

# Une campagne de mesures inédite pour quantifier les bienfaits des arbres d'alignement à Strasbourg le projet TIR4sTREEt (1<sup>er</sup> épisode)

■ Tania LANDES - Georges NAJJAR - Hélène MACHER - Pierre KASTENDEUCH - Pierre COLOT - Vincent LECOMTE - Renato CIFUENTES  
 Françoise NERRY - Damien BONAL - Nathalie BREDA - Marc SAUDREAU - Thierry AMEGLIO - Carole BASTIANELLI - Christophe MARX

*Des ouvrages à succès ont atteint une certaine renommée notamment en associant des pouvoirs mystérieux aux arbres, allant jusqu'à supposer qu'en forêt, les arbres constituent une société secrète, que les arbres "ressentent" des dangers, qu'ils "communiquent entre eux" par leur réseau de racines, etc. Toutefois, mises à part ces idées romanesques que les arbres sont des géants verts dotés d'une intelligence, il n'est plus à démontrer que la nature procure du bien-être à l'être humain, car chacun de nous l'a déjà ressenti directement. Plus difficile est de quantifier ce bienfait et de le chiffrer.*

**MOTS-CLÉS**  
 Modélisation, arbres, transpiration, mesures 3D, lasergrammétrie, infrarouge thermique, simulations, microclimat urbain.

généralement le climat ambiant, car énormément de paramètres interviennent dans sa caractérisation. Si dans le milieu naturel, certaines simplifications peuvent s'opérer du fait de l'hypothèse d'une homogénéité spatiale des facteurs d'influence, cette caractérisation devient extrêmement complexe en milieu urbain, à l'échelle des quartiers et encore davantage des rues, car tous les éléments présents dans les rues, notamment les arbres, influencent le climat ambiant. La représentation 3D la plus fine possible des éléments composant les rues dans lesquelles le microclimat doit être simulé devient alors primordiale. C'est sur ce dernier point, plus particulièrement, que sont intervenus les topographes de l'INSA Strasbourg.

## Introduction

En milieu urbain, il semble évident qu'une rue arborée sera privilégiée à une rue minérale pour y déambuler l'été. Toutefois, les résidents de ces rues ne voient pas que des bienfaits à la plantation d'arbres devant leur balcon, car les arbres font écran aux rayons du soleil, malgré l'ombre agréable qu'ils procurent l'été. La ville est, de plus, contrainte de les tailler, ce qui implique des frais d'élagage, des besoins de bloquer des places de parking, de rénover les façades qui verdissent... Faut-il conserver les arbres devant les bâtiments ? Si oui, quelle(s) espèce(s) ? Vaut-il mieux les tailler ou non ? Quel espacement minimal faut-il considérer entre deux arbres ? Quelles sont les conditions nécessaires pour que les arbres survivent après plantation ? Faut-il planter des arbres en ville, "quoi qu'il en coûte" ? Comment l'arbre agit-il sur le climat de la rue dans laquelle il se trouve, à quel point empêche-t-il l'air de se réchauffer ? C'est pour tenter de quantifier les effets des arbres et de

répondre, avec des chiffres à l'appui, à certaines de ces questions, qu'un consortium de chercheurs s'est réuni autour d'un projet commun, baptisé "TIR4sTREEt (Thermal Infrared for Street Trees)" (<https://trio-climatologie-strasbourg.fr/>).

Il est très complexe de modéliser le confort thermique d'une rue et plus

La végétation urbaine agit comme un régulateur du microclimat par la transpiration et par l'apport d'ombre aux

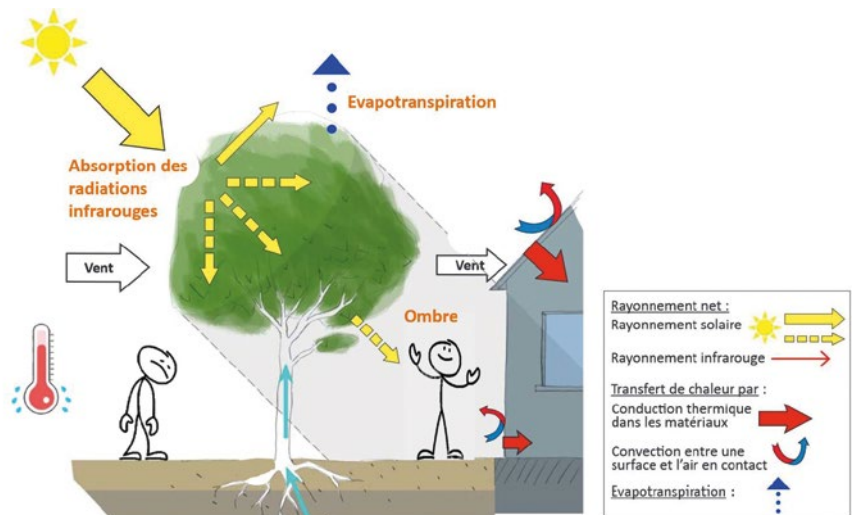


Figure 1. Interactions entre l'arbre isolé et son environnement (Plante & Cité, VegDUD, 2014 modifié).



piétons et aux façades, réduisant ainsi la température de l'air et surtout des températures de surface des bâtiments et du sol. Des chercheurs ont montré que les arbres de rue peuvent avoir un impact significatif sur le refroidissement de l'air et des surfaces, avec une diminution potentielle de 2° C à 3° C et de plus de 10° C respectivement (Gillner et al., 2015). Les arbres protègent contre le rayonnement solaire direct, donc évitent que les surfaces se réchauffent. Ils contribuent au confort thermique, font écran au vent en ralentissant le flux d'air, modulent les échanges de chaleur et d'humidité entre l'air et les façades du bâtiment, et surtout, ils transpirent (figure 1). La transpiration est un phénomène thermodynamique et physiologique par lequel l'eau puisée dans le sol (c.-à-d. la sève brute) monte dans les vaisseaux de l'arbre (xylème) jusqu'aux feuilles, où elle est évaporée à travers les stomates du fait de l'énergie solaire. Le moteur de cette montée est la sécheresse de l'air au niveau des feuilles. Cette évaporation a un pouvoir rafraîchissant pour les feuilles, qui permet ainsi le maintien de la photosynthèse (absorption du CO<sub>2</sub> au cours de la journée). La transpiration de l'arbre consomme une grande partie de l'énergie reçue par rayonnement solaire.

L'effet de l'environnement de l'arbre sur la transpiration des feuilles en milieu urbain reste assez mal connu (The conversation, 2023). L'intensité de ce phénomène dépend des conditions météorologiques, des caractéristiques de l'arbre (espèce, densité des feuilles, taille, géométrie de la couronne, proximité des bâtiments, arbres isolés ou en parc), mais pas seulement. Il dépend également du type de sol, de sa qualité, de l'environnement de l'arbre, sa proximité des bâtiments ou des routes, du niveau de pollution, etc.

### Le projet TIR4STREET

Le projet TIR4STREET (financé par l'Agence nationale de la recherche, ANR- 21 CE 22 0021) vise à améliorer notre compréhension du comportement des arbres et à quantifier l'effet de trois espèces différentes d'arbres de rue sur le climat urbain, en mettant l'accent sur la température de surface. Pour ce faire, le premier objectif du projet est de mener des campagnes de mesure du microclimat saisonnier des rues (sol, air, bâtiments) et du fonctionnement des arbres. L'évapotranspiration joue un rôle crucial dans la régulation de la température de l'air ambiant,

c'est pourquoi le suivi de la transpiration des arbres est primordial. Ce suivi s'est fait à l'aide de capteurs de climatologie, de capteurs écophysologiques, mais aussi au travers de mesures de températures de surfaces. Le deuxième objectif est de développer une méthodologie permettant de fusionner la géométrie de la scène urbaine étudiée avec les températures de surface mesurées. Le modèle thermique 3D pourra être utilisé, dans un troisième objectif, pour valider les estimations produites par les outils de simulation microclimatique, actuellement développés par le consortium, à savoir le modèle LASER/F (*LAtent SEnsible Radiation Fluxes*) adapté à l'échelle d'un quartier (Kastendeuch et al., 2017) et le modèle LASER.T (LASER/F auquel on a couplé RATP, *Radiation Absorption, Transpiration and Photosynthesis*, Sinoquet et al., 2001) opérant à l'échelle de l'arbre. En couplant les deux, il est possible d'analyser et de modéliser l'impact des arbres et de la morphologie urbaine sur le climat urbain. À long terme, ces résultats aideront les urbanistes à proposer des scénarios de verdissement et à améliorer ainsi le climat ambiant. La simulation du bilan énergétique à l'échelle d'une rue



Figure 2. À gauche, les trois rues à l'étude (Strasbourg) avec mention des espèces d'arbres ; à droite : les arbres protégés par un enclos installé pour les besoins du projet (rue Ellenhard).



reste un défi majeur à relever, même si les processus sont connus. En effet, elle nécessite de reproduire fidèlement la géométrie et les caractéristiques physiques de la surface, ainsi que tous les processus d'échange d'énergie qui ont lieu entre ces éléments. C'est ainsi que l'idée d'instrumentaliser au maximum un site d'étude a germé.

## La zone d'étude

Pour mieux comprendre et chiffrer les échanges d'énergie ayant lieu entre les arbres et les bâtiments, mais aussi entre les arbres et la rue et entre les bâtiments et la rue, il a fallu choisir un site qui devait répondre à plusieurs conditions dictées par les impératifs de la recherche : que les rues concernées soient caractérisées par les mêmes conditions climatiques, qu'elles comportent des arbres d'alignement, et de différentes espèces. En concertation avec le Service des Espaces Verts et de Nature de la Ville et Eurométropole Strasbourg (EMS), trois rues adjacentes de Strasbourg, de conditions climatiques homogènes, ont ainsi été sélectionnées (voir figure 2, gauche). Trois espèces d'arbres différentes jalonnent ces trois rues adjacentes, à savoir le platane, le tilleul et le micocoulier. Le patrimoine arboré de l'EMS compte actuellement de nombreuses essences, parmi lesquelles, les tilleuls et les platanes sont bien représentés. Le micocoulier, davantage répandu dans les régions méditerranéennes, semblait intéressant par sa capacité à supporter le stress hydrique et à résister aux fortes chaleurs.

## Une campagne de mesures intensive menée durant l'été 2023

Bien que la campagne principale ait pris place l'été 2023, les prémices datent de 2021. En effet, l'installation de capteurs a démarré dès le printemps 2021, et s'est poursuivie jusqu'en 2023. Dans chaque rue, deux arbres voisins ont été clôturés par les soins des services de l'Eurométropole de Strasbourg, pour sécuriser le matériel de mesure installé au pied des arbres (figure 2, droite). Des structures métalliques supportant des stations de mesures météorologiques et des camé-

ras thermiques ont permis de suivre les échanges gazeux et radiatifs entre les arbres et leur environnement, à différentes hauteurs. La rue Ellenhard, qui aura été la plus instrumentée, est caractérisée par la présence de micocouliers d'un seul côté de la rue, sur le trottoir longeant les bâtiments résidentiels. Cet état de fait rend la rue particulièrement intéressante pour constater l'effet de la présence ou non d'arbres le long du trottoir, devant les façades. Ainsi des variables climatologiques ont également été mesurées sur le trottoir d'en face, grâce à l'installation d'un mât (figure 3, droite), depuis lequel des images thermiques des arbres et façades ont pu être prises au fil du temps, en collaboration étroite avec les services de l'EMS.


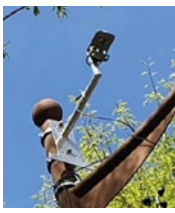

Une vaste campagne de mesures a ainsi pu être menée en deux temps. Une campagne de mesures en continu a débuté en 2021 et s'est poursuivie jusqu'en 2023, durant laquelle des mesures de type climatologique et de flux de sève ont été planifiées. Les équipements ont ainsi enregistré les données toutes les minutes et nous les avons récupérées sur nos ordinateurs chaque semaine. Dans un deuxième temps, une campagne plus intensive et exhaustive s'est déroulée durant la

période estivale de 2023. En effet, les systèmes déjà en place ont été complétés par l'ajout de capteurs thermiques et de systèmes de mesures radiatives concentrées sur un arbre. De plus, une campagne de mesures mobiles, avec trois passages par jour, pour des journées spécifiques, a permis d'augmenter la cadence et la couverture de mesures thermiques notamment. Ainsi, une grande quantité d'informations microclimatologiques, météorologiques, 3D, thermiques et écophysiologicals ont pu être recueillies sur les arbres des trois rues, comme présenté dans les paragraphes suivants.

## ■ Mesures écophysiologicals et climatologiques

Un ensemble de capteurs météorologiques de mesure des paramètres climatiques classiques (température, humidité, rayonnement, vitesse et direction du vent) sont venus équiper chacune des rues. Pour estimer la quantité d'eau transpirée par chaque arbre des trois espèces, des capteurs de densité de flux de sève, des dendromètres mesurant en continu la croissance en diamètre d'une charpentièrre et des capteurs d'humidité et de potentiel hydrique du sol ont été placés sur et à proximité



Capteur	Illustration et utilité
Anémomètre	 <p>Ce capteur permet de mesurer la vitesse du vent en m/s. Il est relié à une centrale de collecte de données. Fréquence de mesure : 5 secondes</p>
Capteur de rayonnement global	 <p>Ce capteur permet de mesurer les rayonnements du soleil dans la journée. Il dispose d'une surface photovoltaïque qui capte les rayonnements et les convertit en courant électrique. Il est relié à une centrale de collecte de données. Fréquence de mesure : 5 secondes</p>
Capteur de température et d'humidité de l'air	 <p>Ce capteur permet de mesurer l'air ambiant avec la température et le taux d'humidité sous abri. Les unités de mesures sont en °C (degrés Celsius) et % (en pourcentage d'humidité). Il doit être placé à une hauteur de deux mètres au-dessus du sol. Il est relié à une centrale de collecte de données. Fréquence de mesure : 5 secondes</p>




Capteur	Illustration et utilité
Capteur d'état hydrique du sol	 <p>Ce capteur permet de mesurer l'humidité volumique du sol (en % d'humidité) à différentes profondeurs, ainsi que la température (°C) et la tension de l'eau (Bar) dans le sol. Chaque rue a été équipée de quatre capteurs, situés à quatre profondeurs différentes (-25, -50, -75 et -100 cm).</p> <p>Fréquence de mesure : semi-horaire</p>
Capteur dendromètre en continu (LVDT)	 <p>Un LVDT (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>), ou dendromètre e-PépiPIAF, est un système électronique connecté autonome permettant de mesurer en continu et de transmettre en temps réel les variations du diamètre du tronc ou branche d'un arbre. Ce capteur permet de fournir plusieurs informations sur la physiologie de l'arbre, telles que l'utilisation des réserves hydriques de l'arbre en lien avec l'intensité de la transpiration ou au manque d'eau dans le sol, les différentes phases de la croissance secondaire de l'arbre et en particulier sa bonne reprise après plantation, et d'en déduire les différents stades phénologiques (débourrement, floraison, chute des feuilles...), l'état de santé du végétal (présence de parasite foliaire, pratique culturale, résistance au gel).</p> <p>Fréquence de mesure : semi-horaire</p>
Capteur de densité de flux de sève brute	 <p>Le capteur de densité de flux de sève brute (la sève qui monte) de type Granier permet de mesurer la vitesse de déplacement de la sève de l'arbre, grâce à deux sondes (un thermocouple) plantées dans l'arbre à une distance d'environ 10 cm. La différence de tension entre les deux aiguilles mesurée par les enregistreurs sur place permet de calculer la densité de flux de sève ou la vitesse avec laquelle la sève se déplace dans l'arbre au bureau. Ces données permettent d'estimer la transpiration à travers les feuilles et donc les besoins en eau des arbres, et de les relier ensuite avec les échanges d'énergie dans chaque rue à proximité des arbres.</p> <p>Fréquence de mesure : une mesure de tension par minute ; données moyennées toutes les 30 minutes</p>

Tableau 1. Systèmes et capteurs écophysologiques et microclimatologiques mis en œuvre dans le projet TIR4sTREEt.

des arbres situés dans les enclos. Pour estimer le bilan radiatif d'un arbre, des capteurs météorologiques ont été placés autour et dans le houppier d'un micocoulier. Le *tableau 1* présente les capteurs météorologiques et écophysologiques mis en place.

### ■ Mesures thermiques

Un suivi de l'évolution des températures de surface des arbres et des bâtiments, à la fois pour étudier les interactions arbres-façades, mais aussi et surtout pour suivre les interactions arbre-climat de la rue, est une

des originalités du projet. En effet, lorsque l'arbre transpire, il régule la température de surface de ses feuilles, qui restera proche de la température de l'air. Comment la température des feuilles va-t-elle influencer la température de l'air ? Peut-on observer et contribuer à quantifier ce phénomène sur la base de séries d'images thermiques, combinées aux autres mesures citées précédemment ? Voilà quelques questions auxquelles le projet cherche à apporter une réponse. À cette fin, la température de surface des feuilles a été observée au fil des heures, de nuit et de jour, au cours de l'été 2023. Ce suivi permet par la même occasion de quantifier l'effet de l'ombre de l'arbre sur les façades.

Les caméras thermiques utilisées durant le projet sont de spécifications différentes et sont recensées dans le *tableau 2*. Elles ont été calibrées au préalable, d'un point de vue géométrique, pour évaluer la qualité géométrique des thermogrammes, et d'un point de vue radiométrique, par comparaison à un corps noir. Une caméra thermique a été fixée en haut d'un mât, en face des micocouliers étudiés dans la rue Ellenhard (*figure 3*). Une autre, boulevard Jacques Preiss, pointait vers la couronne d'un tilleul. Une troisième observait également les feuilles des micocouliers.

Enfin, une dernière a été placée sur un système mobile conçu spécifiquement pour le projet, en couplage avec des caméras GoPro afin de disposer d'images thermiques des surfaces des façades de l'ensemble de la rue. En complément, des thermoboutons ont été fixés au contact de la façade (représentés pas des boules jaunes sur la *figure 3*, gauche). Ces capteurs nous fournissent une valeur ponctuelle de la température de surface, ce qui nous permet de contrôler la pertinence des mesures thermiques produites par les capteurs imageurs. Une première analyse des résultats fournis par les données thermiques a donné lieu à une publication (Lecomte et al., 2024a).

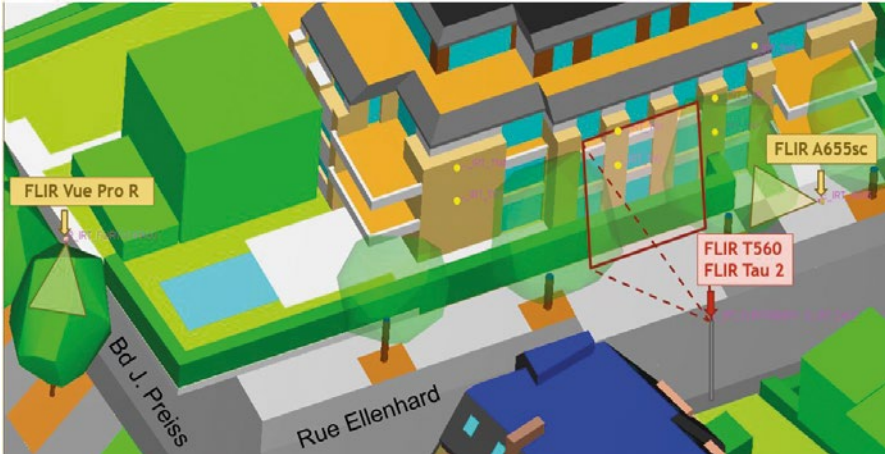


Figure 3. À gauche : site d'étude avec focus sur la FLIR T560 ; à droite : caméra thermique fixée en haut d'un mât.



Capteur	Utilisation
<b>FLIR A655sc</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'images : 121 717 images (du feuillage d'un micocoulier)</li> <li>• Position : sur structure métallique fixée à côté du houppier du micocoulier</li> <li>• Résolution : 640 x 480 ; champ de vision : 25 x 19 ° ; focale : 24,6 mm ;</li> <li>• Précision température : 2 K (constructeur)</li> <li>• Fréquence de mesure : 1 image par minute</li> <li>• Période couverte : du 7 juillet au 23 octobre 2023</li> </ul>
<b>FLIR Vue Pro R</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'images : 120 584 images (du feuillage d'un tilleul)</li> <li>• Position : sur structure métallique fixée à côté du houppier du tilleul</li> <li>• Résolution : 640 x 512 ; champ de vision : 45 x 37 ° ; focale : 13 mm</li> <li>• Précision température : 2 K (constructeur)</li> <li>• Fréquence de mesure : 1 image par minute</li> <li>• Période couverte : du 17 juillet au 31 octobre 2023</li> </ul>
<b>FLIR T560</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'images : 5 005 images (façade et micocoulier)</li> <li>• Position : fixée à un mât (à 6 m du sol)</li> <li>• Résolution : 640 x 480 ; champ de vision : 42 x 32 ° ; focale : 9,7 mm</li> <li>• Précision température : 2 K (constructeur)</li> <li>• Fréquence de mesure : une image RVB et IRT toutes les 5 minutes</li> <li>• Période couverte : du 7 au 24 juillet 2023</li> </ul>
<b>FLIR Tau 2</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'images : 21 210 (façade et micocoulier)</li> <li>• Position : fixée à un mât (à 6 m du sol)</li> <li>• Résolution : 640 x 512 ; champ de vision : 45 x 37 ° ; focale : 13 mm</li> <li>• Précision température : 2 K (constructeur)</li> <li>• Période couverte : du 3 août au 16 novembre 2023</li> </ul>

Tableau 2. Caméras thermiques utilisées lors de la campagne de mesures de 2023.

### ■ Mesures géométriques

Afin de reproduire le plus fidèlement possible la géométrie des trois rues, plusieurs campagnes d'acquisitions au scanner laser 3D ont été effectuées. Les scanners utilisés étaient le Z+F Imager 5016, équipé d'une caméra thermique, le scanner FARO Focus 3D X330 et Premium 150, ainsi que le Trimble X7, le temps d'une démonstration de matériel. Les acquisitions multiples ont permis de produire des nuages de points géoréférencés des trois rues. Complété avec les données LiDAR aéroportées de l'OpenData de l'EMS, le modèle 3D des éléments "durs" de la rue a ainsi pu être reconstruit avec le niveau de détail LOD 3 (*Level Of Detail*) pour les bâtiments situés à proximité des arbres étudiés et qui sont susceptibles d'avoir une interaction significative avec eux. Les acquisitions aux scanners laser terrestres ont été répétées tous les deux mois entre le mois de février et de novembre en 2023, afin de suivre l'évolution du feuillage.

La modélisation des arbres relève d'un autre niveau de difficulté. Un article paru dans XYZ n° 141 (décembre 2014) proposait des solutions de reconstruction 3D d'arbres acquis par lasergrammétrie, dans le parc du Palais universitaire de Strasbourg.



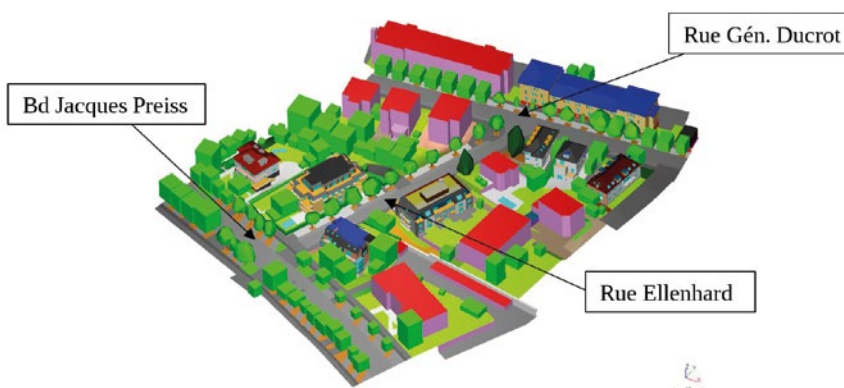


Figure 4. Maquette 3D de l'ensemble du site reconstruite à partir de données acquises par lasergrammétrie et topographie conventionnelle.



Le type de modèle attendu ici pour les arbres en alignement dépend des outils de simulation que nous utiliserons. Dans un premier temps, il s'agit de produire une maquette avec des arbres représentés par un tronc (cylindre) et un houppier sous forme de maillage. De même que pour les bâtiments, le nombre de faces de ces enveloppes doit être réduit au maximum afin de limiter les temps de calcul des futures simulations. La figure 3 (gauche) donne un aperçu d'un bâtiment modélisé avec le LOD3, situé à l'angle de la rue Ellenhard et du bd Jacques Preiss, et la figure 4 présente l'état actuel de la maquette 3D reconstruite sur l'ensemble du site.

Une vidéo présentant les objectifs du projet ainsi que les capteurs mis en place dans le cadre de cette campagne de mesures est consultable via le QR Code de la figure 5.

### Premières images et premiers résultats

Les données collectées durant toute la durée de la campagne de mesures ont été rangées et structurées dans une base de données créée spécifiquement pour le projet. Au terme du projet, cette base de données sera mise à disposition de la communauté des chercheurs, fin 2025. À ce stade, les données recueillies sont en cours de vérification, de consolidation et de validation. Des analyses préliminaires sont en cours. Cet article ne présente que les premiers constats que nous avons faits à ce jour.



Figure 5. Lien vers la vidéo de présentation du projet TIR4sTREEt.

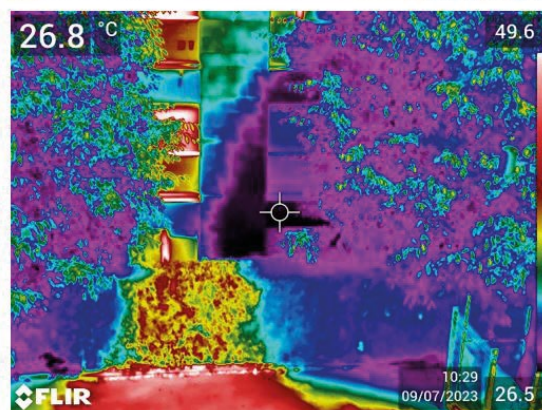


Figure 6. De gauche à droite : Image thermique et RVB (Rouge, Vert, Bleu) observée avec une caméra thermique en juillet 2023.

### Mesures thermiques

Les mesures thermiques provenant de capteurs statiques, notamment de la caméra FLIRT560 (voir tableau 2) fixée en haut d'un mât durant l'été 2023 ont fourni une image d'une façade

de bâtiment et d'une partie de la rue à des intervalles de temps réguliers. Un exemple d'image thermique d'une portion de façade de bâtiment de la rue Ellenhard est présenté figure 6 (image acquise le 9 juillet 2023 en milieu de



Figure 7. Acquisition d'une image thermique et RVB dans la rue Ellenhard. Les températures les plus froides (proches de 1° C) correspondent au ciel.

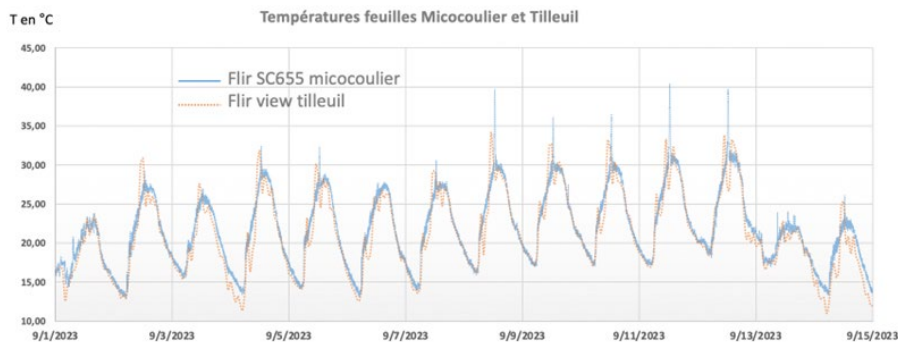


Figure 8. Mesures thermiques effectuées au niveau des feuilles de deux espèces d'arbres.

matinée). À première vue, les écarts de températures de surfaces sont déjà de 23 degrés entre le point le plus frais (26°C pour la façade à l'ombre de l'arbre) et le plus chaud (49° C pour le trottoir en plein soleil).

La caméra thermique employée (FLIR T560) fournissant non seulement des images thermiques, mais aussi dans le domaine du visible, il est agréable de pouvoir confronter les deux domaines du spectre électromagnétique et constater les différences flagrantes de températures de surfaces suivant le revêtement considéré (figure 7). Au niveau des toits en ardoise, des températures de surfaces de l'ordre de 60 degrés ont été observées.

Au niveau du feuillage, les caméras thermiques mises en place sur des structures métalliques à proximité du houppier de deux arbres (un mico-

coulier et un tilleul) montrent que les feuilles des deux espèces présentent des températures de surfaces similaires (entre 15 et 30° C) sur la première quinzaine de septembre (figure 8). Cela nous conforte dans la pertinence des mesures des caméras thermiques. Il reste maintenant à confronter ces mesures à des mesures micro-climatiques et écophysiologiques (température de l'air, humidité, flux de sève...) pour progresser dans la compréhension du comportement de l'arbre.

### ■ Mesures écophysiologiques

Les capteurs de flux de sève mis en place au début de la campagne permettent de mesurer la densité de flux de sève (unité = litres d'eau par m<sup>2</sup> d'aubier et par heure). Cette densité de flux de sève, multipliée par la surface de bois d'aubier (mesurée à partir de

carottes de bois prélevées dans le tronc) conductrice de la sève brute, permet de calculer le flux journalier (litres d'eau par jour) et donc, la transpiration de l'arbre. Nous avons constaté, après analyse des premiers résultats, que les platanes transpiraient beaucoup plus que les micocouliers, qui eux-mêmes transpirent davantage que les tilleuls (figure 9). Si les platanes transpirent certains jours au cours de l'été avec un air chaud et sec entre 300 et 400 litres par jour, les tilleuls atteignent "péniblement" les 150 litres.

Des recherches complémentaires sont nécessaires pour expliquer ces différences entre espèces et comprendre quels facteurs en sont la cause. Il s'agira également de confronter ces résultats aux mesures des dendromètres, aux températures de surfaces des feuilles, à la température et humidité de l'air, aux mesures de sol (humidité volumique, température et tension du sol) acquises aux mêmes dates. Et c'est là que la complémentarité des capteurs installés pour notre campagne intensive prend tout son sens.

## Conclusion et perspectives

Au travers de cette vaste campagne, le premier objectif du projet TIR4sTREEt est largement atteint. Nous avons mis en place un ensemble de systèmes de mesures capables de suivre de très près le comportement d'arbres de différentes espèces, et de leurs voisins au sein de plusieurs rues. Grâce aux compétences multidisciplinaires réunies au sein de notre consortium, la campagne de mesures mise en œuvre a permis, pour la première fois en France à notre connaissance, de caractériser les liens entre la température de surface des éléments d'une scène urbaine, le fonctionnement écophysiologique de l'arbre et le microclimat de la rue.

Le temps est venu, à présent, d'exploiter les données pour en tirer des réponses et chiffrer des phénomènes que nous observerons. Elles devraient permettre de comprendre et quantifier comment les éléments d'une scène urbaine interagissent et influencent les ambiances climatiques. Ces ambiances climatiques se définissent par les indices de confort

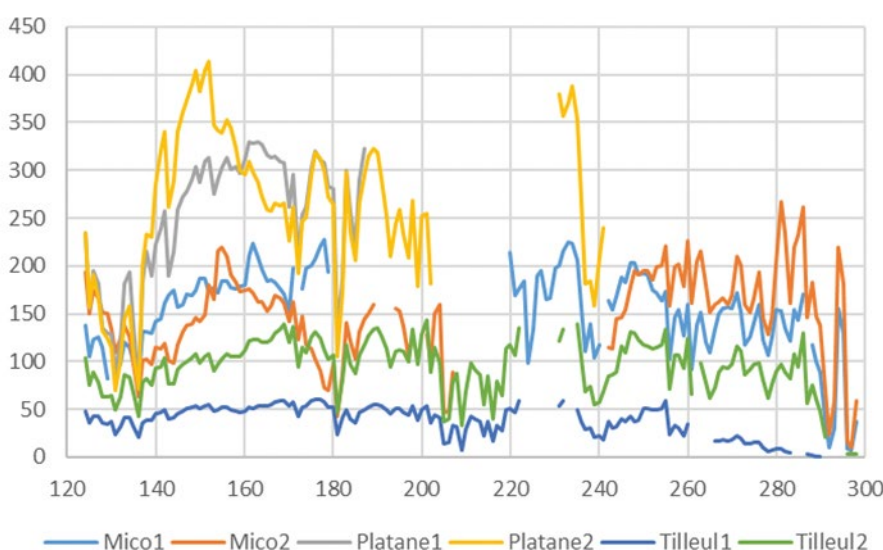


Figure 9. Transpiration des arbres présents sur le site de TIR4sTREEt, en litres d'eau par jour.





(thèse de doctorat de Chaimaa Delasse, INSA-IAV).

Pour atteindre le deuxième objectif du projet, une méthodologie de fusion du modèle géométrique 3D détaillé et des thermographies infrarouges est en cours de développement pour créer un modèle thermique 3D temporel sur l'ensemble de la scène. Un projet de fin d'études est en cours sur le sujet. L'information thermique, avec sa variabilité temporelle, sera issue des mesures effectuées pendant la campagne de 2023, depuis un point de vue statique et dynamique.

Dans un troisième temps, le modèle résultant sera comparé aux simulations de température de surface et d'ombrage que nous procureront les outils de simulation LASER/F et LASER.T, développés au sein de notre consortium (Lecomte et al., 2024b). Cette étape de validation sur la base de mesures réelles est primordiale pour affiner les simulations produites par ces modèles microclimatiques urbains en termes d'effets physiques des bâtiments et des arbres sur l'évapotranspiration, sur les températures de surfaces et sur le confort thermique des rues. À plus long terme, la meilleure maîtrise des interactions entre les arbres et leur environnement devrait nous permettre d'identifier des scénarios de plantations visant à améliorer les conditions de vie et de confort des citoyens. Quant à l'espèce d'arbre à privilégier, elle devra être capable de résister aux fortes chaleurs et au manque d'eau, tout en procurant de l'ombre et de la fraîcheur grâce à l'évapotranspiration.

La suite de ce projet fera l'objet d'un nouvel article, qui sera soumis au comité de rédaction de la revue XYZ, et constituera le deuxième épisode de cette série que nous espérons longue !

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche (ANR) finançant le projet TIR4sTREEt (ANR-21 CE 22 0021), ainsi que toutes les personnes ayant contribué au succès de cette magnifique campagne de mesures et qui n'apparaissent pas

comme co-auteurs : Sandra Albrecht, Thierry Bendler, Francis Bruckmann, Thomas Bur, Chaimaa Delasse, Benjamin Dourdet, Cemal Draman, Etienne Fritsch, Samuel Guillemain, Yannick Faure et Sarah, Lucie Grosjean, Rafika Hajji, François Heitz, Jade-Emmanuelle Heitz, Sylvain Leroux, Raphaël Luhache, Denis Macher, Emile Marie, Clémence Schlick, Christophe Serre, Camille Taufflieb, le personnel du Service des Espaces Verts et de Nature de l'EMS, et les étudiants et enseignants de l'INSA Strasbourg en TP de photogrammétrie et topographie. ●

## Contacts

Tania LANDES<sup>1</sup>, Georges NAJJAR<sup>2</sup>,  
Hélène MACHER<sup>1</sup>, Pierre KASTENDEUCH<sup>2</sup>,  
Pierre COLOT<sup>1</sup>, Vincent LECOMTE<sup>1</sup>,  
Renato CIFUENTES<sup>3</sup>, Françoise NERRY<sup>3</sup>,  
Damien BONAL<sup>4</sup>, Nathalie BREDA<sup>4</sup>,  
Marc SAUDREAU<sup>5</sup>, Thierry AMEGLIO<sup>5</sup>,  
Carole BASTIANELLI<sup>6</sup>, Christophe MARX<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Université de Strasbourg, CNRS, INSA Strasbourg, ICUBE UMR 7357, Équipe TRIO, tania.landes, helene.macher, vincent.lecomte, pierre.colot@insa-strasbourg.fr

<sup>2</sup> Université de Strasbourg, CNRS, Faculté de Géographie, ICUBE UMR 7357, Équipe TRIO georges.najjar, kasten@unistra.fr

<sup>3</sup> Université de Strasbourg, CNRS, ICUBE UMR 7357, Équipe TRIO, f.nerry, cifuenteslamura@unistra.fr

<sup>4</sup> Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, SILVA, damien.bonal, nathalie.breda@inrae.fr

<sup>5</sup> Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, marc.saudreau, thierry.ameglio

<sup>6</sup> Eurométropole et Ville de Strasbourg, carole.bastianelli, christophe.marx@strasbourg.eu @strasbourg.eu

## Bibliographie

Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., Roloff, A. (2015). *Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites*, Landscape and Urban Planning, 143: 33-42

Kastendeuch P.P., Najjar G., Colin J., 2017. *Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F*. Urban Climate 21, 43-65.

Lecomte, V., Macher, H., Landes, T., Nerry, F., Cifuentes, R., Kastendeuch, P., Najjar, G.; Delasse, C. (2024a). *Thermal measurement campaign in the streets of Strasbourg to study interactions between trees and facades*, Société Française de Thermique 2024 (submitted)

Lecomte, V., Macher, H., Kastendeuch, P., Landes, T., Najjar, G. (2024b). *Influence du niveau de modélisation urbaine sur une simulation microclimatique LASER/F*, Association Internationale de Climatologie (AIC), Paris (submitted)

Lecomte, V., Macher, H., and Landes, T. (2022). *Combination of thermal infrared images and laserscanning data for 3D thermal point cloud generation on buildings and trees*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-2/W1-2022, 129-136.

Sinoquet H., Le Roux X., Adam B., Améglio 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): 395-406.

The conversation, 2023. *D'où vient le pouvoir rafraîchissant des arbres en ville*: <https://theconversation.com/dou-vient-le-pouvoir-rafraichissant-des-arbres-en-ville-199906>

## ABSTRACT

*The effect of the tree's environment on leaf transpiration, for example, remains poorly understood, especially in urban areas. While the cooling effect of trees has clearly been proven, it has yet to be quantified, given that it depends on a lot of factors (season, tree species, water access, atmospheric conditions, built environment, etc.). Studying the interactions between trees and their environment should enable us to identify planting methods to improve living conditions and comfort for city dwellers in the future. This is the main topic studied in the TIR4sTREEt project.*