



HAL
open science

L'Arbre en ENvironnement Urbain : Modélisation 3D et suivi des échanges radiatifs et d'énergie d'un îlot vert

Pierre Kastendeuch, Tania Landes, Georges Najjar, Françoise Nerry, Jerome Colin, Laure Roupioz, Marc Saudreau, Jérôme Ngao, Thierry Améglio

► **To cite this version:**

Pierre Kastendeuch, Tania Landes, Georges Najjar, Françoise Nerry, Jerome Colin, et al.. L'Arbre en ENvironnement Urbain : Modélisation 3D et suivi des échanges radiatifs et d'énergie d'un îlot vert. [0] Université de Strasbourg. 2016. <hal-03933851>

HAL Id: hal-03933851

<https://hal.science/hal-03933851v1>

Submitted on 10 Jan 2023

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

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



HAL Authorization

AvENUe

L'Arbre en ENvironnement Urbain :
Modélisation 3D et suivi des échanges
radiatifs et d'énergie d'un îlot vert



Sommaire

1	Contexte et situation de l'expérience	2
2	Acquisition des données et modèles	4
2.1	Mesure topologie 3D des arbres	4
2.2	Acquisition de données IRT	5
2.3	Cartographie mobile	9
2.4	Données de forçage et modèles	10
2.4.1	Données bio-climatologiques	10
2.4.2	Modèles	13
3	Résultats significatifs	14
3.1	Restitution de la topologie tridimensionnelle des arbres	14
3.1.1	Développement d'un algorithme de squelettisation d'un arbre nu : ArbreSQUEL... ..	14
3.1.2	Développement d'un algorithme de reconstruction 3D de couronne foliaire : ArbreVOL	17
3.2	Comparaison LASER/F & température caméra IRT	19
3.2.1	Test de sensibilité	19
3.2.2	Validation de l'estimation de la température de surface	21
3.3	Evaluation de données acquises par système de cartographie mobile	22
3.3.1	Inter-calibration des caméras	22
3.3.2	Evaluation des données lasergrammétriques acquises par l'université de VIGO	24
3.4	Modélisations RATP	27
3.5	Modélisations Meso-NH	28
3.6	Mesures bioclimatologiques	33
4	Perspectives	35
4.1	Topologie 3D arbre dans RATP & LASER/F	35
4.2	Mesures terrestres et aéroportées IRT	35
4.3	LASER/F / Meso-NH à l'échelle du quartier	36
5	Références	37
6	Publications en rapport avec le projet	38

1 Contexte et situation de l'expérience

L'équipe TRIO du laboratoire ICube (UMR 7357 Université de Strasbourg-CNRS) mène depuis 2013 un projet de recherche qui a pour objectif de comprendre et de modéliser la réponse de la zone urbaine de Strasbourg aux conditions imposées par le climat, en particulier lors de paroxysmes climatiques (canicules et périodes de grand froid). L'objectif central de ce projet est la détermination du rôle joué par la végétation dans la création de conditions microclimatiques en milieu urbain. Ces recherches sont financées conjointement par le projet AVENUE (appel d'offre TOSCA du CNES) et le projet Atmo-IDEE (appel d'offre européen INTERREG IV). Elles sont structurées selon trois échelles emboîtées:

- **Ville** : réseau de 23 stations adapté à l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU). Les sites couvrent les différents types de bâti et d'occupation du sol de l'agglomération et de la zone rurale environnante. Toutes les stations mesurent la température et l'humidité de l'air et certaines enregistrent la vitesse et direction du vent ainsi que les précipitations.
- **Quartier** : deux sites de mesures des bilans radiatifs et d'énergie (parc urbain proche du centre-ville ; zone urbaine dense).
- **Locale** : mesures éco-physiologiques pour l'étude des processus du fonctionnement de la végétation dans un milieu urbain

Le rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains est appréhendé à travers deux aspects complémentaires. Le premier aspect consiste en une étude comparative du bilan d'énergie entre un parc urbain proche du centre (le jardin du Palais Universitaire) et une zone fortement minéralisée (la place Kléber) (Figure 1.1). Le site du parc urbain est équipé d'un mât de 20 m, situé entre deux rangées d'arbres (tilleuls argentés de 9 mètres de hauteur) et muni au sommet d'un dispositif permettant la mesure des flux turbulents de chaleur sensible et latente. Le site à dominante minérale, bien représentatif de l'urbanisation du centre-ville, est situé plus au nord de Strasbourg. Ce site est également équipé d'un dispositif de mesure des flux turbulents au sommet d'une antenne de 15 mètres située sur le toit d'un bâtiment.

Le second aspect consiste à étudier le comportement éco-physiologique des arbres et de la pelouse en relation avec les caractéristiques de la masse d'air et des conditions du sol. Une série de six tilleuls argentés dans le jardin du Palais Universitaire a été équipée depuis 2013 de capteurs pour la mesure de la transpiration par la méthode de flux de sève (en collaboration avec l'UMR PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand). Elle est complétée par des mesures d'humidité et de température du sol sur 7 niveaux (jusqu'à 1,20 m), ainsi que de mesures de la variation du diamètre des branches, par le biais de capteurs PépiPIAF qui renseignent sur le comportement hydrique de l'arbre. L'un des six arbres a été choisi pour des mesures complémentaires portant sur la température de surface des feuilles selon deux orientations Est et Ouest, ainsi que des profils de température, d'humidité et du rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR) à l'intérieur et en dessous du houppier, sur 4 niveaux. Cet arbre fait l'objet de relevés réguliers réalisés avec un scanner LIDAR terrestre pour élaborer un modèle géométrique 3D qui sera implanté dans les simulations.

En parallèle, la mesure du forçage radiatif du système urbain est réalisée sur le toit d'un bâtiment universitaire situé non loin de la zone centrale (Figure 1.1). Le dispositif comporte une monture équatoriale qui assure la mesure du rayonnement solaire direct ainsi que des capteurs supplémentaires pour la mesure du rayonnement solaire global, photo-synthétiquement actif (PAR) et de l'infrarouge atmosphérique au pas de temps de deux minutes (*cf.* §2.4.1).

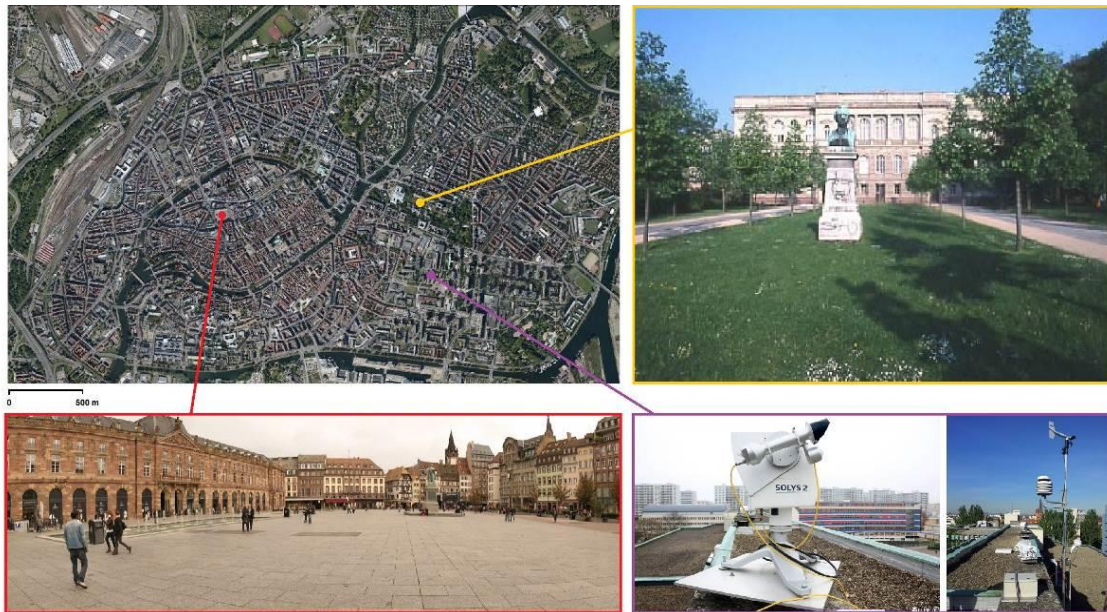


Figure 1.1 : Présentation des trois sites principaux de la campagne 2015. Place Kléber en rouge, le jardin du Palais Universitaire en jaune et le site de mesure de forçage radiatif en violet

L'un des aspects novateurs de cette campagne de mesures est la prise en compte des indices de confort à travers l'étude de leur évolution temporelle et de leur répartition spatiale en relation avec l'occupation du sol. Les mesures sont réalisées selon deux méthodes différentes : la mesure du bilan radiatif selon 3 plans perpendiculaires (difficile à utiliser pour des mesures mobiles) et la méthode utilisant les thermomètres globe (noir et gris). Pour l'étude de la répartition spatiale des indices de confort, deux chariots mobiles ont été équipés chacun d'un abri météo (température et humidité de l'air), d'un thermomètre globe gris, d'un anémomètre girouette et d'un bilanmètre. De plus, des capteurs thermomètres globe gris ont été installés sur un certain nombre de sites du réseau ICU. Une première validation de cette démarche expérimentale a eu lieu durant l'été 2015 lors de deux campagnes de mesures intensives. La première s'est déroulée sur la place centrale de Strasbourg (place Kléber) et les chariots mobiles ont été utilisés complétés par des vues panoramiques en infrarouge thermique de l'ensemble des bâtiments entourant la place (Caméra FLIR SC655) ainsi que par des mesures ponctuelles avec une caméra thermique portable FLIR E6. La deuxième campagne intensive a eu lieu autour du jardin du Palais Universitaire avec un véhicule mobile équipé d'un scanner LIDAR terrestre et d'une caméra infrarouge pour des prises simultanées.

Plus spécifiquement, les objectifs du projet Avenue étaient :

- (i) La mise au point de méthodologies de restitution de la topologie tridimensionnelle des arbres ainsi que leur géométrie fine, à partir de relevés lasergrammétriques terrestre (LIDAR);
- (ii) L'acquisition de données images, en particulier dans le domaine de l'infrarouge thermique, à différentes résolutions, en associant des dispositifs imageurs fixes et mobiles
- (iii) La validation et l'inter-comparaison des modèles RATP, LASER/F et SURFEX de l'échelle de l'arbre à l'échelle du quartier.

La partie 2 de ce rapport présentera les méthodes d'acquisitions des données topologiques 3D et IRT et présentera également les modèles utilisés ainsi que les données de forçage. La partie 3 est consacrée aux résultats significatifs. Le rapport se conclura par des perspectives à moyen terme dont certaines sont déjà mises en œuvre.

2 Acquisition des données et modèles

2.1 Mesure topologie 3D des arbres

La détermination de la géométrie de l'architecture précise des arbres est requise en entrée des modèles RATP et LASER/F (cf. §2.4). Les caractéristiques de la représentation 3D de l'arbre varient toutefois selon le modèle utilisé. Par exemple, pour le modèle RATP, une reconstruction 3D détaillée des pousses d'arbres et de feuilles est nécessaire. L'INRA UMR PIAF¹ a pour habitude d'appliquer une méthode de digitalisation pour caractériser l'architecture de l'arbre. Cependant, cette méthode laborieuse, conçue à des fins de recherche, ne peut pas être considérée si l'architecture des grands arbres ou de plusieurs arbres est étudiée.

Pour simuler les échanges radiatifs entre les objets définis comme des surfaces triangulées intégrées dans un environnement urbain, depuis l'échelle du bâtiment jusqu'à l'échelle de la route et même l'échelle du quartier, le modèle LASER/F exige des représentations plus simples de l'architecture de l'arbre. Dans ce cas, seule l'enveloppe de la couronne ou son volume sont nécessaires. Ainsi, les couronnes des arbres à feuilles se caractérisent généralement par une sphère (ou d'un équivalent géométrique primitif) et un tronc cylindrique. Comme il vient d'être décrit, beaucoup d'études ont besoin d'une reconstruction 3D des arbres, mais seules de très rares travaux trouvés dans la littérature décrivent une méthode de reconstruction appropriée.

Depuis 2013, l'INSA de Strasbourg travaille sur le développement d'une solution rapide et fiable visant à déterminer l'architecture de l'arbre et la reconstruction de sa couronne, sur la base des nuages de points acquis par lasergrammétrie (LiDAR terrestre), à différents stades phénologiques (arbres taillés, arbres avec pousses et arbres feuillus). L'emploi de la lasergrammétrie terrestre est particulièrement adapté pour détecter, sur la base de relevés sans contact et avec un niveau d'automatisation assez élevé, un nuage de points sur des objets à l'échelle du bâtiment ou des arbres. Il nécessite toutefois la mise en œuvre d'un mode opératoire adapté. Une acquisition constituée de 4 à 6 stations autour d'un arbre (Figure 2.1) et la mise en place de sphères de jonction ont permis, en post-traitement, la réalisation de l'étape de consolidation des nuages de points.



Figure 2.1 : Croquis avec stations et photos de la campagne

Après réduction du bruit du nuage et isolement du nuage de l'arbre en question, étape également appelée « segmentation », le processus de modélisation 3D peut commencer. Une recherche bibliographique a permis de mettre en évidence un algorithme susceptible de répondre, au moins partiellement, à notre problématique, à savoir celui de Cao et al. (2010). Le principe de reconstruction employé dans cet algorithme ainsi que les nombreuses modifications apportées à cet outil de façon à ce qu'il réponde à notre problématique sont présentés dans la partie 3.

¹ <http://www6.ara.inra.fr/piaf>

2.2 Acquisition de données IRT

Dans le cadre de la campagne de mesure intensive menée au cours de l'été 2015, plusieurs séries temporelles d'images dans l'infrarouge thermique (IRT) ont été collectées. Des mesures de températures de brillance ont été réalisées à l'aide de caméras infrarouge thermique pour différents éléments constituant le paysage urbain : façades, sol, arbres. Ces expériences ont été menées sur la place Kléber, caractérisée par une forte minéralisation, et dans le jardin du Palais Universitaire, plus végétalisé (Figure 1.1).

Les mesures sur la place Kléber se sont déroulées pendant la période de canicule du 30 juin au 3 juillet 2015. La collecte des données a été effectuée à l'aide de deux caméras radiométriques infrarouge thermique : une caméra FLIR SC655 et une caméra FLIR E6 les deux dans le domaine 8-14 μm . La première, reliée à un ordinateur, permet l'acquisition d'images ponctuelles, programmées ou bien de vidéos à une résolution de 640x480 pixels. La seconde est une petite caméra portable permettant l'acquisition simultanée d'images dans l'IRT et en RGB à une résolution de 160x120 pixels. La FLIR SC655, montée sur un trépied et placée au centre de la place Kléber (Figure 2.2), a été utilisée pour collecter des images panoramiques à 360° de la place à une fréquence horaire et ce pendant la journée du 03.07.2015 de 9h45 à 22h30 (heure locale). La Figure 2.3 présente l'une des images panoramiques reconstituée à partir des données collectées le 3 juillet à 14h30.



Figure 2.2 : Caméra FLIR SC655 installée au centre de la place Kléber



Figure 2.3 : Image panoramique réalisée à partir des images IRT acquises place Kléber le 3 juillet 2015 à 14h30 (heure locale)

A partir de ces mesures, les signatures temporelles thermiques des différents éléments constituant la place Kléber ont pu être extraites et comparées, permettant d'étudier la variabilité spatiale de la température sur cette place. Les températures mesurées et présentées sont des températures de brillance. La Figure 2.4 montre que les éléments au sol, les pavés et les dalles, sont plus chauds que les façades, quel que soit le moment de la journée. La température des façades dépend de leur orientation, les températures les plus élevées étant atteintes pour les façades regardant vers le sud. Il apparaît clairement que les différences de températures observées sont directement liées à l'éclairement solaire, la présence de rayonnement solaire direct et l'angle d'incidence. En soirée, quand il n'y a plus de rayonnement solaire incident, on remarque que les dalles et les pavés présentent des températures similaires. On peut donc supposer qu'il n'y a pas ou peu d'impact du type de matériaux et donc que les effets dus à l'émissivité sont relativement faibles. Cela peut provenir d'une émissivité assez similaire pour ces matériaux ou d'un rayonnement descendant assez important pour gommer les effets de l'émissivité.

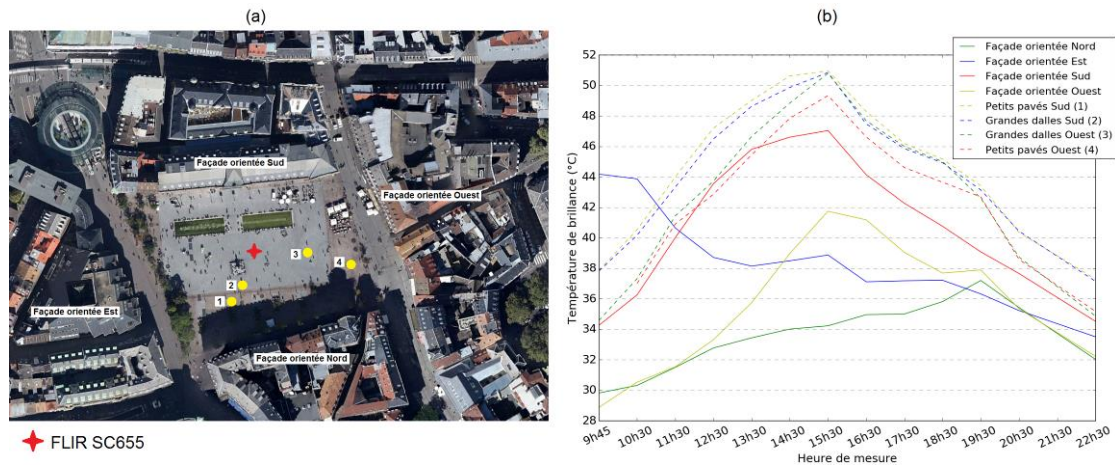


Figure 2.4 : Série temporelle de températures de brillance pour différents éléments constituant la place Kléber (b), indiqués sur la photographie aérienne (a)

La FLIR E6 a été utilisée pendant toute la période de canicule (30/06/15 – 03/07/15) pour mesurer la température de brillance de différents éléments constitutifs de la place Kléber toutes les 90 min entre 9h et 16h (heure locale). La répartition des points des mesures a été définie afin de couvrir l'ensemble de la place et de mesurer chacun des composants au soleil et à l'ombre (Figure 2.5). En parallèle des mesures climatologiques à partir de stations mobiles ont été réalisées (cf. § 2.4).

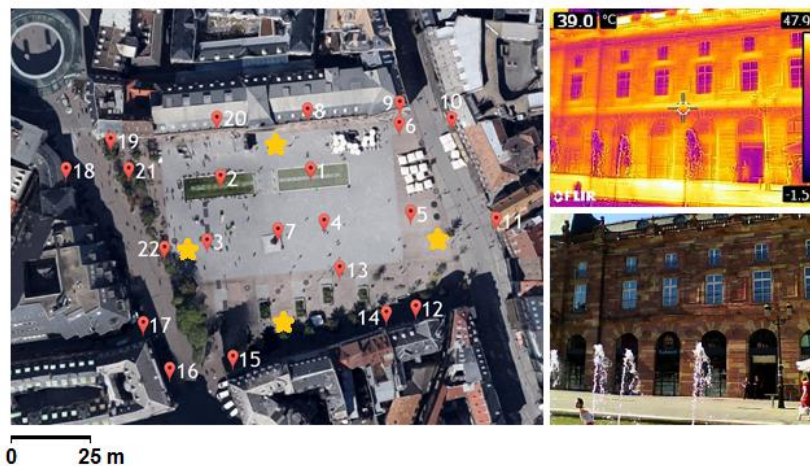


Figure 2.5 : Points de mesures FLIR E6 (gauche) et exemple d'un couple image IRT/image RGB pour le point numéro 8 (droite). La localisation des stations mobiles est indiquée par une étoile jaune

Comme précédemment, les températures de brillance qui ont été relevées sur la place montrent une grande variabilité spatiale (Figure 2.6). L'étendue des températures est de 20°C entre les revêtements les plus chauds et les plus frais. On observe trois catégories de revêtements : (i) ceux qui sont toujours très chauds, comme les éléments des façades qui font face au sud ou le dallage de la place; (ii) ceux qui sont toujours frais comme la végétation, l'eau, les façades tournées vers le nord ou des zones du sol toujours à l'ombre; (iii) ceux dont la température fluctue en fonction de l'illumination, comme c'est le cas pour les façades du côté ouest et est ou des portions du sol qui passent alternativement de l'ombre à la lumière. L'éclaircissement apparaît de nouveau comme le facteur explicatif principal de cette variabilité, via la quantité d'énergie solaire reçue. Mais parfois c'est la nature de l'élément visé qui joue le plus grand rôle : par exemple, le feuillage des arbres ou les plans d'eau restent frais même soumis à un éclaircissement solaire continu et intense.

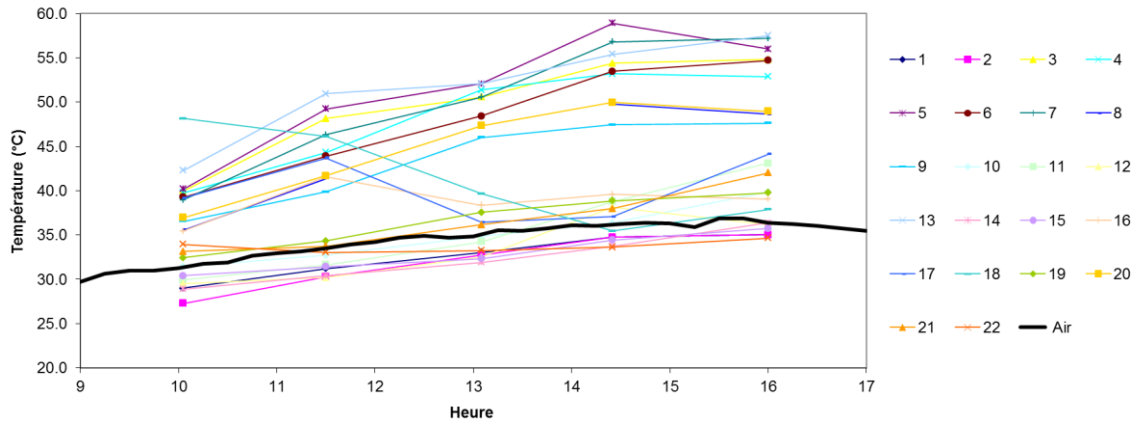


Figure 2.6 : Températures de brillance mesurées avec la FLIR E6 sur la place Kléber le 2 juillet 2015. La localisation des points de mesure est indiquée Figure 2.5

La Figure 2.7 se concentre sur le comportement de quelques éléments minéraux de la place (façades des bâtiments en pierres et dalles au sol). La façade située du côté ouest de la place est la plus chaude tôt le matin lorsqu'elle voit le soleil, puis elle se refroidit en cours de journée quand elle passe à l'ombre. La façade du côté est de la place a un comportement opposé. Le dallage, constamment éclairé, chauffe rapidement le matin et devient l'élément le plus chaud dans l'après-midi. La façade du côté nord se comporte comme le dallage et se révèle particulièrement chaude une fois qu'elle est pleinement illuminée par le soleil dans l'après-midi. La façade du côté sud est la plus fraîche, quel que soit le moment de la journée, puisqu'elle est constamment à l'ombre.

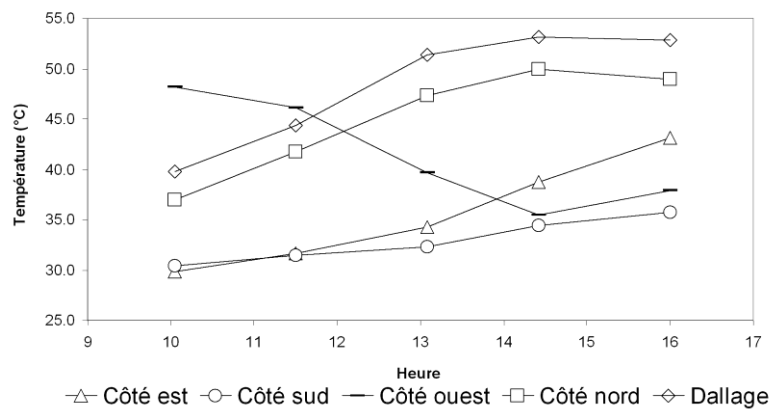


Figure 2.7 : Températures de brillance relevées le 2 juillet 2015 entre 10h et 16h sur la place Kléber pour quelques éléments minéraux de la place

Les mesures effectuées dans le jardin du Palais Universitaire ont été acquises entre le 15 et le 17 juillet 2015. L'objectif de ces mesures était de suivre l'évolution de la température de brillance des différents éléments végétaux et artificiels caractérisant le jardin et de valider les températures instantanées ainsi que de leur cinétique journalière fournies par le modèle LASER/F (cf. §2.4). Cette validation est présentée dans la partie 3.2. Ces mesures ont été collectées à l'aide de la FLIR SC655 installée sur le toit d'un bâtiment faisant face au Palais Universitaire et surplombant le site expérimental mis en place dans le cadre de l'étude sur le climat de Strasbourg. Cette configuration nous a permis d'acquérir des images couvrant une partie de la façade du bâtiment et le houppier des arbres du jardin (Figure 2.8). Les images thermiques ont été collectées sur une période de 51h (du 15 juillet 2015 8h20 au 17 juillet 11h15 heure locale), à la fréquence de 1 image toutes les 5 minutes. Ces acquisitions forment une série temporelle de températures de brillance à très haute résolution temporelle permettant l'analyse précise de la réponse dynamique des surfaces (Figure 2.9).

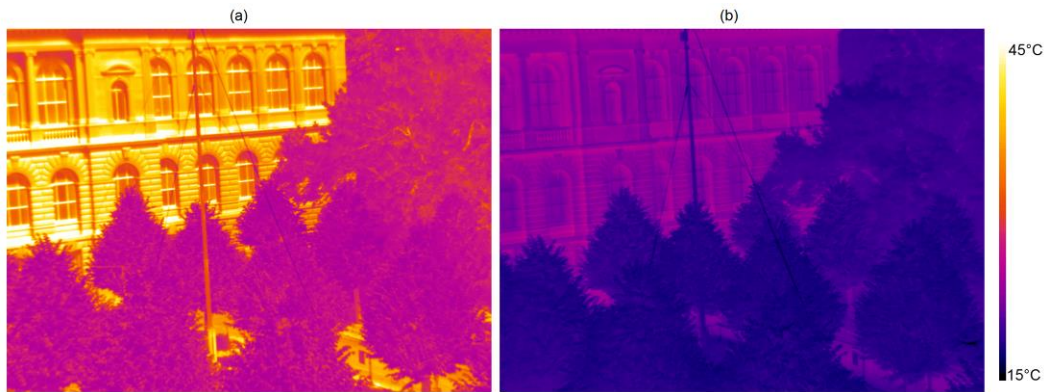


Figure 2.8 : Deux images IRT extraites de la série temporelle collectée dans le jardin historique du Palais Universitaire, de jour à 11h (a) et de nuit 6h (b)

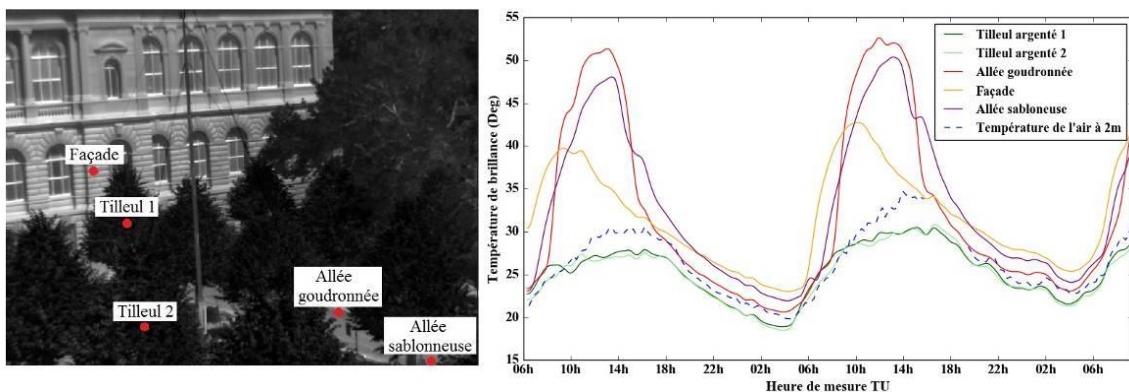


Figure 2.9 Série temporelle de températures de brillance pour 5 éléments caractéristiques du jardin historique du Palais Universitaire à droite référencés sur l'image de gauche

Des zones homogènes et représentatives de différents éléments de la scène ont été extraites de la série temporelle d'images IRT afin de visualiser et comparer les températures de brillance pour chacun de ces éléments et leur évolution journalière (Figure 2.9). L'analyse des courbes de températures montre que pour les végétaux (2 tilleuls argentés) les variations de température dans la journée restent relativement faibles, au maximum de 11°C le 16 juillet. Les courbes des 2 tilleuls argentés sont très similaires. Ces températures sont également en dessous ou proches de la température de l'air (en pointillés dans la Figure 2.9). Au contraire, les éléments artificiels comme la façade, l'allée goudronnée et l'allée sablonneuse montrent des variations beaucoup plus importantes, jusqu'à 32°C pour l'allée goudronnée. Les températures de ces éléments artificiels sont constamment au-dessus de la température de l'air avec des maxima pouvant dépasser les 50°C. La nuit, les différences entre les éléments végétaux et artificiels sont à leur minimum, avec environ 4,5°C entre l'élément le plus chaud et l'élément le plus froid contre 22°C de différence au maximum en journée. Le fait que l'allée sablonneuse n'ait pas le même comportement que la façade et l'allée goudronnée vient du fait qu'elle est localisée sous les arbres et est donc plus souvent ombragée.

Les températures mesurées avec les deux caméras thermiques sont des températures de brillance en bande 8-14 μm . Afin de les convertir en température de surface, l'émissivité de chaque type de surface doit être connue. Il est difficile d'estimer l'émissivité des matériaux en milieu urbain du fait de l'hétérogénéité du rayonnement descendant. Dans le cadre de ce projet, des tentatives de mesure d'émissivités pour les surfaces caractéristiques ont été effectuées avec un radiomètre multispectral Cimel Climat. Ces mesures ont permis de dériver des valeurs d'émissivité à l'aide de la méthode TES (Temperature/Emissivity Separation Method) pour les surfaces horizontales. Cependant, l'utilisation de cette méthode pour les surfaces verticales telles que les façades s'est avérée très compliquée du fait de la difficulté d'estimer le rayonnement infrarouge incident sur ces surfaces. L'obtention des valeurs

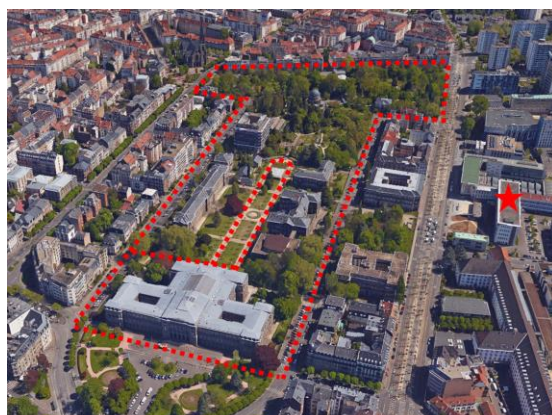
précises d'émissivité pour les éléments urbains verticaux n'a donc pas été possible pour le moment et sera l'objet d'expérimentation plus approfondie à l'avenir. Les températures présentées dans ce document sont donc des températures de brillance.

2.3 Cartographie mobile

Pour compléter ces mesures, des acquisitions ont été réalisées à l'aide d'un système de cartographie mobile combinant un scanner laser (LiDAR) et caméra thermique montés sur un véhicule (Figure 2.10) dans le jardin du Palais Universitaire ainsi que dans les rues entourant ce jardin. Le système de cartographie mobile est composé d'un scanner mobile Optech Lynx Mobile Mapper SG1, accompagné de quatre caméras ainsi que d'une caméra thermique Xenics Gobi 384 Scientific. Ces instruments ont été installés sur un véhicule couplé avec un GPS et une centrale inertielle. Le véhicule a suivi un trajet à travers la rue Goethe, la rue de l'Observatoire, la rue de l'Université, la place de l'Université ainsi que 2 passages dans le jardin du Palais Universitaire (Figure 2.11) pendant 3 jours aux 4 moments clés de la journée (0h, 6h, 15h et 20h). Le circuit total est de 2,3 km de longueur et représente un quartier de 0,3x0,6 km². Les collectes ont été effectuées sur 3 jours du 14 au 16 juillet 2015. Le 14 juillet, deux passages ont été réalisés à 15h et 20h (heures locales). Le 15 juillet, 4 passages ont eu lieu à 0h, 6h, 15h et 20h. Le 16 juillet, 2 passages ont été fait à 0h et 6h. Cette activité a été confiée à l'équipe "Applied Geotechnologies Research Group" de l'université de Vigo en Espagne (<http://geotech.webs.uvigo.es/index.html>).



Figure 2.10 : Système de cartographie mobile de l'université de VIGO



- ★ Bâtiments INSA de Strasbourg
- Itinéraire

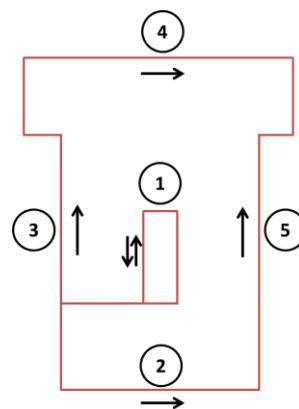


Figure 2.11 : Itinéraire suivi par l'équipe de l'université de VIGO

Lors du dernier passage, des données supplémentaires ont été acquises sur la façade des bâtiments de l'INSA (Figure 2.11) à des fins de validation. Les acquisitions effectuées à partir de la plateforme mobile ont fourni un jeu de données unique constitué d'un nuage de points colorisé avec la température de brillance (Figure 2.12) ainsi que les images thermiques correspondantes apportant une information importante sur l'environnement direct du jardin.

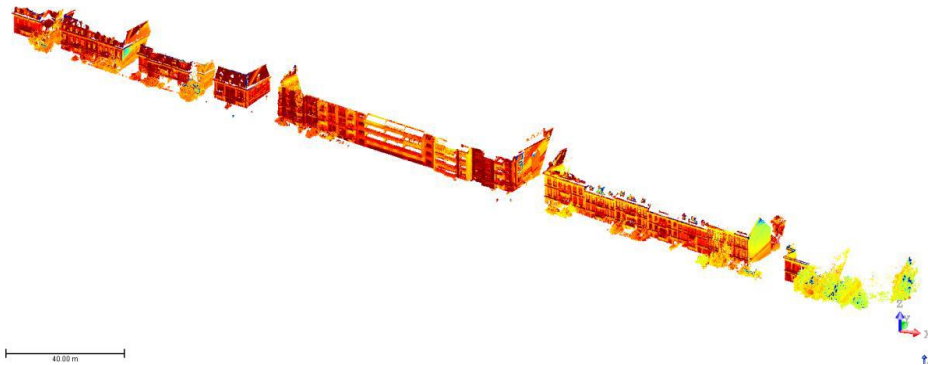


Figure 2.12 : Exemple d'un nuage de points colorisé avec les données thermiques (Pradier et al. 2016)

Ces données ont été collectées dans l'optique d'une validation du modèle LASER/F (cf. §2.4) à l'échelle du quartier.

2.4 Données de forçage et modèles

2.4.1 Données bio-climatologiques

Le réseau de mesures a été installé pour atteindre deux objectifs principaux:

- (i) identifier et quantifier les processus liés au climat urbain;
- (ii) valider les simulations des différents modèles dont nous disposons.

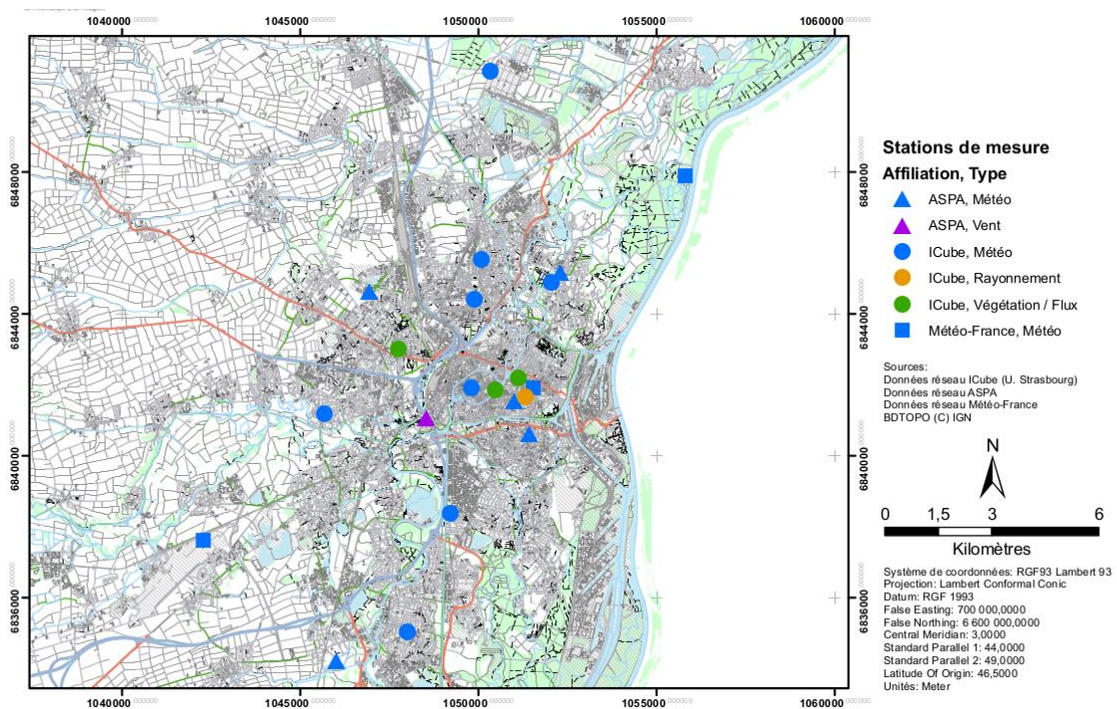


Figure 2.13 : Réseau de mesure dans la Communauté Urbaine de Strasbourg

2.4.1.1 Mesures météorologiques classiques

Le réseau de mesures météorologique existant sur l'agglomération strasbourgeoise regroupe des stations maintenues par Météo-France, par l'ASPA (Association pour la Surveillance et l'Etude de la Pollution Atmosphérique en Alsace) et par le laboratoire ICube, soit un total de 23 sites opérationnels. Chaque station mesure à minima la température de l'air et l'humidité relative. Les sites Météo-France mesurent les précipitations ainsi que la vitesse et direction du vent à 10 mètres à pas de temps horaire, tandis que les sites ICube sont équipés en partie de capteurs de types "globes gris" permettant de mesurer une température de confort. Toutes les mesures du réseau ICube sont réalisées au quart d'heure.

Une campagne expérimentale a également été mise en place pour évaluer le stress thermique subi durant l'épisode de canicule du mois de juillet 2015 sur la place Kléber (Figure 2.14 (a)). Cette place, très fréquentée et située au centre de la ville, est bordée d'enseignes commerciales de renom. Elle présente un aménagement essentiellement « minéral » avec deux rangées d'arbres le long des côtés ouest et sud qui procurent un ombrage très limité. Le dispositif expérimental se compose de deux chariots mobiles (Figure 2.14 (b)) équipés d'un capteur de type « boule grise » destiné à mesurer la température d'ambiance (Figure 2.14 (c), fabrication F. Bruckmann), d'un radiomètre pour le rayonnement net (NR Lite2, Kipp & Zonen), la vitesse et direction du vent (Modèle 05103, Young), d'une sonde pour la température et l'humidité de l'air (HC2S3 Rotronic) placée dans un abri miniature de type Met 21. Les données ont été enregistrées toutes les quinze minutes sur des centrales (CR21 et CR10, Campbell Scientific). Comme il était impossible d'étudier les 4 côtés de la place simultanément avec les deux chariots, ces derniers ont été placés sur les côtés nord et sud le 30 juin et le 2 juillet, puis sur les côtés est et ouest le 1 et le 3 juillet. Des relevés de températures de brillance ont aussi été réalisés toutes les heures et demi à l'aide d'un imageur thermique portable (FLIR E6) en 22 points sur la place (cf. §2.2).

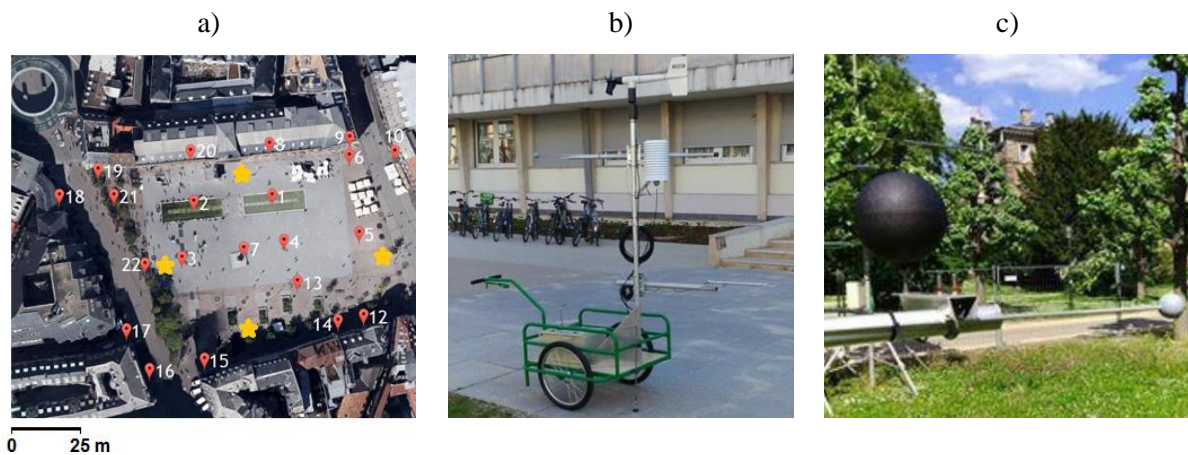


Figure 2.14 : a) La place Kléber avec les points de mesure des températures de brillance (numéros) et l'emplacement des chariots (étoiles); b) chariot mobile pour la mesure de l'ambiance climatique (photo Filliol T.); c) globes noirs et gris pour la mesure de la température d'ambiance (photo Filliol T.)

2.4.1.2 Bilan radiatif

Si la station Météo-France d'Entzheim mesure le rayonnement global à pas de temps horaire, ce terme seul ne permet pas un suivi fin du forçage radiatif. Le laboratoire dispose donc d'un site en milieu urbain (Figure 1.1) comprenant un pyréliomètre monté sur un suntracker pour la mesure du rayonnement solaire direct, d'un pyranomètre mesurant le rayonnement global, d'un pyrgéomètre pour le rayonnement infrarouge incident ainsi que d'un capteur de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) incident. Le rayonnement diffus est quant à lui déduit par différence global - direct. Ce site est programmé pour intégrer les mesures à pas de deux minutes, ce qui permet d'avoir un forçage radiatif à très haute résolution temporelle.

Les termes du bilan radiatif ascendant (rayonnement solaire réfléchi et rayonnement infrarouge émis) sont mesurés sur les sites du jardin historique du Palais Universitaire et de la mairie de Schiltigheim, dont les mats respectifs sont équipés d'un couple pyranomètre / pyrgeomètre. Il est donc possible d'obtenir le terme de rayonnement net sur ces deux sites à pas de temps quart horaire.

2.4.1.3 Bilan d'énergie

Les mesures des termes du bilan d'énergie concernent principalement les flux turbulent (flux de chaleur sensible H et flux de chaleur latente LE). Le premier est mesuré à l'aide d'un anémomètre sonique Campbell Sci. CSAT-3, le second avec un analyseur de gaz LICOR LI7500. Les mâts des sites du jardin historique du Palais Universitaire et de la mairie de Schiltigheim sont tous deux équipés d'un tel couple d'instruments. Le mât déployé dans le jardin historique du Palais Universitaire permet de placer les instruments à la hauteur des toits des bâtiments environnants, de sorte que la mesure n'intègre que les effets locaux du parc urbain. En revanche, le mât situé sur le site de Schiltigheim permet de réaliser des mesures à une quinzaine de mètres au-dessus de la canopée urbaine, ce qui se traduit par des mesures intégrant les contributions d'un secteur beaucoup plus large. Ces deux sites nous permettent d'avoir deux points de mesure de flux turbulent très contrastés avec une signature très urbaine pour Schiltigheim et très végétale pour le site du jardin (Figure 2.15).

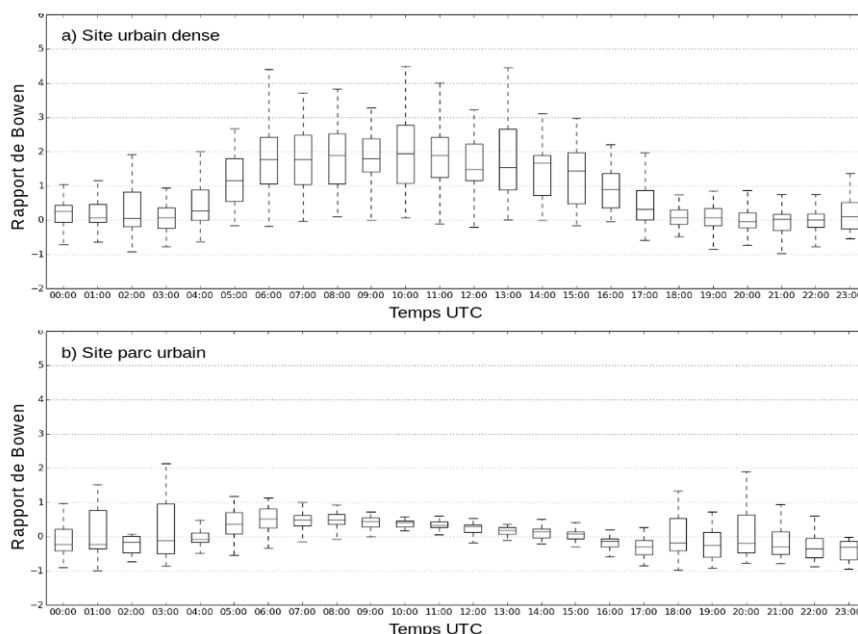


Figure 2.15 : Rappports de Bowen comparés « parc » et « zone dense »

Les termes de transpirations sont aussi décomposés entre contribution des arbres et contribution du gazon sur le site du jardin historique du Palais Universitaire. Le premier terme est mesuré par la méthode des flux de sève sur six tilleuls argentés d'une trentaine d'années, tandis que le second est mesuré par la méthode de la chambre à transpiration. Si la première méthode permet un suivi continu à pas de temps semi-horaire, la seconde méthode requiert une intervention manuelle, et n'est donc réalisées que lors de périodes d'observation intensives.

Le terme de stockage de chaleur, ou flux de chaleur dans le sol, peut être obtenu par différence entre rayonnement net et somme des flux turbulents. Néanmoins, afin de vérifier la clôture du bilan, une série de capteurs de température est disposée dans une fosse pédologique dans le site du jardin historique du Palais Universitaire. Le profil de contenu en eau du sol y est aussi documenté au pas de temps quart horaire.

2.4.2 Modèles

2.4.2.1 LASER/F

Parmi les modèles dont nous disposons, LAtent-SEnsible-Radiative Fluxes (LASER/F) (Kastendeuch et al. 2009) nous permet de simuler ce qui se passe à l'échelle du quartier, avec un très haut niveau de résolution (quelques mètres carrés). C'est un schéma de surface dans lequel on introduit la géométrie réelle (en 3D) de la zone simulée et qui calcule l'évolution thermo-radiative du tissu urbain: échanges radiatifs dans le solaire et l'infrarouge, flux de chaleur sensible, latente, conduction thermique, état de l'atmosphère dans les rues.

2.4.2.2 RATP

Le modèle RATP (Rayonnement Absorbé, Transpiration, Photosynthèse) simule la distribution spatiale du rayonnement ainsi que les échanges gazeux foliaires d'un couvert végétal en fonction de la structure du couvert, du microclimat à l'intérieur de la canopée et des propriétés physiques et physiologiques des feuilles. Le modèle utilise une représentation 3D du couvert végétal constituée d'une matrice de voxels 3D dont chaque voxel est caractérisé par une densité de surface foliaire. La simulation, à l'échelle du voxel, est possible pour plusieurs types de végétation (e.g. plusieurs feuilles de plusieurs plantes différentes) permettant ainsi la simulation du fonctionnement d'un couvert hétérogène. Les simulations se basent sur une approche de type milieu turbide pour le traitement des transferts radiatifs, sur la résolution du bilan d'énergie des feuilles pour la transpiration et du formalisme de Farquhar pour la photosynthèse, et en considérant, à l'échelle de chaque cellule 3d, des feuilles d'ombre et de soleil. Le pas de temps généralement utilisé pour une simulation est de l'ordre de 30 minutes. Les équations et la description détaillée du modèle sont données dans Sinoquet et al. (2001). (www6.ara.inra.fr/piaf/Methodes/RATP)

2.4.2.3 Meso-NH

Meso-NH est le modèle atmosphérique mesoscale non-hydrostatique de la communauté de recherche française. Il a été conjointement développé par le Laboratoire d'Aérodynamique et par le CNRM-GAME (URA 1357 CNRS/MÉTÉO-FRANCE). (www.obs-mip.fr/services-observation/soa/MESO-NH)

3 Résultats significatifs

3.1 Restitution de la topologie tridimensionnelle des arbres

La restitution de la topologie tridimensionnelle des arbres vise à fournir un modèle 3D d'une part de l'architecture de l'arbre nu et d'autre part de l'arbre feuillu. Tandis que le modèle de l'arbre nu avec pousses est d'importance pour l'utilisation du modèle RATP, celui représentant l'arbre feuillu est indispensable en entrée au modèle LASER/F.

3.1.1 Développement d'un algorithme de squelettisation d'un arbre nu : *ArbreSQUEL*

Le choix d'utiliser la squelettisation pour répondre à notre problématique de modélisation a déjà été conforté dans le travail de fin d'études de Christelle Hayot (INSA de Strasbourg) en 2014 (Hayot, 2014). Le terme de squelettisation désigne de manière grossière le procédé qui permet de simplifier un objet en un squelette. L'algorithme réalisé par Cao et al. (2010) a pour but de créer le squelette d'une forme à partir d'un nuage de points. En quelques mots, il permet premièrement de réduire le nuage de points d'un objet, disposant d'une certaine épaisseur, à un nuage de volume quasi-nul, ceci grâce à une opération de contraction par triangulation locale de Delaunay. Deuxièmement, un amincissement topologique est appliqué et permet d'obtenir le squelette 3D final. On peut visualiser ces étapes de traitements dans la Figure 3.1. Cette méthode présente des caractéristiques telles que la robustesse face au bruit du nuage de points et la capacité à gérer des données non complètes, mais de façon modérée. Ainsi, dans l'idée d'extraire un squelette d'un nuage de points, plusieurs auteurs ont créé des méthodes automatiques.

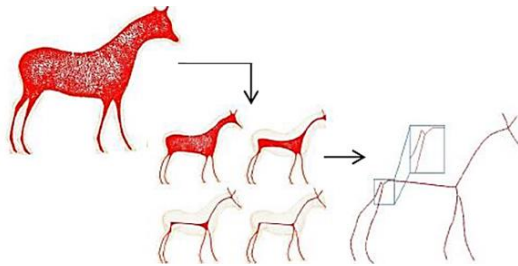


Figure 3.1 : Etapes de traitement de la squelettisation développée par Cao et al. (2010)

La méthode de squelettisation de Cao et al. (2010) a été développée pour modéliser des objets généralement clos, tels que des statues, par exemple. C'est au travers des travaux de Hayot (2014) qu'elle a été appliquée aux arbres. La Figure 3.2 présente les résultats obtenus après squelettisation d'un arbre nu (a), d'un arbre avec des pousses (b) et d'une tête de chat (c). L'arbre en question est un tilleul argenté, taillé de façon spécifique.

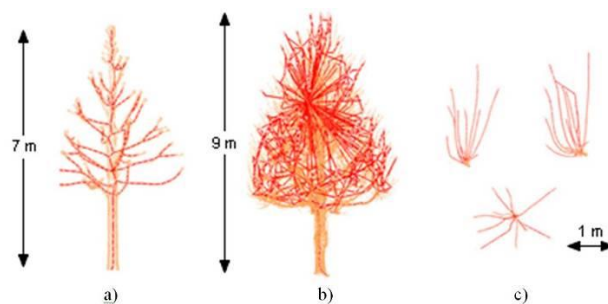


Figure 3.2 : Résultat de la squelettisation d'un arbre nu (a), d'un arbre avec des pousses (b) et d'une tête de chat (c) obtenus avec l'algorithme de Cao et al. (2010)

A partir de l'algorithme développé par Hayot (2014), nous sommes en mesure d'extraire du squelette d'un arbre les attributs suivants, qui sont au nombre de cinq :

- Une représentation 3D colorée représentée Figure 3.3 (une couleur différente pour chaque branche ou pour chaque pousse)
- La longueur rectiligne et curviligne de chaque partie de l'arbre (tronc, branches, pousses) (Figure 3.3)
- Un fichier des pousses par tête de chat (nombre et longueur)
- Les coordonnées de tous les nœuds présents dans le squelette, rangées soit par branches soit par pousses. De plus, ces éléments sont fournis dans un ordre précis, qui part du tronc ou bien du centre du moignon jusqu'aux extrémités
- La détermination des coordonnées approchées des extrémités des branches où sont situés les moignons

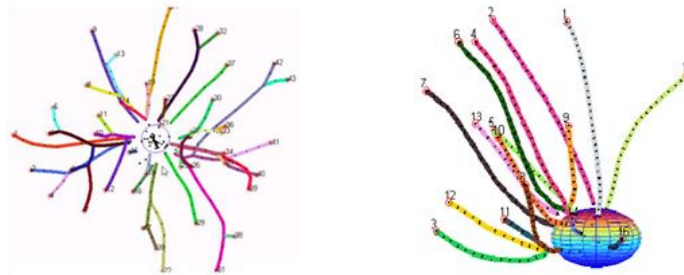


Figure 3.3 : Résultats de squelettisation sur l'arbre nu (à gauche) et sur une tête de chats avec pousses (à droite)

Ainsi est né l'algorithme de squelettisation « ArbreSQUEL ». Dans sa version de juin 2014, il était en mesure de fournir les résultats illustrés dans la Figure 3.4.

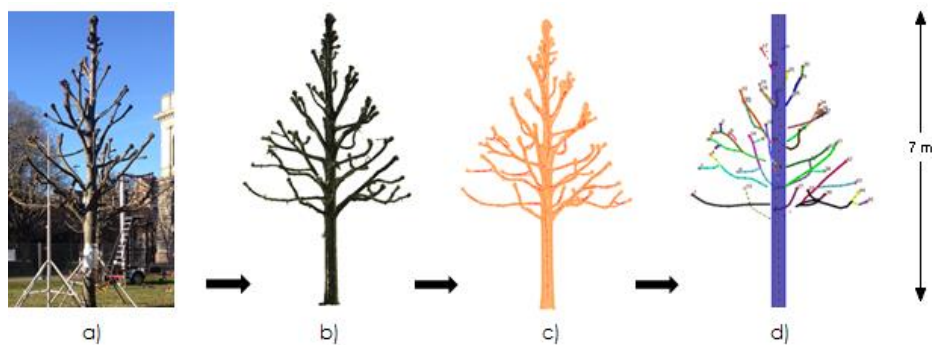


Figure 3.4 : Etapes caractéristiques de l'algorithme « ArbreSQUEL » développé dans notre projet : (a) arbre nu, (b) nuage de points, (c) 1^{ère} étape de squelettisation et (d) résultat de la squelettisation finale

Bien que pour la reconstruction 3D d'arbre, l'algorithme développé en 2014 semble fonctionner sur le tilleul étudié, il reste encore des points à améliorer, car les défauts suivants ont été observés :

- Des pertes de longueurs au niveau des extrémités des branches et des pousses (environ 20 cm),
- Des mauvaises liaisons entre les différents éléments (branches, pousses), causées par le bruit présent dans le nuage de points,
- Des petites pousses, ainsi que des pousses en dehors des têtes de chat, qui ne sont pas modélisées,
- Une représentation du tronc peu fidèle à la réalité.

Les travaux réalisés par Elena Bournez (INSA de Strasbourg) (Bournez et al., 2016), dans le cadre de son projet de fin d'études en 2015 ont permis de proposer des solutions à ces défauts. En parallèle à ces améliorations, l'arbre a aussi été considéré dans son état feuillu ; ainsi, la modélisation 3D de la couronne a été étudiée et un algorithme de calcul d'enveloppe 3D a été développé.

3.1.1.1 Modélisation du tronc

La modélisation du tronc de l'arbre est définie initialement par un cylindre. Cette primitive géométrique permet de disposer d'un résultat visuel et d'estimer l'épaisseur moyenne du tronc, chose qu'un squelette ne fournit pas. Nous avons décidé à ce stade d'utiliser quatre cylindres dont les paramètres sont obtenus par ajustement de la primitive géométrique au nuage de points, en respectant le principe des moindres carrés.

Cet ajustement de cylindres verticaux (Figure 3.5) sur les quatre parties du nuage de points qui forment le tronc permet d'affiner le calcul des longueurs de branches et de faciliter, du fait de la verticalité, le calcul d'intersection cylindre-squelette de branche.

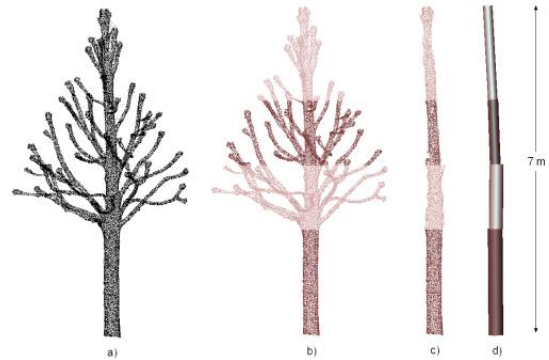


Figure 3.5 : Division du tronc en 4 parties, ajustées ensuite par des cylindres

3.1.1.2 Détection des branches manquantes

Un des premiers constats faits à partir des résultats de l'algorithme de squelettisation est que toutes les branches de l'arbre ne sont pas détectées. La raison provient du bruit présent dans le nuage de points qui, malgré le processus de réduction du bruit, persiste dans le nuage.

La première étape consiste à déterminer les points des branches non squelettisées, que nous qualifierons de points « non-utilisés », erreur d'omission de l'algorithme à ce stade. Pour les extraire, un calcul de distance entre chaque point du nuage de points et ceux du squelette intermédiaire est effectué. Pour ne garder que les points des branches manquantes, différents filtres de suppression sont appliqués. C'est ici que le choix d'utiliser quatre cylindres pour représenter le tronc joue un rôle important.

La dernière étape consiste à réaliser une squelettisation du nuage de points de chaque nouvelle branche, puis à raccorder les squelettes créés au squelette existant.

Avec l'ensemble des modifications apportées à l'algorithme ArbreSQUEL, que ce soit pour la modélisation du tronc ou la détection de toutes les branches, le modèle 3D final obtenu pour l'arbre « nu » est dorénavant plus fidèle à la réalité (Figure 3.6).



Figure 3.6 : Nuages de points et résultats fournis par ArbreSQUEL sur deux tilleuls argentés

Pour évaluer quantitativement l'apport des changements opérés dans l'algorithme ArbreSQUEL, une comparaison des résultats obtenus en termes de squelettisation, avant et après modification de l'algorithme, a été effectuée. Les tests réalisés sur les dix tilleuls argentés ont servi à cette analyse. Ainsi, 23% (soit environ 12 m) de longueur de branches ont été corrigés par arbre. Le pourcentage de branches détectées par l'algorithme dépend des branches prises en compte dans l'arbre. Si on les considère toutes, le nombre de branches détectées passe de 82% à 91%. Si l'on ne prend pas en compte les branches au sommet, par ailleurs difficilement identifiables, ce nombre passe de 90% à 98%.

Malgré ces résultats prometteurs, plusieurs pistes d'améliorations sont envisagées pour de futurs travaux sur l'algorithme de squelettisation d'arbres nus. Par exemple, pour que la reconstruction du tronc soit plus fidèle à la réalité, il faudrait préférer un maillage complet de celui-ci, comme suggéré dans Åkerblom et al. (2015). De plus, les étapes exigeant une intervention de l'opérateur méritent d'être étudiées dans une optique d'automatisation.

3.1.2 Développement d'un algorithme de reconstruction 3D de couronne foliaire : ArbreVOL

En parallèle au développement de la méthode de squelettisation de l'arbre nu, une solution de reconstruction 3D de la couronne de l'arbre feuillé a été proposée.

La représentation 3D de l'enveloppe de la couronne de l'arbre est utile en entrée du modèle LASER/F et à la connaissance du volume de la couronne foliaire. Trois méthodes de calcul aboutissant à un calcul de volume foliaire se profilent dans la littérature :

- Celles basées sur la détermination d'une enveloppe 3D de points (Hackenberg et al. 2014; Rahman et al. 2015),
- Celles basées sur un calcul de volume par sommes de tranches (Lee et al. 2008; Rosell Polo et al. 2009; Xu et al. 2013; Miranda-Fuentes et al. 2015),
- Celles basées sur le traitement de photographies terrestres (Miranda-Fuentes et al. 2015; Tumbo et al. 2002).

Suite à cette recherche bibliographique, nous avons choisi de calculer le volume de la couronne foliaire directement à partir du nuage de points, sans transformation en voxels, image ou en découpage en tranches. Il s'agit de déterminer l'enveloppe englobant les points du nuage composant la couronne de l'arbre. Toujours dans l'optique d'automatiser un maximum les opérations, nous nous sommes aussi inspirés des études qui déterminent la hauteur sous la base du houppier (Rahman et al. 2015), afin de séparer automatiquement le tronc de la canopée, quel que soit l'arbre étudié.

Les tilleuls argentés, taillés en tête de chat, présentent un volume intérieur à la canopée et qui semble vide de feuilles. Ainsi, pour déterminer le volume de feuilles portées par l'arbre, nous avons décidé de soustraire au volume de la canopée entière le volume sans feuilles.

L'algorithme ArbreVOL ainsi développé permet, à partir de deux nuages de points d'un même arbre (nu et feuillu) :

- la délimitation de la couronne entière,
- la délimitation de la partie vide de feuilles,
- le calcul des volumes formés par ces deux données en entrée, pour en déduire le volume comprenant la majorité des feuilles.

Cette méthodologie a l'avantage d'être entièrement automatique et s'inscrit dans la continuité de l'algorithme ArbreSQUEL.

Pour déterminer l'enveloppe de la partie vide de feuilles, les points du squelette des extrémités des branches reculés de 30 cm en direction du tronc ont été utilisés. Ensuite, l'enveloppe convexe de

ces points a été déterminée à l'aide de l'outil Convex-Hull (Matlab). La Figure 3.7 (a) présente l'enveloppe de la canopée entière en rouge et la Figure 3.7 (b) l'enveloppe vide de feuilles (gris clair). Cet algorithme permet de déterminer automatiquement le volume recherché, à condition de disposer du nuage de points de l'arbre feuillu et du nuage de points de l'arbre nu.

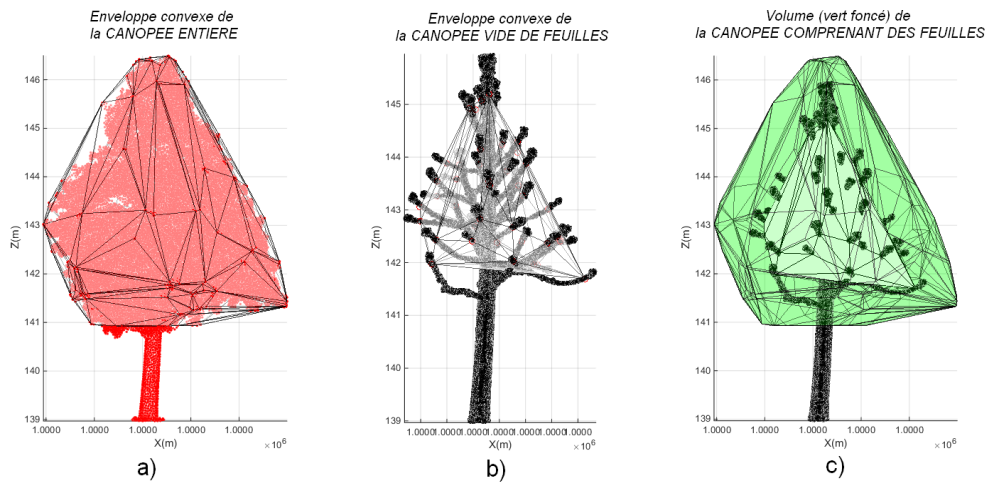


Figure 3.7 : Représentation des enveloppes déterminées par ArbreVOL : (a) de la canopée entière, (b) de la partie vide de feuilles et (c) du volume comprenant les feuilles

Après application d'ArbreVOL sur 10 tilleuls argentés, il ressort que le volume de la canopée contenant des feuilles représente en moyenne 76 % du volume de la canopée entière. Ainsi, par arbre, il y a 24 % d'espace vide de feuilles, c'est pourquoi il est nécessaire de soustraire ce volume non négligeable. De plus, ces résultats nous permettent d'affirmer que début juin, les arbres ont un volume de canopée entière compris entre 45 m³ et 60 m³, respectivement pour les tilleuls argentés numéro 3 et 7. Cette fourchette provient de la différence de géométrie d'un arbre à l'autre visible dans la Figure 3.8.

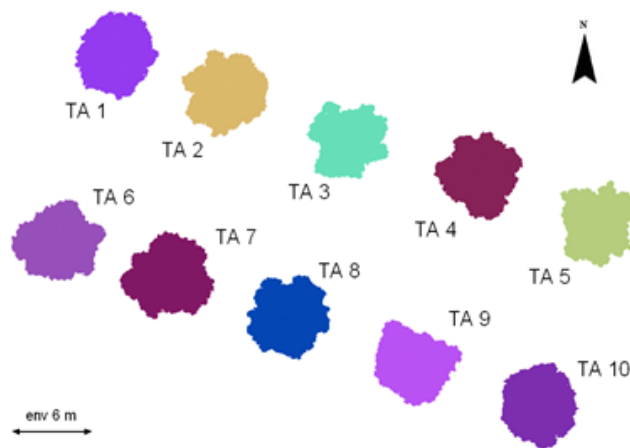


Figure 3.8 : Surface projetée au sol de la couronne foliaire des dix tilleuls argentés étudiés

L'algorithme actuel semble fournir des résultats cohérents, mais pour les valider, il serait utile de disposer des volumes vrais.

En conclusion, les solutions développées au cours de ce projet répondent aux demandes de TRIO et de l'INRA. L'enveloppe de la canopée des arbres pourra être introduite dans le modèle LASER/F. La reconstruction de la structure des arbres, par des cylindres, pour les troncs, et par des squelettes, pour les branches, pourra être introduite dans RATP.

3.2 Comparaison LASER/F & température caméra IRT

LASER/F a déjà été validé pour les échanges radiatifs (Kastendeuch et al. 2009). Cette validation reste cependant partielle et l'on souhaite prouver la capacité de ce modèle à simuler les autres types de flux. C'est pourquoi au cours de l'été 2015, une opération a été menée dans le jardin du Palais Universitaire pour tenter de comparer les températures de surface simulées par LASER/F (sur la façade du bâtiment) et celles acquises par la caméra infrarouge FLIR SC655. La série temporelle d'images IRT collectée dans le jardin à l'aide de la caméra (cf. § 2.2) a été utilisée afin de valider les estimations de températures de surface de la façade, ainsi que leur cinétique journalière, fournies par LASER/F. En parallèle, une étude complémentaire a été effectuée afin d'évaluer la sensibilité de LASER/F à la complexité du modèle de surface utilisé lors des calculs.

Les simulations LASER/F ont été forcées à l'aide des données collectées par les instruments installés dans le jardin et aux alentours (Najjar et al. 2015). En ce qui concerne l'irradiance solaire, le ratio entre direct et diffus a été estimé à partir de données MODIS (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) selon la méthode présentée dans Roupioz (2015). Les simulations ont été effectuées à un pas de temps de 15 minutes et les températures de surface ont été fournies au pas horaire. Pour ses calculs, LASER/F utilise un modèle géométrique 3D de la zone urbaine considérée, fragmenté de façon plus ou moins fine. Afin d'effectuer un maximum de simulations pour le test de sensibilité, une fragmentation en facettes de 15 m² a été choisie et la fonction de radiosité, permettant le calcul plus précis de l'énergie reçue par les éléments environnants, a été désactivée. Dans notre cas, des tests ont montré que, pour une zone homogène, utiliser cette configuration entraînait une différence de moins de 0.15°C pour l'estimation de la température de surface par rapport à une fragmentation en facettes de 1 m² incluant le calcul de radiosité précis.

3.2.1 Test de sensibilité

Pour le calcul de la température de surface, LASER/F utilise la formule suivante (Kastendeuch 2015) :

$$Ts^\tau = \left(\frac{k}{\Delta x} T_1^\tau + Rn^\tau + Le^\tau + S^\tau + \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x}{2\Delta\tau} Ts^{\tau-1} \right) / \left(\frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x}{2\Delta\tau} + \frac{k}{\Delta x} \right)$$

- Ts^τ : température de surface pour un pas de temps donné τ en K
 k, ρ, c : conductivité thermique, masse volumique et chaleur spécifique du matériau en W/mK, kg/m³, J/kgK respectivement
 T_1 : température au milieu de la couche externe du mur en K
 Δx : demi-épaisseur de la couche externe du mur en m
 Rn, Le, S : bilan radiatif, flux de chaleur latente et sensible en W/m²

Afin de comprendre comment les différents termes de cette équation influencent le calcul des températures de surface, nous avons d'abord cherché à déterminer le rôle des matériaux à travers trois aspects :

- l'émissivité et l'albédo du matériau, intervenant *via* le bilan radiatif
- les propriétés thermiques du matériau, soit la conductivité thermique et la masse volumique (la masse volumique et la chaleur spécifique variant de pair)
- le nombre et l'épaisseur des couches constituant la façade

Le modèle géométrique et les valeurs présentes dans la base de données de matériaux fournis avec le modèle ont été utilisés comme référence. La façade de référence est composée, de l'extérieur vers l'intérieur, de 3 couches : une couche de crépi de 5 cm et deux couches de béton de 12 cm, soit une épaisseur totale de 29 cm. L'émissivité, l'albédo et les propriétés thermiques sont identiques pour le crépi et le béton et fixés à 0.9 pour l'émissivité, 0.37 pour l'albédo et 0.7, 1000 et 2800 pour la

conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique respectivement.

Nous avons tout d'abord fait varier l'émissivité entre 0.85 et 0.95, ce qui, comparé aux températures de surface obtenues avec les valeurs de référence, a conduit à une variation maximale observée de 0.14°C. L'émissivité ne joue donc pas un rôle très important dans la simulation de la température de surface. Au contraire les variations de l'albédo ont entraîné des différences significatives dans le calcul des températures de surface (Figure 3.9). Les températures simulées avec un albédo de 0.1 peuvent être jusqu'à 5.3°C supérieures aux valeurs obtenues avec un albédo de 0.4 aux heures de la journée où l'éclairement solaire est le plus fort. En effet, l'albédo étant le paramètre contrôlant la quantité d'énergie solaire réfléchi par la façade, une valeur faible signifie qu'il y a peu de réflexion et plus d'absorption, ce qui entraîne un réchauffement de la surface.

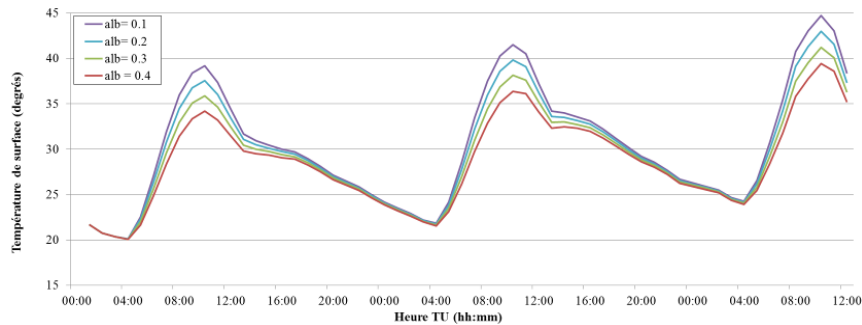


Figure 3.9 : Série temporelle de températures de surface simulées avec LASER/F pour différentes valeurs d'albédo

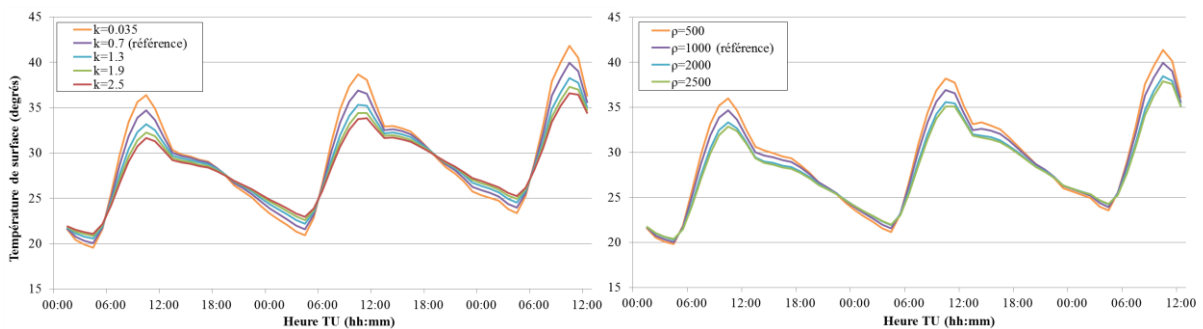


Figure 3.10 : Série temporelle de températures de surface simulées avec LASER/F pour différentes conductivités thermiques (gauche) et différentes masses volumiques (droite)

En ce qui concerne les propriétés thermiques, des modifications de la conductivité et de la masse volumique ont conduit à des variations significatives de la température de surface. Pour une conductivité thermique variant entre 0.035 et 2.5, on observe des différences de plus de 5°C (Figure 3.10, gauche). Les plus gros écarts sont observés aux périodes les plus chaudes et les plus froides de la journée. En examinant la pente de refroidissement, on constate que la conductivité influence également l'inertie thermique de la façade. La même tendance est observée avec les variations de la masse volumique, cependant l'impact pour les périodes froides et l'inertie thermique est moins important (Figure 3.10, droite).

L'analyse visant à étudier l'impact du nombre et de l'épaisseur des couches constituant la façade s'est avérée très complexe car elle met en jeu de nombreux facteurs interagissant entre eux. Au nombre et à l'épaisseur des couches s'ajoute l'épaisseur totale du mur et l'ordre des couches. Il est donc difficile de tester de façon exhaustive tous les cas de figure. Cependant certaines tendances se dégagent de cette analyse montrant que, pour chacune des configurations testées, la valeur moyenne et minimum des températures varie très peu, jamais plus de 0.5°C. Les différences observées sont surtout

localisées au niveau des maxima atteints. Nous constatons également que l'épaisseur de la couche externe a une influence plus importante que celle des autres couches, surtout si elle est épaisse (>5cm). Dans le cas d'une couche externe épaisse, l'épaisseur totale du mur et le nombre de couches a très peu, voire aucune, influence sur le calcul de la température de surface. Si l'épaisseur de la couche externe est supérieure à 10 cm, l'influence du nombre de couches n'a pas pu être mise en évidence. Nous remarquons également qu'une couche externe fine entraîne des maxima de température de surface moins élevés, mais ce constat reste à approfondir.

3.2.2 Validation de l'estimation de la température de surface

Au vu de l'analyse de sensibilité présentée ci-dessus, il est évident qu'une définition correcte et précise des propriétés des murs du bâtiment étudié est un prérequis nécessaire à la simulation de leur température de surface. Deux séries temporelles de températures de surface simulées par LASER/F ont été comparées aux températures de brillance collectées lors de la campagne de mesures (Figure 3.11). Il est important de rappeler que les températures de brillance sont, par essence, légèrement inférieures aux températures de surface réelles. La première série temporelle est simulée en utilisant les propriétés des matériaux telles que définies dans la base de données de LASER/F (cf. §3.2.1) et la deuxième en utilisant des paramètres plus adaptés aux caractéristiques de la façade du bâtiment. Cette dernière a été divisée en 5 couches de grès rose de 10 cm chacune. L'albédo a été fixé à 0.2 et la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique à 1.3, 2000 et 710 respectivement. Cette comparaison a mis en évidence que la définition des paramètres par défaut dans la base de données de LASER/F ne correspond pas à notre cas de figure et confirme qu'il est essentiel de définir correctement les propriétés du bâtiment afin d'obtenir des résultats corrects. La cinétique journalière de la température de la façade est bien respectée mais, malgré les améliorations apportées par les nouvelles propriétés de la façade, les maxima de température de la première et deuxième journée simulés sont toujours en deçà de la réalité. En plus de la difficulté à définir exactement les propriétés de la façade, s'ajoutent différentes erreurs possibles. Une mauvaise estimation du flux de chaleur sensible pourrait conduire à une sous-estimation de la température de surface. Comme la répartition du rayonnement solaire global entre direct et diffus a été estimée par un algorithme, il est possible que le rayonnement solaire direct soit sous-estimé, ce qui limite le réchauffement de la façade. Des erreurs peuvent également provenir de la modélisation géométrique de la façade qui est réduite à une simple surface plane, alors que la façade réelle contient des corniches, des colonnes et d'autres éléments structurels pouvant conduire à des réflexions thermiques en direction de celle-ci.

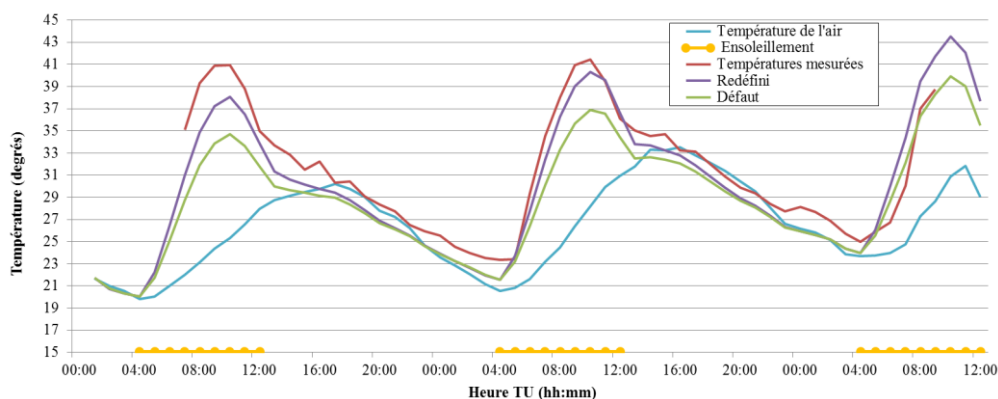


Figure 3.11 : Série temporelle de températures de surface simulées avec LASER/F en utilisant les propriétés par défaut et les propriétés redéfinies comparées aux températures de brillances mesurées et à la température de l'air (pointillés). Les périodes d'ensoleillement de la façade sont également indiquées sur l'axe des abscisses

3.3 Evaluation de données acquises par système de cartographie mobile

Les acquisitions effectuées à partir de la plateforme mobile avec le système LiDAR-caméra thermique ont fourni un jeu de données unique constitué d'un nuage de points colorisé avec la température de brillance ainsi que les images thermiques correspondantes apportant une information importante sur l'environnement direct du jardin.

3.3.1 Inter-calibration des caméras

Les données thermiques collectées par la caméra du système de cartographie mobile ont été enregistrées sous forme de vidéos dont une séquence d'images a été extraite. Afin d'évaluer la qualité de ces données, nous avons acquis des images à l'aide de notre FLIR SC655 simultanément au premier passage du véhicule dans le jardin (14 juillet à 15h). La comparaison entre les images IRT collectées par le système mobile et par notre caméra a mis en évidence des différences pouvant être assez élevées (4°C) (Figure 3.12). Pour cette comparaison, deux zones ont été sélectionnées, une sur la façade du Palais Universitaire et une dans le feuillage du 1^{er} tilleul argenté bordant l'allée sur la droite. Bien que l'angle d'observation et la résolution du fait de la distance soient différents entre les deux instruments, les histogrammes présentés dans la Figure 3.12, montrent clairement une répartition identique des pixels à l'intérieur des zones sélectionnées mais une valeur moyenne sur la façade de 311 K pour VIGO et 307 K pour la FLIR et de 303 K pour VIGO et 299 K pour la FLIR dans le feuillage.

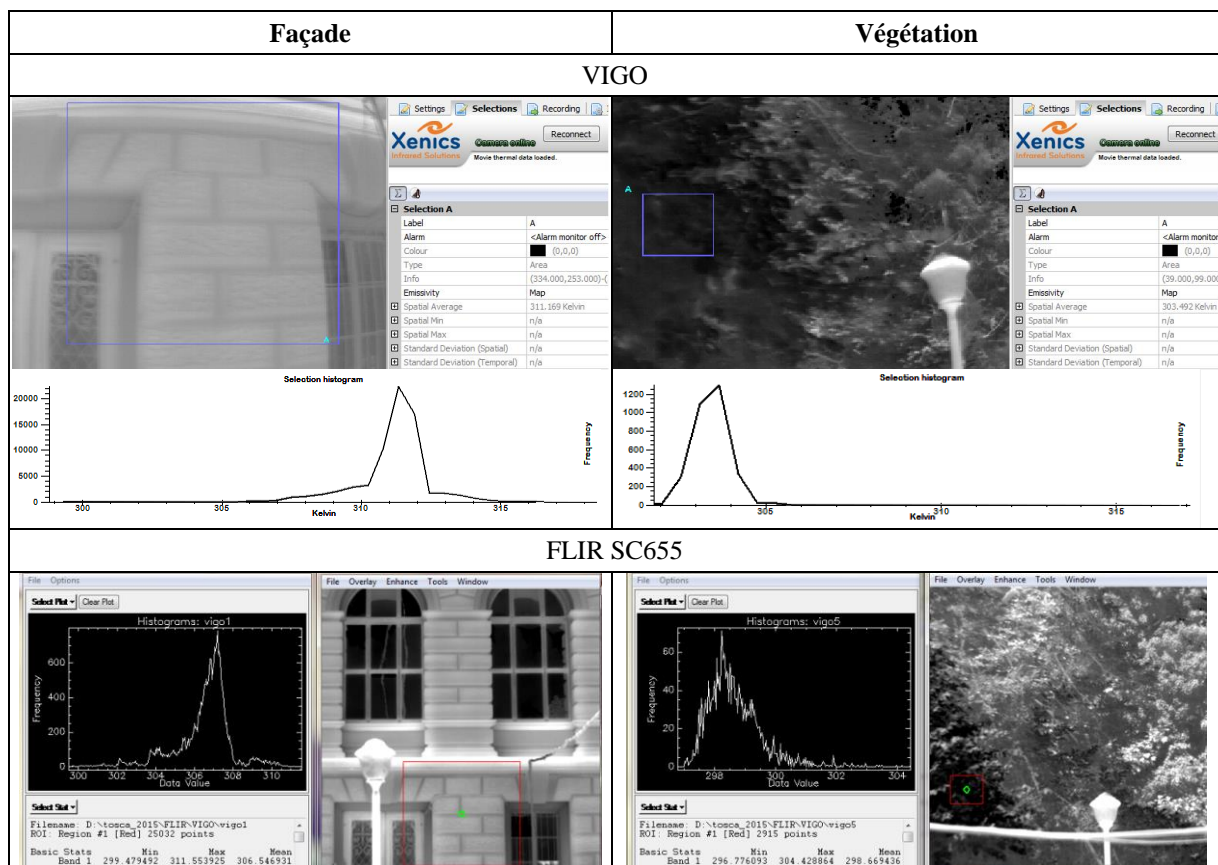


Figure 3.12 : Comparaison pour un élément de façade et un élément de végétation des températures de brillance acquises simultanément par VIGO et la FLIR SC655 le 14 juillet 2015 à 15h (heure locale)

La similarité des paramètres de mesure définis pour chacune des deux caméras ayant été confirmée, la comparaison a été approfondie avec des images issues de la série temporelle collectée pour la validation de LASER/F (§ 3.2). Au préalable, nous avons confronté notre caméra thermique à nos deux corps noirs (Mikron, Land) et ces tests n'ont montré aucune divergence de notre

caméra (Figure 3.13). Pour la plage de températures correspondant aux valeurs observées dans les images de la série temporelle, l'écart moyen le plus large est de 0.8°C pour les températures avoisinant les 55°C, ce qui correspond à la précision de la caméra. Comme illustré dans la Figure 3.13, il y a une excellente corrélation entre les mesures de la FLIR et la température du corps noir. Nous considérons donc notre caméra comme bien calibrée.

CN	Tp min	Tp max	Tp moyenne	Différence
15	14.8	15.4	15.1	0.1
20	19.6	20.3	20	0
25	25	25.6	25.3	0.3
30	30	30.5	30.2	0.2
35	35.2	35.6	35.4	0.4
40	40.3	40.8	40.5	0.4
45	45.3	45.8	45.6	0.5
50	50.5	51	50.7	0.6
55	55.7	56.2	56	0.8

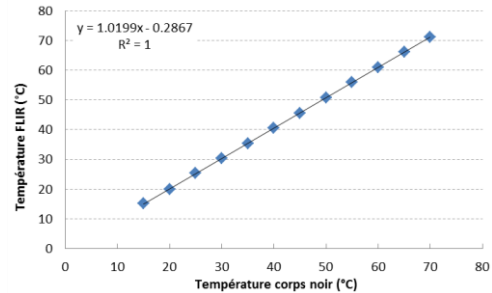


Figure 3.13 : Vérification des températures mesurées par la FLIR SC655 à l'aide d'un corps noir (CN)

Au vu de ces résultats, nous avons décidé de recalibrer les valeurs de températures fournies par la caméra de VIGO à l'aide des images collectées simultanément par la FLIR SC655. Nous disposons de 4 passages différents du véhicule de VIGO qui correspondent à nos acquisitions FLIR: le 15 juillet à 15h et 20h ainsi que le 16 juillet à 0h et 6h. Pour effectuer l'intercalibration, 15 zones communes aux deux instruments ont été identifiées sur les images collectées et comparées (Figure 3.14). Afin d'éviter les erreurs liées à l'hétérogénéité spatiale entre les pixels, les zones sélectionnées ne devaient pas contenir moins de 20 pixels. Pour chaque zone la moyenne et l'écart-type ont été calculés. La Figure 3.14 présente la régression effectuée entre les données VIGO et FLIR pour 4 configurations: (i) une régression linéaire intégrant toutes les zones (Figure 3.14 a), (ii) une régression linéaire ne considérant que les zones de la façade (Figure 3.14 b), (iii) une régression polynomiale d'ordre 3 intégrant toutes les zones (Figure 3.14 c) et (iv) une régression polynomiale d'ordre 3 ne considérant que les zones prises sur la façade (Figure 3.14d).

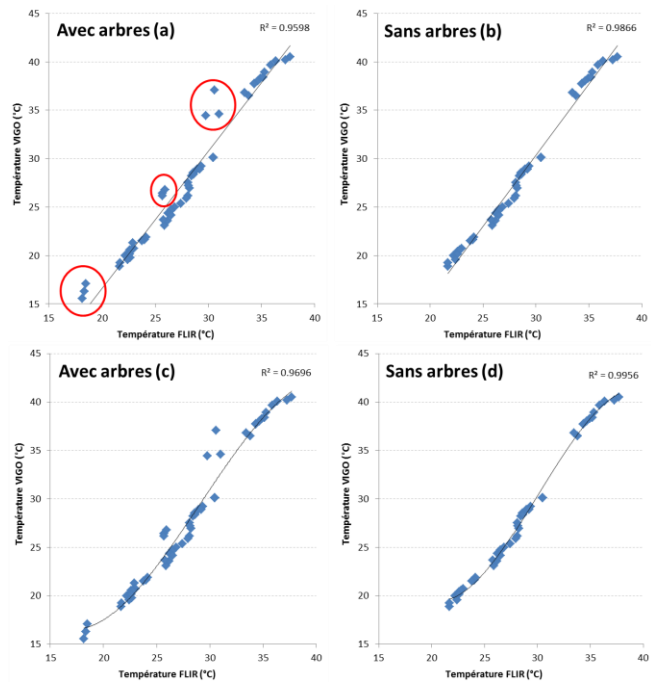


Figure 3.14 : Résultats de 4 régressions entre les températures de brillance acquises par VIGO et la FLIR SC655 pour 4 configurations: régression linéaire intégrant toutes les zones (a) et ne considérant que les zones sur la façade (b), régression polynomiale d'ordre 3 intégrant toutes les zones (c) et ne considérant que les zones prises sur la façade (d). Les zones utilisées pour les régressions sont indiquées sur la photo à gauche

Sur les graphiques de la Figure 3.14, il est possible d'identifier des groupes formés de trois points qui se détachent de la tendance principale (entourés en rouge). Ces points correspondent aux zones sélectionnées sur le feuillage des arbres, (point 11, 12 et 13 de la Figure 3.14). Contrairement à la façade, la végétation est composée d'éléments, les feuilles, dont l'orientation est variable et la comparaison entre les mesures VIGO prises du bas vers le haut et les mesures FLIR acquises depuis le dessus est plus complexe. C'est pourquoi nous avons également calculé les facteurs d'intercalibration sans intégrer ses zones dans la régression. Les facteurs de régression obtenus pour les configurations 1, 2 et 4 (correspondant aux graphes de la Figure 3.14 (a), (b) et (d)) ont été évalués en simulant à partir des données VIGO, les données FLIR correspondantes. Les données FLIR simulées ont ensuite été soustraites aux données FLIR mesurées. Les résultats obtenus sont récapitulés dans la Table 3.3.1.

Table 3.3.1 : Validation de l'inter-calibration

	Estimation avec arbres et régression linéaire (°C)	Estimation sans arbre et régression linéaire (°C)	Estimation sans arbre et régression polynomiale d'ordre 3 (°C)
Total			
Min	-3.88	-3.99	-3.36
Max	1.40	1.00	2.11
Mean	0.00	-0.36	-0.18
Ecart-type	1.01	0.97	0.69
Façade			
Min	-0.86	-0.99	-0.40
Max	1.40	1.00	0.71
Mean	0.35	0.00	0.00
Ecart-type	0.35	0.3	0.1
Arbres			
Min	-3.88	-3.99	-3.36
Max	0.42	-0.13	2.11
Mean	-1.38	-1.81	-0.91
Ecart-type	1.33	1.08	2.53

La validation réalisée sur l'ensemble des zones montre que la calibration fournie par les facteurs issus de la régression polynomiale d'ordre 3 n'intégrant pas les arbres donnent les meilleurs résultats avec une différence moyenne de -0.18°C et un écart-type de 0.69°C . Cette observation est la même lorsque que l'on effectue la validation sur les façades uniquement avec des résultats encore meilleurs (différence moyenne de 0°C et écart-type de 0.1°C). Par contre, si l'on ne considère que la végétation, les résultats sont moins bons pour toutes les méthodes de régression. Ceci est dû aux difficultés citées précédemment.

Les paramètres issus de la régression polynomiale d'ordre 3 n'intégrant pas les arbres seront donc retenus pour la recalibration des données acquises par VIGO.

3.3.2 Evaluation des données lasergrammétriques acquises par l'université de VIGO

Les acquisitions lasergrammétriques de l'université de VIGO nous ont fourni un total de 49 nuages de points, 50 thermo-nuages (points du nuage, colorisés suivant les images thermiques) ainsi que 2 nuages test acquis le long du Boulevard de la Victoire le 16 juillet. Le champ de vision de la caméra IRT étant réduit, les toits et le bas des bâtiments ne sont pas représentés dans les thermo-nuages, de même que les troncs des arbres, sortis du champ de vision vu que la caméra est positionnée sur le toit du véhicule. C'est pourquoi ces données ne seront pas analysées pour le moment. En revanche, les données lasergrammétriques ont été évaluées du point de vue de leur qualité géométrique.

L'étude menée pour évaluer la qualité des nuages VIGO, a été réalisée dans le cadre d'un projet

de recherche technologique, mené par des étudiants de l'INSA de Strasbourg. La qualité des nuages de points a été évaluée du point de vue de la précision de mesure ou précision interne, de la précision absolue et de sa précision géométrique.

L'évaluation de la qualité de données acquises par le système de VIGO se réalise en comparant ces données à des données de référence. Le mot "référence" signifie ici qu'elles ont été acquises avec des techniques plus précises. Le scanner laser mobile est un instrument moins précis que le scanner laser terrestre. Par conséquent le nuage de référence choisi est un nuage acquis par scanner laser terrestre par le groupe PAGE de l'INSA de Strasbourg. Ce nuage de 87 millions de points ne concerne que le jardin de l'Université. Notre étude est donc restreinte aux nuages de points correspondant aux zones intitulées « Jardin Horaire », « Jardin Anti-Horaire » et « Rue Goethe », acquis le 15 Juillet 2015 à 15h que nous avons consolidés au préalable.

Les nuages acquis par l'université de VIGO ayant tous été acquis et traités avec les mêmes procédés, nous faisons l'hypothèse que les résultats de l'évaluation obtenus sur ce nuage de point test seront comparables à ceux que l'on obtiendrait sur les autres nuages VIGO.

Le nuage servant de référence et obtenu par traitement de données acquises par scanner laser terrestre est composé de plus de 500 millions de points (Figure 3.15). Il a été rééchantillonné aléatoirement pour ne garder que 103 300 000 points, et faciliter les traitements sous les logiciels par la suite.

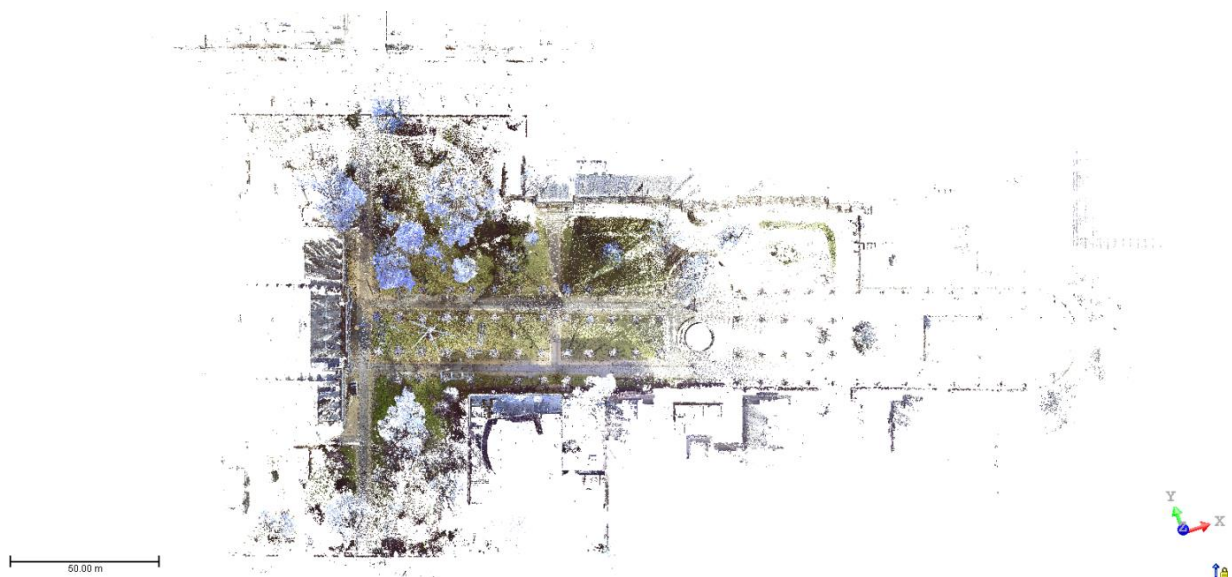


Figure 3.15 : Nuage de référence, acquis au scanner laser terrestre, servant à évaluer la qualité géométrique des données acquises par le système de VIGO

La Figure 3.16 présente la méthodologie adoptée pour réaliser les différentes évaluations.

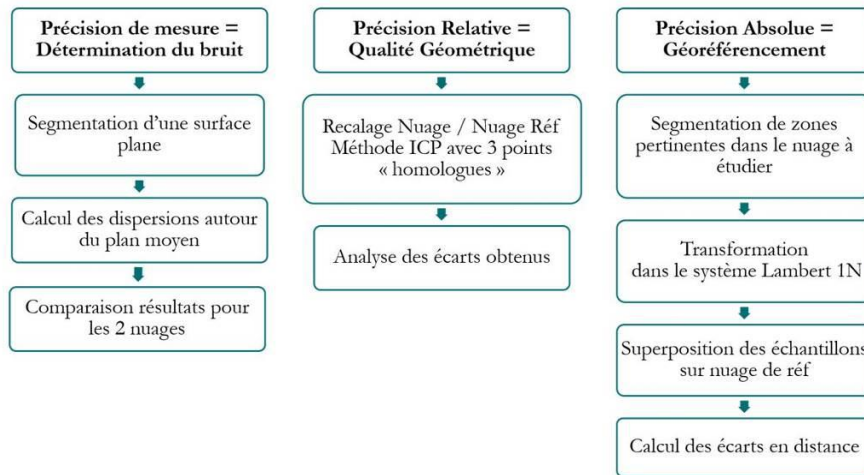


Figure 3.16 : Méthodologie adoptée pour réaliser les différentes évaluations du nuage de points

Les premières analyses ont mis en évidence un bruit systématique dans tous les nuages de points acquis par VIGO. Le bruit apparaît dans chacun des nuages mais moins intensément que sur le nuage fusionné. On constate que ce bruit se situe à environ 60 cm du sol. On constate également que le bruit suit la trace du véhicule dans les lignes droites comme dans les virages. Au vu de la géométrie d'acquisition du scanner laser embarqué sur le véhicule (2 vues obliques qui scannent de chaque côté du véhicule), on peut émettre l'hypothèse que le bruit « inexplicable » vient de la prise de quelques points sur le véhicule lui-même (Figure 3.17).

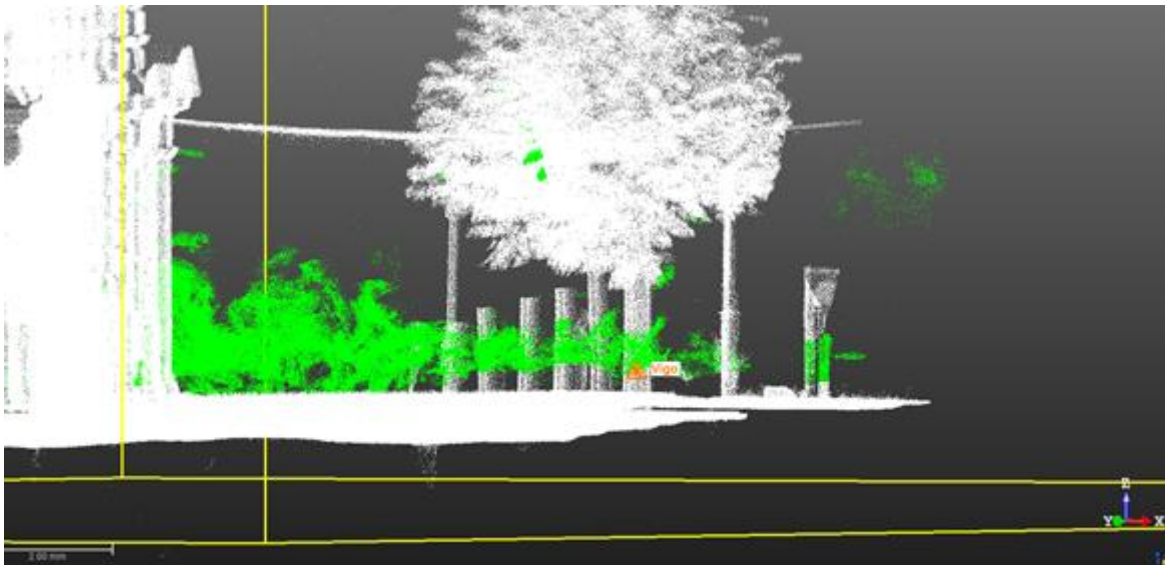


Figure 3.17 : Artefacts constatés (en vert) au sein des nuages de points (en blanc) acquis par l'université de Vigo

La précision de mesure du nuage de référence étant de 7 mm, la zone étudiée peut être prise comme témoin. La précision interne du nuage VIGO se situe aux environs de 3 cm, ce qui est tout à fait acceptable vu qu'il s'agit d'un système d'acquisition mobile.

Concernant la précision absolue, on obtient une exactitude de 5 cm après avoir supprimé les échantillons erronés sans quoi l'exactitude s'élève à 14 cm. L'un des échantillons considéré a une précision record de 1,2 cm. L'exactitude dépend de la densité des données. Il faut également prendre en compte la végétation qui diffère suivant les saisons et qui perturbe les données (masques et bruit).

Finalement, cette étude de précision nous permet de valider le caractère exploitable des données fournies par VIGO. Bien qu'un important travail de suppression de points aberrants soit requis, les données sont de qualité satisfaisante pour la suite des opérations.

3.4 Modélisations RATP

Le modèle RATP est utilisé pour simuler la distribution spatiale de la transpiration et de la photosynthèse au sein de la couronne foliaire d'un arbre. Contrairement au modèle LASER/F qui permet d'effectuer des simulations à l'échelle de la rue voir même du quartier, RATP permet d'avoir des simulations à l'échelle de l'arbre mais de manière plus détaillées. Dans le cadre de ce projet, RATP est en cours de validation sur un des six tilleuls argentés présents dans le jardin du Palais Universitaire. Le choix de tester le modèle sur cet arbre s'est fait par la présence de nombreuses mesures complémentaires autour de celui-ci et à l'intérieur de sa couronne, qui pourront permettre de valider les différents résultats en sortie du modèle.

En vue d'appliquer ce modèle sur un arbre et d'obtenir des simulations fiables, il est nécessaire de disposer de différents paramètres liés à celui-ci et à ses alentours. Ces paramètres sont extraits à partir de nombreuses mesures effectuées sur le terrain avec différents capteurs. Le couplage de la reconstruction 3D détaillée des pousses de l'arbre obtenue à partir des données LiDAR, décrite précédemment (cf. §3.1), et de relations allométriques entre la position des feuilles et la longueur des pousses permet de reconstruire le feuillage de l'arbre (Figure 3.18). Celui-ci va être disposé dans une grille de voxels d'une certaine résolution. C'est à partir de ces voxels, de données climatiques et de données physiologiques de l'arbre que les calculs de RATP vont être effectués. Un atout de ce modèle est la possibilité de visualiser non seulement les résultats obtenus selon des courbes, mais aussi de manière spatialisé sur la maquette 3D de voxels de l'arbre étudié.

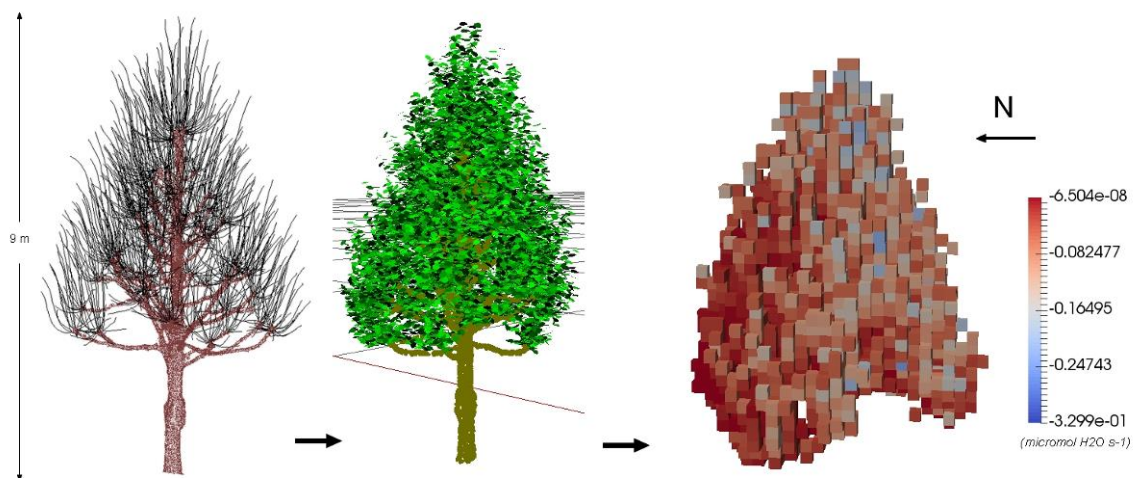


Figure 3.18 : Reconstruction 3D des pousses, reconstruction 3D du feuillage de l'arbre et spatialisation des résultats de transpiration de l'arbre selon les voxels

La validation de l'estimation de la transpiration fournie par RATP sur l'arbre étudié se fait par la comparaison de la transpiration obtenue avec les capteurs de flux de sève, décrit précédemment (cf. §2.4.1). L'analyse est effectuée sur la période de juin 2014 à fin septembre 2014. Les premiers résultats obtenus sont prometteurs (Figure 3.19) avec une même tendance journalière de transpiration de l'arbre. Une paramétrisation plus fine des données en entrée de RATP va être effectuée, ce qui permettra une meilleure validation du modèle sur la transpiration estimée. De plus, grâce aux différentes mesures effectuées sur le terrain, une validation plus détaillée du modèle, par exemple au niveau de la température des feuilles, pourra être effectuée.

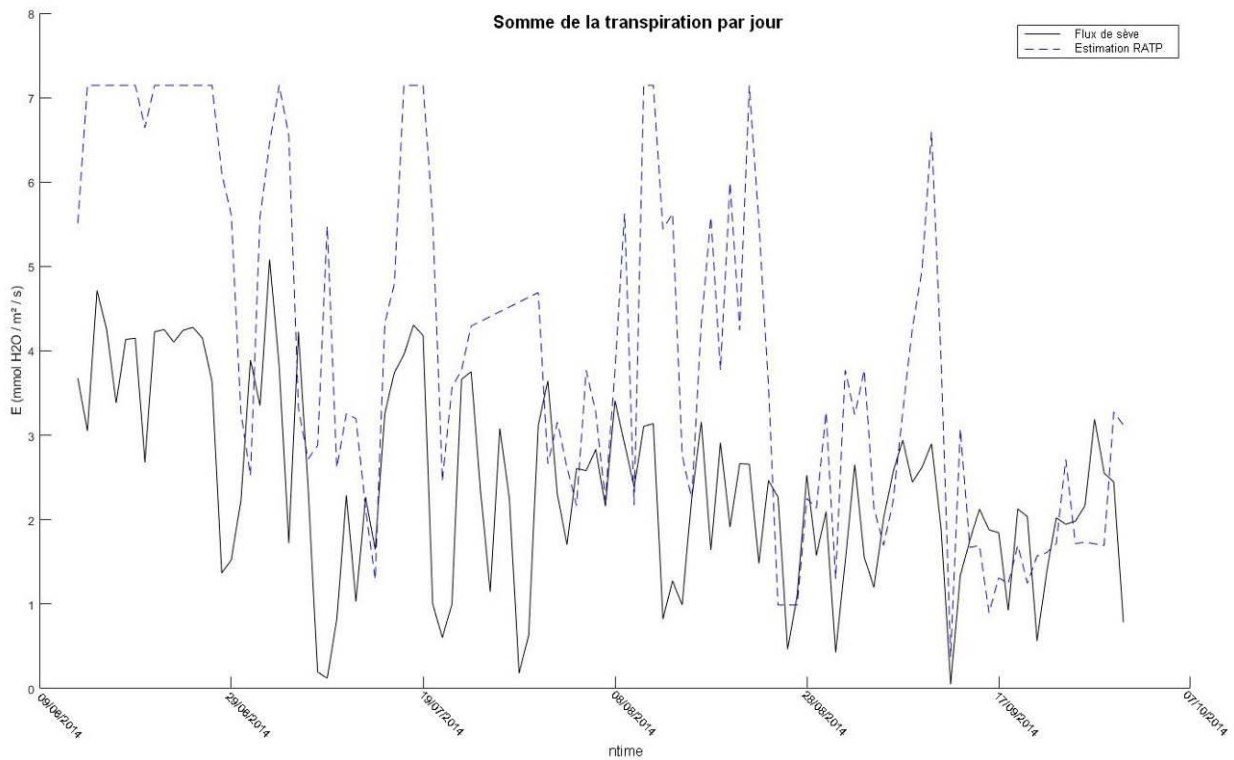


Figure 3.19 : Comparaison de la transpiration obtenue avec RATP (ligne pointillée) et celle obtenue avec les capteurs de flux de sève (ligne continue) sur plusieurs journées

Ainsi, une fois ce modèle validé, il permettra d'effectuer des comparaisons à l'échelle de l'arbre avec les résultats du modèle LASER/F.

3.5 Modélisations Meso-NH

Nous avons utilisé le modèle atmosphérique méso-échelle Meso-NH (*cf.* §2.4) pour simuler la réponse de l'ensemble de l'agglomération de Strasbourg à différents types de contraintes météorologiques et pour différents états de surface. Ces simulations à haute résolution (Figure 3.20) ont été réalisées sur deux séquences temporelles différentes : celle de juin 2014 a été choisie en raison de l'extrême sécheresse du sol après une longue période à déficit pluviométrique; celle de juillet 2014 fait suite à un important apport d'eau qui a permis la recharge de la réserve utile des sols. L'objectif de ces simulations est double: d'une part valider le schéma de surface de ce modèle sur ces deux périodes; et d'autre part d'analyser la répartition des flux dans des conditions hydriques différentes. Ces simulations confirment déjà certains résultats obtenus précédemment par Kastendeuch et al. (2010). Cependant, les nouvelles simulations montrent que la ville sait répondre rapidement à l'évolution des conditions météo et une énorme différence en ce qui concerne la répartition des flux apparaît dans les flux de surface. Les figures suivantes illustrent quelques résultats préliminaires obtenus pour ces deux simulations (Figure 3.20, Figure 3.21, Figure 3.22, Figure 3.23).

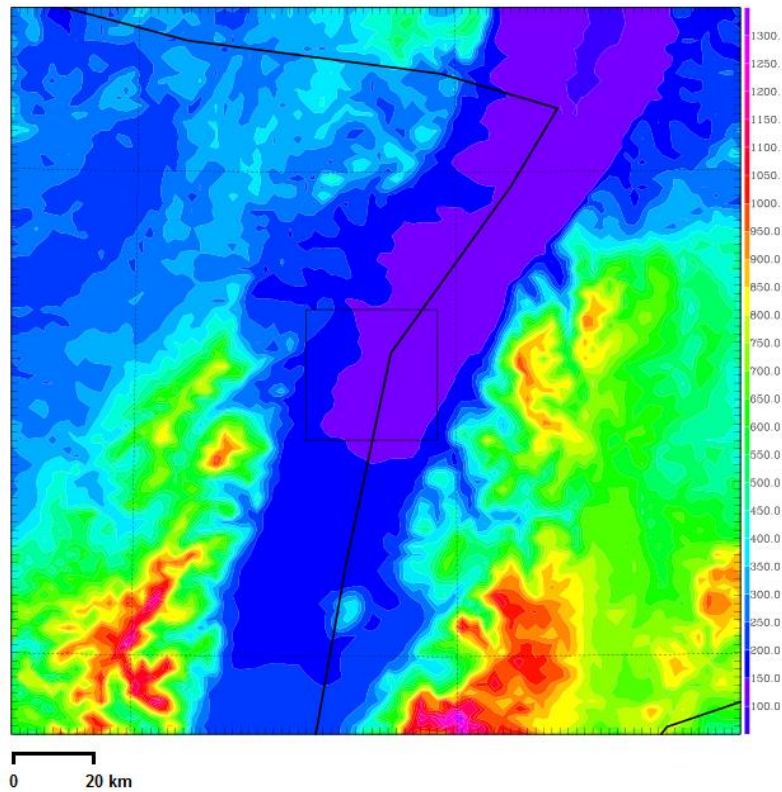


Figure 3.20 : La simulation est réalisée en échelles emboîtées centrées sur la place Kléber pour deux domaines : un premier domaine à 2 km de résolution et 180 km de côté, et un second (rectangle noir) à 250 m de résolution pour 32,5 km de côté. La rampe de couleurs correspond à la topographie en mètre

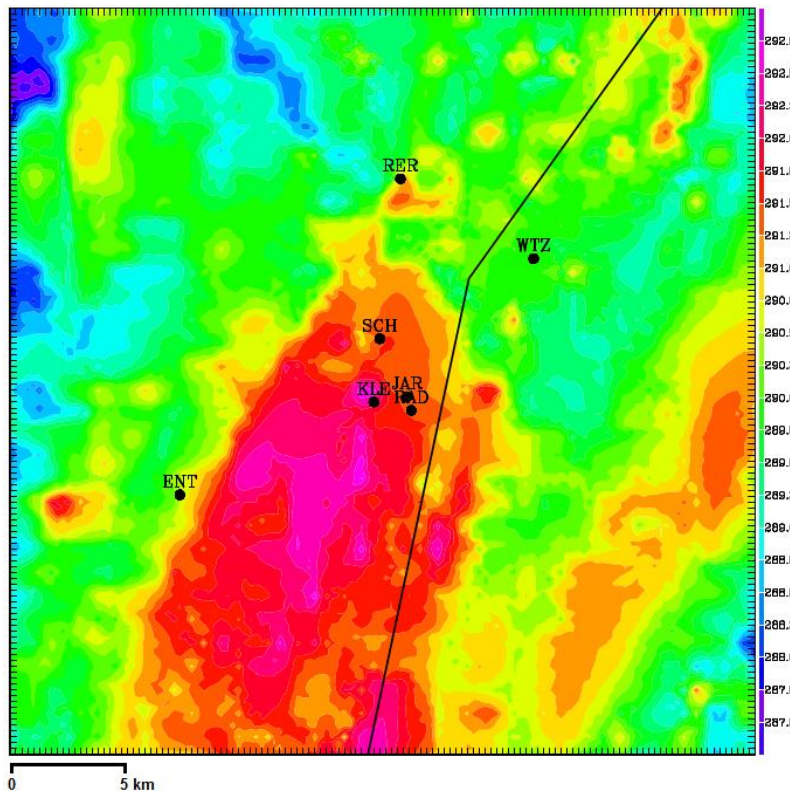


Figure 3.21 : Exemple de distribution de la température de l'air à 2 mètres (en Kelvin) sur l'ensemble du second domaine (Figure 3.20). Le panache de chaleur de l'agglomération est nettement visible, et affecte la station de référence "rurale", notée ENTZ ici. Le centre-ville correspond au point localisé sous l'étiquette KLE

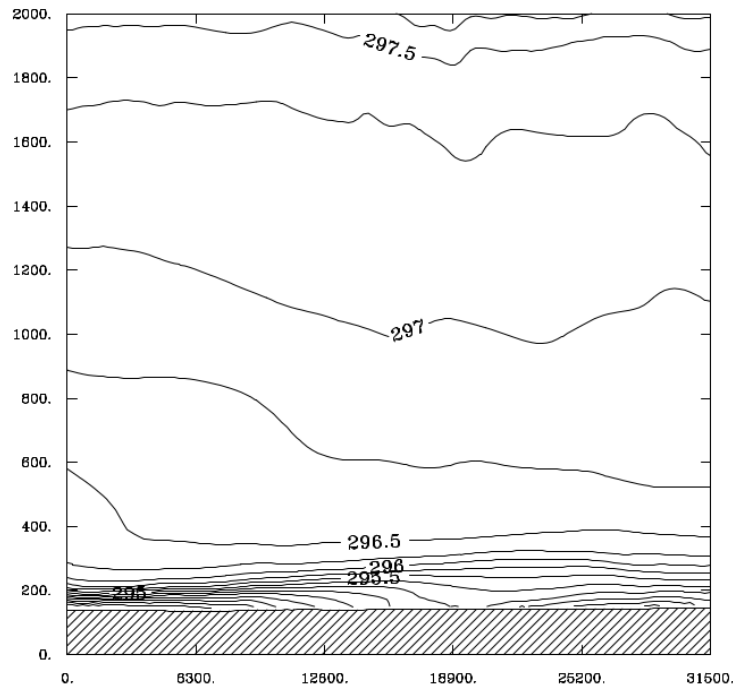


Figure 3.22 : Profil vertical de la température potentielle (en K) représentée en isothermes, sur un transect nord (gauche) - sud (droite) passant par le centre-ville, obtenu à partir des données simulées pour le domaine à 250 mètres. L'effet de réchauffement des basses couches par la surface à mi-distance du transect (centre-ville) ainsi que la propagation de la plume à l'aval de l'écoulement (vers le sud, droite de la figure) est nettement visible. L'altitude en ordonnée est exprimée en mètres

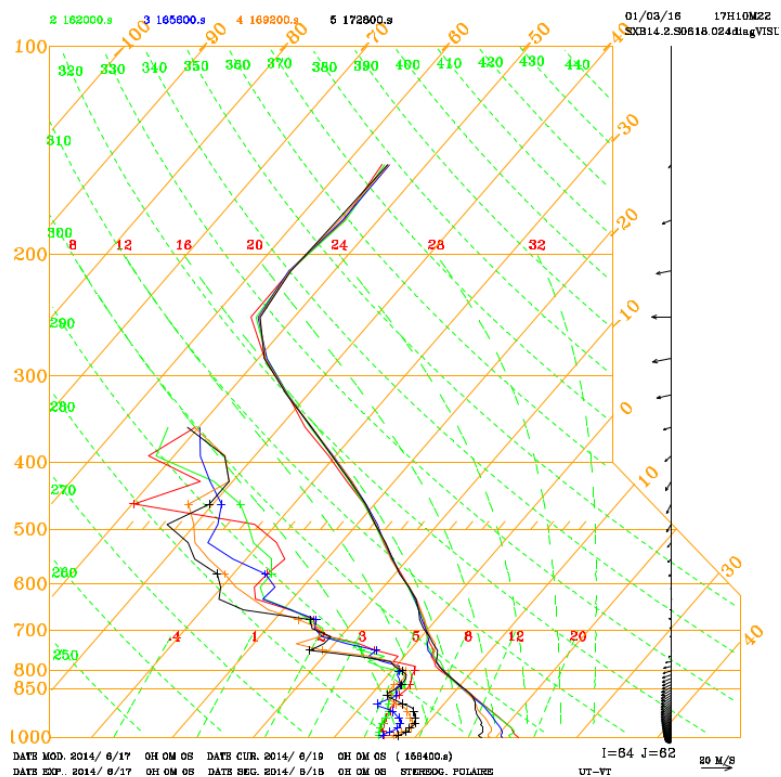


Figure 3.23 : Radiosondage extrait de la simulation sur le domaine à 250 mètres le 18 juin 2014 à 20h (rouge), 21h (vert), 22h (bleu), 23h (orange) et 24h (noir), en heures UTC, au point correspondant à la station du centre-ville "Kléber". Les profils illustrent l'effet de réchauffement de la surface, alors même que radiosondage en zone rurale montre une inversion thermique

Les températures de l'air à 2 mètres mesurées sur le site du centre-ville (station Kléber) et simulées par Meso-NH sont en bonne adéquation, tant en terme d'amplitude que de cinétique journalière, avec des écarts inférieurs au °C. En revanche, on observe des différences significatives entre la mesure et le modèle pour les deux stations considérées comme références rurales : la station de l'aéroport d'Entzheim et la station de Reichstett. Dans les deux cas, l'explication tient à la présence dans la maille de calcul d'une forte proportion de surface minérale. Le tarmac de l'aéroport dans la première maille, la friche industrielle de la raffinerie pétrolière dans la seconde. Le phénomène est particulièrement marqué pour la maille d'Entzheim, pour laquelle le modèle produit des températures de l'air à 2 mètres supérieures de plus d'1°C à la température de la maille du centre-ville au moment du midi solaire. Si l'on compare les températures simulées avec les températures mesurées (Figure 3.24), on constate un écart pouvant atteindre quasiment 3°C.

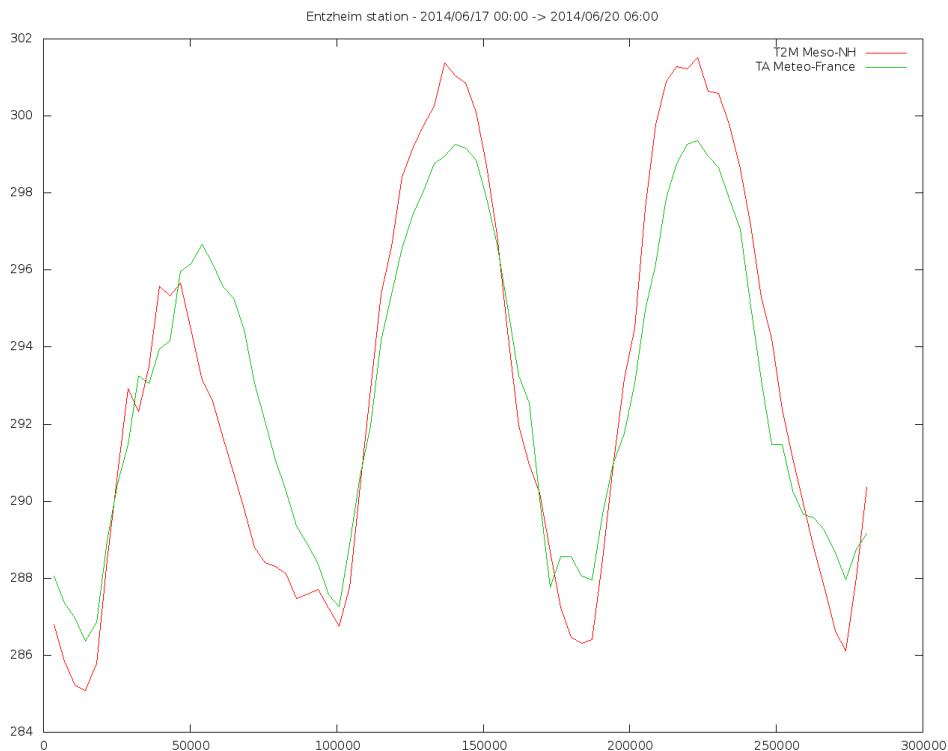


Figure 3.24 : Comparaison de la température de l'air à 2 mètres (en Kelvin) mesurées par Météo-France (vert) et la même température extraite de la simulation à 250 mètres (rouge) pour la période du 17 au 20 juin 2014

De fait, les mesures réalisées sur le terrain sont plus proches de résultats obtenus pour la maille de modèle située immédiatement au nord de la maille de chaque site.

L'utilisation de la base de données Ecoclimap pour la description des propriétés de la surface de chaque maille introduit nécessairement un biais, comparativement à une description ad hoc utilisant des observations ou une classification spécifique à l'agglomération strasbourgeoise. Le choix a néanmoins été fait d'utiliser Meso-NH de la manière la plus standardisée et reproductible. Ainsi, les mailles correspondant aux sites du jardin historique du Palais Universitaire et au site de la mairie de Schiltigheim, l'une caractéristique d'un parc urbain, l'autre très minérale, ne se différencient pas particulièrement en terme de température de l'air simulée, alors que les mesures réalisées sur le terrain montrent deux motifs typiques et très distincts. Il en est de même en termes de comparaison des flux turbulents mesurés et simulés, avec néanmoins une réserve : l'exploitation des mesures de flux turbulent suppose une analyse de l'empreinte (footprint) préalable, afin de déterminer précisément la zone contributive aux flux de chaleur à un instant t . Cette analyse restant à faire, aucune comparaison avec les simulations n'est présentée ici.

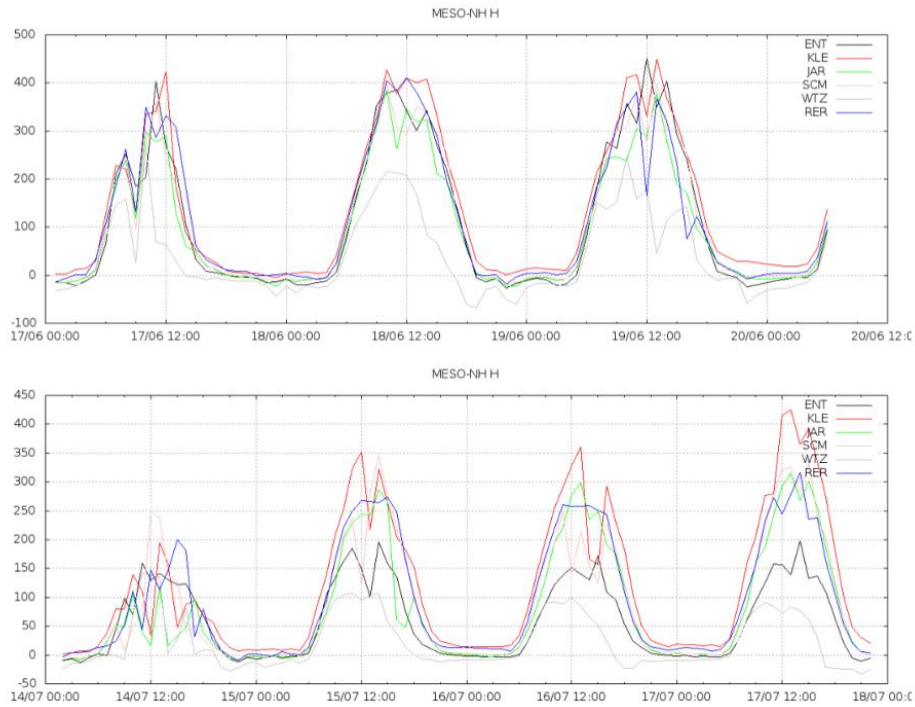


Figure 3.25 : Cinétiques comparées du flux de chaleur sensible (W/m^2) simulées par Meso-NH pour des sites urbain dense (KLE), de parc urbain (JAR), de zone péri-urbaine dense (SCM) et rurales (WTZ, RER, ENT) pour la période de juin (haut) et la période de juillet (bas). Le site WTZ est particulièrement marqué par la forte présence d'eau (Rhin et station d'épuration), alors que le site de l'aéroport (ENT) est affecté par le tarmac

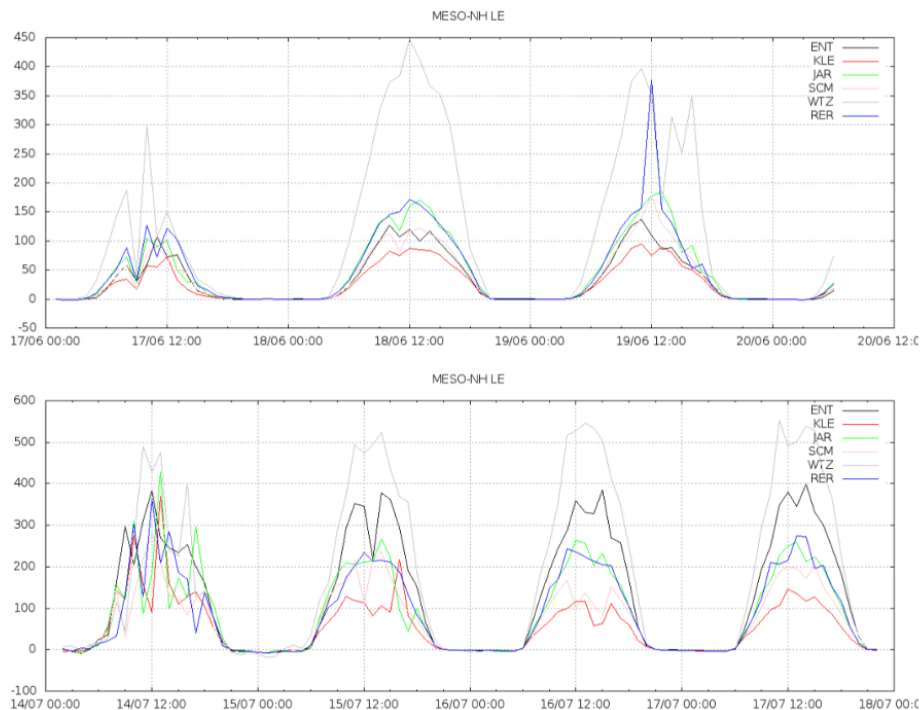


Figure 3.26 : Cinétiques comparées du flux de chaleur latente (W/m^2) simulées par Meso-NH pour des sites urbain dense (KLE), de parc urbain (JAR), de zone péri-urbaine dense (SCM) et rurales (WTZ, RER, ENT) pour la période de juin (haut) et la période de juillet (bas). Le site WTZ est particulièrement marqué par la forte présence d'eau (Rhin et station d'épuration), alors que le site de l'aéroport (ENT) est affecté par le tarmac

Les travaux de simulation et de validation de Meso-NH en sont à un stade préliminaire, et nécessiteront encore d'affiner la paramétrisation des schémas de surface d'une part, et des post-traitements des mesures de validation d'autre part. Néanmoins, une première lecture des résultats permet de dégager deux aspects intéressants :

(i) Meso-NH retranscrit bien le contraste entre les deux périodes sélectionnées, un mois de juin très sec suivi d'un mois de juillet pluvieux. On retrouve bien ce contraste dans la dynamique de la température et du contenu en eau du sol, ainsi que dans la répartition des flux turbulents en chaleur sensible et chaleur latente (Figure 3.25 et Figure 3.26). Les périodes choisies devraient donc nous permettre une validation du modèle dans deux cas de figures significativement différents;

(ii) Une observation de la dynamique des champs de vent de surface confirme une analyse antérieure (Kastendeuch et al. 2010), selon laquelle la station de l'aéroport d'Entzheim, que l'on a tendance à considérer comme une référence rurale dans l'analyse de l'îlot de chaleur urbain de Strasbourg, est en fait sous la plume de chaleur de l'agglomération, et bénéficie en début de soirée d'une advection de chaleur de la ville (Figure 3.21 et Figure 3.22). Ce phénomène, observable pour un type de temps anticyclonique avec un léger vent de nord-nord-est, est ensuite balayé en milieu de nuit par un changement d'orientation du vent, attesté par l'observation des champs de vent issus du domaine à deux kilomètres. Ceci doit être pris en compte dans l'implantation d'une future station météorologique de référence rurale, dont le site reste pour le moment à définir, mais pour lequel il est démontré qu'elle devra se situer au nord-ouest de Strasbourg.

3.6 Mesures bioclimatologiques

La campagne expérimentale mise en place pour évaluer le stress thermique subi durant l'épisode de canicule du mois de juillet 2015 sur la place Kléber a permis de collecter toutes les données nécessaires pour calculer l'indice de confort UTCI (Universal Thermal Climate Index, cf. Fiala et al. 2012). Toutes ces données sont disponibles sur les chariots mobiles ainsi que sur certains autres sites répartis dans la ville. Cet indice exprime la sensation d'un être humain quand il est soumis à une ambiance climatique dont on connaît la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et la température de radianse moyenne, qui s'obtient à partir des globes noirs ou gris (Figure 2.14 (c)). Contrairement aux températures de l'air qui se sont révélées homogènes, l'UTCI donne des valeurs nettement différentes en fonction des endroits de cette place (Figure 3.27).

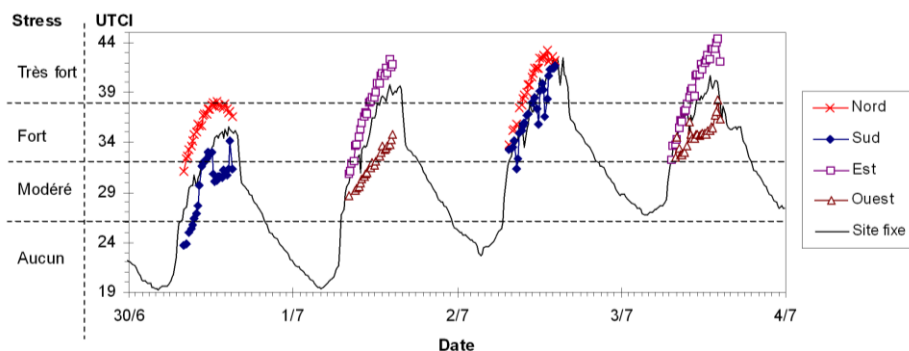


Figure 3.27 : Indices de confort thermiques (UTCI) et niveau de stress thermique sur la place Kléber à Strasbourg du 30 juin au 3 juillet 2015, pour les quatre côtés de la place et le site fixe

Les côtés nord et est se révèlent les plus inconfortables et atteignent un niveau de stress thermique très fort. Les côtés sud et ouest de la place sont les plus confortables, car souvent à l'ombre, et se situent toujours à un niveau inférieur sur l'échelle du stress. Le site sud possède un indice qui varie beaucoup en fonction de l'évolution des ombres des arbres qui sont plantés le long de la façade : le niveau de stress augmente ou diminue en fonction de l'efficacité de l'ombrage. Le site fixe Kléber montre bien l'évolution du niveau de stress nocturne sur les quatre jours : on atteint un stress modéré en fin de période, ce qui se traduit par un problème de récupération physiologique la nuit.

Il est possible de comparer l'indice de confort thermique obtenu sur la place Kléber avec celui du jardin du Palais Universitaire. Le jardin est plutôt défavorisé le matin par rapport à la place (Figure 3.28). La sensation de chaleur y augmente rapidement et atteint un niveau de stress supérieur à celui de la place. Cela provient du fait que le dispositif de mesure placé dans le jardin, dans une zone dégagée, à l'écart des arbres, ne se retrouve jamais à l'ombre. La zone chauffe dès le matin. En fin de journée la place arrive au même niveau de stress que le jardin et elle le dépasse légèrement au cours de l'après-midi. C'est surtout lors de la phase de refroidissement, et notamment après 18h TU que la place devient plus inconfortable que le jardin. Le niveau de stress diminue rapidement pour le site du jardin la nuit, tandis qu'il reste plus élevé pour la place: le stress reste même à un niveau modéré sur la place dans les nuits du 2 au 3 et du 4 au 5 juillet (Figure 3.28).

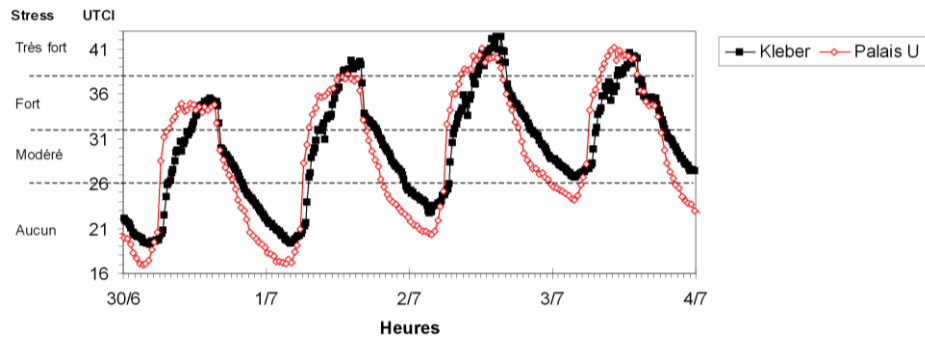


Figure 3.28 : Indices de confort thermiques (UTCI) et niveau de stress estimé sur la place Kléber et pour le jardin du Palais Universitaire du 30 juin au 3 juillet 2015

4 Perspectives

4.1 Topologie 3D arbre dans RATP & LASER/F

Le travail accompli sur l'arbre témoin a permis de mettre en place des procédures semi-automatisées pour l'acquisition de la structure fine d'un arbre taillé (tronc + branches) ainsi que de son enveloppe foliaire. Il reste maintenant à tester ces algorithmes d'acquisition sur d'autres espèces ou sur des arbres dont les branches ne sont pas taillées.

La mise en place d'une procédure capable d'obtenir la géométrie des branches de différentes espèces avec des architectures variées intéresse particulièrement l'INRA qui digitalise ses arbres avec des méthodes manuelles. Ce type de méthode pourra également faire l'objet de tests pour savoir s'il serait possible de l'appliquer à partir de données acquises par des moyens mobiles (scanner monté sur un véhicule) pour reconstituer facilement les arbres d'une rue (au moins au niveau de l'enveloppe de la couronne).

Pour passer du niveau ponctuel à celui du quartier avec LASER/F, il s'avère indispensable d'introduire dans le modèle une information sur la position ainsi que sur l'ampleur (volume) de la couronne des arbres. Le scan mobile des arbres s'avère la méthode idéale pour y parvenir.

4.2 Mesures terrestres et aéroportées IRT

Les différentes campagnes de mesure IRT effectuées au cours de l'été 2015 sur la place Kléber et dans le jardin du Palais Universitaire ont permis l'acquisition de deux séries temporelles d'images thermiques en milieu urbain. Ces jeux de données uniques ont servi de base à une analyse exploratoire des comportements thermiques de différents composants urbains et à une première validation du modèle LASER/F concernant l'estimation de la température de surface et de sa cinétique journalière pour les bâtiments. L'exploitation de ces images a confirmé le besoin évident de ce type de données lors d'étude climatique en milieu urbain et les résultats présentés dans ce rapport ont mis en avant deux points essentiels. D'une part, le besoin de mesures à très haute résolution spatiale acquises au sol ou aéroportées complétées par d'autres mesures climatologiques, et d'autre part la nécessité d'acquérir des données IRT permettant le suivi de la température de surface à l'échelle de la ville à une résolution spatiale et temporelle adéquate.

Dans le cadre de notre étude, des données IRT à très haute résolution permettraient d'améliorer la compréhension des processus physiques intervenant à l'échelle du canyon urbain et d'approfondir la validation du modèle LASER/F en ce qui concerne l'estimation de la température de surface des bâtiments. Il serait très intéressant de compléter ces investigations par l'acquisition simultanée de données climatologiques telles que des mesures d'albédo et de rayonnement, indispensables à une validation plus approfondie des processus IRT simulés par LASER/F. Pour la suite de ces travaux, deux moyens d'acquisitions sont envisagés pour la collecte des données IRT très haute résolution. Des acquisitions au sol comme effectué lors de ce projet mais avec l'acquisition de données complémentaires plus complètes ainsi qu'une expérimentation plus poussée en ce qui concerne l'estimation de l'émissivité afin de permettre l'estimation de l'émissivité caractérisant les surfaces verticales en milieu urbain. Des mesures IRT aéroportées sont également prévues et des contacts ont été pris avec l'IETR (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes) pour un projet de collaboration. Cet institut possède un avion/ULM capable d'intégrer des caméras thermiques et permettant d'atteindre la résolution métrique sur la ville, permettant la validation des méthodes à cette échelle.

En ce qui concerne le suivi de la température de surface à l'échelle de la ville, cela nécessite des données IRT à une résolution temporelle permettant l'analyse de la cinétique journalière de la température et une résolution spatiale satisfaisante pour représenter la plupart des variations intra-urbaines de températures, c'est-à-dire une centaine de mètres. Ces mesures seront également indispensables dans l'optique d'une validation des sorties de LASER/F et Meso-NH à l'échelle du

quartier. Afin d'obtenir ces observations, la télédétection satellitaire est à privilégier. Cependant, les satellites actuels ne fournissent pas les données IRT aux résolutions nécessaires et l'utilisation de méthodes de désagrégation est requise. Bien que les méthodes de désagrégations des données IRT visant à estimer la température de surface en milieu urbain aient montré des résultats prometteurs, la plupart ne prennent pas en compte la complexité de la surface dont l'impact sur l'estimation de la température de surface a été démontré. Il sera donc nécessaire d'intégrer une correction de l'impact de la géométrie de la surface urbaine à ces méthodes afin d'améliorer l'estimation de la température de surface aux résolutions satisfaisantes pour le suivi de température en ville. Pour cela, l'impact de la géométrie de la surface sur l'estimation de l'émissivité effective sera évalué et une émissivité effective corrigée sera estimée. La fréquence d'acquisition des données satellites IRT à l'échelle de la centaine de mètres (*ie* ASTER) est suffisante pour capturer la dynamique temporelle de l'émissivité effective corrigée en milieu urbain. La température de surface sera ensuite estimée à haute résolution temporelle (*ie* MODIS) en combinant l'émissivité effective corrigée, des données IRT journalières préalablement désagrégées à 90 m et une estimation précise du rayonnement incident. La méthode qui sera développée pourra ensuite être appliquée aux différents capteurs actuels tels que ASTER ou Landsat 7 et 8 ou le futur Thirsty pour la haute résolution spatiale et MODIS, SUOMI NPP ou Sentinel 3 pour la haute résolution temporelle.

4.3 LASER/F / Meso-NH à l'échelle du quartier

LASER/F est un modèle conçu spécifiquement pour simuler les processus urbains à l'échelle de la rue et du quartier. Il va falloir prouver que ce modèle est capable de travailler dans ces deux configurations, sur des situations réelles. Pour ce faire, on propose de réaliser des validations de ce modèle sur deux zones tests: d'abord appliquer le modèle sur une rue, puis étendre le domaine à tout un quartier.

Le premier test permettra d'appliquer le modèle sur deux rues d'orientations identiques (NNE-SSO), mais de largeurs différentes et plus ou moins arborées. La rue de l'Argonne (H/W de 0.9) ne possède pas beaucoup d'arbres et fera l'objet d'une simulation détaillée du comportement de la façade des bâtiments (vitres + balcons). Le Boulevard de la Marne (H/W <0.9) est constitué sur sa longueur de différents types de tronçons contenant plus ou moins d'arbres. En fonction de l'évolution du code de LASER/F (introduction du module d'arbre), il sera possible de tester le modèle sur l'une ou l'autre de ces configurations. Ces modélisations seront accompagnées de campagnes de mesures. Ces opérations de terrain auront pour objectif de documenter ces deux rues de manière à valider les sorties de LASER/F (notamment les échanges radiatifs, les ambiances climatiques et les températures de surface).

Une première campagne de mesures aura lieu dès cette année dans la rue de l'Argonne pour commencer à mettre au point un protocole expérimental et des simulations préliminaires. Cette opération consistera essentiellement à effectuer des mesures mobiles dans la rue et les bâtiments (notamment pour les températures de surface). Une seconde campagne de mesures sera mise en place dans le Boulevard de la Marne. Cette opération reposera sur un dispositif fixe et très dense de capteurs afin d'évaluer l'impact de la végétation dans ce boulevard. Ce réseau fixe sera complété par des mesures mobiles selon les besoins.

Une simulation pourra être envisagée pour englober l'ensemble des deux rues qui sont très proches. Cette simulation conjointe nécessite de faire fonctionner LASER/F à l'échelle du quartier. En fonction des capacités du modèle (mémoire, temps de calcul) on pourra choisir d'introduire une géométrie plus ou moins détaillée.

5 Références

- Åkerblom, M., Raunonen, P., Kaasalainen, M., Casella, E., Baghdadi, N., Thenkabail, P., 2015. Analysis of Geometric Primitives in Quantitative Structure Models of Tree Stems. *Remote Sensing*, **7**, pp.4581–4603.
- Cao, J., Tagliasacchi, A., Olsoy, M., Zhangy, H., Su, Z., 2010. Point cloud skeletons via Laplacian-based contraction. In *SMI 2010 - International Conference on Shape Modeling and Applications, Proceedings*. pp. 187–197.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, **56**(3), pp.429–441.
- 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), pp.1069–1105.
- 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 soutenance de diplôme d'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 79 pages.
- Kastendeuch, P., 2015. Documentation scientifique de Laser/F.
- Lee, K. & Eshani, R., 2008. A Laser-Scanning System for Quantification of Tree-Geometric Characteristics. In *ASABE Annual International Meeting*. p. 11.
- 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), pp.3672–3687.
- 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**, pp.127–133.
- Rosell Polo, J.R., Sanz, R., Llorens, J., Arno, J., Escolà, A., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Camp, F., Gràcia, F., Solanelles, F., Pallejà, T., Val, L., Planas, S., Gil, E., Palacin, 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), pp.128–134.
- Roupioz, L., 2015. Observing at-surface irradiance and albedo from space: the Tibet experiment. PhD thesis, Université de Strasbourg and Delft Technical University, 181 pages.
- 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 and Environment*, **24**(4), pp.395–406.
- Tumbo, S.D., Salyani, M., Whitney, J.D., Wheaton, T.A., Miller, W.M., 2002. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture*, **18**(3), pp.367–372.
- 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**, pp.242–251.

6 Publications en rapport avec le projet

Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Guillemain, S., Najjar, G., 2016. 3D reconstruction of tree architecture and tree crown from terrestrial laser scanner data for urban climate studies. *Remote Sensing*. (Soumis)

Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J., Luhahe, R., Bruckmann, F., 2016. Effects of the 20 March 2015 solar eclipse in Strasbourg, France. *Weather, Royal Meteorological Society*, **71**(3), pp.55–62.

Kastendeuch, P., Najjar, G., Philips, N., Nerry, F., Roupioz, L., Colin, J., Luhahe, R., 2016. Mesures pour l'étude des ambiances climatiques à Strasbourg lors de la canicule de juillet 2015. In *Actes du 29ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*. Besançon, France.

Kastendeuch, P. & Najjar, G., 2015. Simulation of urban fluxes with a 3D canopy model. In *Proceedings of ICUC9, 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France, p. 6 p.

Kastendeuch, P., Najjar, G., Lacarrere, P., Colin, J., 2010. Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, **7**, pp.21–36.

Kastendeuch, P. & Najjar, G., 2015. Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, **12**, pp.44–64.

Kastendeuch, P. & Najjar, G., 2009. Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar Energy*, **83**(3), pp.333–341.

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 *Proceedings of ICUC9, 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France, p. 6 p.

Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., Guillemain, S., 2014. Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, **141**(4ème trimestre 2014), p.7 p.

Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P., Ngao, J., Saudreau, M., Landes, T., Ameglio, T., Luhahe, R., Guillemain, S., Schreiner, G., Kleinpeter, J., 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 *Proceedings of ICUC9, 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse, France, p. 6 p.

Pradier, C., Wilhelm, L., 2016. Évaluation de la qualité de données acquises par couplage de données laser et de données infrarouge thermique. Rapport de projet de recherche technologique, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 29 pages.

Roupioz, L., Kastendeuch, P., Najjar, G., Landes, T., Nerry, F., Colin, J., Luhahe, R., 2016. Validation du modèle Laser/F par des images thermiques dans le cadre de la campagne bioclimatologique sur Strasbourg. In *Actes du 29ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*. Besançon, France.

Saudreau, M., Kastendeuch, P., Ngao, J., Najjar, G., Ameglio, T., 2015. Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques, INRA*, **45**, pp.23–34.