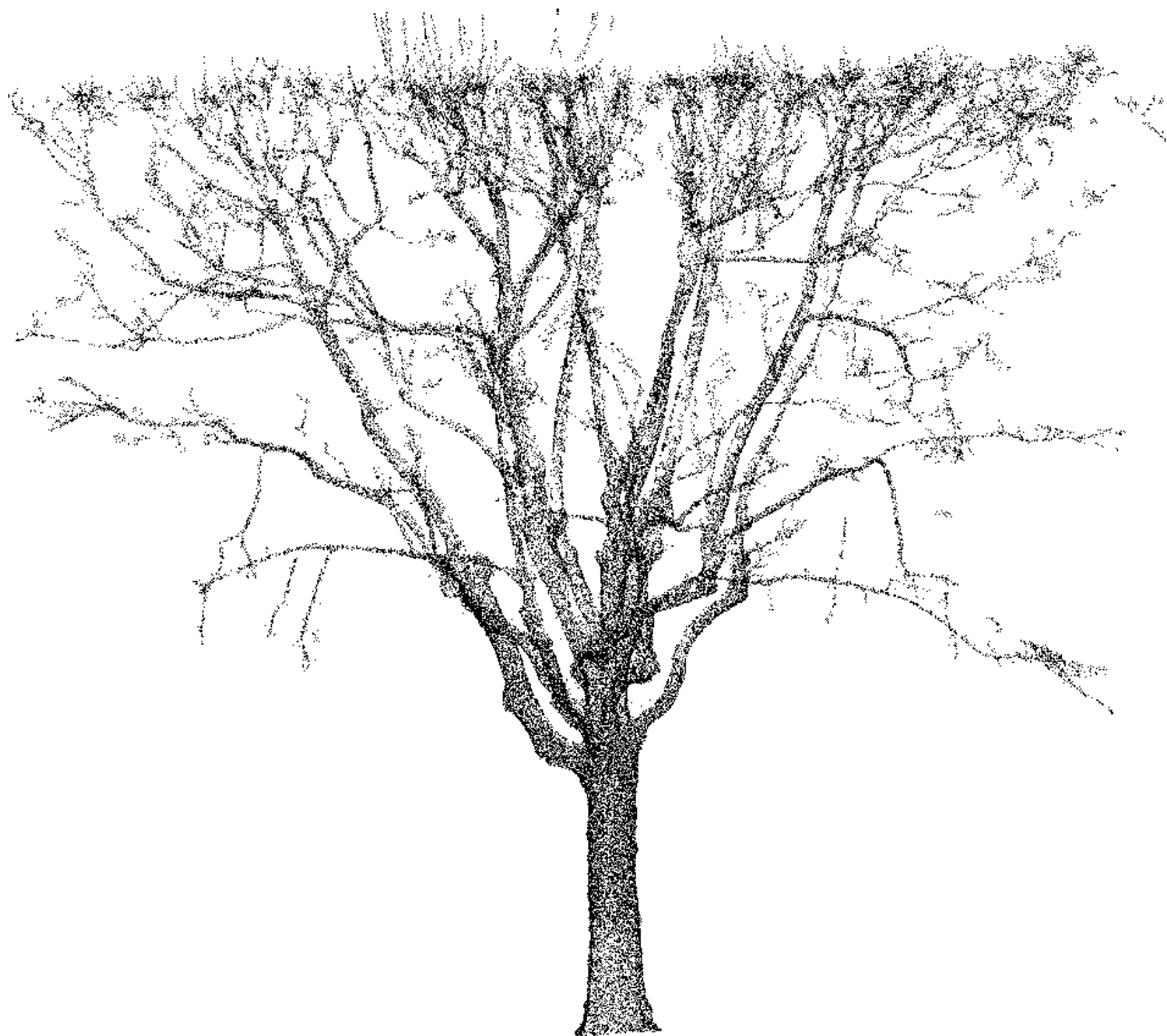


Maquette reconstruite avec SimpleTree

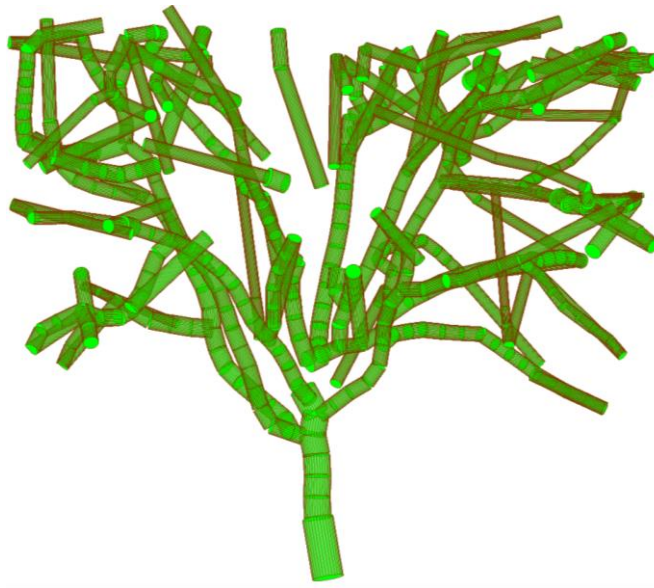


G.6. Platane taillé (PT)

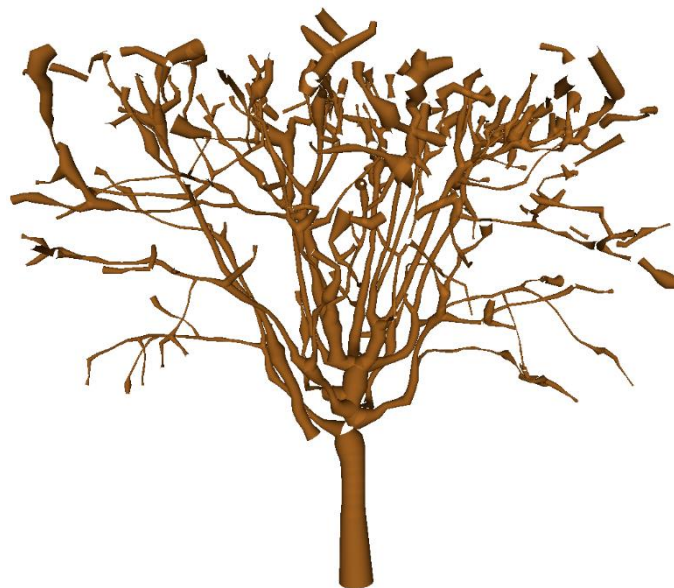
Nuage de points



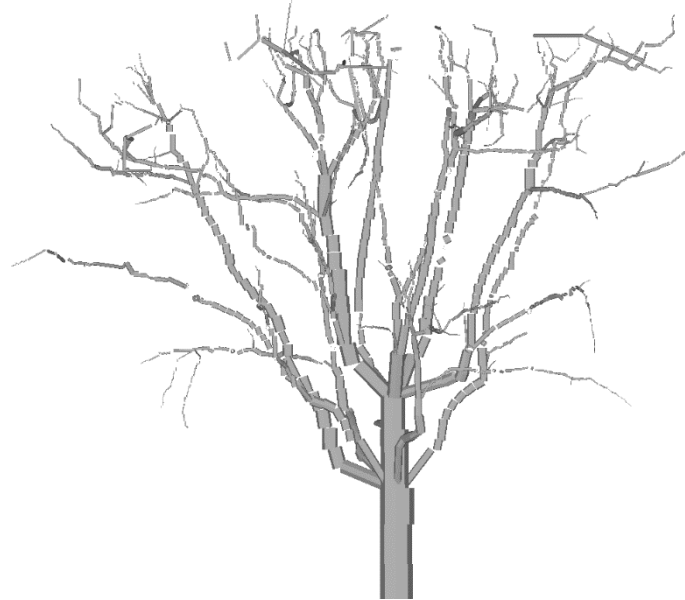
Maquette reconstruite avec TreeArchitecture



Maquette reconstruite avec PlantScan3D



Maquette reconstruite avec SimpleTree



Annexe H. Formules des grandeurs statistiques utilisées

Coefficient de détermination :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i - \frac{\sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n P_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right]}} \right)^2 \quad [5]$$

Pente de la droite de régression :

$$a = \frac{P_i - b}{O_i} \quad [6]$$

Origine de la droite de régression :

$$b = P_i - a O_i \quad [7]$$

Variance des observations :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n} \quad [8]$$

Erreur moyenne quadratique :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}} \quad [9]$$

Erreur moyenne :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad [10]$$

Erreur moyenne absolue :

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad [11]$$

Coefficient d'accord :

$$dr = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, \text{ quand } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \quad [12]$$

$$dr = \frac{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1, \text{ quand } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|$$

Avec P_i la valeur simulée, O_i la référence (mesurée ou simulée), n la taille de l'échantillon, $e_i = P_i - O_i$ l'erreur par rapport à la référence et \bar{O} la valeur moyenne de l'échantillon de référence.

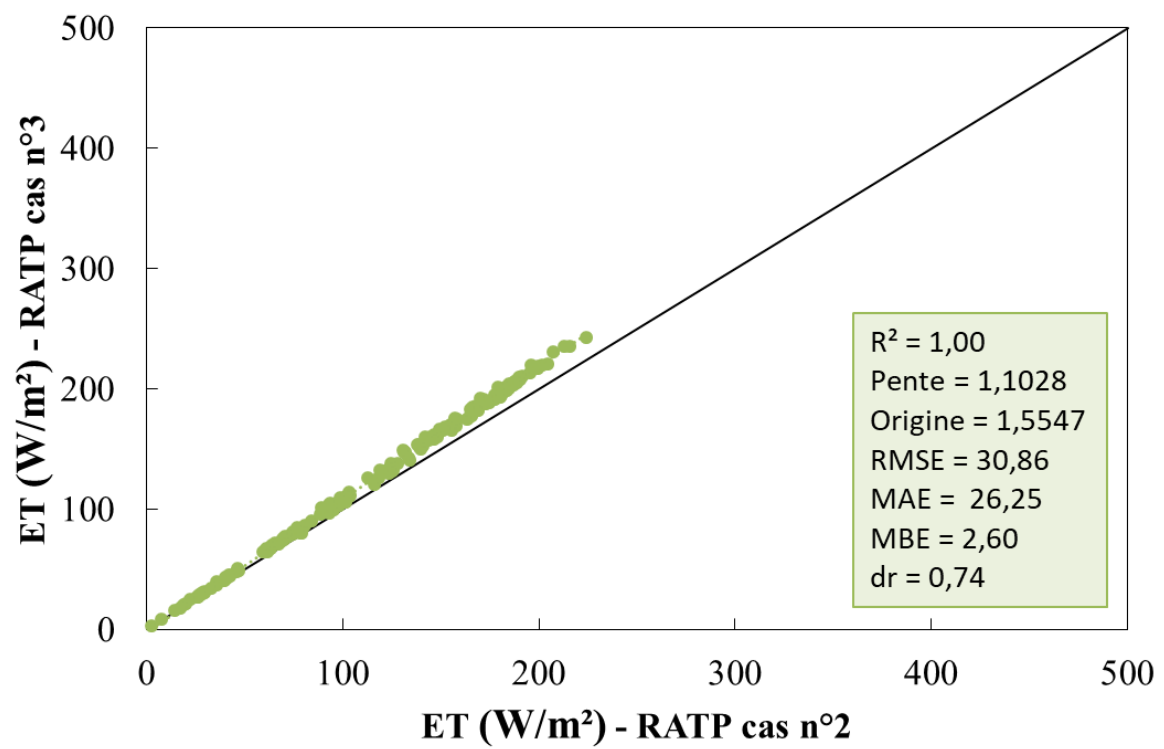
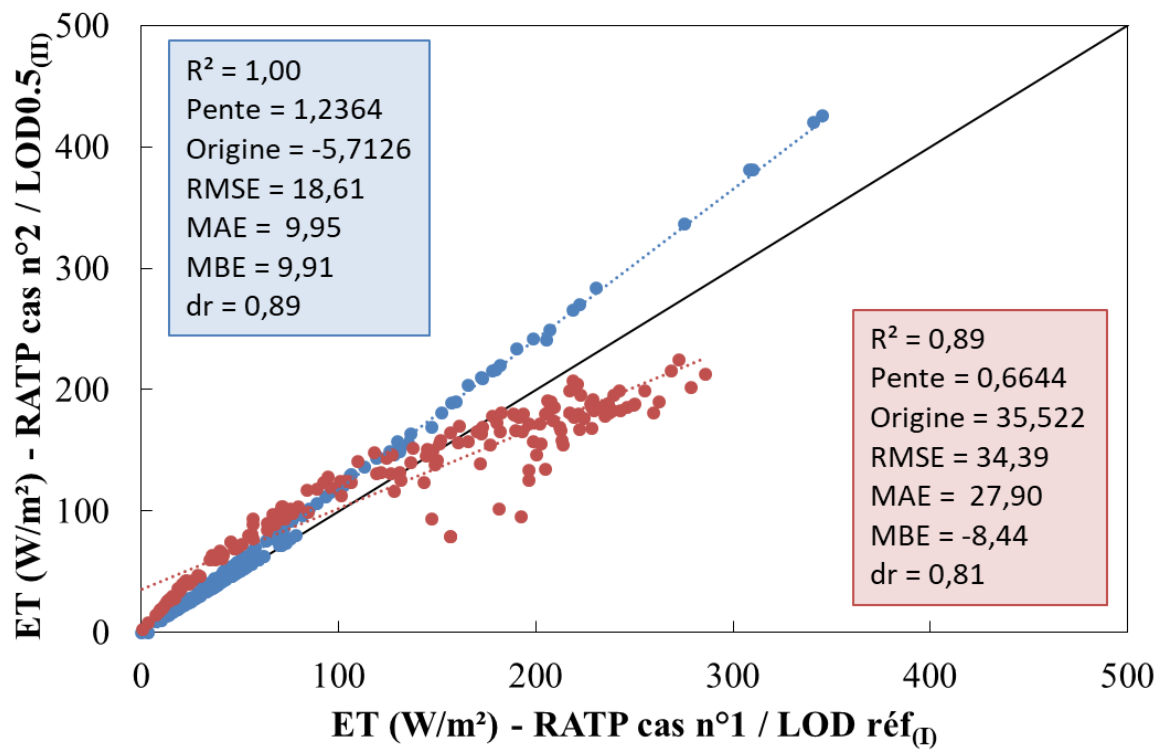
Annexe I. Sensibilité de RATP au paramétrage optique et physiologique

Pour compléter notre étude de sensibilité présentée dans le Chapitre 4, nous avons évalué la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par RATP au paramétrage des caractéristiques optiques et physiologiques du feuillage. Le but est de voir l'impact d'un passage du paramétrage de RATP au paramétrage de LASER/F sur les simulations.

Les résultats sont présentés dans les deux graphiques ci-dessous, à l'aide de régressions linéaires :

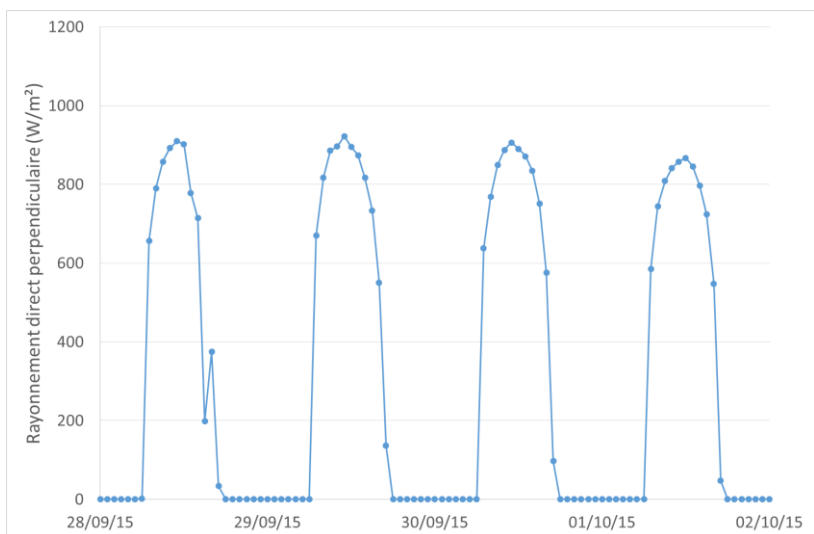
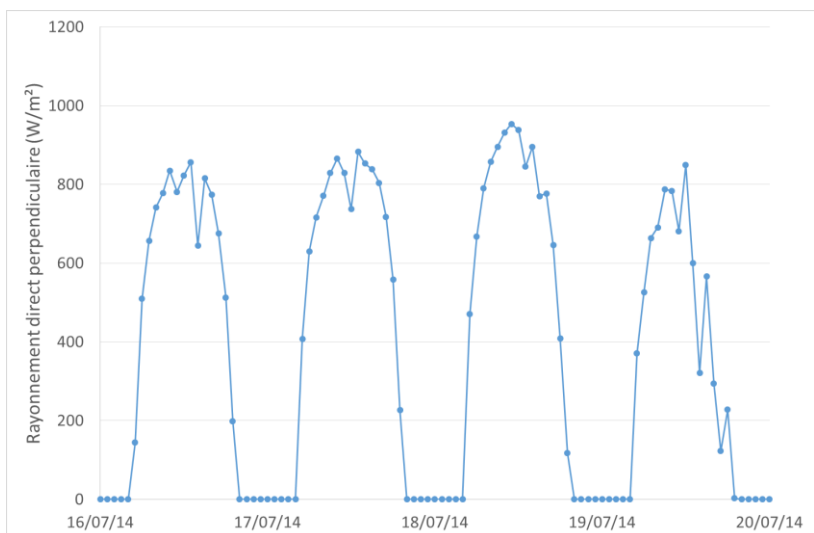
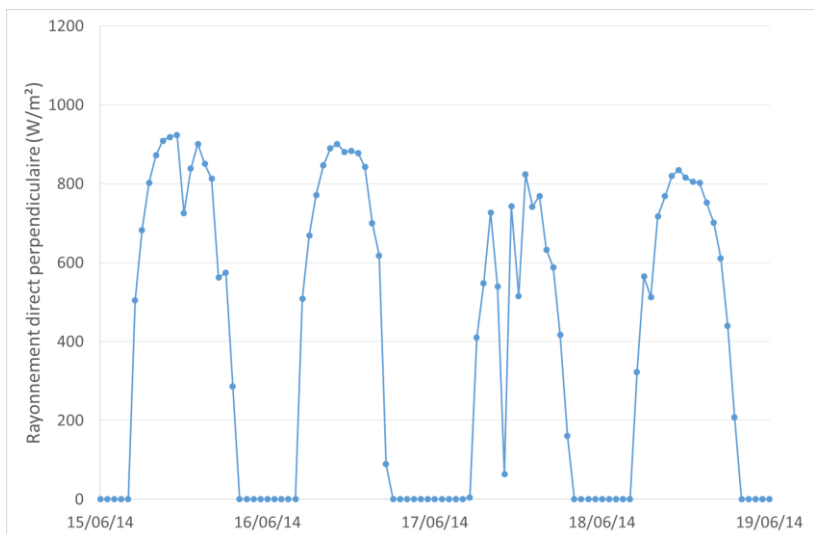
- Le cas de référence, ou cas n°1, utilise la maquette de référence (LOD réf_(I)) et l'ensemble du paramétrage de RATP décrit dans la partie 4.1, page 64.
- Le cas n°2 emploie la maquette de référence et le paramétrage physiologique de LASER/F. La régression linéaire établie entre le cas n°2 et le cas n°1 est présentée en rouge dans le premier graphique.
- Le cas n°3 utilise la maquette de référence et le paramétrage physiologique et optique de LASER/F. La régression linéaire obtenue entre le cas n°3 et le cas n°2 est représentée dans le deuxième graphique en vert. Ce cas n°3 a été comparé au cas n°2 et non pas au cas n°1 pour évaluer l'impact de l'utilisation du paramétrage optique seulement.
- Pour finir, nous avons ajouté à notre analyse la régression en bleu établie entre le cas n°1 et le cas n°1 utilisant la maquette LOD 0,5_(II). Cette analyse nous permet de comparer l'impact de la différence de maquette d'arbre utilisée entre RATP et LASER/F.

Cette étude nous montre que l'impact de l'utilisation du paramétrage physiologique est non linéaire contrairement aux autres cas testés. Ensuite, nous pouvons voir que le changement de paramétrage optique a moins d'impact que le changement de maquette, qui a lui-même moins d'impact que le changement de paramétrage physiologique.

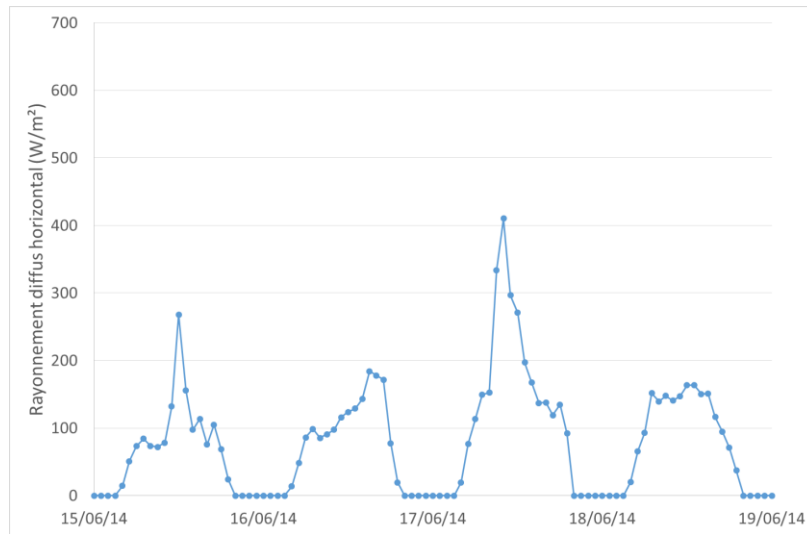


Annexe J. Données météorologiques utilisées

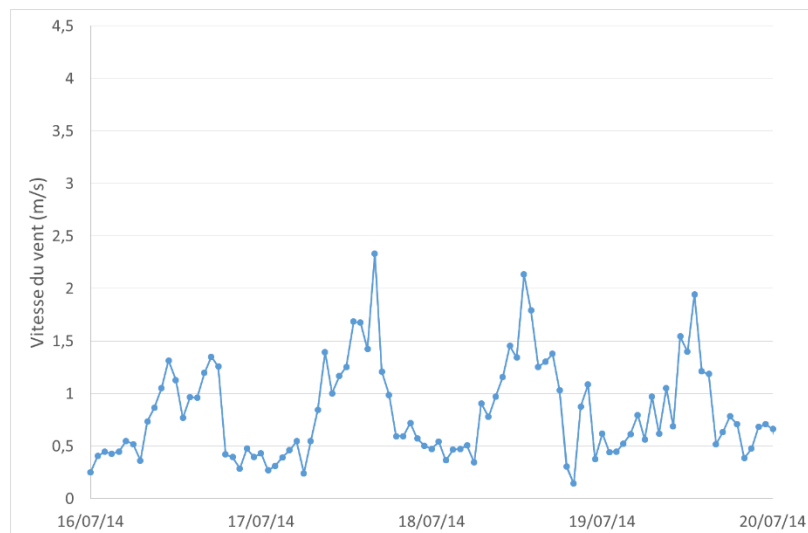
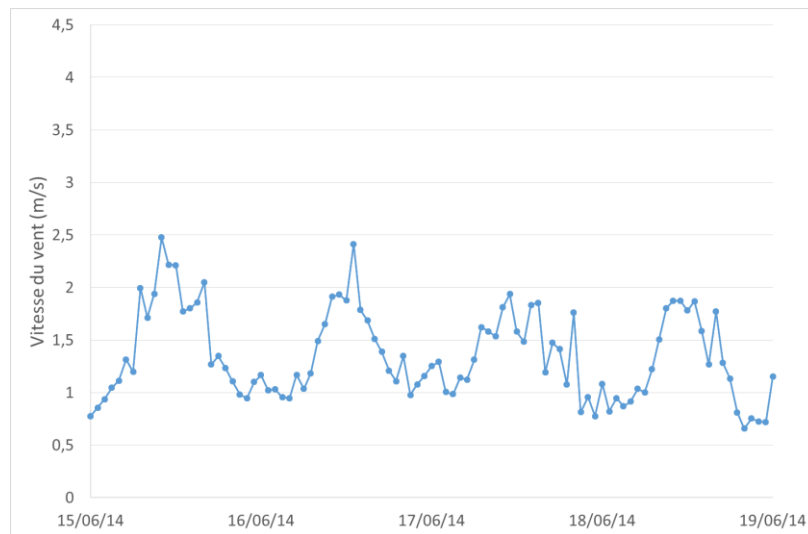
- Rayonnement direct



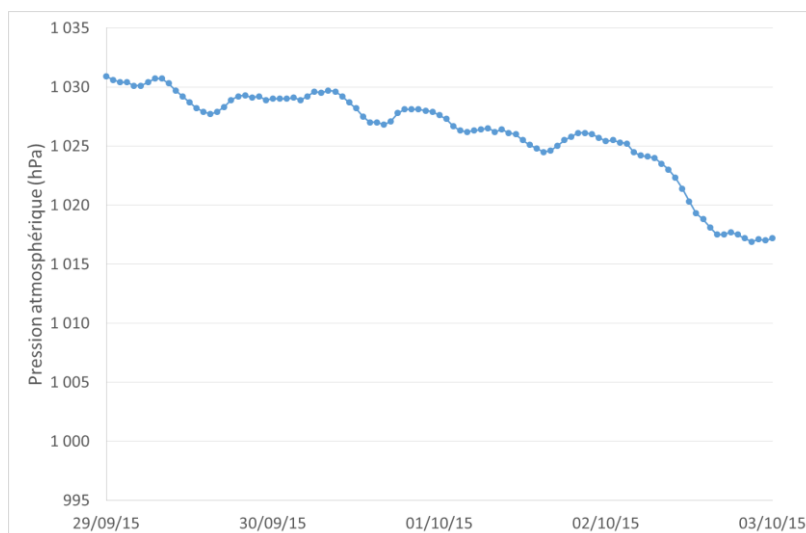
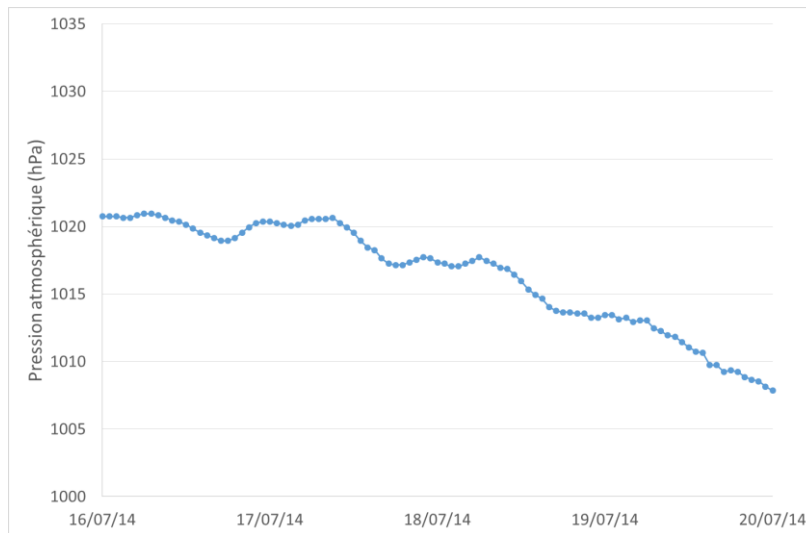
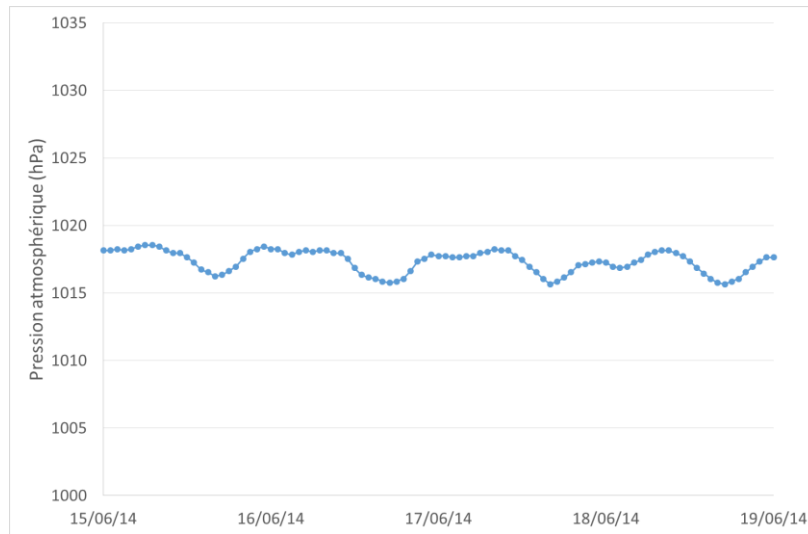
- **Rayonnement diffus**



- **Vitesse du vent**



- **Pression atmosphérique**



Annexe K. Simulations de LASER/F à l'échelle du parc par rapport aux mesures

K.1. Comparaisons relatives au sol – Première analyse

Les simulations de LASER/F relatives au sol enherbé ont été comparées à des mesures de terrain. Les grandeurs statistiques représentatives des résultats obtenus sur l'ensemble des périodes (P1, P2 et P3) sont détaillées dans le Tableau 1.

Grandeur	R ²	RMSE	MBE	MAE	dr
ET	0,91	76,49	47,35	66,00	0,32
RN	0,90	79,10	7,57	39,33	0,91
Sol ↑	0,87	27,65	-12,19	16,09	0,84
IR ↑	0,96	35,52	29,81	29,85	0,66
Sol ↓	0,92	90,24	2,97	38,32	0,93
IR ↓	0,98	23,26	22,22	22,22	0,63
G	0,71	22,06	3,00	16,80	0,53
TP 5cm	0,81	4,2	2,3	3,3	0,64
TP 10 cm	0,93	2,0	1,5	1,7	0,79
TP 40 cm	0,98	0,8	0,6	0,6	0,89
TP 100 cm	0,63	0,6	-0,4	0,5	0,59

Tableau 1 – Grandeurs statistiques calculées sur l'ensemble des périodes de simulation pour les comparaisons relatives à l'évapotranspiration (ET), au rayonnement net (RN), au rayonnement solaire montant (Sol ↑), au rayonnement infrarouge montant (IR ↑), au flux de chaleur dans le sol (G) et à la température du sol en profondeur à - 5 cm (TP 5cm), à -10 cm (TP 10 cm), à -40 cm (TP 40 cm) et à -100 cm (TP 100 cm).

➤ Flux d'évapotranspiration

La simulation de l'évapotranspiration (ET) émise par le sol enherbé a été comparée aux mesures issues des chambres à transpiration sur deux socles différents (Figure 1). Comme la mesure est manuelle, l'évapotranspiration a été mesurée sur seulement quelques journées de P1 et P2.

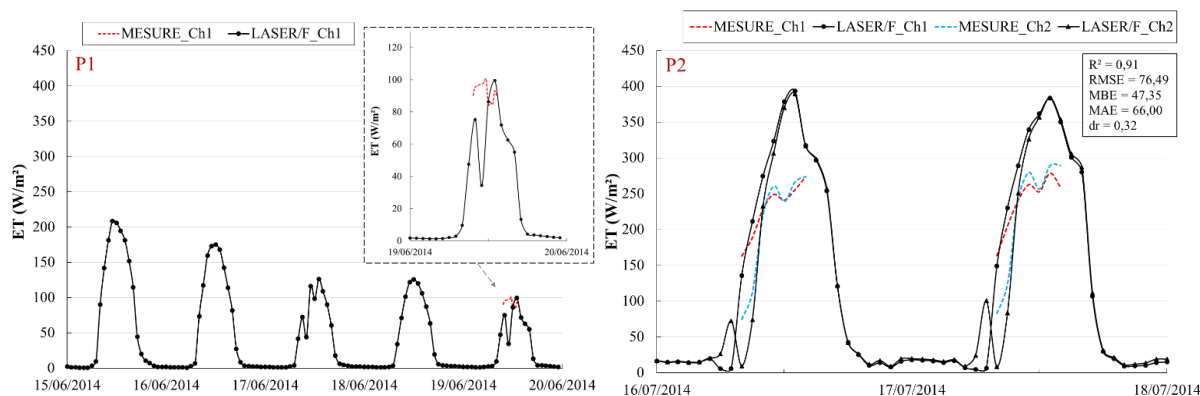


Figure 1 – Dynamiques journalières de l'évapotranspiration (ET) simulée et mesurée lors de P1 et P2.

Globalement, la relation entre le flux simulé et mesuré est forte avec un R² de 0,91. La Figure 1 nous permet tout d'abord de constater que, que ce soit avec la mesure ou avec la

simulation, l'évapotranspiration est plus faible, en moyenne de 145,35 W/m², en P1 par rapport à P2. Par conséquent, la mesure et la simulation indiquent bien que le sol est sec (P1) ou humide (P2). En revanche, lors de P2 en journée, l'évapotranspiration semble surestimée par rapport à la mesure de 47,35 W/m² en moyenne, avec un écart maximum de 180,41 W/m². Nous n'avons pas de mesures la nuit nous permettant de constater si le sol enherbé émet véritablement encore une légère évapotranspiration de l'ordre de 20,00 W/m², comme nous le montrent les simulations.

Plusieurs mauvais paramétrages (LAI, RU) pourraient causer cette surestimation de l'évapotranspiration :

- Le LAI du sol est probablement surestimé, ce qui laisse supposer que ce sol contient une quantité trop importante d'herbe. Ainsi, l'évapotranspiration du sol serait surestimée. Or, d'après une observation visuelle, il semblerait que lors de P2, l'herbe était très fraîche et donc que le sol enherbé devait plutôt posséder un LAI supérieur.
- La réserve utile d'eau peut être trop importante et permettre à la végétation d'émettre un flux trop conséquent. Aucune diminution de l'évapotranspiration n'est observée alors que la réserve utile en surface passe de 77 % à 3 % au cours de cette période.
- Ce dernier constat montre que le modèle LASER/F utilise probablement une mauvaise conductance stomatique relative à l'herbe. En effet, puisque l'évapotranspiration ne diminue pas en même temps que la réserve utile, nous pouvons en déduire que la conductance stomatique à l'humidité du sol est trop importante.
- De plus, en début de matinée, l'évapotranspiration simulée pour la chambre n°2 est quasiment nulle alors que la mesure indique des valeurs d'environ 100,00 W/m². Sachant que cette chambre est encore à l'ombre et soumise uniquement à un rayonnement solaire diffus, on peut émettre l'hypothèse que ces écarts proviennent d'une mauvaise conductance stomatique de l'herbe au rayonnement. La conductance serait trop importante lorsque le sol est éclairé par du rayonnement direct, et trop faible lorsque le sol est à l'ombre. Dans le modèle, l'herbe suit quasiment la même conductance stomatique que les arbres (Figure 4.1). Cette simplification dans le code n'est sans doute pas assez réaliste.
- Nous pouvons aussi émettre l'hypothèse que l'atténuation du rayonnement par les couronnes d'arbre est trop importante.

➤ Bilan radiatif

Le bilan radiatif simulé avec LASER/F a été comparé à celui mesuré avec le bilan-mètre à quatre composantes (CNR1) (Figure 2, Figure 3 et Tableau 1).

Rayonnement net

Globalement, sur l'ensemble des périodes, le processus radiatif est bien reproduit, car la relation entre le rayonnement net (RN) simulé et mesuré est très proche (R² de 0,90). Il en est de même lorsque les périodes de simulation sont distinguées (R² de 0,93 pour P1 et P3). Quelques différences de dynamiques sont tout de même présentes entre les simulations et les mesures, notamment lors de P1. En effet, lors de P1, une importante sous-estimation est observée en journée (maximum d'environ 200,00 W/m²) et une légère surestimation la nuit (autour de 20,00 W/m²). Ces différences peuvent être dues : (i) soit au forçage radiatif qui, comme étant mesuré à 700 m du site d'étude, peut induire des divergences de couvertures nuageuses à un instant t avec le site d'étude (le parc), (ii) soit à une mauvaise reconstruction

3D de la zone de simulation, et donc des obstacles visibles depuis le bilan mètre, ce qui pourrait expliquer les pics d'écart observés sur toutes les périodes en début et fin de journée.

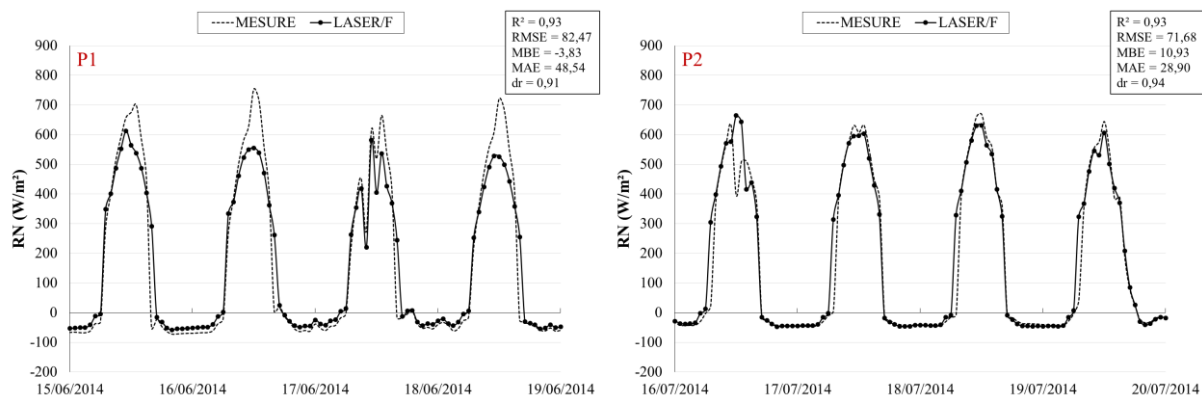


Figure 2 – Dynamiques journalières du rayonnement net (RN) simulé et mesuré lors de P1 et P2.

Pour comprendre davantage ces écarts, l'analyse a été approfondie en étudiant les composantes du bilan radiatif relatives aux interactions du sol, tels que le rayonnement solaire montant et descendant (Solaire \uparrow - Solaire \downarrow) et le rayonnement infrarouge montant et descendant (IR \uparrow - IR \downarrow). La dynamique de ces flux simulés est cohérente avec la mesure, puisque pour les quatre composantes, le R^2 est élevé (0,87, 0,96, 0,92, 0,98 respectivement sur l'ensemble des périodes pour le rayonnement solaire et infrarouge montant et le rayonnement solaire et infrarouge descendant).

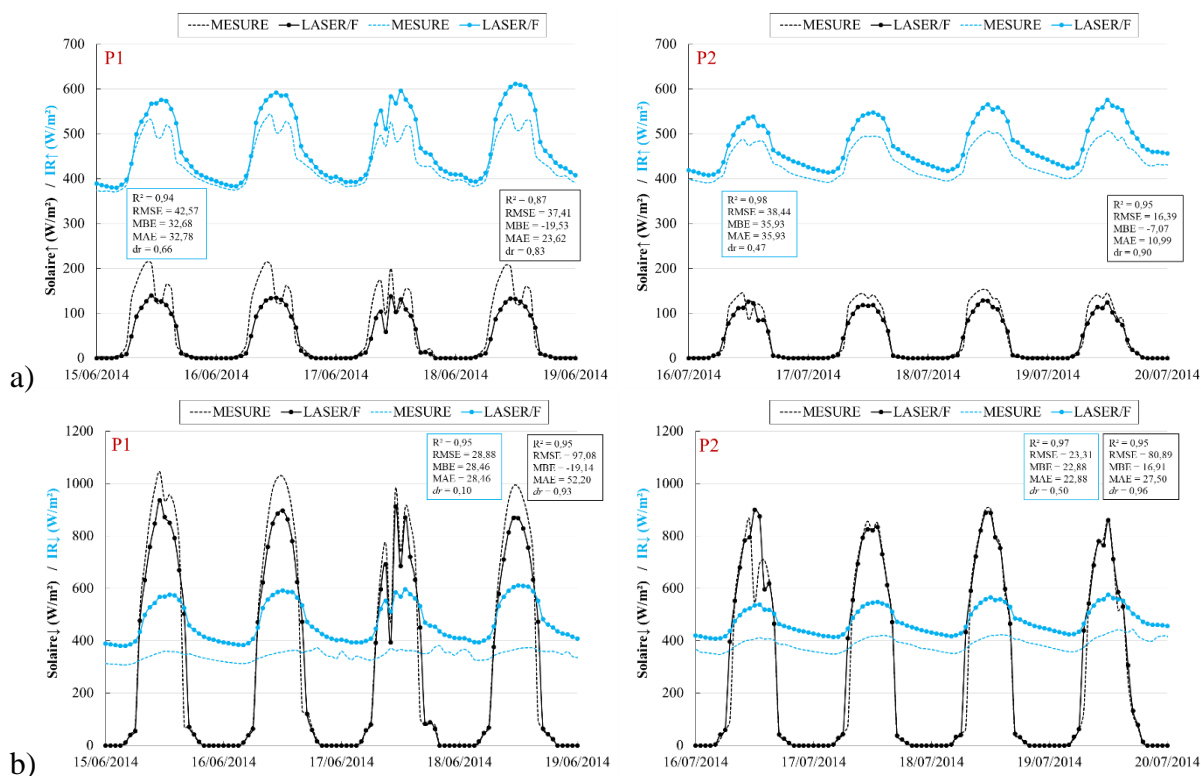


Figure 3 – Dynamiques journalières simulées et mesurées lors de P1 et P2 a) du rayonnement solaire montant (Solaire \uparrow - en noir) et du rayonnement infrarouge montant (IR \uparrow - en bleu) et b) du rayonnement solaire descendant (Solaire \downarrow - en noir) et du rayonnement infrarouge descendant (IR \downarrow - en bleu).

Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire montant est globalement sous-estimé en journée par le modèle par rapport à la mesure (MBE de $-12,19 \text{ W/m}^2$) et ceci est d'autant plus le cas lors de P1 (MBE de $-19,53 \text{ W/m}^2$).

Le rayonnement solaire réfléchi par une surface enherbée dépend du rayonnement solaire descendant, du coefficient de réflexion de la surface dans le solaire (soit l'albédo) et du pourcentage de présence de végétation. Les écarts observés doivent donc être causés par une mauvaise estimation de ces précédentes grandeurs.

La comparaison entre le rayonnement solaire descendant simulé et la mesure montre que pour P2, le flux simulé est quasi identique à la mesure, alors que pour P1 il est sous-estimé d'environ $100,00 \text{ W/m}^2$ au maximum. Ainsi, dans le cas de P2, la sous-estimation du rayonnement solaire montant provient d'un mauvais albédo de la surface enherbée, qui doit se trouver sous-estimé. Dans le cas de P1, la sous-estimation du rayonnement solaire montant doit provenir à la fois d'un mauvais albédo (il diverge trop par rapport à la réalité) de la surface enherbée, mais aussi d'un rayonnement solaire incident sur la surface trop faible. Il semblerait donc que le modèle ne simule pas correctement le rayonnement réfléchi par les surfaces aériennes (bâtiments et/ou arbres), et donc leur albédo, lors de la période où le sol est sec (P1). Dans la nature, l'albédo d'une surface enherbée varie en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement, du LAI, de la nature du sol et de la réserve utile d'eau. La sous-estimation du rayonnement solaire montant doit par conséquent être due à un ou plusieurs des constats suivants :

- L'albédo dans LASER/F ne varie pas au cours de la journée suivant l'angle d'incidence du soleil.
- Le LAI et la réserve utile d'eau du sol enherbé peuvent être sous-estimés, c'est-à-dire mal paramétrés en entrée. Plus le pourcentage de sol nu sera important (LAI faible), plus l'albédo de la surface sera faible et elle réfléchira moins de rayonnement solaire. Plus la réserve utile est importante, moins le sol réfléchira et *vice versa*. Cependant, d'après une étude de sensibilité des flux simulés par le modèle en fonction du LAI, de la nature du sol et de la réserve utile, nous avons constaté qu'actuellement il semblerait qu'un problème dans le code LASER/F soit présent (Annexe M, page 214). En effet, la variation du LAI ou de la réserve utile d'eau n'a aucune influence sur le rayonnement solaire montant.
- Des erreurs de reconstruction 3D de la couronne des arbres peuvent expliquer les différences de dynamiques observées au cours de P1.

Rayonnement infrarouge

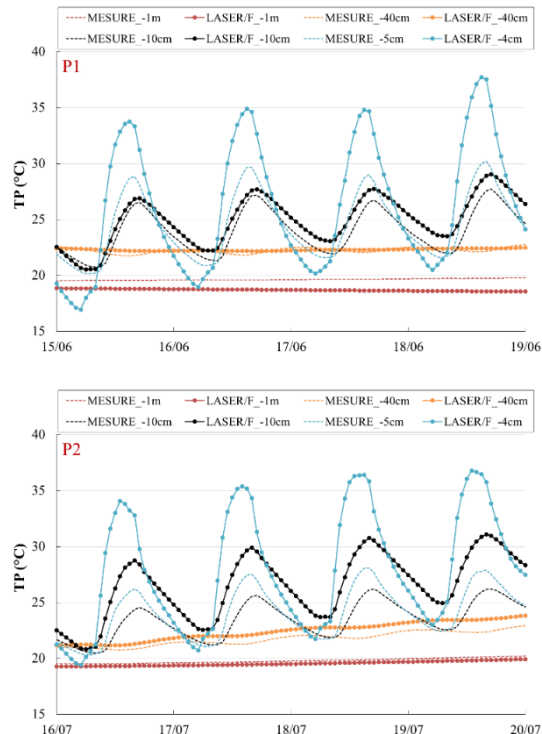
Le rayonnement infrarouge montant, quant à lui, est constamment surestimé par le modèle par rapport à la mesure (MBE de $29,81 \text{ W/m}^2$ et RMSE de $35,52 \text{ W/m}^2$). La surestimation est en général plus importante la journée que la nuit et les écarts la nuit sont plus importants lors de P2. Il est très difficile de distinguer si la surestimation provient du rayonnement infrarouge émis ou réfléchi. Le rayonnement infrarouge montant dépend de l'émissivité du sol, de sa température de surface, de son coefficient de réflexion dans l'infrarouge et du rayonnement infrarouge descendant, qui dépendent tous du LAI, de la nature du sol et de la réserve utile d'eau dans le sol.

Par conséquent, la surestimation du rayonnement infrarouge montant doit provenir d'un ou plusieurs des constats suivants :

- Le rayonnement infrarouge descendant est constamment surestimé par le modèle par rapport à la mesure, ce qui implique une surestimation du rayonnement émis et/ou réfléchi par les surfaces aériennes. Par conséquent, si les surfaces enherbées reçoivent trop de rayonnement incident, il est normal que le rayonnement infrarouge montant soit surestimé.
- La température de surface du sol enherbé semble surestimée tout au long de la journée. Cette surestimation est plus importante en période diurne, ce qui engendre directement un flux montant trop important. Une analyse de sensibilité nous a permis d'identifier deux natures de sol différentes qui engendreraient une température de surface et par conséquent un rayonnement infrarouge moins important : le limon sablo-argileux (58 % de sable, 15 % de limon et 27 % d'argile) et l'argile sableux (52 % de sable, 6 % de limon et 42 % d'argile) (Annexe M, page 214).
- L'émissivité et/ou le coefficient de réflexion doivent être certainement surestimés. Cette surestimation peut provenir d'un mauvais paramétrage du ou des paramètres suivants : le LAI, la réserve utile et la nature du sol. Cependant, il semblerait que l'émissivité du sol ne varie pas ni au cours de la journée, ni lorsque la réserve utile ou le LAI ou la nature du sol changent (Annexe M, page 214). Cet aspect devra être analysé davantage.
- Des erreurs de reconstruction 3D de la couronne des arbres peuvent expliquer les différences de dynamiques observées au cours des journées de P1.

➤ Température en profondeur

Les simulations de la température en profondeur (TP) du sol naturel ont été comparées aux mesures effectuées dans la fosse à l'aide de sondes (Tableau 1 et Figure 4).



P1				
	Tsol -5cm	Tsol -10 cm	Tsol -40 cm	Tsol -100cm
R ²	0,89	0,63	0,29	0,95
RMSE	3,6	1,1	0,2	0,6
MBE	1,7	1,0	0,0	-0,4
MAE	2,8	1,1	0,2	0,5
dr	0,44	0,70	0,55	-0,86

P2				
	Tsol -5cm	Tsol -10 cm	Tsol -40 cm	Tsol -100cm
R ²	0,75	0,97	0,97	1,00
RMSE	5,2	3,3	0,7	0,3
MBE	3,8	3,0	0,7	-0,3
MAE	3,9	3,0	0,7	0,3
dr	0,00	-0,07	0,36	0,32

Figure 4 – Dynamiques journalières des températures du sol en profondeur (TP) à -4 cm (en bleu), -10 cm (en noir), -40 cm (en jaune) et -1 m (en rouge) simulées et mesurées lors de P1 et de P2.

Les mesures des températures en profondeur montrent que pour P1 et P2 les couches en surfaces sont plus chaudes qu'en profondeur. De plus, lors de P1, le sol est constamment sec

(pas d'évolution des écarts et variabilité importante entre les couches) et lors de P2, le sol est au début sec, puis il s'assèche (augmentation des écarts et de la variabilité).

Globalement, plus la comparaison entre les simulations et les mesures est réalisée en profondeur, plus l'écart entre la simulation et la mesure diminue (MBE de 2,3 °C, 1,5 °C, 0,6 °C et -0,4 °C, respectivement à 5 cm, 10 cm, 40 cm et 1 m), de même pour la variabilité des écarts (RMSE de 4,2 °C, 2,0 °C, 0,8 °C et 0,6 °C, respectivement à 5 cm, 10 cm, 40 cm et 1 m). A 1 m de profondeur, le modèle LASER/F sous-estime la température du sol par rapport à la mesure, alors qu'à 40 cm et au-delà le modèle surestime la température du sol. Quelles que soit les périodes de simulations, ces constatations sont identiques. La variabilité des températures simulées indique que l'inertie thermique du sol semble plus faible à travers le modèle qu'à travers les mesures.

La diffusivité thermique¹³ d'un sol varie dans le temps en fonction du contenu en eau. Lorsqu'un sol est sec il est très mauvais conducteur, la chaleur reste donc dans les premières couches de sol. Dans ce cas, la température en surface reste trop importante et une forte variation de température est observée dans les premières couches. Ainsi, la réserve utile d'eau dans le sol est sans doute mal paramétrée en entrée, ce qui impliquerait un sol trop sec dans la simulation. La nature du sol détermine aussi son inertie thermique. D'après une analyse de sensibilité réalisée avec LASER/F (Annexe M, page 214) il semblerait que trois natures de sol différentes dans la base de données des matériaux de LASER/F auraient une inertie thermique plus importante : le limon (10 % de sable, 85 % de limon et 5 % d'argile), le limon argileux fin (10 % de sable, 56 % de limon et 34 % d'argile) et limon argileux (32 % de sable, 34 % de limon et 34 % d'argile). Le limon sableux paramétré dans le modèle (d'après un carottage réalisé dans le parc) ne permet donc pas de reproduire des températures en profondeur cohérentes avec celles mesurées. Il serait donc envisageable par la suite d'améliorer les simulations en modifiant la nature du sol utilisée. L'écart de température entre la surface et la profondeur est plus important à travers la simulation qu'à travers la mesure. Mais ces écarts semblent à peu près constants au cours du temps. Ainsi, le modèle réagit correctement aux variations des conditions météorologiques au cours du temps. Nous pouvons donc écarter l'hypothèse d'un problème de calcul provenant du modèle lui-même.

➤ Flux de chaleur dans le sol

Le flux de chaleur dans le sol (G) simulé a été comparé aux mesures effectuées dans le sol avec le flux-mètre (Tableau 1 et Figure 5).

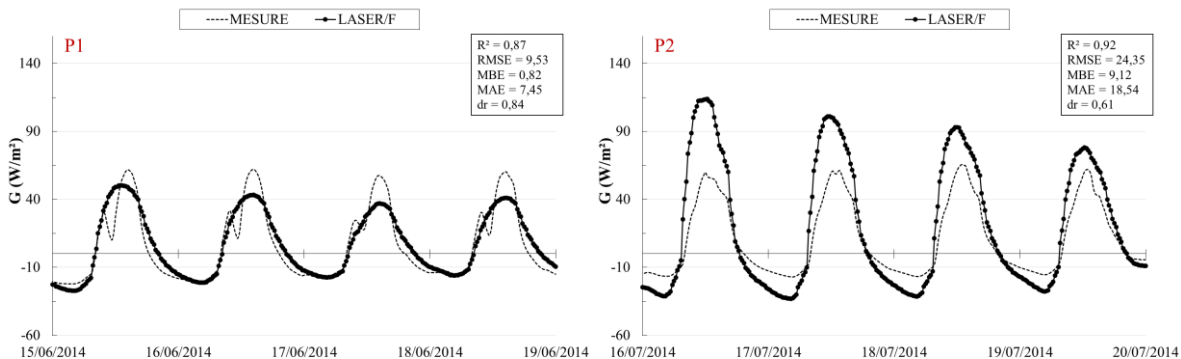


Figure 5 – Dynamiques journalières du flux de chaleur dans le sol (G) simulé et mesuré lors de P1 et P2.

¹³ Diffusivité thermique : grandeur physique qui caractérise l'inertie thermique d'un objet. Plus elle est faible, plus la température de l'objet change lentement dans le temps, ce qui signifie que l'inertie thermique de l'objet est forte.

La mesure du flux de chaleur dans le sol (Figure 5) est cohérente avec les différences de températures observées en surface (Figure 4). Cependant, le flux de chaleur dans le sol, mesuré lors de P2, est certainement sous-estimé. En effet, très proche de la zone de mesure, une partie de pelouse qui ne peut être tondue, entraîne trop d'ombre le matin au niveau de la zone de mesure. Par conséquent, le sol se réchauffe moins que s'il n'y avait pas d'herbe et donc le flux de chaleur dans le sol est moins important. Nous émettons l'hypothèse que cette sous-estimation est uniquement lors de P2, lorsque l'herbe est « active ». L'épaisseur (Δx) sur laquelle le flux est calculé étant moins importante dans la mesure que dans la simulation, le flux de chaleur dans le sol peut se trouver aussi surestimé par la mesure.

Globalement, le modèle simule un flux proche de la mesure en moyenne de $3,00 \text{ W/m}^2$ avec un RMSE de $22,06 \text{ W/m}^2$. Cependant, la dynamique des écarts est totalement différente d'une période de simulation à l'autre. La comparaison lors de P1 montre une simulation qui est proche de la mesure (R^2 de 0,87). Ce constat mène à penser que la bonne nature du sol est utilisée dans le modèle, et que lors de P1, l'humidité du sol (sol totalement sec) et par conséquent la diffusivité thermique, sont équivalentes à celles mesurées. Lors de P2, le flux de chaleur dans le sol simulé est trop important par rapport à la mesure (R^2 de 0,92 et MBE de $9,12 \text{ W/m}^2$). De plus, il diminue lors de la simulation alors que le flux de chaleur dans le sol mesuré reste constant. Cette diminution ne provient pas de la température en profondeur, puisqu'il a été montré précédemment que les écarts de variation des températures en profondeur restent constants au cours de la simulation. Cette diminution du flux de chaleur dans le sol doit donc provenir d'une diminution de la diffusivité thermique. Cela semble cohérent, puisqu'en début de période le sol est très humide et donc est fortement conducteur (G élevé), puis il s'assèche et devient moins conducteur en raison de l'augmentation de la présence d'air (G faible). Cette diminution n'est cependant pas observée dans la mesure, pour laquelle le flux de chaleur dans le sol est constant. Ainsi, soit la précision de la mesure est remise en question, soit l'humidité initiale dans le modèle est trop importante, soit le sol ne s'assèche pas assez vite dans la simulation. Ainsi, il sera plus compliqué de simuler avec LASER/F un flux de chaleur dans le sol réel lorsque le sol n'est ni saturé en eau, ni totalement sec.

K.2. Comparaison relative à l'UTCI

L'UTCI est aussi une grandeur représentative de l'ambiance climatique de l'ensemble de la zone puisqu'il dépend de plusieurs facteurs : climatiques, relatives aux conditions climatiques de la zone d'étude (température de l'air, condition d'ensoleillement, humidité, vitesse du vent, etc.) et humains (métabolisme, habits portés, âge etc.) (Bröde et al., 2011).

L'indice de confort thermique simulé par le modèle a été comparé à des mesures effectuées d'une part avec le globe noir et d'autre part avec le globe gris (Tableau 1 et Figure 6). Les mesures ont été réalisées à partir de 2015, c'est pourquoi uniquement P3 est analysée. D'après les grandeurs statistiques, les simulations seraient plus cohérentes avec les mesures du globe gris (R^2 de 0,82) qu'avec les mesures du globe noir (R^2 de 0,76). Les dynamiques journalières quant à elles montrent d'autres résultats. Par rapport à la mesure du globe noir, l'indice de confort thermique simulé semble plus surestimé la journée (MBE de $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$) que la nuit (MBE de $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$), alors que par rapport à la mesure du globe gris, celui-ci est sous-estimé la journée (MBE de $-1,2 \text{ }^\circ\text{C}$) et surestimé la nuit (MBE de $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Ainsi, les simulations sont plus ou moins proches des mesures selon le capteur de l'indice de confort thermique utilisé pour la comparaison. Nous retiendrons celles par rapport au globe gris, puisque ce capteur a une

précision théorique meilleure que le globe noir. Enfin, d'après ces résultats, l'impact radiatif des arbres, soit le rayonnement qui passe à travers les couronnes, semble correctement simulé.

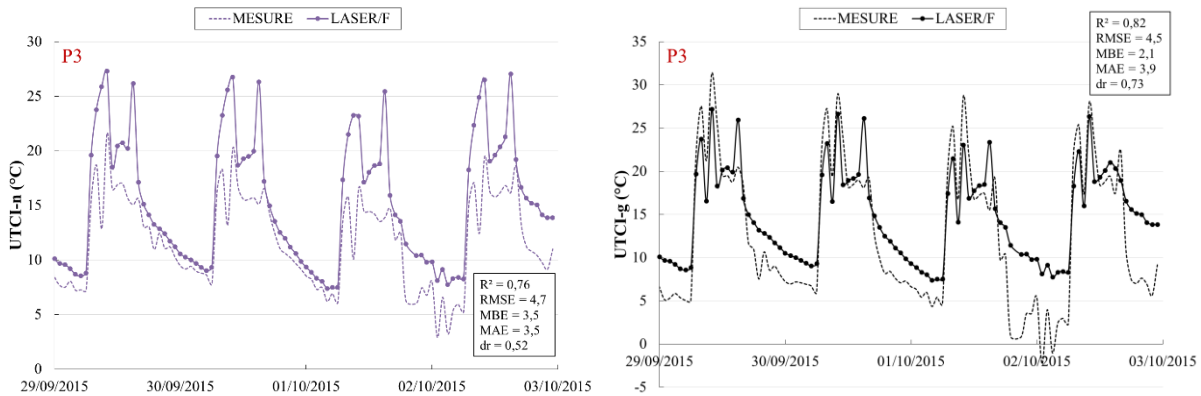
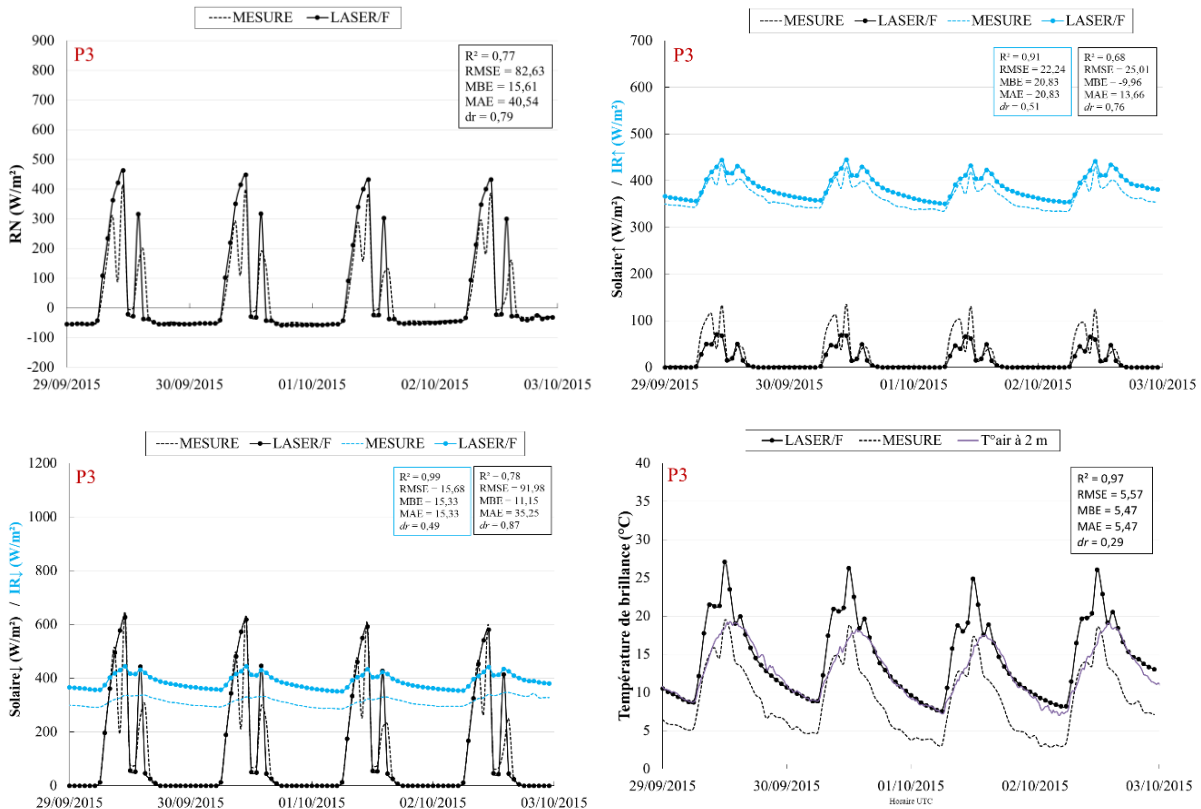


Figure 6 – Dynamiques journalières de l'indice de confort thermique (UTCI) simulé, comparé à la mesure sur P3, avec le capteur globe noir (UTCI-n) et globe gris (UTCI-g).

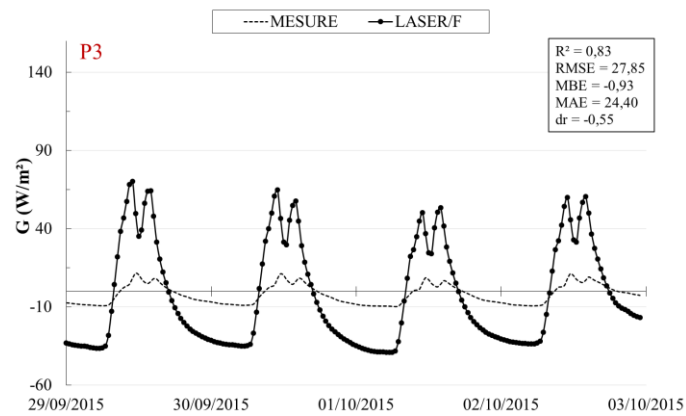
K.3. Comparaisons entre simulations et mesures, lors de P3

➤ Comparaisons relatives au sol enherbé

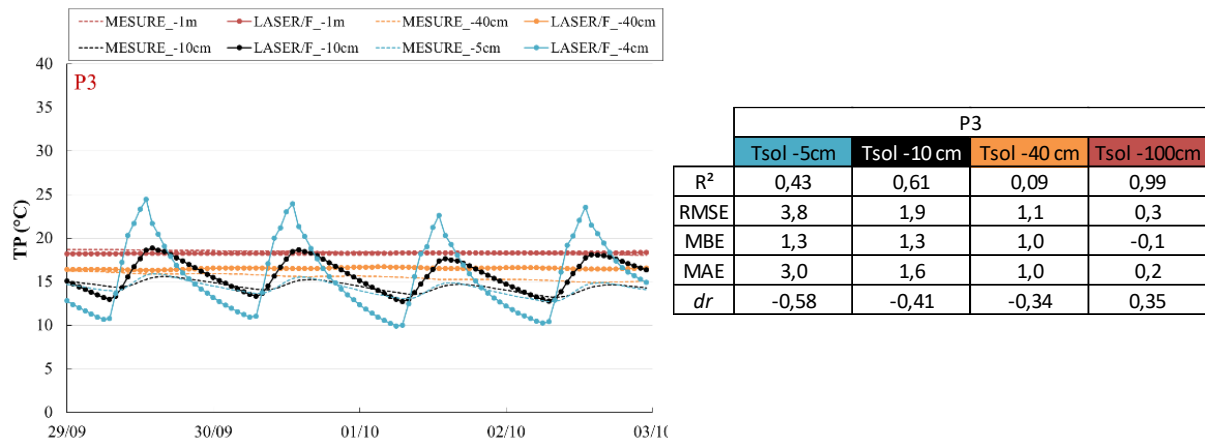
Mesures réalisées avec le bilan-mètre :



Mesures réalisées avec le flux mètre :

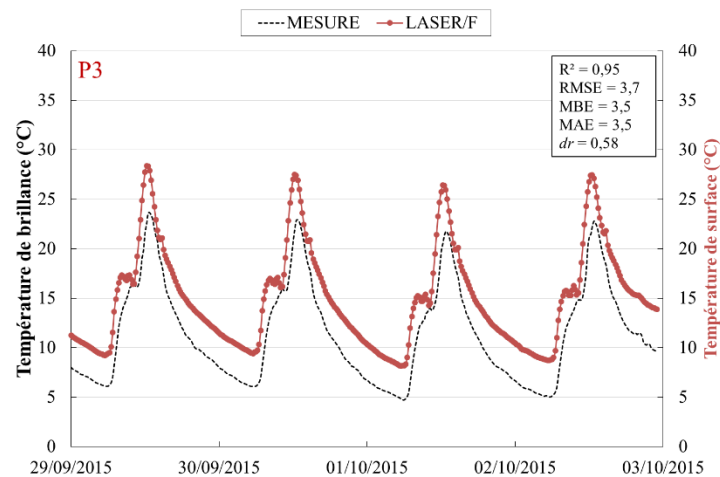


Mesures réalisées avec les thermistances dans la fosse :



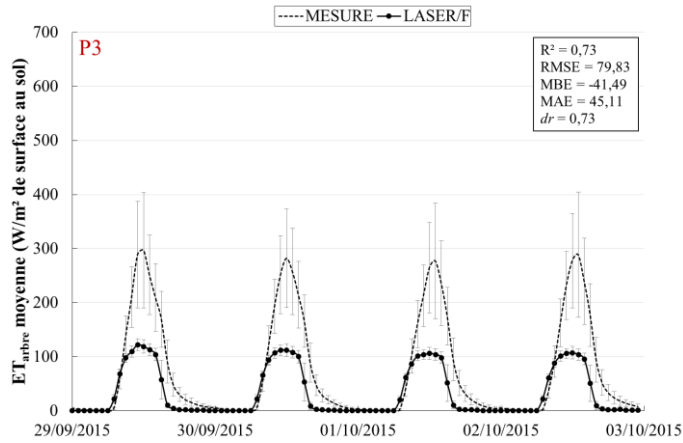
➤ Comparaisons relatives au bitume

Mesures réalisées avec le radio-thermomètre :



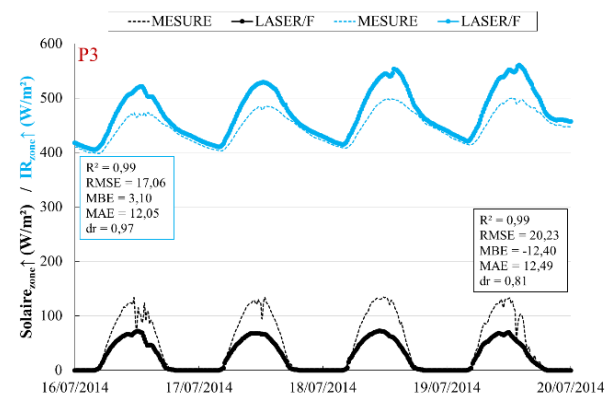
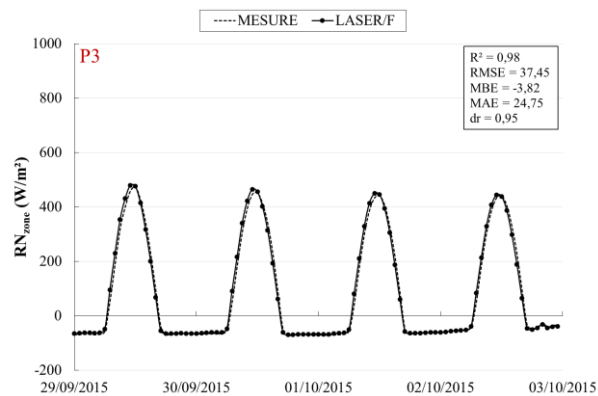
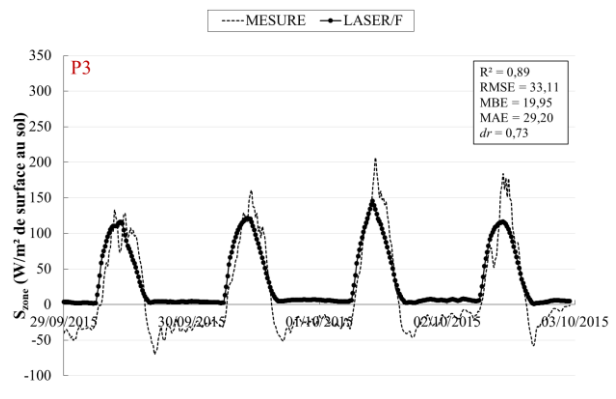
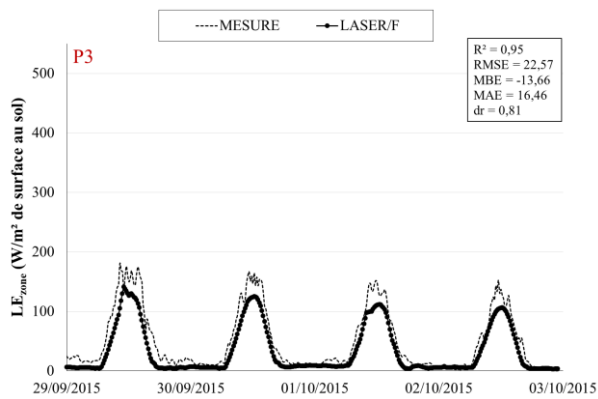
➤ Comparaisons relatives aux arbres

Mesures réalisées avec les capteurs de flux de sève :



➤ Comparaisons relatives à l'ensemble de la zone

Mesures réalisées avec les capteurs localisés sur le mât à 17 m :



Annexe L. Sensibilité de LASER/F au paramétrage d'un arbre

Dans cette analyse, nous avons évalué la sensibilité de l'évapotranspiration d'un arbre simulée par le modèle LASER/F au paramétrage du sol et de cet arbre. Les variations relatives au sol ont concerné la nature du sol et son assèchement en superficie ou en profondeur. Concernant les changements liés au paramétrage de l'arbre, nous avons testé la sensibilité du modèle à des variations de superficie d'horizon racinaire, d'indice de surface foliaire dans la couronne et de la forme de la couronne. Plusieurs changements relatifs à la couronne ont été testés et sont illustrés dans la Figure 1 :

- T1 c. – seuls le volume et la PEA de la couronne changent
- T2 c. – seul le volume de la couronne varie
- T3 c. – seule la forme de la couronne et par conséquent son PEA et son TLA sont transformés

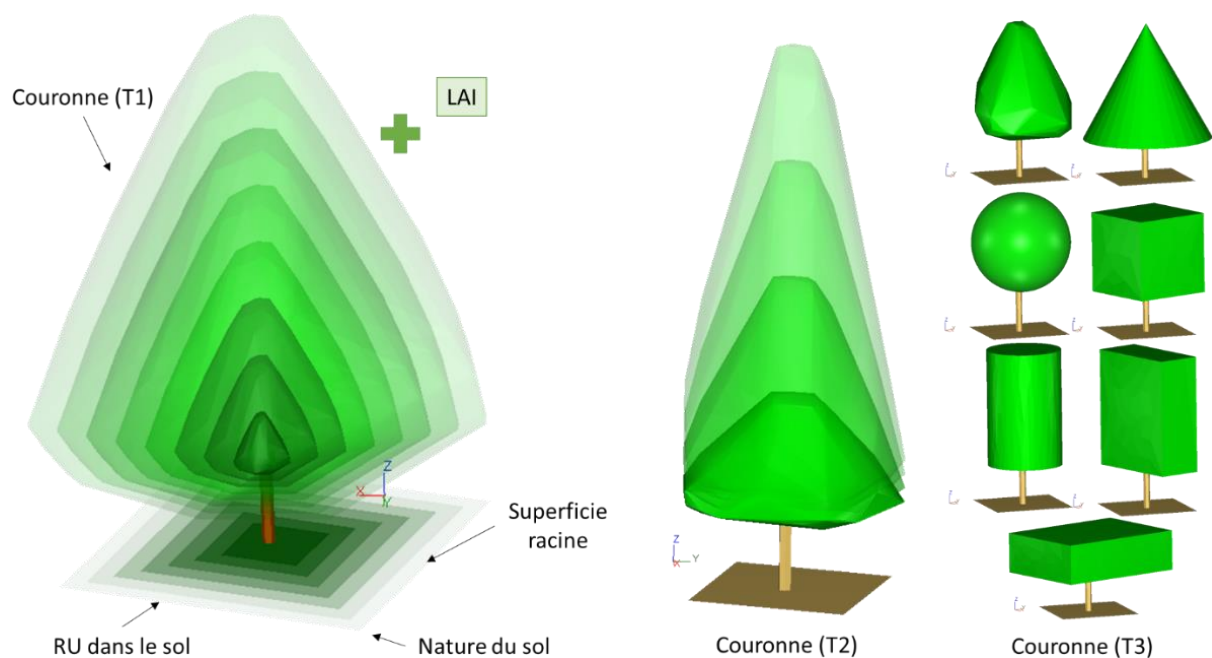


Figure 1 – Critères testés pour l'étude de la sensibilité de l'évapotranspiration simulée par LASER/F.

La sensibilité de l'évapotranspiration aux différents cas testés est présentée dans la Figure 2 et le Tableau 1. La Figure 2 présente la somme d'évapotranspiration simulée sur l'ensemble de la période par rapport aux différents cas testés. Le Tableau 1 indique, en pourcentage, les écarts minimums et maximums observés par rapport à une valeur initiale.

Le Tableau 2 détaille les résultats obtenus pour T3 c., où différentes formes de couronnes ont été reconstruites.

Toutes ces analyses ont été réalisées sur sept journées du 14 au 21 juillet 2014.

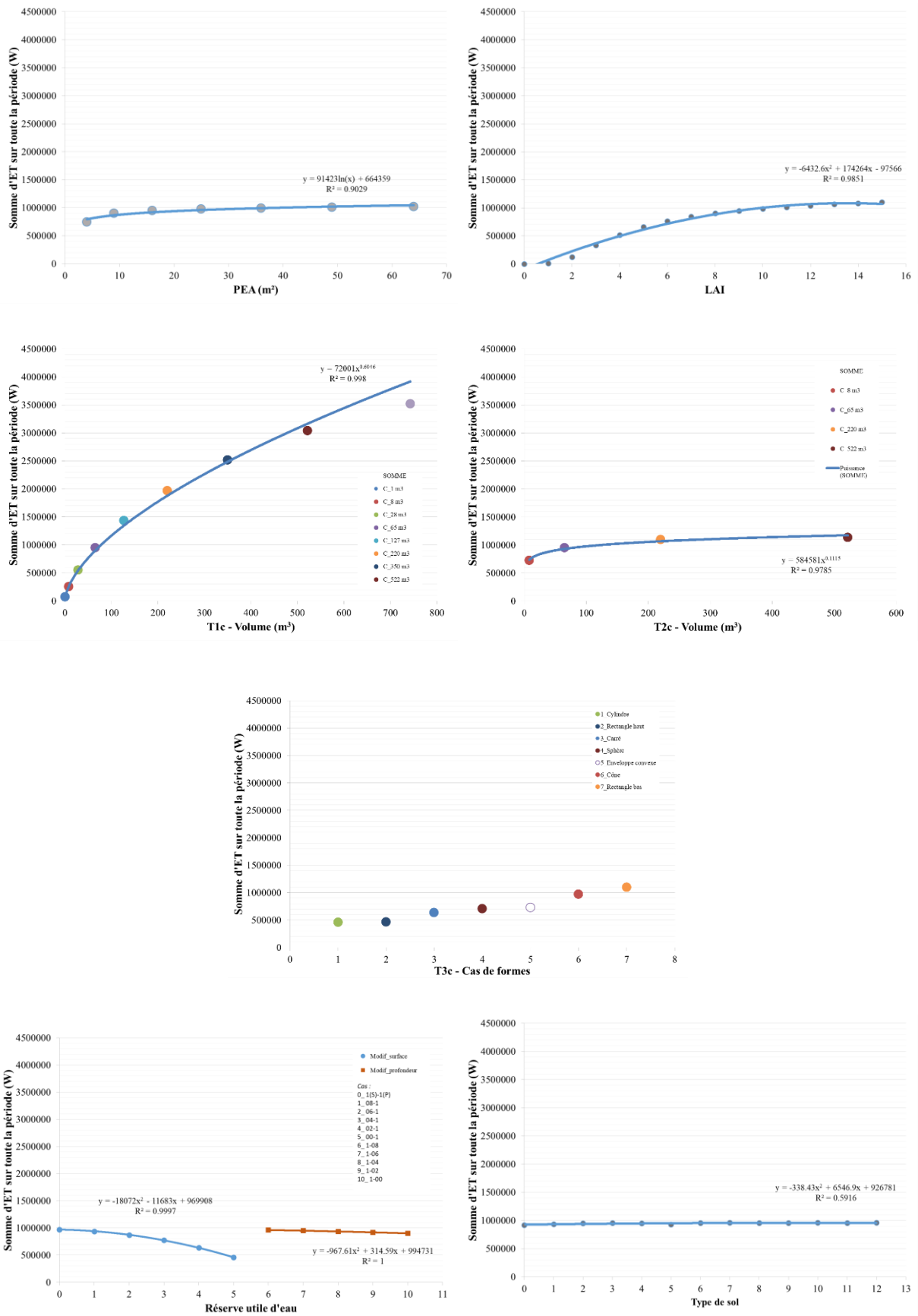


Figure 2 – Somme d'évapotranspiration sur l'ensemble de la période en fonction des critères testés.

Sensibilité	Horizon racinaire	LAI	T1 c.	T2 c.	T3 c.	Eau surface	Eau prof.	Type de sol
Min (%)	-21	-84*	-93	-22	-45	-54	-7	-2
Max (%)	8	15	273	23	57	-4	-1	1

Tableau 1 – Sensibilité minimale et maximale de l'évapotranspiration simulée à chacun des critères testés.

*Sachant qu'entre un LAI de 6 et de 15 l'écart est de -19 % à 15 %.

	Cylindre	Rectangle haut	Carré	Sphère	Convexe	Cône	Rectangle bas
Sensibilité (%)	-37	-36	-13	-3	/	34	51
PLA (m ²)	11,3	11,1	16,2	19,5	21,3	33,1	32,6
TLA (m ²)	102,4	101,2	147,5	177,4	193,5	301,6	297,0

Tableau 2 – Sensibilité de l'évapotranspiration simulée à la différence de forme de couronne foliaire, par rapport au cas d'une enveloppe convexe. Le volume (de 65 m³) et le LAI (de 9) est identique pour chaque cas.

Nous pouvons ressortir de cette étude comparative sur la sensibilité de l'évapotranspiration d'un arbre simulée par LASER/F, que :

$$Sensibilité_{Nature_{sol}} < S_{Eau_{prof.}} < S_{Racine} < S_{Eau_{surf.}} < S_{LAI} < S_{T1_{couronne}} < S_{T2c.} < S_{T3c.}$$

De plus, la sensibilité la plus importante est lorsque des couronnes rectangulaires sont utilisées, car l'orientation de la couronne joue un rôle très important. Nous pouvons observer également que, plus les maquettes engendrent des PLA et par conséquent des TLA éloignées du cas initial (enveloppe convexe), plus la sensibilité sera importante. Les conclusions de cette analyse rejoignent celles auxquelles nous sommes arrivées dans le Chapitre 4, partie 4.2. Pour la reconstruction de la couronne d'un arbre, il faut donc essayer d'employer une forme géométrique qui n'impacte pas trop sur la PEA. Dans le cas d'un tilleul argenté taillé en forme de tête de chat, il semblerait que la solution soit d'utiliser des géométries homogènes, comme la sphère ou le carré pour simplifier la géométrie de la couronne dans LASER/F.

Annexe M. Sensibilité de LASER/F au paramétrage du sol

Dans cette annexe, nous avons testé la sensibilité de LASER/F en fonction du paramétrage du sol en faisant varier la réserve utile d'eau (RU), l'indice de surface foliaire (LAI) et la nature du sol. L'analyse a été réalisée sur des flux émanant d'une surface de sol enherbé (rayonnement solaire réfléchi – *REF*, rayonnement infrarouge émis – *IR*, flux de chaleur latente – *LE*, flux de chaleur dans le sol – *G* et flux de chaleur sensible – *S*, et sur des températures (de surface – *TS* et à -8 cm de profondeur – *T -8 cm*). La sensibilité du modèle a été testée sur la journée du 17/07/2014, en moyennant les simulations de 10 h à 14 h.

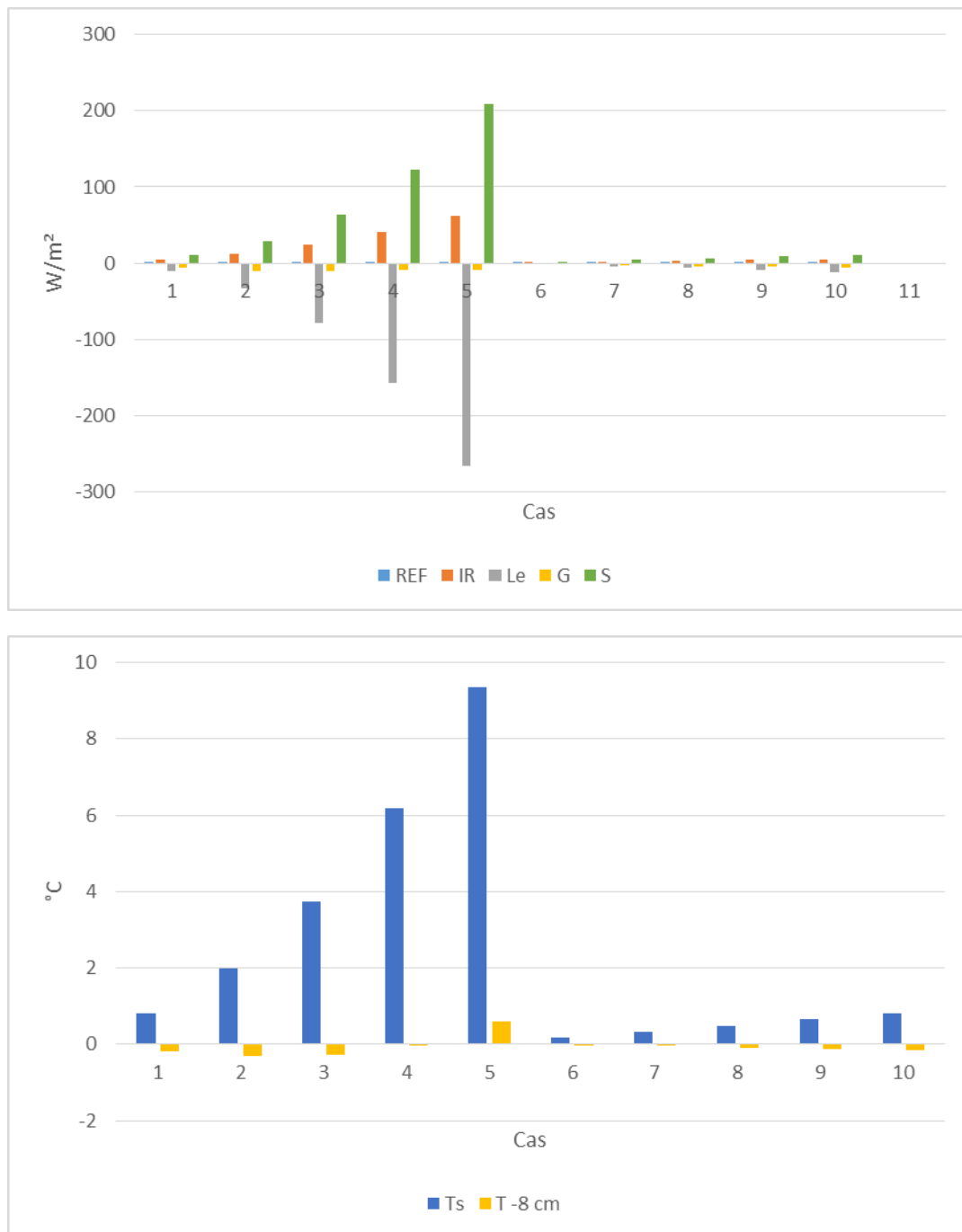
Le tableau ci-dessous répertorie les cas testés pour les trois analyses de :

- Sensibilité à la réserve utile d'eau (RU) : test de référence avec RU de 1 en surface et en profondeur
- Sensibilité au LAI : test de référence avec un LAI de 2
- Sensibilité à la nature du sol : test de référence avec un sol composé de limon sableux (58 % de sables – Sa., 32 % de limons – Li. et 10 % d'argiles – Ar.)

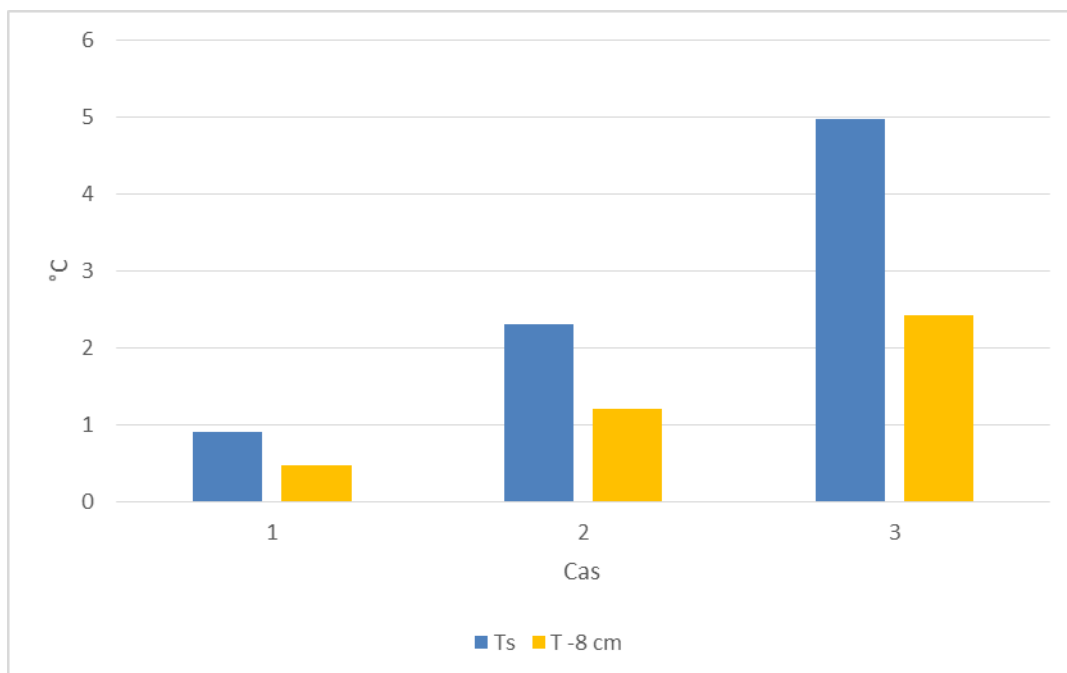
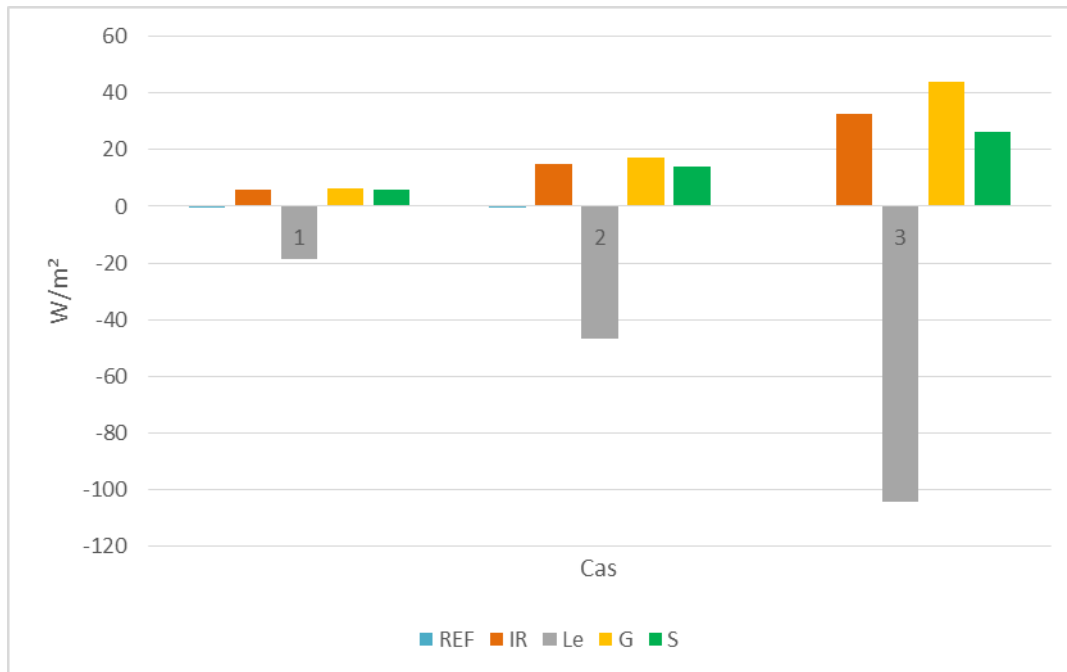
CAS	RU	LAI	Nature du sol	Composition du sol
Référence	1(S) – 1(P)	2	Limon sableux	43 % Sa., 39 % Li. et 18 % Ar.
1	08-1	1,5	Sable	92 % Sa., 5 % Li. et 3 % Ar.
2	06-1	1	Sable limoneux	82 % Sa., 12 % Li. et 6 % Ar.
3	04-1	0,5	Limon sableux bis	58 % Sa., 32 % Li. et 10 % Ar.
4	02-1		Limon fin	17 % Sa., 70 % Li. et 13 % Ar.
5	00-1		Limon	10 % Sa., 85 % Li. et 5 % Ar.
6	1-08		Limon sablo-argileux	58 % Sa., 15 % Li. et 27 % Ar.
7	1-06		Limon argileux fin	10 % Sa., 56 % Li. et 34 % Ar.
8	1-04		Limon argileux	32 % Sa., 34 % Li. et 34 % Ar.
9	1-02		Argile sableux	52 % Sa., 6 % Li. et 42 % Ar.
10	1-00		Argile limoneux	6 % Sa., 47 % Li. et 47 % Ar.
11			Argile	22 % Sa., 20 % Li. et 58 % Ar.

Pour chaque test, les écarts obtenus par rapport à un cas de « référence » sont représentés par des diagrammes dans les figures ci-après :

En fonction de la RU :

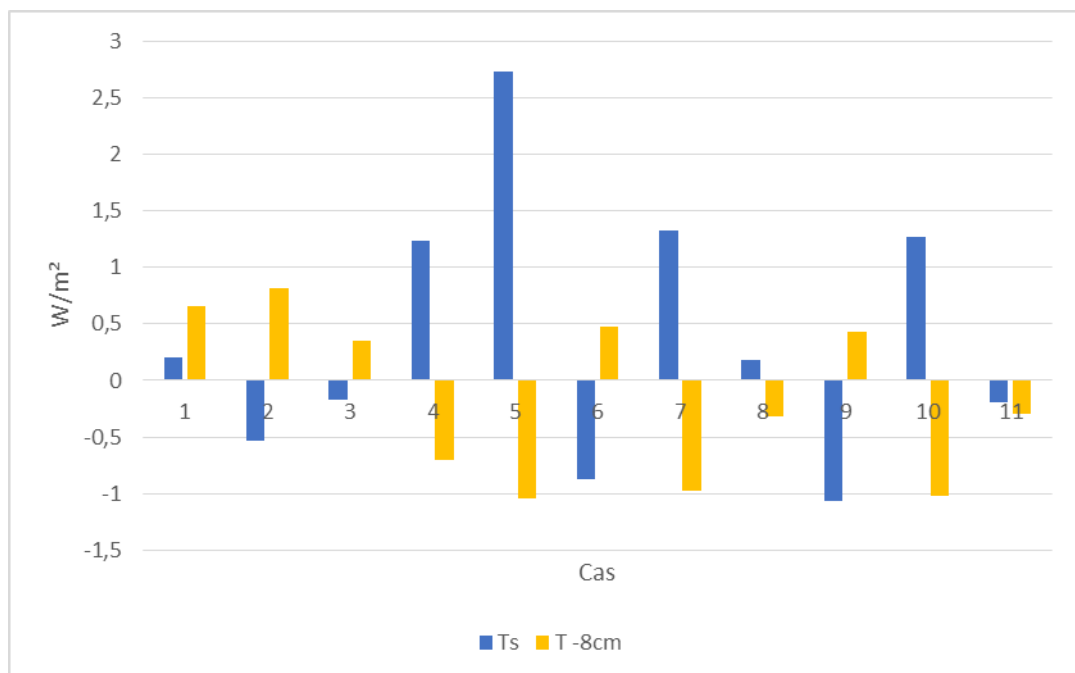
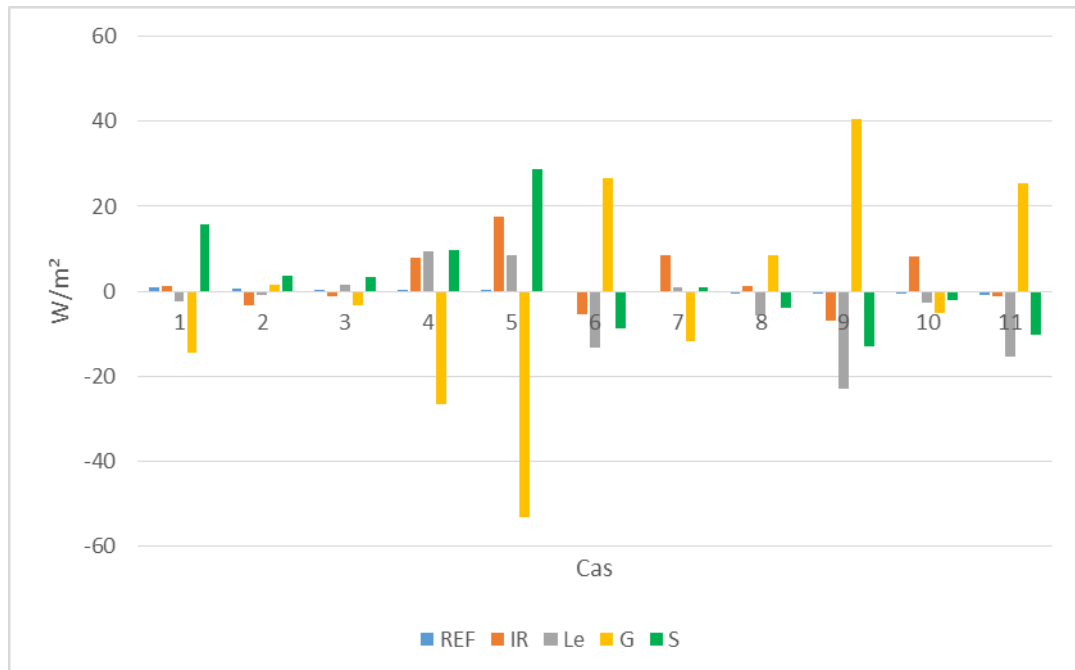


Ces graphiques montrent que l'assèchement du sol en profondeur n'a presque pas d'impact sur les flux et les températures, contrairement à l'assèchement du sol en surface. Cet assèchement superficiel induit une augmentation du flux de chaleur sensible (max 208,45 W/m^2), du rayonnement infrarouge émis (max 62,70 W/m^2) et de la température de surface (max 9,3 $^{\circ}C$). A l'inverse le flux de chaleur latente diminue (max -264,79 W/m^2). Nous noterons que cet assèchement ne semble presque pas impacter le rayonnement solaire réfléchi.

En fonction du LAI :

Ces graphiques illustrent que plus l'indice de surface foliaire diminue, plus le flux de chaleur latente diminue (max $-104,19 W/m^2$). A l'inverse, une augmentation du rayonnement infrarouge émis (max $32,81 W/m^2$), du flux de chaleur sensible (max $26,38 W/m^2$), du flux de chaleur dans le sol (max $43,81 W/m^2$) et des températures (max $5,0 ^{\circ}C$ en surface et $2,4 ^{\circ}C$ à -8 cm) est observée lorsque l'indice diminue. Dans ces tests, le rayonnement solaire réfléchi n'est quasiment pas impacté.

En fonction de la nature du sol :



Un changement de nature du sol a un impact sur les températures et tous les flux à l'exception du rayonnement solaire réfléchi. Le cas 5 semble impacter le plus les grandeurs, contrairement au cas 8.

Ces tests n'ont pas été réalisés avec la dernière version de LASER/F datant de mai 2018. Les résultats obtenus sont donc amenés à évoluer avec la dernière version.

Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains.

Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles.

Résumé

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain engendre de l'inconfort thermique auprès des habitants. Améliorer le microclimat en zone urbaine est donc l'une des préoccupations des aménageurs. La végétalisation des villes s'avère une solution prometteuse, car l'évapotranspiration des plantes et les ombres portées des arbres ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère alentour. Un défi majeur aujourd'hui est le développement d'un modèle de simulation microclimatique capable de reproduire les conditions climatiques d'une rue, voire d'un quartier urbain végétalisé, dans l'objectif de proposer un outil d'aide à la décision pour l'aménagement des villes durables. L'objectif de cette thèse est d'étudier comment prendre en compte la végétation et plus particulièrement les arbres, dans un modèle microclimatique 3D afin de simuler le microclimat d'un quartier. Deux modèles, LASER/F et RATP sont appliqués à l'échelle d'un arbre et d'un parc urbain pour mener à bien cette étude.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, végétalisation, arbre, nuage de points, reconstruction 3D, modèle microclimatique, évapotranspiration.

Résumé en anglais

The urban heat island phenomenon causes thermal discomfort to residents. Improving the microclimate in urban areas is therefore one of the concerns of urban planners. The greening of cities (with lawns, trees, green roofs, etc.) is a promising solution, as the transpiration of plants and the shadows of trees have a significant impact on the thermal balance of the surrounding atmosphere. This act must be planned to optimize the benefits of vegetation. A key challenge today is thus the development of a microclimatic simulation model capable of reproducing the climatic conditions of a street, or even a vegetated urban neighborhood, with the aim of proposing a decision support tool for the development of sustainable cities. The aim of this thesis is to study how to consider vegetation and especially trees, in a 3D microclimatic model to simulate the microclimate of a neighborhood. Two models, LASER/F and RATP were applied at the scale of a tree and an urban park to carry out this study.

Keywords: urban heat island, vegetation, tree, point cloud, 3D reconstruction, microclimatic model, evapotranspiration.