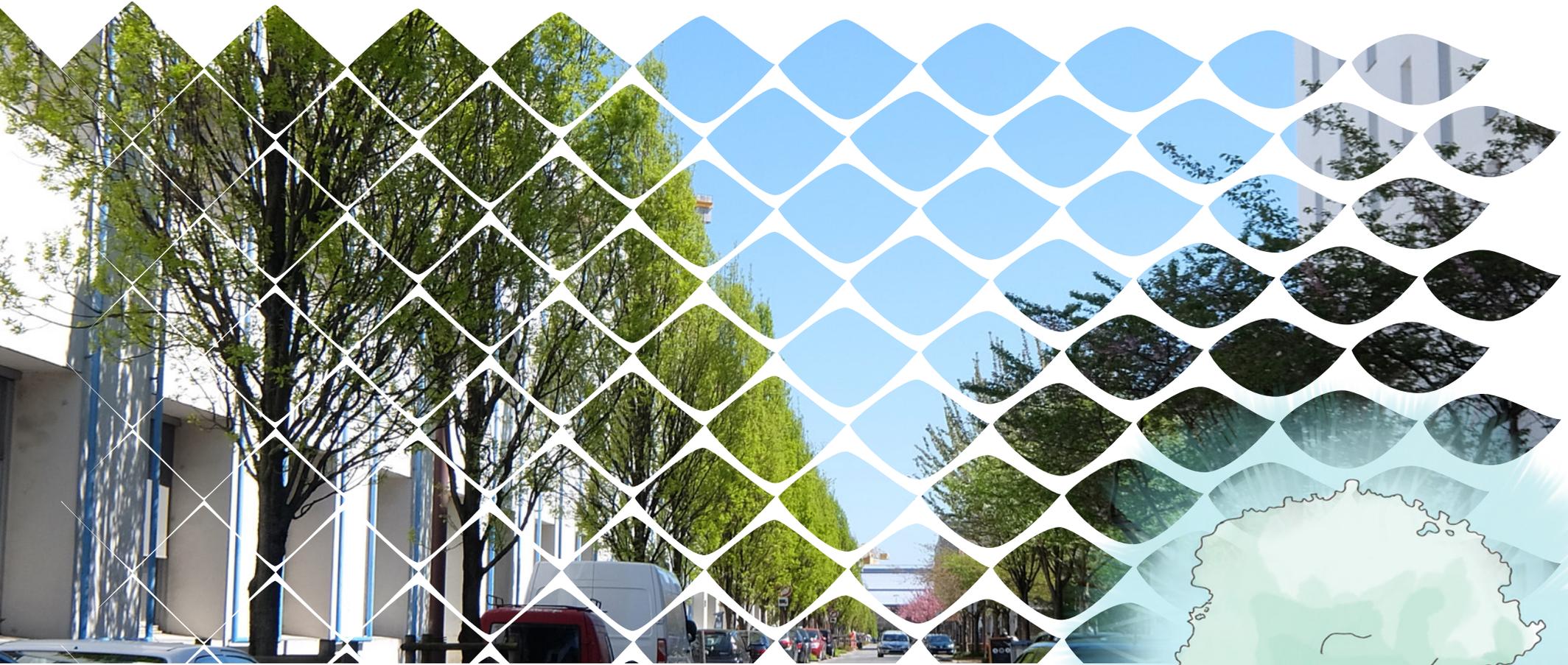




COOLTREES

LE RA Fraîchissement DES VILLES PAR LES ARBRES

Les résultats du programme de recherche ANR COOLTREES, une fenêtre ouverte vers l'aménagement des villes de demain.



INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
TOULOUSE

ICUBE

INRAE
Auvergne
Rhône-Alpes



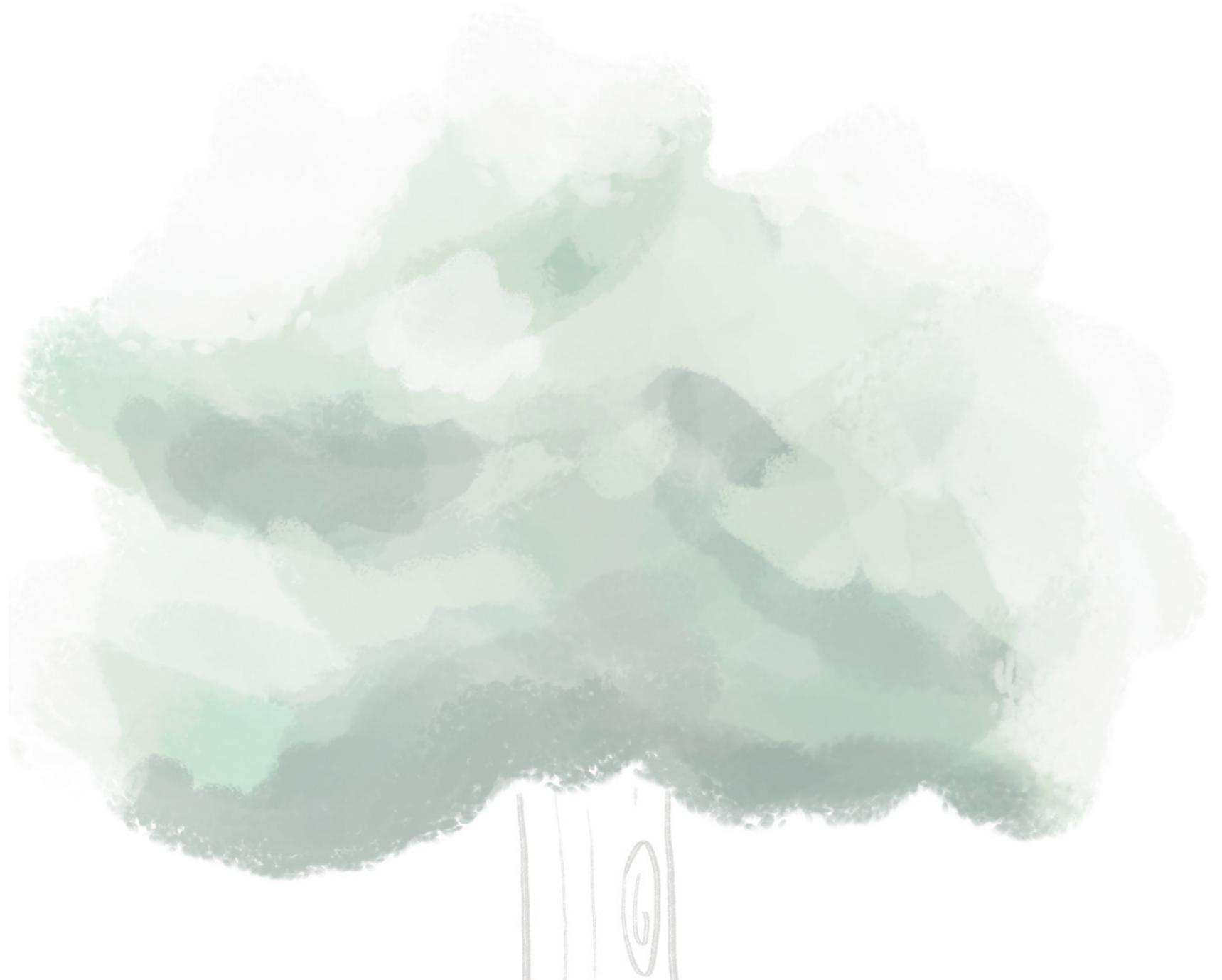
UCA
UNIVERSITÉ
Clermont
Auvergne

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Strasbourg.eu
& COMMUNAUTÉ URBAINE
Capitale européenne

Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

U.M.R. PIAF



Auteurs :

Loïse Triollet (INRAE), Pauline Laille (Plante&Cit ), Marc Saudreau (INRAE)

Illustration :

Loïse Triollet (Agricomics)

Conception graphique :

Loïse Triollet (Agricomics), William Sicre (Sikrw)

Relecteurs :

Marc Saudreau, Pauline Laille, Hélène Veillon, Jérome B bin, Emma Dauphin, Caroline Gutleben, Mathilde Ellie.

 diteurs :

INRAE, Plante & Cité

Parution : 17 / 11 / 2021

ISBN :

978-2-38339-009-1

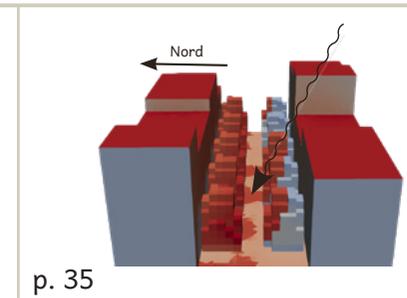
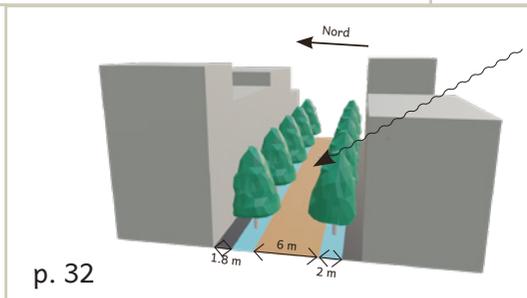
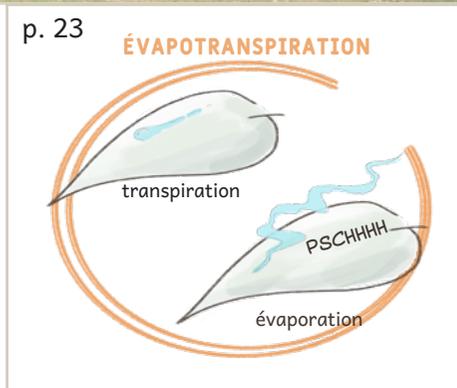
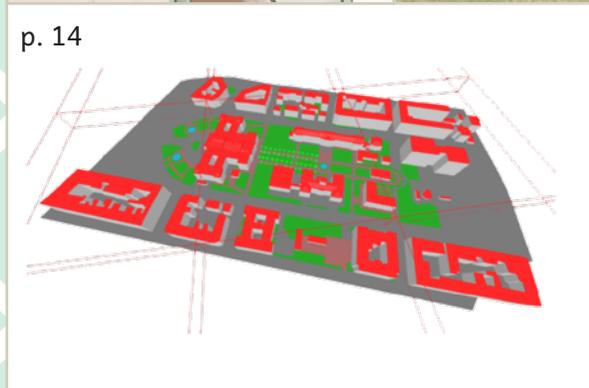
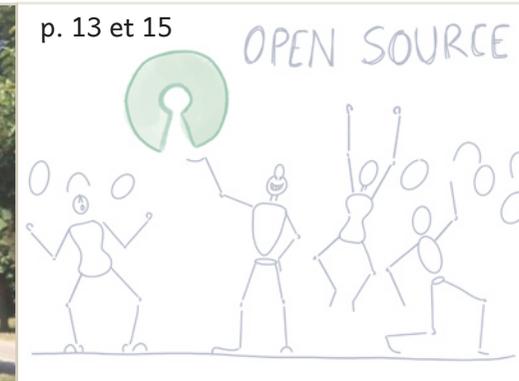
Pour citer le document :

Triollet Loïse, Laille Pauline, Saudreau Marc, 2021. COOLTREES : les résultats du programme de recherche ANR.
INRAE, Plante & Cité, 46 p.

Remerciements :

Les membres du consortium COOLTREES : Marc Saudreau, Georges Najjar, Pierre Kastendeuch, Tania Landes, Jerome Ngao, Thierry Améglio, Carole Bastianelli, Karen Lecomte Sylvain Leroux, Elena Bournez, Pauline Laille.

» Sommaire



p. 6-7
Regards croisés

P. 9
BD

p.10
L'ANR COOLTREES
n° 17-CE22-0012

p. 11
L'ANR COOLTREES (2017 - 2021)

p. 13
Une étude de cas, en pleine zone
urbaine

p. 13
Production : une base de données

p. 14 - 15
Production : logiciel de modélisation
3D LASER.T

p. 16
Les suites du projet avec
TIR4sTREEt

p. 17
Exemple : partenariat entre la
recherche et une eurométropole.

P.18
Fiches pour se
donner des repères

p. 19
Fiche n°1 : Avant de commencer,
quelques définitions

p. 20 - 23
Fiche n°2 : Quels déterminants
façonnent l'impact climatique de
l'arbre ?

p. 24
Fiche n° 3 : Arbre ou pelouse pour
rafraîchir, telle est la question

p. 25
Fiche n°4 : L'arboriculture de
précision avec le dendromètre
PépiPIAF

p. 26
Fiche n°5 : Le bilan d'énergie de
l'arbre en 15 minutes

p. 27
Fiche n°6 : La modélisation d'arbres
réels en 3D, pourquoi et comment ?

p.28
Fiche n°7 : L'UTCI, un outil pour
simuler la T°C de confort de l'utilisateur.

p.29
Fiches exemples
de modélisation

p. 30 - 31
Des faits validés dans chaque
modélisation

p. 32- 33
Présentation de la scène de
référence

**p. 34 - 35
Modélisations :
Scène-modèle initiale**

p. 36
Si on enlève les arbres ?

p. 37
Si on fait différentes densités de
plantation ?

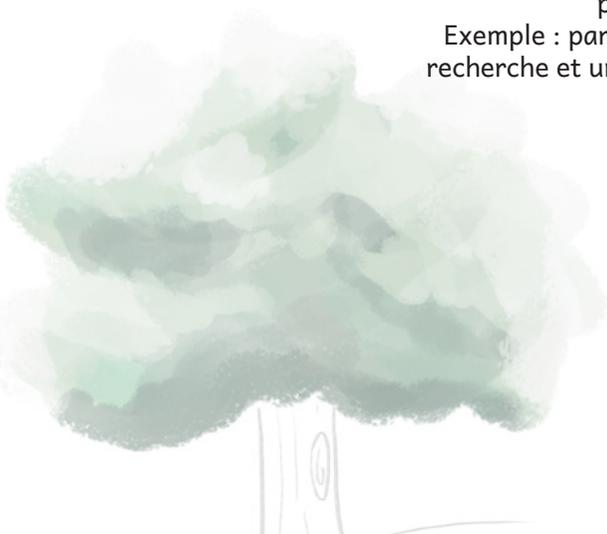
p. 38 - 39
Si on forme les houppiers de
façons différentes ?

p. 40 - 41
Si le LAI varie entre 1 et 13 ?

p. 42 - 43
D'autres aménagements végétalisés
et plus encore !

P. 44 - 45
Conclusion

P. 46 - 47
Bibliographie



» Regards croisés

Marc SAUDREAU,
Chargé de recherche
UMR 574 PIAF
INRAE de Clermont-Ferrand
Porteur du projet COOLTREES



Porteur du projet

“

Face aux changements climatiques à venir, la végétation et les arbres en particulier doivent réintégrer la sphère urbaine et s’y développer sereinement en harmonie avec les attentes des citoyens et les contraintes du milieu. L’objectif est qu’ils puissent contribuer à améliorer les conditions de vie en ville en atténuant les îlots de chaleur urbains. Pour y réussir une meilleure connaissance du fonctionnement des arbres, de leurs interactions avec les éléments qui constituent le paysage urbain, et de la mise en œuvre pratique d’aménagements arborés est primordiale.

Ces questionnements et la volonté de bioclimatologistes et physiologistes des arbres de travailler ce sujet sont à l’origine du projet COOLTREES. Nous avons été rejoints par la Ville de Strasbourg et l’association Plante & Cité, séduits par le projet et conscients de l’importance d’avancer sur cette thématique. Ce projet a été ensuite soumis et soutenu par l’Agence Nationale de la Recherche. Démarré en 2017 et clôturé en 2021, nous visions 2 grands objectifs : documenter la physiologie des arbres urbains et développer un outil de modé-

lisation. Cet outil va permettre de mieux quantifier le rôle des arbres au niveau local et donc leur effet sur le confort thermique des habitants. Aujourd’hui, ce logiciel LASER.T est un outil pour la recherche. À terme, l’objectif est qu’il soit utilisable par les aménageurs des villes.

La recherche suit rarement un tracé prédéfini. Certains objectifs sont atteints, d’autres mériteraient d’être revus ou approfondis. La réussite d’un projet de recherche est également le fruit de rencontres humaines. Le projet COOLTREES n’échappe pas à cette règle, et je tenais à remercier chaleureusement toutes les personnes qui se sont investies à nos côtés tout au long de ces 4 années et qui ont contribué à faire de ce projet une aventure scientifique et humaine enrichissante. Une partie des résultats et échanges issus du projet COOLTREES est restituée dans ce document. Nous avons essayé de rendre la complexité du sujet accessible au plus grand nombre en commençant par une immersion ludique à travers une bande dessinée.

Chargé.e.s de workpackage ou étape du projet



Georges NAJJAR,
Chercheur
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357



Pierre KASTENDEUCH,
Chercheur
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357



Tania LANDES,
Enseignante et chercheuse
INSA de Strasbourg,
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357

Augustin BONNARDOT,
Forestier Arboriste Conseil
CAUE 77



77 Seine-et-Marne
caue
Conseil d'architecture, d'urbanisme
et de l'environnement

“ L’arbre des villes, considéré longtemps comme un arbre « d’ornement » puis « d’agrément » a, en fait, de très nombreux autres atouts pour les citoyens. Il fournit plusieurs services essentiels pour la communauté humaine (production d’oxygène, climatisation, stockage du carbone, limitation de l’érosion et des inondations, biodiversité).

Au milieu du XIXe siècle, lors de la révolution industrielle, le Baron Hausmann aidé d’Adolphe Alphand et de leurs équipes avaient bien compris que les arbres amélioraient la qualité de l’air de la ville et ils ont planté énormément à Paris. Les ingénieurs des « Ponts et Chaussées » ont planté les bords des routes et les aménageurs des villes de France ont suivi l’exemple de Paris. Les plantations étaient réfléchies (emplacement, choix des essences relativement peu nombreuses) et réalisées dans de bonnes conditions avec des acteurs formés assurant une réelle chaîne de compétence indispensable à la réussite des plantations (maître d’ouvrage, maître d’œuvre, entreprises, gestionnaires). Plusieurs décennies plus tard nous avons la chance de bénéficier d’un grand nombre d’arbres centenaires qui offrent tout leur potentiel. Aujourd’hui le « Changement climatique » dont nous observons les premiers effets met les arboristes devant un nouveau défi. Choisir les

essences qui sont adaptées aux nouvelles conditions climatiques que les météorologues et prévisionnistes essaient de nous dessiner.

Le choix des végétaux adaptés aux sites devient de plus en plus nécessaire. La solution préconisée actuellement par le CAUE 77 pour essayer de répondre aux nouvelles conditions climatiques est de mélanger les essences et d’accompagner les arbres avec des strates arbustives et herbacées. Il nous paraît indispensable d’utiliser toute la gamme des végétaux : indigènes, exotiques et variétés. Ainsi, si des végétaux ne supportent pas le nouveau climat ils pourront être remplacés au cas par cas sans bouleversement trop important pour la régulation thermique, pour l’aspect paysager, pour la biodiversité, pour l’absorption de l’eau, le stockage de carbone, pour les finances du maître d’ouvrage. Les plantations monospécifiques de grande ampleur risquent d’être remises en cause. Il s’agit là également d’un bouleversement des pratiques actuelles que nos générations devront esquisser et que nos successeurs affineront à partir de toutes les expériences heureuses et malheureuses que nous aurons mises en place.

”

“

Strasbourg est une ville très arborée grâce à l’héritage de plantations datant de plusieurs siècles et à l’importance accordée aux arbres dans les politiques publiques d’aménagement du territoire depuis plusieurs années. La gestion durable du patrimoine actuel vise à valoriser, à protéger et à surveiller au mieux l’existant, et à offrir un environnement de qualité pour la plantation de nouveaux arbres.

La reconnaissance du rôle de l’arbre urbain et de ses services aux habitant.e.s et usager.e.s constitue la base de l’adoption du plan Canopée par la ville de Strasbourg en 2020, qui prévoit de nombreuses actions. L’une d’entre elles consiste à renforcer les connaissances scientifiques sur l’arbre urbain, et notamment l’influence des arbres sur le climat local, ainsi que leur rôle et adaptation.

L’objectif est à la fois de maintenir le patrimoine arboré existant pour les générations actuelles et futures, mais également planter les arbres remarquables de demain en respectant l’adage « planter le bon arbre, au bon endroit » afin qu’ils puissent, à terme, rendre de nombreux services écosystémiques. C’est dans l’objectif de répondre aux interrogations concernant l’effet et les liens entre les arbres et le climat local que la Ville de Strasbourg souhaite développer ses connaissances dans ce domaine, en collaboration avec l’Université de Strasbourg et l’INRAE.

”

Partenaire du projet

Carole BASTIANELLI,
Adjointe au chef de service des Espaces Verts et de Nature
Ville et Eurométropole de Strasbourg.



Strasbourg.eu
COMMUNAUTÉ URBAINE



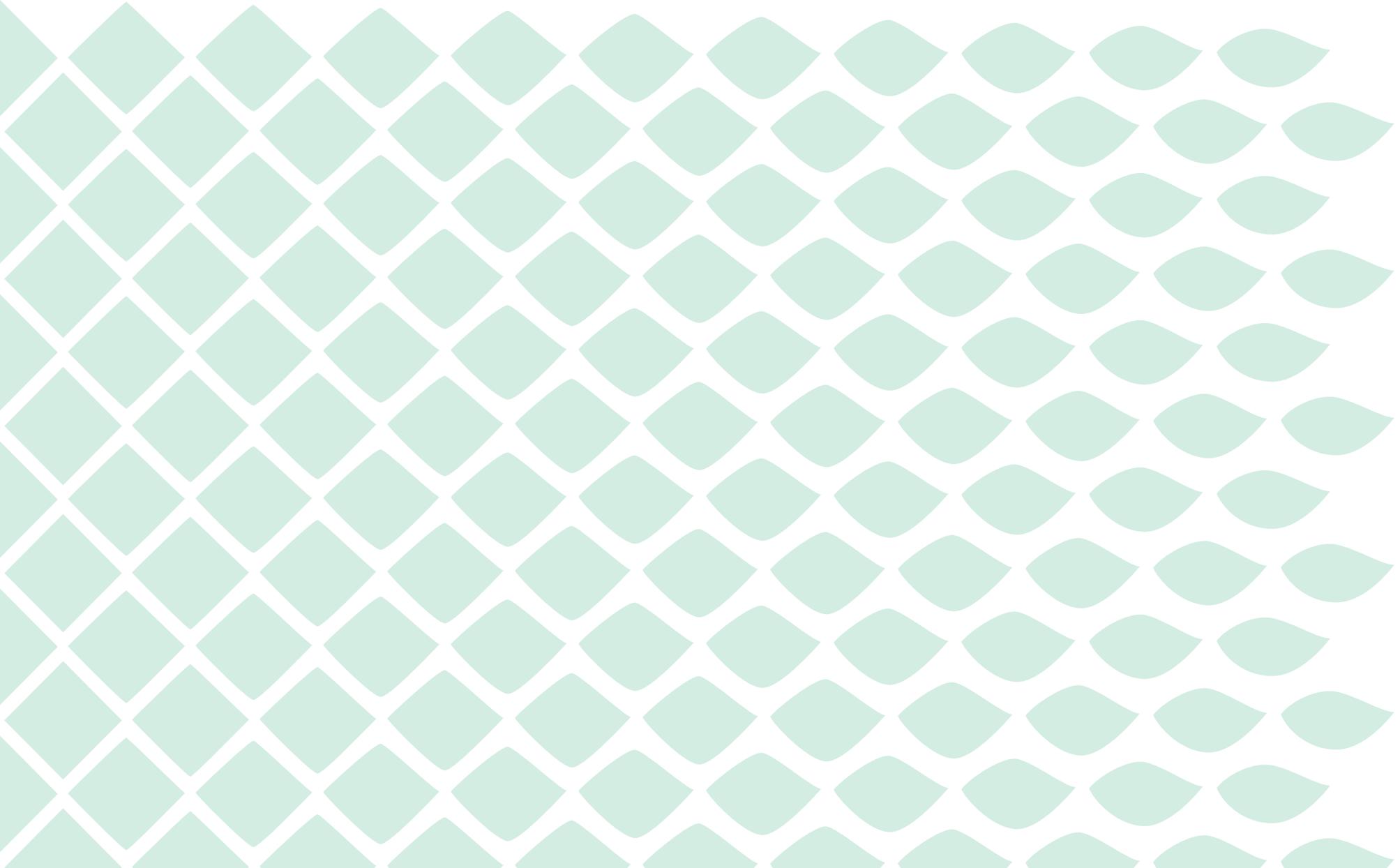
Strasbourg.eu
COMMUNAUTÉ URBAINE

Karen LECOMPTE,
Cheffe de projet
Plan Canopée

Ville et Eurométropole de Strasbourg.

» BD, L'arbre un acteur à part entière

Un dessin vaut mille mots,. C'est avec un arbre en train de quitter sa fosse pour rejoindre tous les acteurs du végétal que vous allez découvrir le contexte dans lequel le projet Cooltrees se positionne.



À LA FIN D'UNE JOURNÉE BIEN REMPLIE,
LES ARBRES DE STRASBOURG DÉBAUCHENT.



**DÉSOLÉ DU
RETARD !!!**

IL ME RESTAIT QUELQUES
DEGRÉS À FAIRE !!



TOUTS LES ACTEURS DU MONDE DU VÉGÉTAL URBAIN SONT LÀ !
L'ESBAR VERT EST LE LIEU PHARE D'ÉCHANGE ENTRE EUX.



ILS Y DISCUTENT LEURS CONNAISSANCES, IDENTIFIENT
LES RÉPONSES QU'ILS ONT ET LEURS BESOINS FUTURS.

LES SCIENTIFIQUES.



IL Y A EU 200 PUBLICATIONS
SCIENTIFIQUES PAR AN ENTRE 1900
ET 2010 SUR LE VÉGÉTAL URBAIN,
C'EST PEU !

LES PROS DE L'AMÉNAGEMENT.



ON SAIT QU'ICI, IL FAUDRAIT TELS
TYPES D'ARBRES. MAIS LESQUELS
ONT CES CARACTÉRISTIQUES ?

LES GESTIONNAIRES TERRAIN.



L'ENTRETIEN EST PRIMORDIAL
POUR MAINTENIR LES EFFETS
BÉNÉFIQUES DES VÉGÉTAUX.

IL FAUT PLANTER, MAIS ON RISQUE
DE MANQUER DE TEMPS.

LES ÉLUS ET LES CITOYENS.



NOUS VOULONS PLUS D'ARBRES
DANS NOS VILLES ! MAIS PAR
OÙ DÉBUTER ? NOUS Y TRAVAILLONS.

ET BAH, TOUT LE
MONDE EST DÉJÀ LÀ !



**SALUT
GEORGES !**



T'AS L'AIR FATIGUÉ,
TU RACONTES QUOI ?

BAH VOUS SAVEZ ... NOTRE ESPÉRANCE DE VIE
EST DIMINUÉE PAR DEUX EN VILLE. JE ME
SENS JUSTE UN PEU FATIGUÉ EN CE MOMENT.



MAIS C'EST FOU CE
QUE LES HUMAINS
TRAVAILLENT DEPUIS 2011 !



LE NOMBRE DE
PUBLICATION
SCIENTIFIQUES A ÉTÉ
MULTIPLIÉ PAR 14 EN 7 ANS.

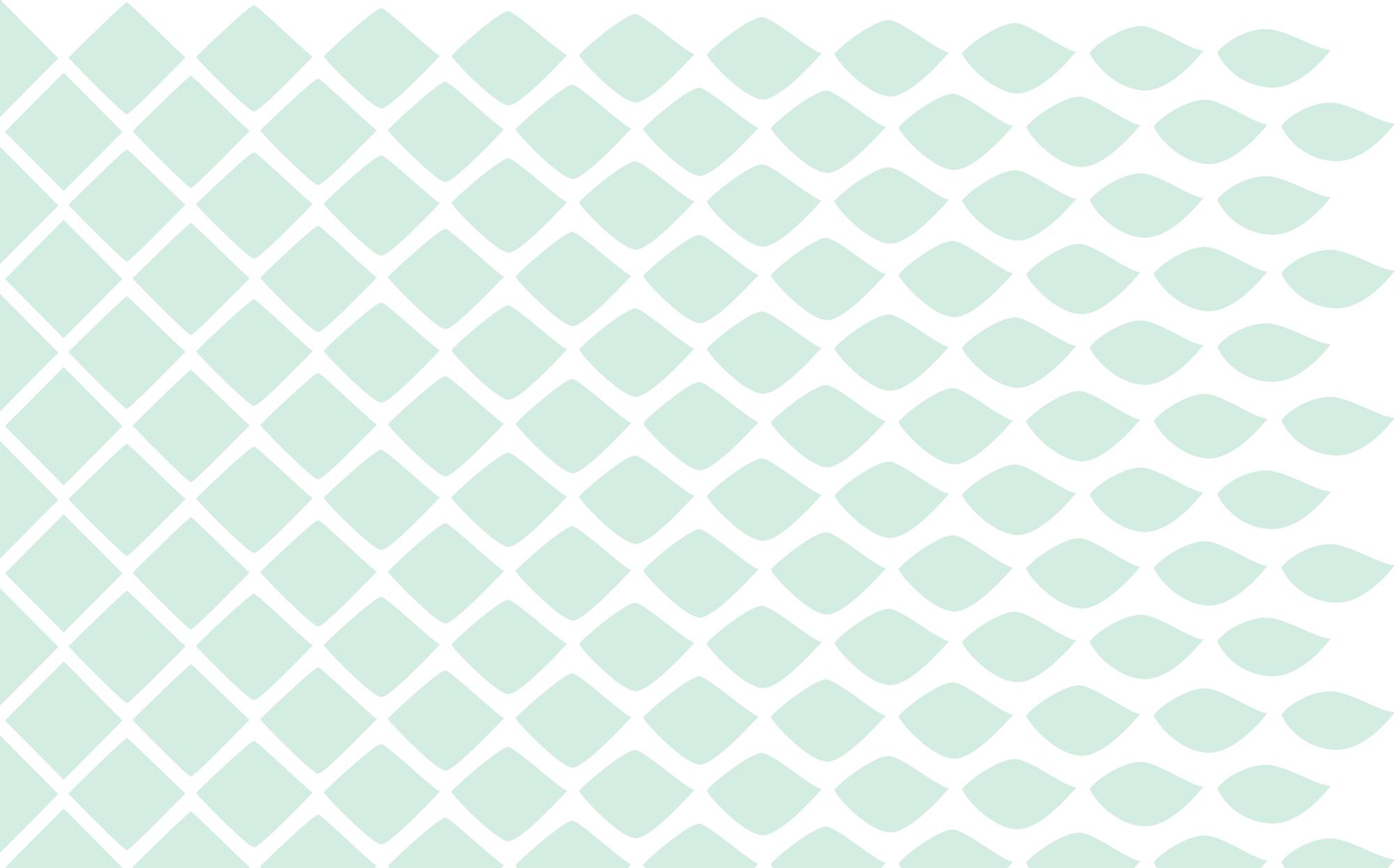
DES PROJETS DE RECHERCHES APPARAISSENT POUR
MIEUX NOUS COMPRENDRE ET AGIR AVEC CHAQUE ACTEUR
POUR AMÉLIORER NOS CONDITIONS DE VIE.



...ET DONC NOS EFFETS BÉNÉFIQUES SUR LA VILLE.
REGARDE, COMME CELUI-CI : COOLTREE.

» L'ANR COOLTREES (2017 - 2021)

Cette partie présente le projet : ses origines, ses partenaires, ses objectifs, l'étude de cas sur laquelle les deux productions de COOLTREES se sont construites, les deux productions, la suite du projet TIR4sTREEt et enfin un zoom sur le déroulé et les bénéfices du partenariat entre recherche et collectivité.





COOLTREES

LE RAFFRAÎCHISSEMENT DES VILLES PAR LES ARBRES

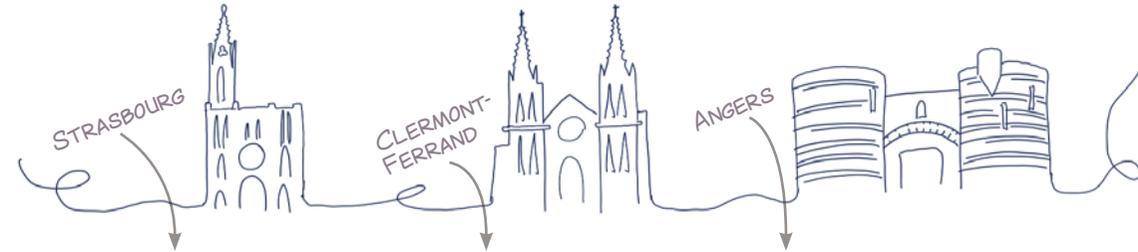
Le contexte du projet

Il existe de nombreuses stratégies complémentaires pour adapter les villes aux changements climatiques. Ces changements impactent la biodiversité, la gestion des eaux de ruissellement et, ce qui nous intéresse dans le cadre de COOLTREES, la fréquence des îlots de chaleur urbains.

Pour rafraîchir les villes, il est possible d'agir de façon curative, c'est-à-dire une fois que le phénomène est installé par vaporisation d'eau par exemple. Mais ces approches sont souvent coûteuses en temps, énergie et budget.

Une autre approche plus préventive consiste à construire un environnement peu propice à l'installation des îlots de chaleur en favorisant les couloirs de vent ou en plantant des arbres. Ces arbres, en plus de rafraîchir par leur ombre et leur évapotranspiration apportent de nombreux autres services de biodiversité, d'amélioration du cadre de vie... Mais ce levier et ses effets locaux sont peu quantifiés et difficiles à anticiper dans cette époque de changement.

Les partenaires du projet



Partenaires scientifique :
ICube, Laboratoire des sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie qui a apporté son expertise sur le microclimat urbain et la modélisation BIM.

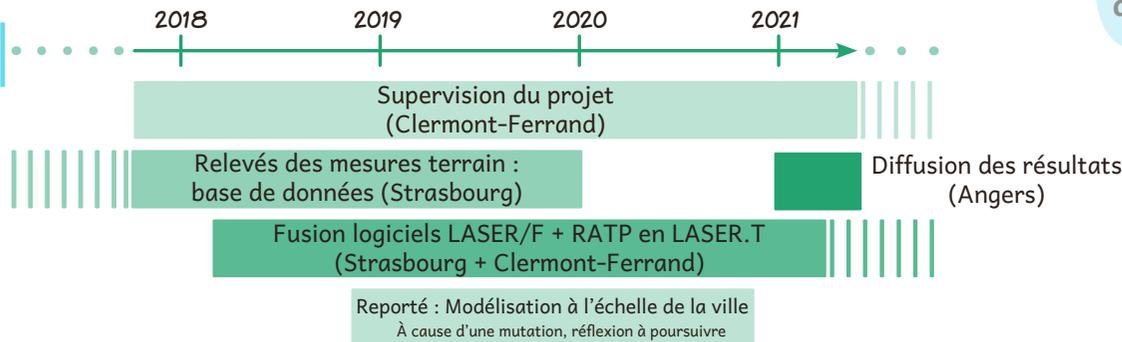
Porteur de projet :
INRAE, UMR PIAF (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant) qui a apporté son expertise sur l'arbre dans son environnement.

Partenaire transfert :
Plante & Cité qui a appuyé et apporté son expertise de la diffusion des résultats auprès des professionnels du végétal en ville.

Partenaire collectivité :
DEPN/SEVN Direction Mobilité, espaces publics et naturels Service espaces verts et de nature qui ont apporté l'accès et protection des zones de mesure.

Financier : Agence nationale de la recherche.

Quatre années de collaboration



UN LOGICIEL DE MODÉLISATION 3D
du microclimat urbain à l'échelle
d'une rue

1 BASE DE DONNÉES
des mesures terrains

16 PERSONNES
avec un total de
11,75 années de travail

6 ARTICLES
SCIENTIFIQUES

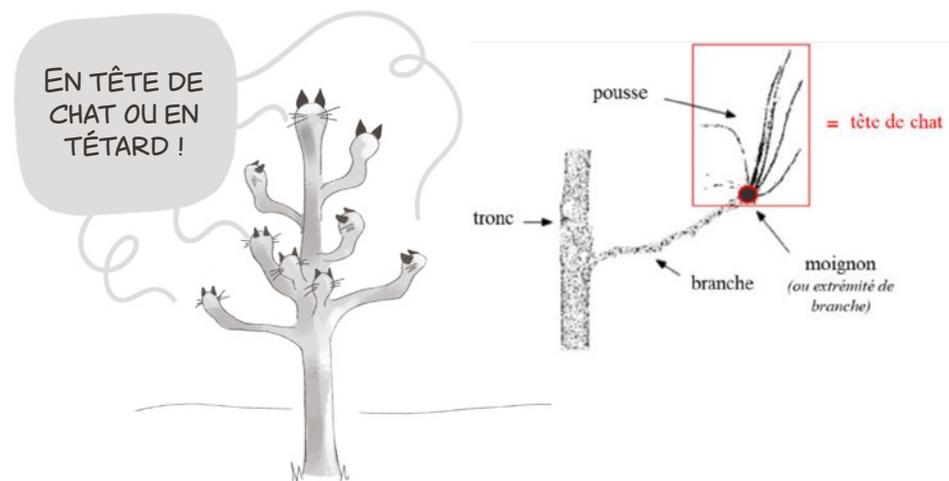
Une étude de cas en centre ville, pour collecter des données

Pourquoi réaliser une étude de cas ?

Le premier intérêt est la nécessité d'avoir des référentiels pour valider et paramétrer un logiciel de modélisation 3D, comme le logiciel LASER.T développé dans le cadre du projet COOLTREES. Or, pour vérifier qu'il fonctionne correctement pour simuler des situations imaginaires, il faut pouvoir dans un premier temps modéliser une situation réelle.

Le second intérêt concerne la recherche fondamentale. L'intérêt porté aux arbres urbains croît de façon exponen-

tielle depuis 1950, c'est une question de recherche relativement jeune. L'objectif final est de mieux comprendre et caractériser la contribution de la végétation au rafraîchissement de la masse d'air environnante, et notamment les processus précis qui régulent ces effets.



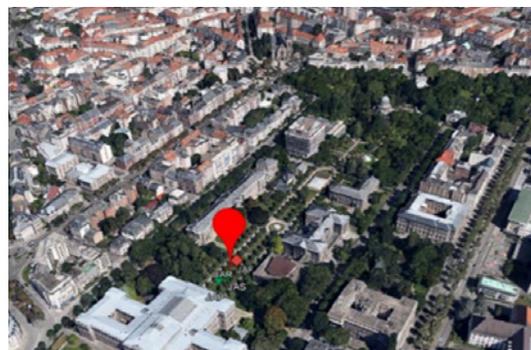
Présentation du lieu étudié : Parc du jardin du Palais Universitaire, au coeur de la ville de Strasbourg.

Le parc se trouve au centre de la ville de Strasbourg, il représente un environnement urbain typique avec des arbres isolés et en groupes contenant différentes espèces souvent entourées de bâtiments. L'occupation des sols est répartie entre 37% de bitume, 28% de végétation pleine terre (pelouses arborées), 27 % de bâtiments et 7 % d'allées sablées. L'espace compte quatre rangées de tilleuls argentés *Tilia tomentosa*. Les arbres sont espacés de 3 m, d'une hauteur moyenne de 9 m et d'une largeur de 6 m de diamètre. Les tilleuls sont conduits en tête de chat. Ils sont entourés de bâtiments d'environ 18 m de hauteur.

La zone d'étude s'est concentrée sur des tilleuls situés au centre du parc afin de renseigner au mieux le comportement de cette essence d'arbre.



Vue aérienne de la zone d'étude. Elle se situe au parc universitaire de l'université de Strasbourg.



Zone d'étude en été, la densité foliaire des arbres est élevée, ce qui est une résultante de la taille réalisée en hiver. Ils ont une forme conique avec un creux en leur coeur.



Crédit photos et schéma : INSA Strasbourg / Elena Bournez

Que trouve-t-on dans cette base de données ?

Ce travail regroupe les données des réponses physiologiques des tilleuls telles que le niveau d'absorption ou de transmission du rayonnement direct du soleil, ou encore les flux réémis par les feuilles. Ces informations sont reliées aux données météorologiques.

Grâce à ces données brutes, il sera possible de modéliser les variations de température de surface, de température ressentie dans tout l'espace étudié et à différents moments du jour ou de l'année. Pour cela, toutes les informations permettant de reconstruire en 2D et 3D les arbres, notamment par techniques lasergramétriques et topographiques ont été relevées sur le site.

Georges Najjar
Chercheur à l'Université de Strasbourg, Equipe TRIO laboratoire Icube.

“ Pour cette base de données, environ 7 personnes à mi-temps ont été mobilisées entre 2014 et 2016. Ce temps de travail s'est découpé entre le relevé des mesures et la maintenance des appareils, tous deux réalisés chaque semaine. Auxquels s'ajoutent mensuellement des campagnes de mesures sur des journées entières, comme par exemple les relevés de la 3D des arbres réalisés à la main et la chambre de transpiration.

Après avoir recueilli toutes ces informations, il faut les traiter et les analyser pour construire la fameuse base de données dont le data paper est en cours de rédaction. Beaucoup de temps et d'énergie pour mieux comprendre nos voisins les arbres urbains. ”

Où la trouver ?

La base de données issue des relevés sera accessible à tous, en ligne, en 2023. Dans le respect des bonnes pratiques de citation et d'utilisation des données. Pour 2022, les chercheurs travaillent sur un «data paper», document de description de la base de données produite lors de ce processus de recherche.



Affaire à suivre ...

Quels outils ont été utilisés pour mesurer ces paramètres ?

Une station a été positionnée au centre du site. Tous les capteurs (voir ci dessous) étaient positionnés sur un mât de 17m de haut (flux de chaleur sensible/latente, rayonnement solaire et infrarouge).

Au total, 6 arbres ont été étudiés dont 1 qui a été baptisé «George's Tree», qui a vu son comportement étudié en détail à travers des mesures de température de feuillage, d'évapotranspiration, de rayonnements reçus / émis, de l'hydrométrie et sa géométrie 3D à chaque saison à l'aide de scanners laser 3D. Concernant les données liées à la météo, certaines ont été mesurées sur place et ensuite complétées par les relevés de météo France.

Le mât avec les capteurs est situé juste derrière la statue.



Liste des capteurs présents sur le site :

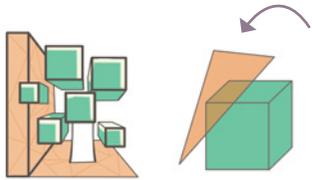
| | |
|---|---|
| Capteurs liés au sol et à sa couverture (ici pelouse) | Bilan-mètre à quatre composantes à 40 cm et radio-thermomètre à 4 m |
| | Bilan-mètre à quatre composantes à 40 cm |
| | Profil de sept thermistances mesurant la température dans le sol |
| | Flux-mètre à 8 cm dans le sol |
| Capteurs liés aux arbres | Chambre à transpiration |
| | Radio-thermomètre proche d'une couronne d'arbre |
| Capteurs sur site pour météo | Flux de sève avec des thermocouples à 1,3 m sur six troncs |
| | Pyranomètre et pyr géomètre à 17 m sur un mat |
| | Anémomètre sonique et analyseur de gaz à 17 m |
| | Anémomètre sonique et analyseur de gaz à 17 m |
| | Globe gris et globe noir au milieu de la scène à 2 m |

Des données très recherchées dans le monde scientifique

Les services écosystémiques rendus par les arbres sont connus mais on ne sait pas les quantifier précisément aujourd'hui. Les bases de données existantes sont parcellaires, c'est-à-dire qu'elles ont seulement l'information sur les bâtiments ou les arbres. Ces bases peuvent aussi être incomplètes et certains aspects comme l'évapotranspiration ne sont pas mesurés. Les bases les moins intéressantes sont celles dont on

ne connaît pas l'origine, certains calculs ne sont pas explicités et on ne sait pas d'où vient l'information.

La base de données COOLTREES offre de nouvelles informations qui pourront servir aux professionnels du végétal en ville pour appuyer et affiner leurs décisions.



LASER.T a pour objectif d'être utile à une grande diversité de professionnels. Aujourd'hui, sa principale utilisation est scientifique. Il permet de mieux comprendre le microclimat urbain et ses liens avec la végétation, notamment les arbres. Mais il peut dans le futur accompagner les professionnels du végétal

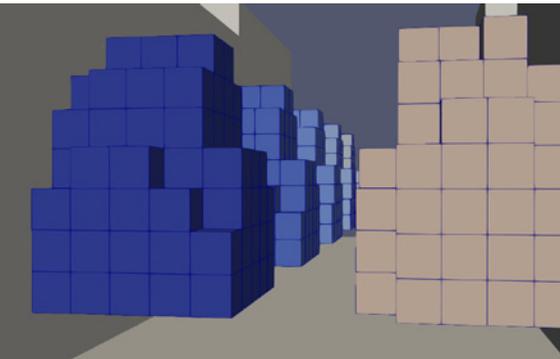
en ville dans la conception et le diagnostic d'aménagements urbains pour permettre de les optimiser et de diminuer les effets d'îlots de chaleur.

Les fonctionnalités de LASER.T

Le logiciel permet de simuler les interactions entre arbres, ville et climat grâce à la modélisation. Son amélioration et l'ajout des arbres a été le principal travail réalisé pendant COOLTREES. Il permet la modélisation 3D d'une scène comme une rue ou une place, avec un grand niveau de détail en déterminant les matériaux, les mobiliers, les plantations...

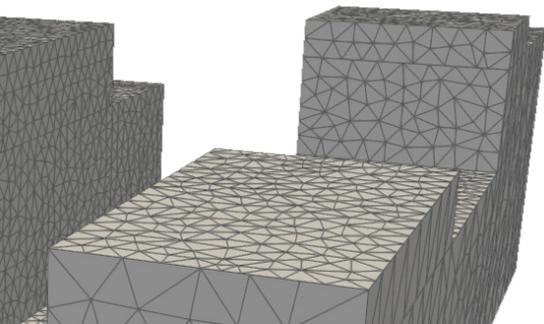
Il calcule ensuite les flux de chaleur et

d'énergie entre les différents éléments, l'évapotranspiration des végétaux, les températures de surface et de confort. Les calculs réalisés dans le logiciel ont été calibrés et validés à partir des données issues de l'étude de cas du jardin de l'université de Strasbourg.

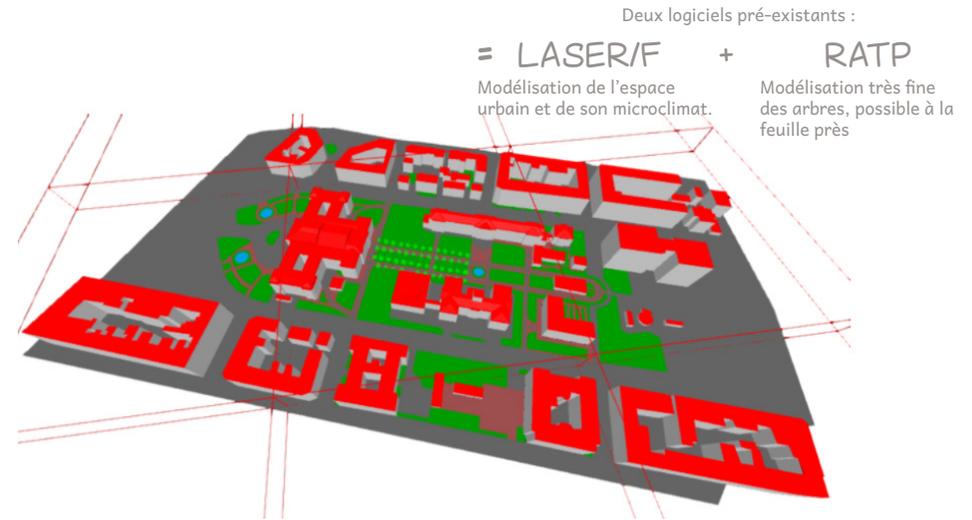


Les arbres sont représentés par des voxels ou cubes. Cela permet de représenter au mieux le volume des houppiers et spatialiser le fonctionnement foliaire. Chaque voxel comporte l'angle foliaire, la surface foliaire et les caractéristiques optiques du feuillage.

À partir de ces données, l'évapotranspiration, la quantité de rayons interceptés, réfléchis, la température de surface au soleil et à l'ombre ... sont calculées.



Les surfaces murs, sols, toits ainsi que le ciel sont représentés par des triangles qui constituent un maillage. Le nombre de triangles et de voxels peut être augmenté pour améliorer la résolution (le niveau de détail) de la modélisation mais cela augmente exponentiellement les temps de calcul.



Reconstruction 3D du quartier du jardin du Palais Universitaire, la maille (quadrillage rouge) est de 250m x 250m. Crédit : INSA / Elena Bournez

Deux logiciels pré-existants :

= LASER/F

Modélisation de l'espace urbain et de son microclimat.

+ RATP

Modélisation très fine des arbres, possible à la feuille près

Ses atouts

- modélisation très fine, jusqu'au microclimat autour des feuilles de l'arbre
- tout le bilan radiatif est modélisé (cf Fiche n°5)
- il est possible de modéliser n'importe quel aménagement

Ses limites

- sens et force du vent imposé
- pas de modélisation 3D des racines
- temps de calcul très long
- pas de modélisation interne des bâtis
- la réserve en eau du sol est fixe tout au long d'une modélisation
- pas de température d'air ambiant

Si l'on dézoome de la scène, voici comment le ciel est modélisé dans le logiciel.



Les données d'entrées, la mécanique et les données en sortie

Le logiciel a besoin des caractéristiques physiques, optiques et thermiques des bâtiments, des arbres, des sols, de la nature des points d'eau (vive, inerte) et de la zone modélisée en 3D. La scène peut être construite avec le logiciel 3D Blender, mais aussi à partir d'images satellites ou de relevés de télédétection dont la plupart des grandes villes disposent aujourd'hui.

Une fois ces informations entrées, le logiciel accomplit différents traitements. Tout d'abord, il construit la modélisation 3D de l'aire d'étude en réalisant le maillage (triangles et voxels). Ensuite, il modélise les flux

d'énergie entre chaque maille. Enfin, une fois tous les flux identifiés, le logiciel va réaliser la simulation avec les données météorologiques.

Le bilan radiatif (cf: Fiche #5), les températures de surface, le *skyview* facteur (cf Fiche #1) sont calculés pour chaque maille. Pour lire ces informations, aujourd'hui est utilisé le logiciel libre de droits : Paraview. À partir de ces informations, d'autres indicateurs peuvent être calculés dans un fichier Excel : l'UTCI (cf fiche n°7), l'évapotranspiration des arbres et/ou du végétal en général ...

Open source, comme la base de données !
Vous pourrez trouver prochainement
le logiciel en open source



Maurin WOUSEN,
Développeur C++ qui a travaillé sur le logiciel LASER.T

“ Le développement de Laser.T s'est fait en deux grandes étapes. D'abord, le portage de LASER/F, du langage informatique Pascal Objet vers le C++, où l'enjeu était d'adapter le programme pour accueillir les arbres. La visibilité de chaque élément à travers la scène fut un passage important de l'écriture, par sa complexité et son caractère essentiel dans la simulation. Nous avons donc LASER/F auquel on est venu ajouter RATP (logiciel spécialisé dans la modélisation de la physiologie de l'arbre). Pour le futur, il serait intéressant par exemple d'optimiser les temps de calculs, mais aussi de parfaire l'expérience utilisateur avec une interface graphique complète. ”

Ce qu'il faut retenir

**UN LOGICIEL DE
MODÉLISATION 3D DU
MICROCLIMAT URBAIN**

ÉCHELLE D'UNE RUE

**3 ENTRÉES
géométrie, météorologie
et matériaux**

**OPEN SOURCE
disponible en ligne**

En comparaison avec les autres logiciels existants : un compromis entre la taille de la zone de test et la précision des modélisations.

LASER.T est très «fin», il peut modéliser la fenêtre ou le balcon d'un bâtiment ainsi qu'un arbre très tortueux. Aucun autre logiciel ne permet d'être aussi précis à petite échelle. Néanmoins, aujourd'hui, il n'est pas possible de réaliser des tests sur des zones très grandes, d'autres logiciels peuvent simuler à plus large échelle ce qui donne une image globale, mais en perdant en précision. Comme par exemple le logiciel TEB (<https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article199>).

Une fenêtre ouverte sur les utilisations possibles du logiciel LASER.T

Aujourd'hui, LASER.T est prévu pour être utilisé par des scientifiques, en partenariat avec les professionnels de terrain. Néanmoins, la mutation de LASER.T en outil opérationnel est initié par un travail sur l'interface graphique et des pistes d'évolution dans le cadre du projet TIR4sTREEt.

Les suites du projet

ANR TIR4sTREEt Thermal InfraRed for Street TREEs (2021 - 2024)

Ce programme de recherche s'inscrit dans la continuité de l'ANR COOLTREES. On y retrouve les mêmes partenaires et compétences, plus l'apport du BIM (modélisation de l'information des bâtiments et de la robotique).

Un des objectifs est de perfectionner LASER.T pour en faire un outil d'aide à la décision pour les acteurs de la fabrique de la ville.

TIR4sTREEt s'appuiera sur le logiciel LASER.T et vise à son amélioration grâce à la réalisation d'une nouvelle campagne d'acquisition terrain dans trois rues à Strasbourg, sur trois essences d'arbres à formes géométriques variées : micocouliers, tilleuls et platanes. Ces mesures seront spatiales (3D), météorologiques, spectrales (thermiques) et écophysiologicals à différents moments de l'année.

Cette base viendra compléter les données acquises dans le cadre de COOLTREES.

Ainsi, deux axes pourront être améliorés dans LASER.T : l'impact physique des bâtiments, celui des arbres ainsi que les interactions entre les deux.

Tania Landes, Enseignante et chercheuse à l'INSA Strasbourg, porteuse du projet TIR4sTREEt, dans l'équipe TRIO du laboratoire Icube

“ Nous cherchons également à développer un nouveau système de prise de mesures mobile, une sorte de drone, pour acquérir des informations plus facilement le long de droites verticales et horizontales, en direction des arbres et des bâtiments. Cette méthode sera appliquée notamment pour la prise des mesures de la température de surface sur les trois espèces d'arbres et sur les bâtiments autour.

Ensuite, ces mesures serviront l'amélioration de LASER.T : les thermographies appliquées aux modèles 3D de la rue et des arbres viendront enrichir les maquettes BIM avec des informations de déperditions énergétiques et en même temps elles permettront de valider les estimations produites par LASER.T à l'échelle des rues et des arbres la composant. »

Voici trois exemples d'arbres qui ont été protégés par l'Eurométropole de Strasbourg avec un box. L'objectif est d'empêcher toute dégradation sur les outils de mesures des scientifiques. Au total, entre 3 et 5 arbres ont été protégés par essences, dans trois rues monospécifiques.

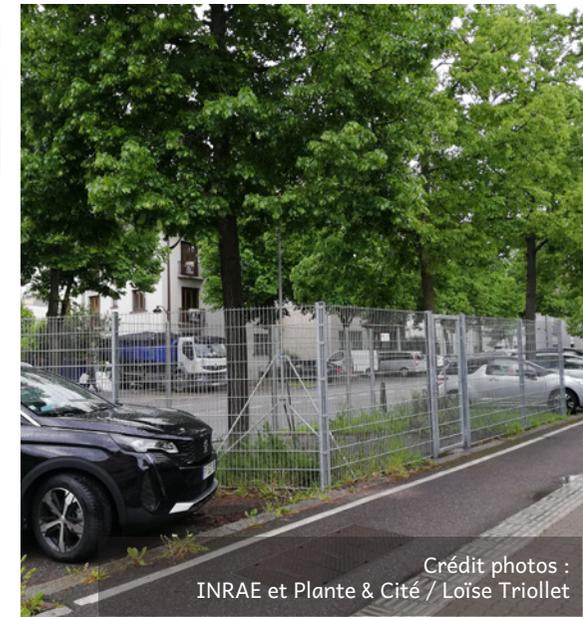


Celtis australis

Platanus sp.



Tilia Cordata



Étudier deux autres essences d'arbres avec notamment des capteurs d'humidité et des capteurs de flux de sèves (disposés par l'INRAE Nancy), permettra d'observer s'il y a différence d'évapotranspiration avec le tilleuil, et si oui, de combien.

Un partenariat entre la recherche et l'Eurométropole de Strasbourg

Que s'est-il passé ?

Un partenariat de longue date

1999 : Début du partenariat

Il débuta par une campagne de mesures sur 23 sites dans les rues de la ville. Grâce à l'opportunité de travaux, des rues étant fermées, il y a moins de risque de dégradation du matériel. L'objectif était de récolter des données réelles pour mieux comprendre les facteurs liés aux îlots de chaleur urbains.

2002 : Campagne de mesure dans une rue

L'idée est de profondément étudier le rôle de la géométrie urbaine. A l'issue de ce travail, Pierre Kastendeuch, chercheur dans l'équipe TRIO de Icube développe le logiciel de modélisation 3D : LASER/F.

2013 -2017 : Mesures terrains sur les arbres du Jardin Universitaire de Strasbourg.

2017 - 2021 : COOLTREES

Il manque l'approche végétale dans le logiciel c'est alors que des spécialistes de l'arbre à l'INRAE de Clermont-Ferrand sont contactés.

2021 : Mise en place d'espace de collecte de mesure terrain dans des arbres de rues

Sur micocouliers platanes et tilleuls pendant 1 an minimum.

2022 - 2025 : Programme de recherche : Tir4Street

Laboratoire de recherche Icube



Georges NAJJAR, Tania LANDES et Pierre KASTENDEUTCH
Chercheurs et chercheuse

“ Au départ, utiliser les rues comme lieu de relevé de données était bloquant à cause des risques de vandalisme. Mais à la suite d'échanges, nous avons ensemble trouvé des solutions pour protéger nos outils et apporter des réponses aux questions de la ville. Et maintenant, d'autres échanges sont en cours pour de potentielles mesures terrains.

Notre collaboration entre nous scientifiques et une collectivité n'est aujourd'hui plus négligeable. Nous espérons qu'elle pourra servir de modèle et lancer d'autres beaux partenariats comme celui-ci. ”

Ville et Eurométropole de Strasbourg



Carole BASTIANELLI et Karen LECOMTE
Service des Espaces verts et de Nature

“ Les agents du service des espaces verts et de nature, experts et gestionnaires arboricoles, constatent depuis quelques années maintenant, un dépérissement croissant de certaines essences à cause de la multiplication des pics de chaleur. Face à ce constat, il semble nécessaire d'étudier le comportement des arbres face à la sécheresse ainsi que leurs pouvoirs rafraîchissants, afin d'adapter au mieux la palette végétale au changement climatique. ”

En tant que collectivité, comment mettre en place un début de partenariat avec des structures scientifiques?

N'hésitez pas à contacter les centres de recherche même situés loin de votre situation géographique.

Une fois votre intérêt exprimé et votre ouverture à ce type de partenariat, vous serez contacté lorsqu'une opportunité verra le jour.

Si vous êtes intéressé dans le cadre de COOLTREES, n'hésitez pas à aller :

--> page n°41.

Le lien s'est consolidé autour de l'Axe 3 du Plan Canopée de la ville de Strasbourg : Recherche et Développement en lien avec l'arbre urbain.

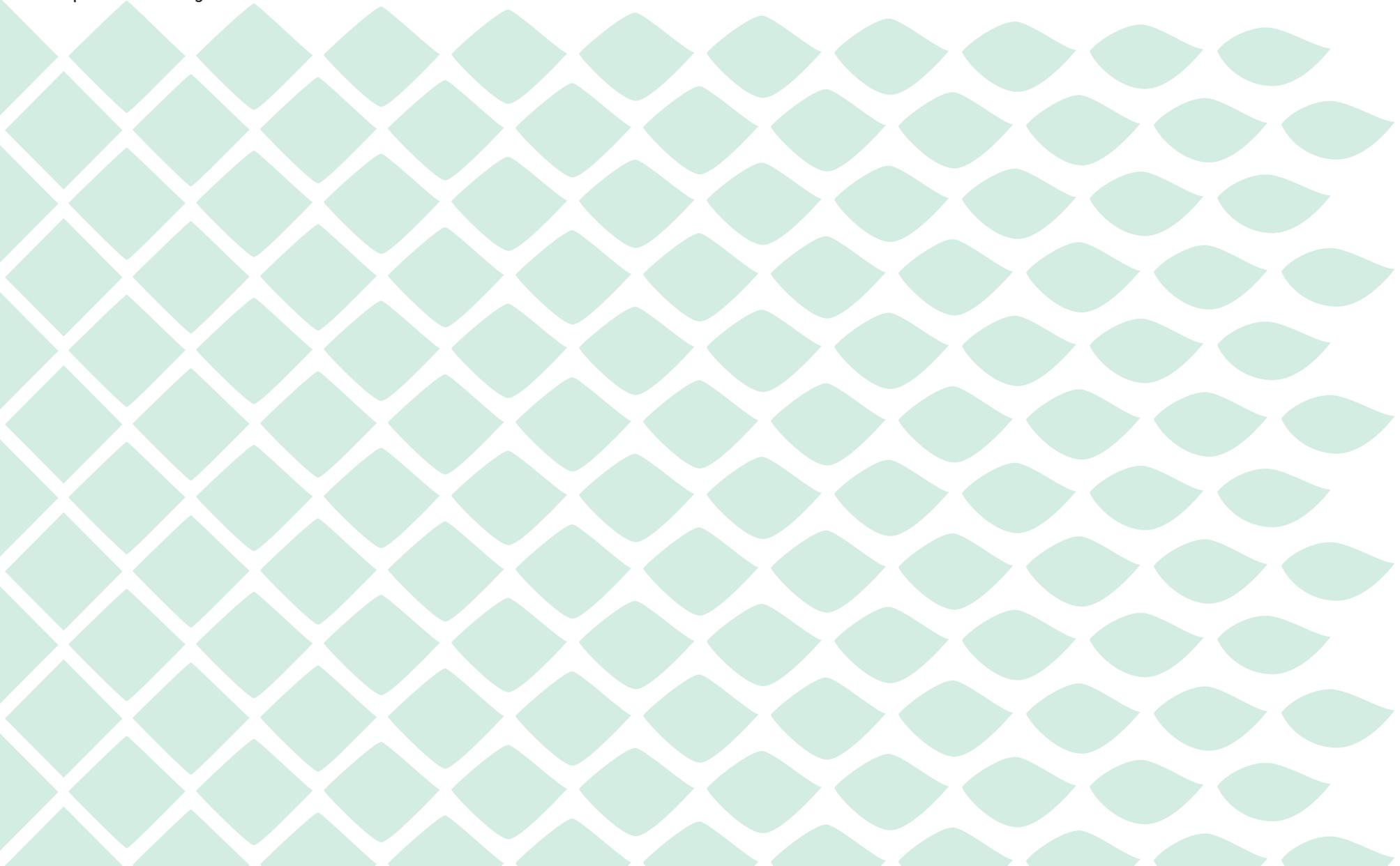
Des bénéfices individuels et partagés

- >> DES ZONES DE MESURES TERRAINS.
- >> DES MOYENS HUMAINS ET MATERIELS POUR LA RÉALISATION DE MESURES.
- >> DES RÉPONSES AUX QUESTIONS POUR L'AMÉNAGEMENT DES VILLES.
- >> MÉDIATION SCIENTIFIQUE AUPRÈS DES CITOYENS ET PROFESSIONNELS.
- >> UN LIEN DIRECT AVEC LA SPHÈRE SCIENTIFIQUE.
- >> UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES SUBVENTIONS.



» Fiches pour se donner des repères

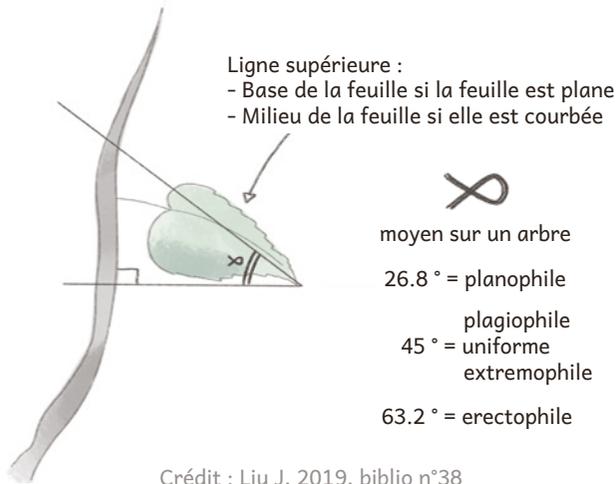
Ces fiches contiennent des informations directement issues de la base de données qui a été produite avant et pendant COOLTREES, du logiciel de modélisation LASER.T, ainsi que d'autres recherches. Ensemble, elles répondent aux questions les plus fréquemment entendues lors de nos entretiens auprès de différents acteurs du végétal en ville tels que des aménageurs, des élus, des techniciens ou des urbanistes.



Fiche n°1 : Avant de commencer, quelques définitions

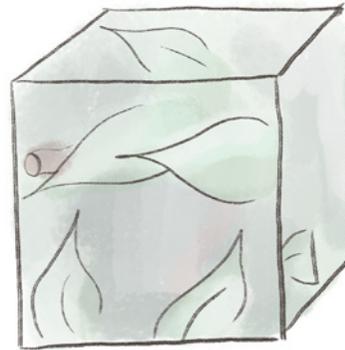
Angles foliaires

Les feuilles vont se positionner avec un certain angle par rapport au rayon du soleil.



LAD : Leaf Area Density Densité foliaire

Il s'agit de la surface foliaire dans un volume donné. Comme si l'on positionnait toutes les feuilles de ce cube côte à côte sur une surface plane.



$$\text{Densité foliaire (m}^2 / \text{m}^3) = \frac{\text{Surface totale de feuilles}}{\text{Volume de la couronne}}$$

LAI : Leaf Area Index Indice de surface foliaire



$$\text{Indice de surface foliaire (m}^2 / \text{m}^2) = \frac{\text{Surface totale de feuilles}}{\text{Surface projetée au sol par le houppier}}$$

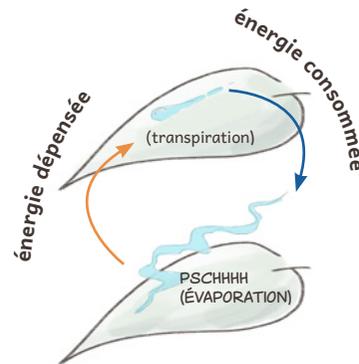
skyview factor (%)

C'est la portion de ciel perçue par l'arbre, par rapport à toute la surface du ciel. Plus les bâtiments sont hauts, moins l'arbre « voit » de ciel.



Chaleur latente (C°)

Chaleur sensible (C°)



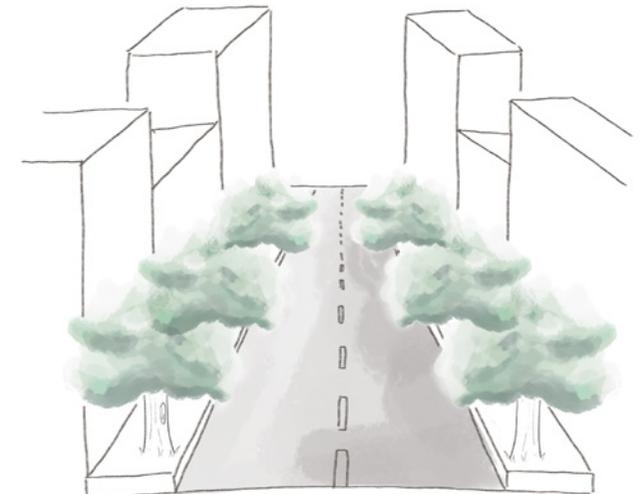
Chaleur émise ou absorbée par un milieu ou un objet, dont la température change en conséquence sans changement de phase.

Chaleur émise ou absorbée lors d'un changement d'état d'un élément, ici l'eau entre sa phase gazeuse et liquide.



Le microclimat

Ensemble des conditions climatiques d'un espace homogène très restreint et isolé de son environnement général.



Fiche n°2 : Quelles caractéristiques des arbres déterminent leur capacité à rafraîchir ?

L'effet rafraîchissant des arbres est principalement déterminé par 3 caractéristiques du houppier. Ces nouvelles connaissances permettent d'optimiser la conception des aménagements urbains végétalisés, mais aussi d'adapter les plans de gestion (renouvellement, conduite, entretien) de manière à maximiser et maintenir le service de rafraîchissement dans le temps.



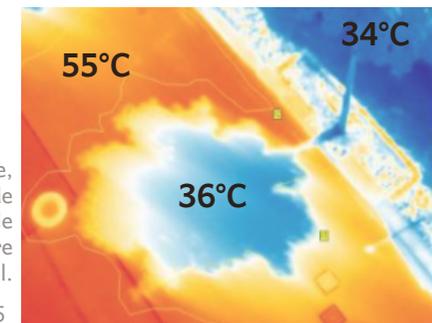
2.1 La forme du houppier des arbres

Dans le houppier, de nombreux facteurs affectent l'impact climatique de l'arbre. Mais de toutes ces caractéristiques seules trois d'entre elles et leurs origines ont un impact significatif.

Densité foliaire (LAD) + 1 pts
= - 5° C de T° de surface

Voici une photo thermique, révélant la franche différence de température de surface entre le sol de la rue à l'ombre de l'arbre et le sol directement au sol.

Crédit : Gillnet et al, 2015



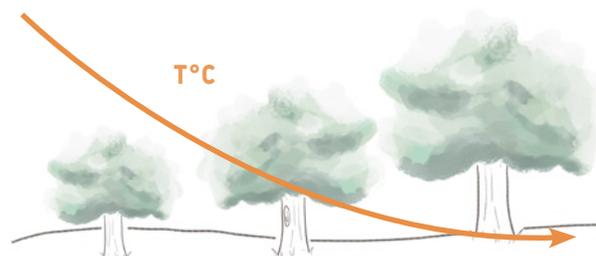
1/ STAR (Silhouette to Total Area Ratio)



Plus la surface du houppier est visible à la lumière par rapport à son volume, plus l'arbre aura un effet sur la température ambiante.

Leviers --> choix de la conduite (le centre peut être creux) ou d'essence.

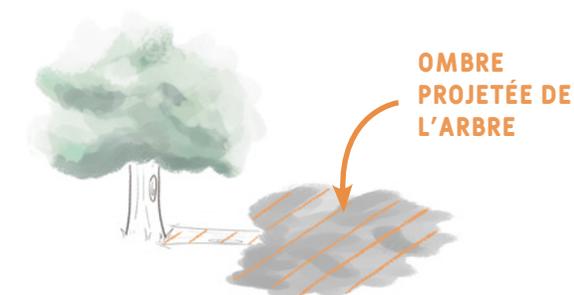
2/ Volume du houppier



Plus le houppier, continu ou discontinu, aura un volume important, plus il aura un effet rafraîchissant. Attention de garder en tête le point 1 : STAR.

Leviers --> utilisation de l'espace disponible, densité de plantation, choix essence, conduite, ...

3/ Ombre portée _ PLA (Projected Leaf Area)



Cette ombre portée est plus ou moins dense en fonction des caractéristiques du feuillage apte à stopper la lumière : densité, couleur, taille des feuilles, angle foliaire...

Leviers --> choix de l'essence, choix de la conduite, ...

2.2_ La couverture foliaire des arbres et la température ambiante

+ 10% de couverture foliaire par les arbres = - 1 °C de T° de l'air

Le renforcement de la présence de l'arbre dans les espaces publics existants doit être pensé à court, moyen et long terme. Il ne s'agit pas seulement de l'arbre, mais également de ses évolutions et de sa pérennité. Cet être vivant, avec ses besoins, doit avoir sa place pour exprimer pleinement ses nombreux atouts, tout en prenant en compte tous les usages des espaces urbains comme majoritairement la voirie. Un levier supplémentaire serait l'apport des citoyens en aménageant les espaces privés qui représentent une partie non négligeable à la couverture foliaire d'une ville.

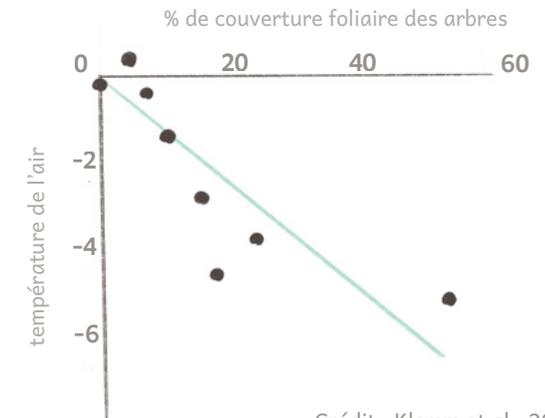
Aujourd'hui, les objectifs des Plans canopée convergent généralement vers 30 % de couverture. Cela revient à augmenter de moitié la moyenne nationale !

MOYENNE NATIONALE DE COUVERTURE ARBORÉE EN VILLE : 19 %

MÉDIANE NATIONALE : 18 %

Crédit : KERMAP, 2020, biblio n°38

Graphique du lien entre température de l'air et le pourcentage de couverture foliaire d'une rue.

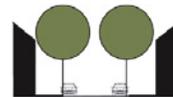


Crédit : Klemm et al., 2015, biblio n°39

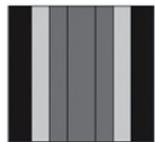
Pour relier ce chiffre à des cas concrets :



Pas de végétation
Couverture foliaire des arbres = zéro



Arbres des deux côtés de la rue
Couverture foliaire des arbres = 24 à 54 %



Arbres des deux côtés de la rue combinés avec les jardins de particuliers
Couverture foliaire des arbres = 7 à 18 %



Crédit : Klemm et al., 2015, biblio n°39

Voici les aménagements qui ont été étudiés pour construire ce chiffre. Les rues sont ici présentées en trois catégories : une sans végétation, deux avec des arbres des deux côtés de la rue, dont une avec des jardins de particuliers. Le chiffre mis en lumière dans cette fiche est le pourcentage de couverture foliaire des arbres. Il est relié à la température de l'air ambiant.

La question est comment augmenter cette couverture foliaire ?

De nombreuses actions contribuent à développer la canopée. Parmi elles : renforcer la place de l'arbre dans les aménagements existants, planter, diversifier les strates de végétation, adapter la conduite et la gestion pour révéler le potentiel des arbres en place.

Un exemple de renforcement de la place de l'arbre par dédensification



La Place de Bretagne à Rennes, à la suite de 2 campagnes de dédensification en 5 ans.

Un arbre sur deux abattus et une couverture foliaire par arbre multipliée par 2,8.

En 2000, cette place a été plantée de 59 Platanes et à partir de 2006, nous pouvions marcher sous une canopée de 2 764 m². Cette plantation étant très dense, deux actions de dédensification ont eu lieu. Et c'est pourtant en dédensifiant, que la ville de Rennes a pu voir la couverture foliaire de la rue presque doubler en atteignant une surface de 4 094 m² en 2017.

Bertrand MARTIN,
Direction des Jardins et de la Biodiversité de Rennes.

“ La plantation très dense en hypercentre a mené à un constat : une trop forte concurrence entre les arbres. En effet, pour la pérennité du patrimoine, il faut conserver un équilibre largeur et hauteur de tronc, or nos arbres commençaient à souffrir de ce déséquilibre. L'action a été réfléchi en fonction de nombreux points, notamment celui de notre sol qui est très favorable à la croissance des arbres, car nous sommes dans une zone alluviale. Cette dé-densification a aussi trouvé sa place dans la politique de réduction de la place de la voiture en ville où la partie Est, qui était un parking, a été transformée en espace de détente et de plantations. À la suite de cette action, nous avons pu observer une prise d'ampleur de la canopée. Ces arbres peuvent maintenant pleinement exprimer leur potentiel génétique. ”

D'autres végétaux qui peuvent apporter un supplément de couvert végétal : la place des arbustes



Voici un exemple d'utilisation d'une strate arborée et arbustive qui a été récompensée lors la Victoire du paysage 2016 dans la Ville de Mons-en-Baroeul, Métropole européenne de Lille pour l'écoquartier du nouveau Mons en Baroeul.

Christine CHASSEGUET
Ingénieur horticole _ Docteur en Ecologie végétale et Présidente des Arbusticulteurs

“ En milieu urbain, à l'instar des arbres et des surfaces herbacées, les arbustes jouent un rôle tout aussi important dans la captation de gaz carbonique, d'autant plus que leur surface foliaire est très souvent dense avec des systèmes de ramification qui occupent l'espace en fonction de leurs caractéristiques écologiques. ”

Dans les milieux « naturels », les arbustes forment, en lisière de forêt, un « manteau » (R. Tüxen 1952) qui protège les arbres forestiers des fortes chaleurs et de la lumière et qui constitue un « écotone », réservoir de biodiversité de par sa structure dense et la production de fleurs et de fruits favorables aux insectes et oiseaux. A ces atouts s'ajoutent bien sûr les aspects paysagers, permettant les étagements visuels de strates et mettant fleurs et fruits à l'échelle du piéton. ”

Crédit : VAL'HOR; Empreinte - Bureau de Paysages Charles Delcourt, 2015

2.3_ L'évapotranspiration, le moteur de la climatisation

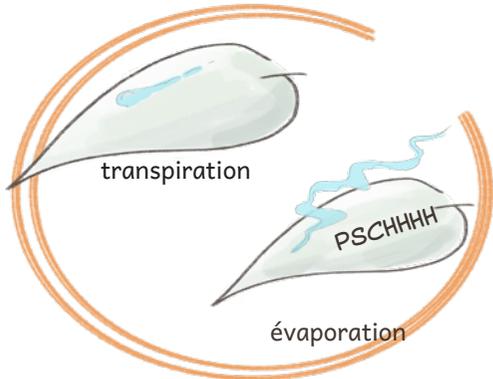
Définition

**ÉVAPOTRANSPIRATION =
TRANSPIRATION + ÉVAPORATION**

c'est un processus endothermique. L'évaporation de l'eau consomme de l'énergie et permet de réguler la température de l'arbre par un dégagement de chaleur dite latente.

Ce phénomène dépend de la réponse fonctionnelle de l'espèce, elle-même modulée par l'état de santé de l'arbre

ÉVAPOTRANSPIRATION



Un phénomène dépendant de l'environnement de l'arbre et de ses réponses physiologiques induites

L'évapotranspiration est une des réponses de la plante à une somme de stimuli extérieurs et aux réponses physiologiques de la plante.

Ces stimuli sont liés au microclimat urbain présent autour de ses feuilles : température, humidité, vent, rayonnements... Ce microclimat en place est impacté par les aménagements humains : densité et spatialisations de la végétation, du bâti, caractéristiques du sol et notamment sa disponibilité en eau.

Moins l'eau est accessible, moins l'évapotranspiration est

possible. Les stomates (les « pores » des feuilles) sont les principaux régulateurs de l'évapotranspiration. La réponse stomatique varie d'une essence à une autre, mais aussi en fonction de la santé de l'arbre et de son état hydrique.

Pour un arbre donné, ce phénomène n'est donc pas un phénomène constant. Elle sera maximale pour un individu correctement développé, en bon état physiologique et en situation de confort hydrique.



Augustin Bonnardot, CAUE 77

“ Parmi tous les atouts de l'arbre pour améliorer la qualité de vie en ville, celui de climatiseur est primordial. Face à des températures qui vont augmenter et s'accroître dans les univers minéraux des villes il faut trouver un moyen d'atténuer ces pics de chaleur.

L'arbre feuillu est un climatiseur idéal, car naturellement, en période de végétation (donc en période chaude) il procure de l'ombre et son évapotranspiration capte une partie de l'énergie thermique, ce qui a pour effet de diminuer la température de quelques degrés sous les frondaisons.

Mieux encore, lorsque la luminosité diminue et que la chaleur baisse (en hiver) l'arbre perd naturellement ses feuilles pour laisser entrer les rayons de soleil dans les appartements situés sous le niveau des cimes. Tout cela fonctionnant parfaitement, naturellement, pendant des décennies et avec un minimum d'entretien.

Consommation d'énergie :

1 GRAMME D'EAU ÉVAPORÉE



600 CALORIES BRÛLÉES

Un tilleul de 9 m de haut et de 6 m de diamètre taillé en tête de chat évapore plus de 2,6 m³ / h d'eau lors d'un premier jour de canicule (cf. fiche modélisation LASER.T)

Crédit : Saudreau M, 2019, biblio n°19

Que fait l'arbre de l'eau qu'il absorbe ?

95 % EST TRANSPIRÉE

ET

5 % EST STOCKÉE

Il faut donc un accès à l'eau le plus régulier possible, pour permettre à l'arbre de ne pas entrer en fonctionnement de protection et réduire le niveau d'évapotranspiration. Sans pour autant «babysitter» l'arbre qui doit subir des stress hydriques pour s'habituer, s'adapter et pouvoir être résilient lors de forts épisodes de sécheresse.

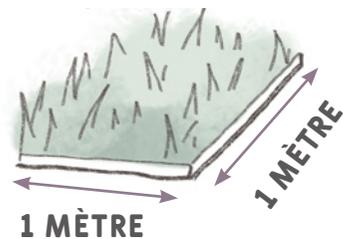
Mais quel équilibre trouver dans le défi de la gestion de l'eau en ville ? (cf. Fiche #4)

Fiche n°3 : Arbre ou pelouse pour rafraîchir, telle est la question.

D'après les mesures réalisées dans le jardin universitaire de Strasbourg, on peut comparer une pelouse tondeuse avec un LAI = 1 avec un tilleul argenté *Tilia Tomentosa*, taillé en «tête de chat» (LAI = 10). À la suite du passage de modélisations dans LASER.T, il a été conclu que :

1 M² DE PELOUSE = 1 M² DE FEUILLES PROJETÉES AU SOL DU TILLEUL EN TERME DE RAFFRAÎCHISSEMENT

IL FAUT BIEN PRENDRE EN COMPTE QUE LA PELOUSE A AUSSI UN VOLUME DE QUELQUES CENTIMÈTRES DE HAUTEUR.



POUR ICI, ON SÉLECTIONNE TOUTES LES FEUILLES AU-DESSUS DU CARRÉ. ET ON LES APPLATIT SUR LE SOL SANS LES BOUGER !



Pourquoi ne pas mettre que de la pelouse ? Cela prend moins d'espace si précieux en ville

Leur besoin différent d'accessibilité à l'eau.

En période de sécheresse, le sol s'assèche plus vite en surface.

La pelouse, très sensible à la sécheresse, limite très rapidement son évapotranspiration. L'arbre qui puise son eau en profondeur, est moins sensible au stress hydrique, évapotranspire plus longtemps et a donc un effet rafraîchissant plus prolongé. Son effet rafraîchissant peut même être continu si l'arbre puise son eau directement dans une nappe phréatique. Mais il faut tenir compte de son temps de développement, beaucoup plus long que celui d'une pelouse.

Pour la création d'îlots de fraîcheur qui restent efficaces même en période de sécheresse, il faut se poser la question de la gestion durable de l'eau pour l'arrosage des espaces verts.

Fiche n°4 : L'arboriculture de précision : le dendromètre PépiPIAF



Dispositif mis en place à Strasbourg
Crédit photo : Thierry Améglio, UMR PIAF,
INRAE de Clermont-Ferrand, entre 2017 et 2021.

Le dendromètre PépiPIAF

Cet appareil de mesure est un système électronique autonome miniaturisé qui permet la mémorisation des variations de diamètre des organes troncs, branches, fruits, racines... sans perturber leur fonctionnement.

Il peut mesurer :

- le manque ou l'excès d'eau
- la bonne reprise de croissance après plantation
- les rythmes de croissance
- les différents stades phénologiques (débourrement, floraison, chute des feuilles...)
- l'état de santé du végétal : parasite foliaire, pratique culturale, résistance au gel ...

> 1 an d'autonomie

Environ 200 jours de stockage de données

Coût unitaire : < 1 000 €

e-PépiPIAF : Récupération en temps réel des données GRAFANA

Des utilisations variées, voici deux exemples très différents :

Pour la recherche

Thierry AMEGLIO, Chercheur à INRAE Clermont Ferrand

« Ce dendromètre a de nombreux intérêts, y compris en recherche appliquée. Des champs de lavande ont été étudiés dans le cadre du programme RECITAL pour déterminer la perte de diamètre induisant de la mortalité en sécheresse extrême. Grâce à ce travail, des perspectives de meilleures gestions et sauvegardes des plantations sont envisageables en temps réel. Ces recherches ont permis également de produire de nouvelles questions de recherches sur la contribution des réserves d'eau des plantes aux mécanismes de survie pendant une sécheresse sévère. »

Sur le terrain : Le Projet bIoTope

<http://www.biotope-project.eu>



Photo de l'aménagement réalisé rue Garibaldi.
Crédit photo : Thierry Améglio, 2021

Dans le cadre du projet «Ville perméable» de Lyon, la rue Garibaldi, qui était une trémie (tunnel sous une intersection) est aujourd'hui transformée en bassin de stockage des eaux de pluies.

À partir de cette infrastructure et dans l'objectif de mieux gérer la santé des arbres en ville, le projet pilote bIoTope (2017-2018) a été mis en place. Le dendromètre informe et déclenche l'arrosage pour atténuer les périodes de canicule subies par les arbres.

Présentation des résultats simplifiés d'un résultat d'utilisation du dendromètre

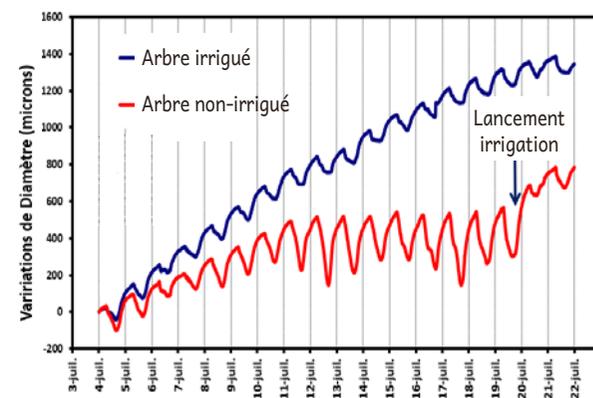
« Les arbres ont un coeur qui bat une fois par jour ! »

C. Lenne « Dans la peau d'un arbre » (Berlin, 2021)

Le jour, lorsque l'absorption d'eau ne compense pas la transpiration de l'arbre, il puise dans ses réserves en eau des cellules de son écorce et le diamètre de ses branches diminue. La nuit la transpiration s'arrête. L'arbre se réhydrate et ses branches retrouvent leur forme.

Ces "pulsations" montrent la croissance journalière de l'arbre et les besoins en eau (cf. graphe). Si elles s'accroissent sans croissance de l'arbre, on en déduit qu'il subit une forte contrainte hydrique. Une fois irrigué, l'arbre reprend sa croissance et transpire sans contrainte, ce qui contribue au rafraîchissement.

Graphique du suivi de deux arbres, l'un irrigué, l'autre non



25

Crédit : Améglio T, 2021

Le lien avec COOLTREES ?

Le logiciel LASER.T modélise la transpiration potentielle d'un arbre, en absence de contrainte hydrique. Le PépiPIAF mesure la contrainte hydrique réelle subie par l'arbre. Le couplage de ces 2 outils doit permettre d'optimiser les services de rafraîchissement.

Fiche n°5 : Le bilan d'énergie de l'arbre

Des effets semblables à ceux d'un parasol et d'un panneau solaire combinés

L'arbre permet de réduire les températures de surface des objets aux alentours en stoppant le rayonnement net entre le soleil les bâtiments et les sols. D'une pierre deux coups, l'arbre agit sur le bilan conductif en stoppant les rayonnements car il interrompt le stockage d'énergie et donc la création d'îlots de chaleur. L'arbre agit aussi sur le

bilan convectif en absorbant et en rejetant de la chaleur sensible. Grâce à son évapotranspiration, il fait diminuer la chaleur ambiante en créant un flux de chaleur latente.

L'arbre a une action très complète sur le bilan d'énergie. À plus large échelle, il peut même agir sur l'énergie anthropique en régulant la température des villes et en diminuant les besoins en climatiseurs par exemple.



Mieux l'on comprend ce qu'il se passe, plus nos modélisations seront justes et mieux nous pourrons agir

Tous ces flux sont représentés dans le logiciel LASER.T et calibrés à partir de données de terrain. Nous pouvons considérer que le microclimat urbain y est très bien représenté.

Quels éléments sont pris en compte lors d'un bilan d'énergie ?

$$RN + A = S + LE + G + \Delta S$$

Bilan radiatif

Énergies qui viennent du soleil et des activités humaines.

RN Rayonnement Net :
Flux direct
Diffus atmosphérique
Réfléchi visible
Albedo
Infra rouge

A Energie anthropique
(climatiseurs, chauffage, réseaux ...)

Bilan convectif

Flux liés au vent et à des phénomènes biologiques tel que l'évapotranspiration.

S Flux de chaleur Sensible

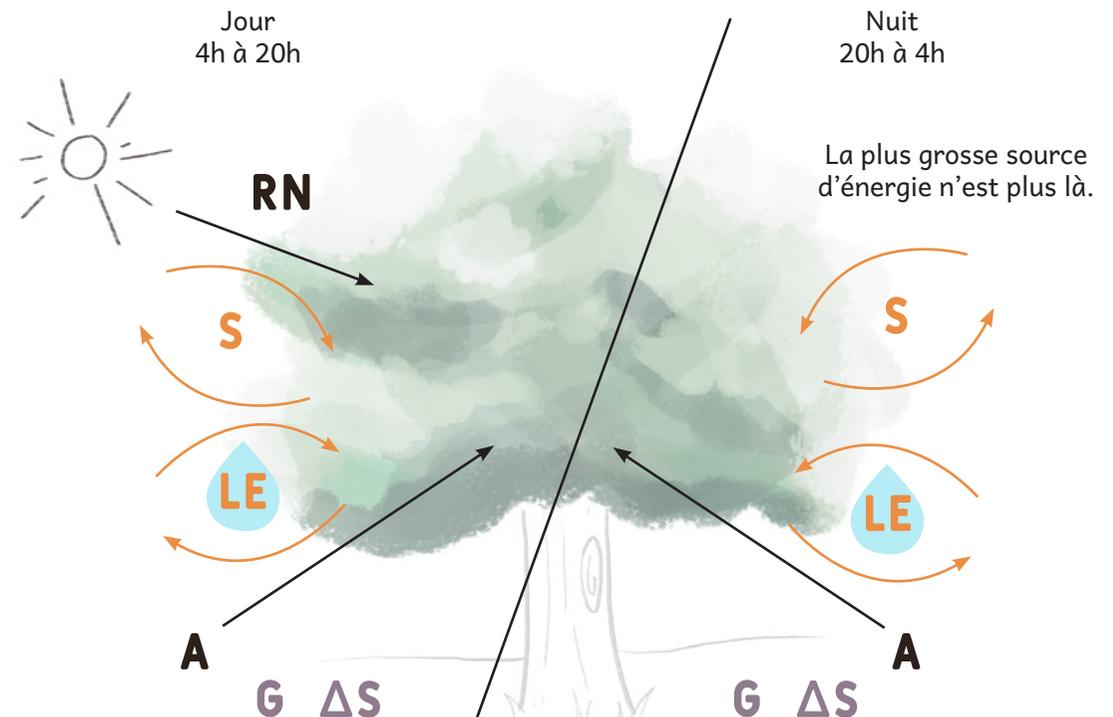
LE Flux de chaleur Latente
(cf. Fiche # 2,3)

Bilan conductif

Dans les matériaux du sol, des murs et tout autre objet de la scène.

G Flux de conductivité, comment l'énergie est transmise entre les éléments.

ΔS Variation de l'énergie stockée dans les éléments.



Fiche n°6 : La modélisation d'arbres réels en 3D, pourquoi et comment ?

Pour que la science puisse répondre aux questions du terrain

L'intérêt est de mieux connaître et comprendre les arbres urbains. En effet, ils suscitent de nombreuses questions quant à leur développement, leurs structures racinaires, leurs lieux d'implantation, leur entretien et maintenance pour leur permettre d'être en bonne santé et d'exprimer au mieux leurs effets de rafraîchissement et autres services écosystémiques que l'on souhaite également mieux comprendre.

Un arbre en 3D, pourquoi ?

Un arbre peut être représenté de nombreuses manières. Son tronc peut être un cylindre, une ligne, des points. Son feuillage peut être une enveloppe, chaque feuille représentée ou encore des «voxels», soit des cubes positionnés les uns à côté des autres.

Pour choisir quelle forme utiliser, il faut identifier l'objectif de la modélisation, son échelle, les capacités de calculs mathématiques disponibles.

Comment construire un arbre 3D, scientifiquement rigoureux, pour le logiciel de modélisation LASER.T ? Crédit : Bournez E, 2018, biblio n°7

Voici les différentes étapes de construction d'un arbre en 3D. Différentes méthodes ont été testées et comparées par Elena Bournez lors de sa thèse, les meilleures sont illustrées ci-dessous :

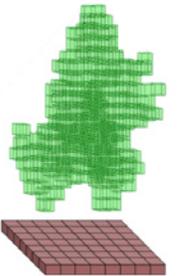
L'objet dont on souhaite cartographier la 3D, ici un arbre, est positionné entre des stations LIDAR. Ces appareils topographiques envoient des lasers. S'ils rencontrent l'objet, ils retournent vers la station. Celle-ci note un point dans l'espace en fonction du temps de réception, qui équivaut à une distance parcourue.



Plant Scan 3D
Utilisation de la technique DMst, c'est-à-dire de la « distance minimum spanning tree ». L'algorithme associe les points les plus proches ensemble pour recréer la structure de l'arbre à partir du nuage de points.



Reconstruction du feuillage
pousse par pousse puis, placement de la maquette dans une grille pour obtenir un arbre en voxel, utilisable par RATP et donc aujourd'hui par LASER.T



Méthodes de collecte des informations :

- **lasergrammétrie : LIDAR**
- photogrammétrie (images 2D vers la 3D)
- digitalisation électromagnétique (Utilisation d'un champ électromagnétique créé par une grosse bobine pour cartographier l'objet)

Algorithmes de reconstruction des branches à partir du nuage :

- Tree Architecture --> développer en projet de fin d'étude
- **Plant Scan 3D**
- Simple Tree

Algorithme de reconstruction du feuillage :

- Tree Crown
- PATH model concave
- PATH model convexe

Mesures terrains :

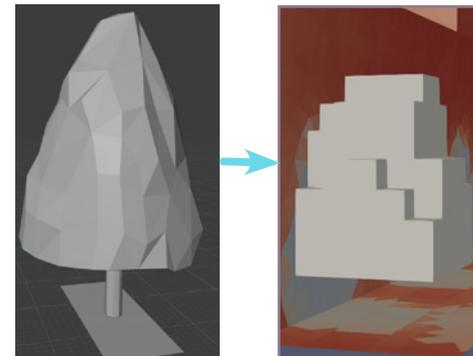
- **mesures allométriques + algorithme** (cf. Fiche #1)

Elena Bournez, doctorante à l'INSA Strasbourg lors du projet COOLTREES
PRIX JEAN KEPLER pour sa thèse et Prix du meilleur Poster en 2016 et 2017

“ L'arbre est un être d'une remarquable complexité. Sa modélisation fut un défi en tant que topographe plus habituée aux objets minéraux inertes. Actuellement Géomètre maître d'œuvre, je travaille sur des projets où il est nécessaire de montrer aux maîtres d'ouvrage les services écosystémiques du végétal en ville et notamment leur intérêt pour réduire les îlots de chaleur urbains malgré la complexité de leur réintroduction. L'utilisation d'un modèle micro-climatique tel que LASER.T serait la solution. D'où l'intérêt de continuer les recherches scientifiques sur la modélisation 3D du végétal pour une utilisation dans ce type de modèle ! ”

Une méthode plus rapide pour tester des aménagements ?

Dans le cadre des modélisations exemples présentées plus loin dans ce document, une méthode plus rapide a été utilisée. Grâce au logiciel de création 3D Blender, il est possible de créer un arbre en s'appuyant sur des hauteurs, largeurs issues de bibliographie. Le degré de précision est suffisant si l'objectif est d'avoir une idée générale de l'impact du végétal sur le microclimat de la rue.



Fiche n°7 : L'UTCI, la T°C de confort de l'utilisateur

Un indicateur plus proche des usagers, cibles de l'effet rafraîchissant des arbres

Les effets rafraîchissants de l'arbre impactent les températures de surface et la température ressentie. Un des objectifs d'adaptation au changement climatique est le bien-être de l'utilisateur dans l'espace urbain, c'est pour cela que pour représenter au mieux l'effet bénéfique de l'arbre, un indice de confort est calculé. Il existe différentes méthodes de calcul de l'indice de confort. Dans le cadre de COOLTREES et du logiciel LASER.T, c'est l'UTCI qui est utilisé en raison du paramétrage du logiciel et des données accessibles grâce aux simulations.

UTCI
Universal Thermal Confort Index

Un calcul complexe, où beaucoup de variables entrent en jeu

L'indice se distingue des autres méthodes par le détail appliqué à la modélisation de l'influence des facteurs liés à l'humain. Il faut prendre en compte que l'acclimatation des humains aux fortes chaleurs et l'adaptation n'est pas encore considéré.

Certaines variables sont liées au microclimat



Humidité, vent, quantité de rayonnements perçus, température de l'air, radiation, pression de l'air

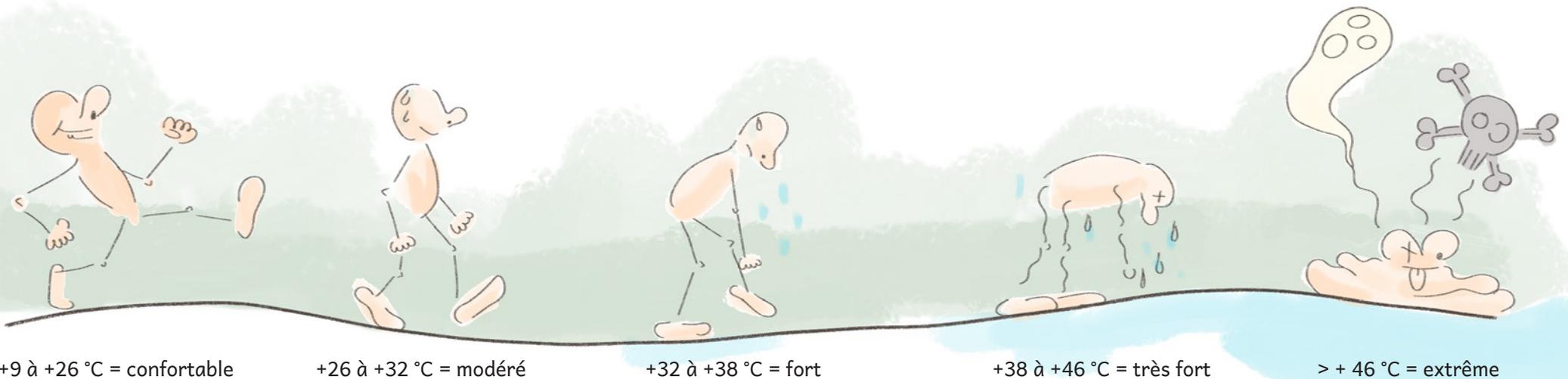
D'autres sont liées à l'utilisateur de l'espace



Age, métabolisme, caractéristiques des vêtements (couleur, formes, matière), temps d'exposition, transpiration

...

Une échelle de comparaison internationale Crédit : Blazejczyk K, 2017, biblio n°35





Pierre KASTENDEUCH,
Chercheur dans l'équipe Trio du laboratoire Icube.
Créateur de LASER/F au début des années 2000.

Historique technique et développements

“ Le projet LASER/F est né au cours d'une campagne expérimentale de climatologie urbaine réalisée pour le projet RECLUS en 2002 et qui avait pour objectif (entre autre) d'équiper un canyon urbain strasbourgeois à l'aide de capteurs pour y mesurer les différents flux de chaleur.

L'un des objectifs consistait notamment à évaluer tous les échanges radiatifs se produisant dans ce canyon. Très vite la question s'est posée de savoir s'il existait une possibilité de modéliser ces échanges au moyen d'algorithmes numériques existants, ce qui a conduit à la création d'une première ébauche informatique appelée SCEM (pour Surface City Energy Model).

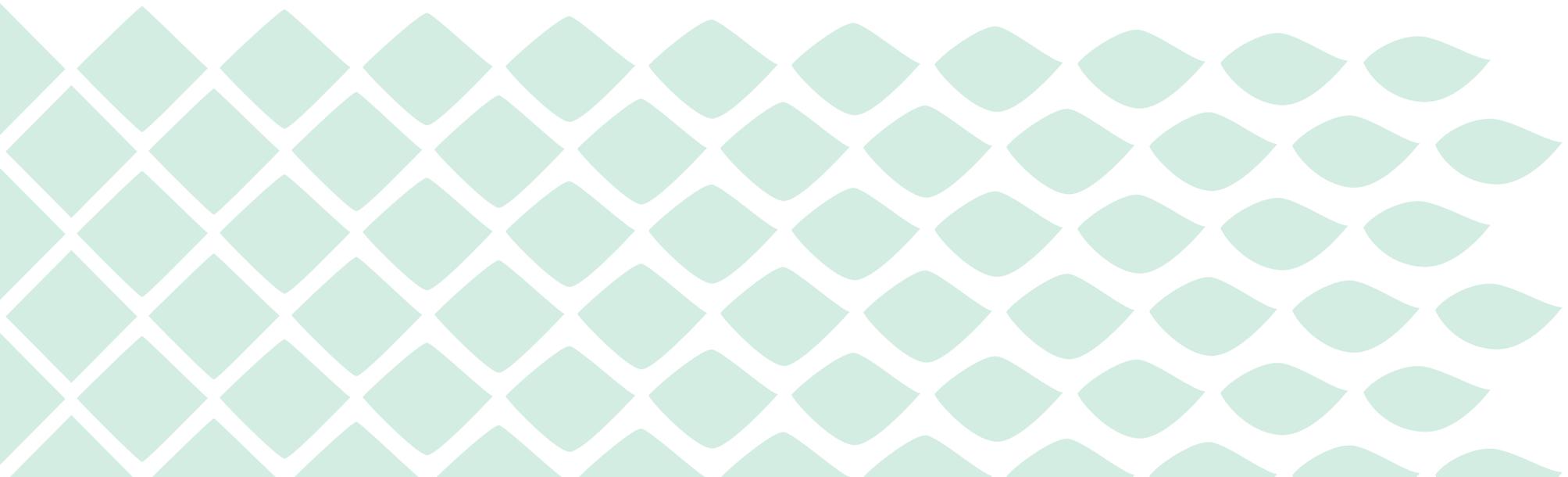
Après plusieurs années de développement et une modification des objectifs initiaux, ce modèle est devenu LASER/F (Latent Sensible Radiation Fluxes). LASER/F a hérité de SCEM la capacité à calculer les échanges radiatifs

dans un environnement en « vraie 3D » et il lui rajoute le traitement de l'ensemble des flux de surface et les échanges sol-atmosphère, ce qui en fait un schéma de surface complet, applicable en milieu urbain et à la campagne. Au départ le logiciel a été conçu pour être utilisé sur les plateformes de travail PC-WINDOWS, en utilisant un langage de programmation simple (le Qbasic de Microsoft). Mais très vite (dès avril 2003), les limites du Qbasic se sont faites sentir et tout le code a été réécrit à l'aide d'un langage plus puissant et plus évolué : le Pascal Objet (Delphi de Borland).

En janvier 2005 les composants GLScene (une bibliothèque graphique 3D Open Source) ont été utilisés pour améliorer le rendu graphique. En 2012 le code a été parallélisé pour exploiter la puissance des ordinateurs devenus multi-cœurs. La version actuelle de LASER/F est écrite en Free Pascal (logiciel libre).

» Fiches exemple de modélisation

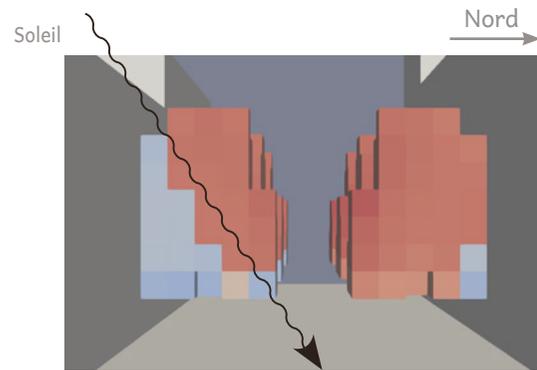
Avant d'aller explorer ces fiches, il faut avoir en tête les limites actuelles du logiciel, elles sont présentées à la page 12 et 13 et que ces modélisations ne sont que des illustrations. Elles permettent de montrer des utilisations possibles du logiciel LASER.T et un petit éventail des résultats qu'il permet d'obtenir.



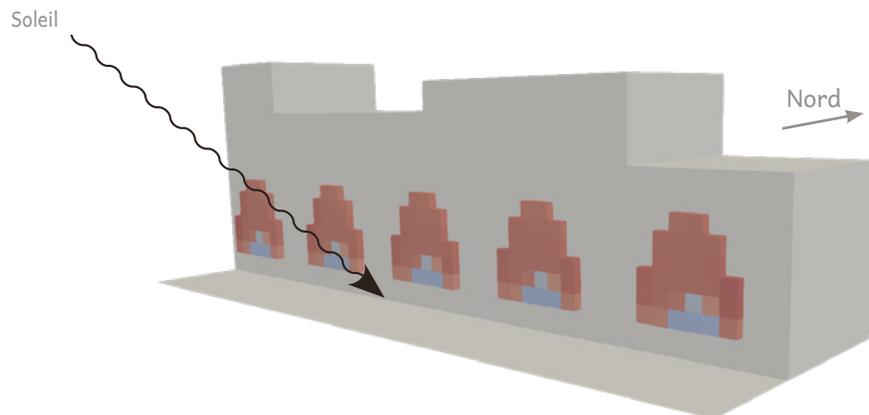
Les premiers enseignements tirés de LASER.T

Le feuillage est une véritable carapace absorbante

On voit que les arbres stoppent les rayonnements et donc la chaleur car les voxels (cubes) les plus chauds sont les premiers à rencontrer les rayons du soleil. Alors que les voxels opposés à ces rayons arborent une belle couleur bleue, synonyme de faible température. Que ce soit sur la longueur de la rue ou des deux côtés de celle-ci. Et cela sans stocker une once d'énergie. Une efficacité encore inégalée !



Coupe dans le milieu du houppier à 13h.

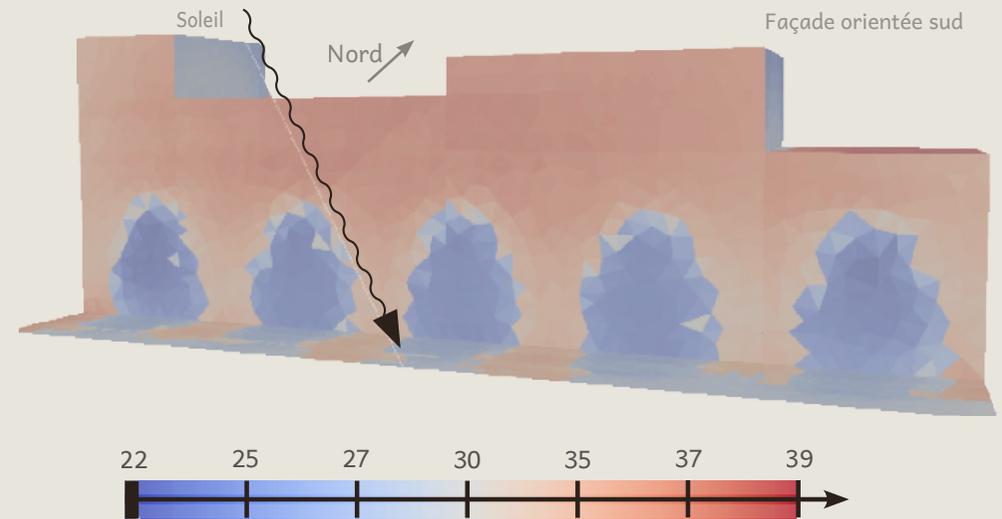


Coupe longitudinale d'un alignement situé sur un trottoir orienté sud.

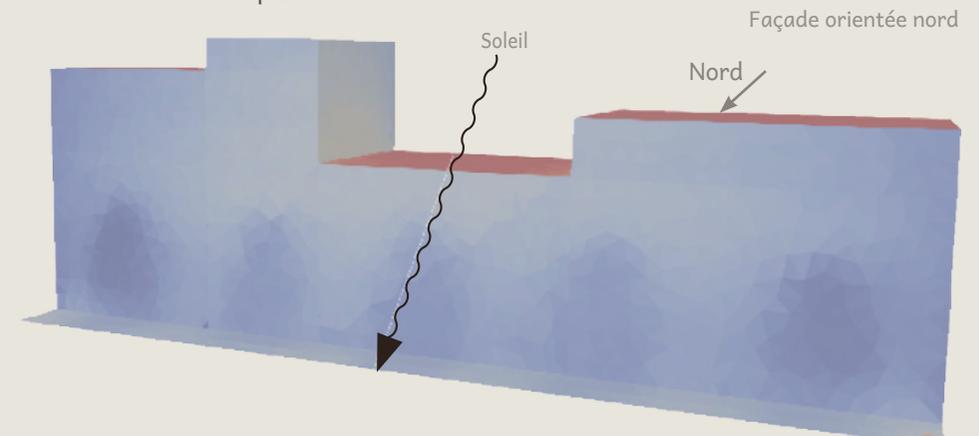


Température des surfaces des feuilles en °C

Voici une moitié de rue qui a été coupée dans la longueur, nous ne percevons que les températures de surface des façades des bâtiments. Les arbres ne sont pas visibles pour permettre une meilleure lisibilité.



Température des surfaces des feuilles en °C

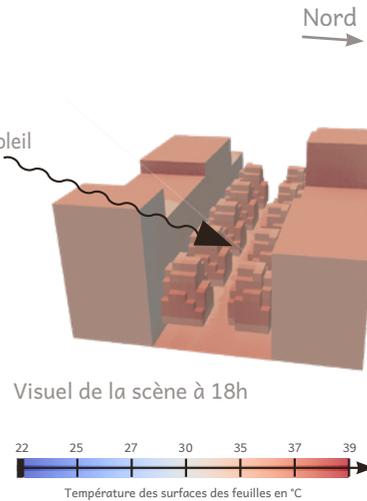


Des arbres imprimés sur les murs au soleil et à l'ombre

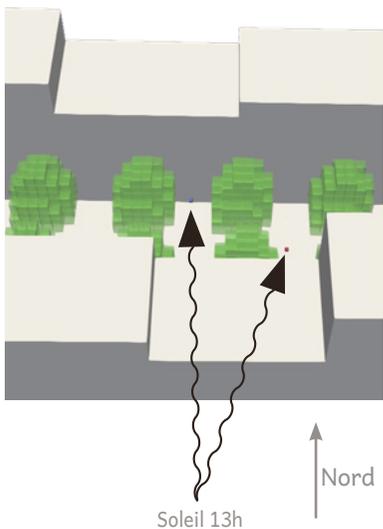
LASER.T nous permet de bien visualiser l'effet rafraîchissant des arbres grâce à la projection de leur ombre sur les murs. La différence de température est frappante sur la face exposée au soleil. Mais nous pouvons aussi voir un effet de quelques degrés sur la face des murs non exposée au soleil. Cela s'explique par le rayonnement diffus, qui est aussi intercepté par les arbres. LASER.T nous permet de le voir en un coup d'oeil !

Des températures qui s'harmonisent

Dès le début de journée, il existe de fortes différences entre les températures des arbres, des toitures et du sol de la rue. Cette différence est accentuée jusqu'à son pic en milieu de journée. À partir de ce moment, elles vont tendre à s'harmoniser jusqu'à ce que toute la scène présente presque la même température sauf pour les arbres qui restent plus froids.



La température de confort à 13h, les arbres ne compensent plus



Lors de chaque modélisation à 13h, l'UTCI est très haut sur le trottoir orienté sud, haut au milieu de la rue et le trottoir orienté nord. Cela s'explique par le rayonnement du soleil qui percute directement les capteurs pointés par les flèches ci-contre. Lors d'une scène il y a donc de fortes différences entre les différents UTCI. Ce qui sera mis en lumière est la différence entre chaque scène sur l'UTCI minimum relevé.

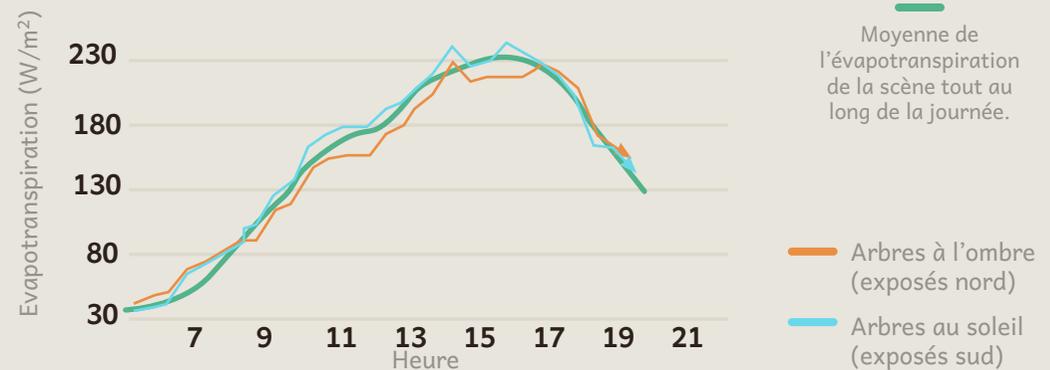
À noter que l'UTCI sur le trottoir orienté nord, qui est presque toute la journée à l'ombre ne varie presque pas au cours de la journée, peu importe les scènes modélisées.

L'évapotranspiration au cours de la journée

L'évapotranspiration la plus forte est mesurée en milieu d'après-midi. En effet, le matin l'arbre est peu soumis au rayonnement direct, ce qui déclenche un début d'évapotranspiration. À 13h, les rayonnements sont les plus forts, l'évapotranspiration est forte mais limitée par l'arbre pour se protéger. Et en fin de journée, les rayonnements sont plus faibles mais la température ambiante est élevée, la protection de l'arbre s'abaisse et l'évapotranspiration atteint son maximum de la journée.

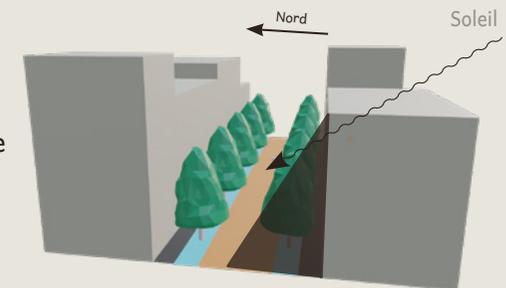
L'arbre a un impact sur le rafraîchissement de par son évapotranspiration croissante au cours de la journée.

Évapotranspiration moyenne au court de la journée dans la scène de référence.



L'évapotranspiration impactée par le rayonnement direct

Les arbres situés à l'ombre des bâtiments vont avoir toute la journée, une évapotranspiration inférieure aux arbres de l'autre côté de la rue, qui sont en plein soleil toute la journée. C'est un phénomène qui dépend du rayonnement direct perçu par l'arbre.



La scène de référence, votre boussole pour ces fiches

Une boussole à laquelle vous reporter pour la lecture des fiches exemples

Cette scène représente une rue canyon typique, c'est-à-dire une voie urbaine dont l'encaissement entre des bâtiments provoque des difficultés en matière d'environnement ou de radiocommunication. À partir de cette scène de référence, pour chacune des fiches exemples suivantes, un seul facteur a été modifié. Ainsi, les différences de température de surface, de température ressentie et d'évapotranspiration sont issues de la comparaison des résultats des modélisations réalisées par rapport aux données de cette scène référence.

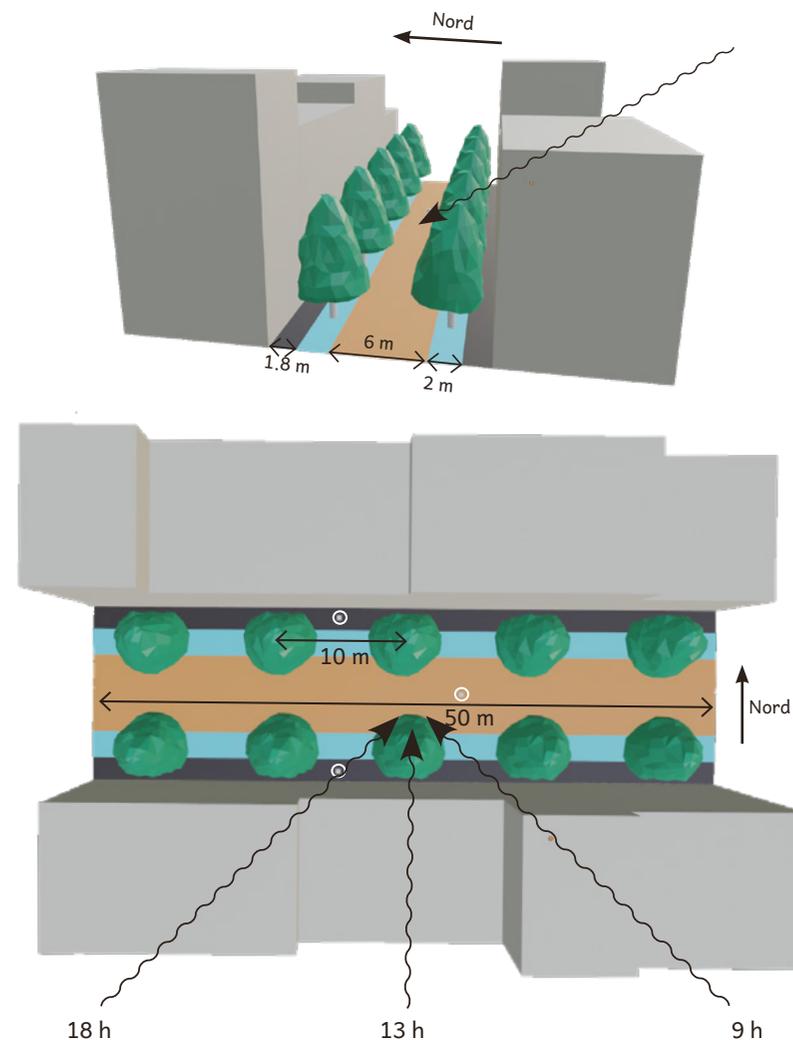
Description de la scène de référence et du cadre des modélisations

Cette rue se trouve à Strasbourg, lieu de naissance de LASER.T. De ce fait, le soleil est positionné comme un été strasbourgeois. La géolocalisation impacte aussi le sol dont la nappe phréatique est très proche, ce qui positionne les arbres en confort hydrique constant et permanent. Enfin, pour le contexte météorologique, nous nous positionnons lors du premier jour d'un épisode caniculaire, basé sur les données étudiées par Elena Bournez lors de sa thèse.

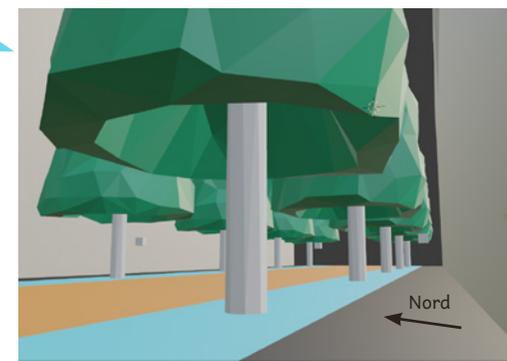
Les modélisations réalisées sont des visions à un instant T, sans notion de cinétique ou d'évolution dans le temps. Pour des raisons de temps de calcul, un été entier n'a pas été modélisé, car il faudrait faire tourner le logiciel pendant plusieurs jours pour une seule scène.

-  8 bâtiments entre 13 et 17 mètres de haut, constitués de béton.
-  10 tilleuls, *Tilia tomentosa*, de 9m de hauteur, angle foliaire plagiophile*, une surface foliaire de 368 m² par arbre. Cela représente un LAI de 12 m²/m².
-  Trottoir
-  Espace de stationnement, enherbement
-  Route, espace partagé voiture, vélo et bus.
-  3 capteurs à hauteur de torse d'utilisateur ou de la tête d'un.e enfant, soit 1m20
-  Trajectoire d'impact des rayons directs du soleil

* Fiche n°1 : définitions, page 17



Plongeons dans la scène de référence à la place d'un usager de la rue pour se rendre compte des échelles. Nous sommes en compagnie d'arbres implantés depuis déjà plusieurs décennies.



Voici des exemples de situations réelles, qui pourraient représenter la scène de référence.



Une rue de Paris, 2015
Crédit : Image par cocoparisienne de Pixabay



Une rue de Barcelone, 2015.
Crédit : Image par Ogutier de Pixabay



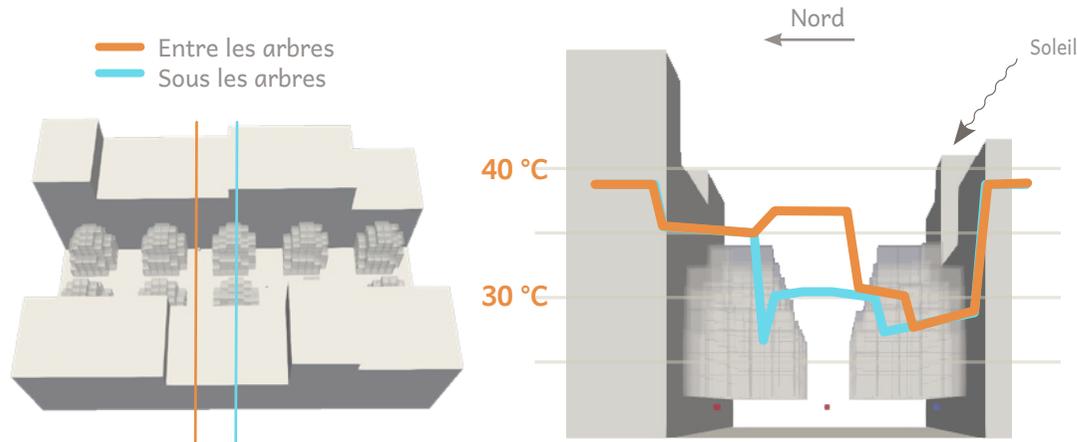
Une rue de Paris, 2013
Crédit : Image par David Mark de Pixabay



Une rue de Budapest, 2020
Crédit : Image par fxzh de Pixabay

Résultats issus de la modélisation de la scène de référence.

L'impact des arbres est d'autant plus flagrant à 13h



Les arbres permettent de diminuer drastiquement la température de surface d'environ 7°C. Cela s'explique par l'absorption des rayonnements directs du soleil. La plus-value est que cette quantité d'énergie n'est pas stockée et ne sera pas redistribuée pendant la nuit.

Les chiffres clés, à 13h, heure critique

- 7°C
ENTRE LE MILIEU DE LA RUE
ET EN DESSOUS DES ARBRES
(T°C DE SURFACE)

35°C
MOYENNE DES TEMPÉRATURES
RESSENTIES (UTCI)

Evapotranspiration de la scène

Les arbres sont ici en confort hydrique, il s'agit donc de l'évapotranspiration maximale possible pour cette scène.

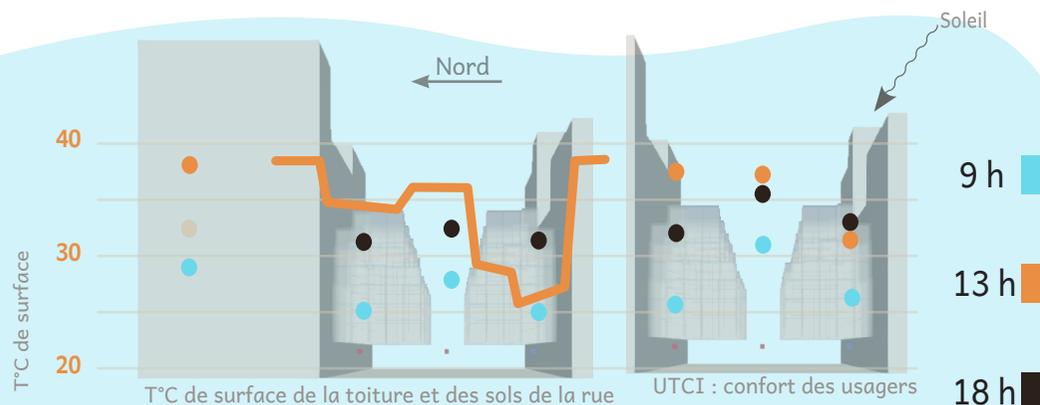


Échelle de température ressentie par l'utilisateur à 13h

Les usagers ont un indice de confort «modéré». Le matin et le soir, cette température ressentie est plus faible sur les côtés de la rue soit par effet des arbres soit par ceux combinés des arbres et des bâtiments. Sauf lors de l'heure la plus chaude comme présenté page précédente.

Il faut noter que nous sommes au premier jour de la canicule, ces chiffres vont augmenter lors de l'épisode.

Graphique des températures de surface et de confort UTCI au cours de la journée



UTCI trottoir orienté SUD

37,7°C

Nord ←

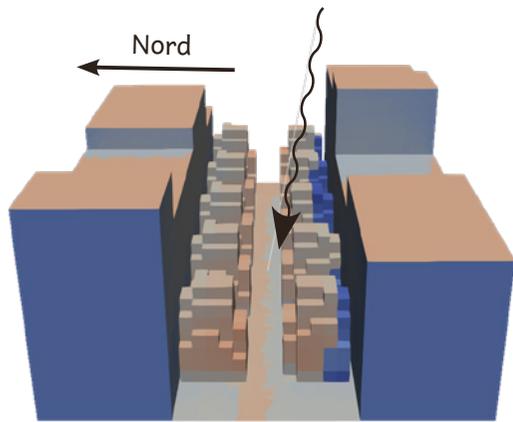
Soleil ↘

UTCI trottoir orienté NORD

31,1°C

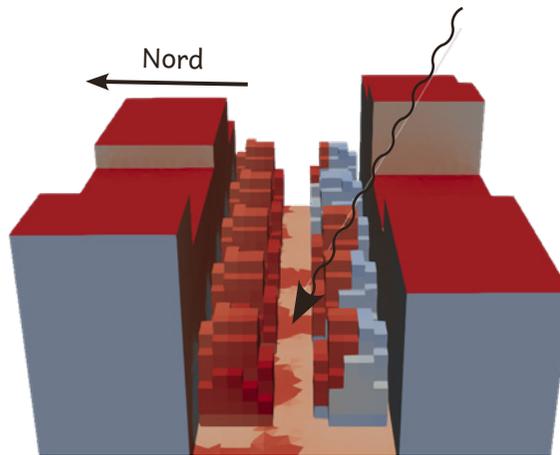


9 H



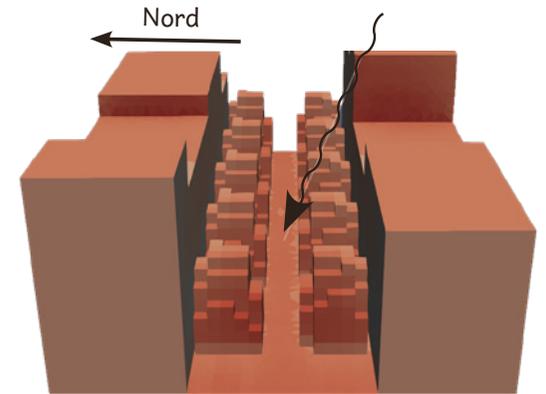
Les premiers éléments à voir leur température augmenter sont les toits et les arbres. Ces derniers permettent de retarder l'augmentation de la chaleur au sein de la ville car leur houppier fait obstacle aux rayons du soleil et cette énergie est utilisée dans ses processus physiologiques et non stockée.

13 H

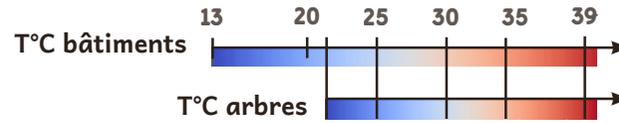


Sous les arbres, sur le sol de la rue, la température est nettement inférieure en comparaison à la température de surface entre les arbres. Nous pouvons voir cette différence marquée sur les visuels ci-dessus.

18 H

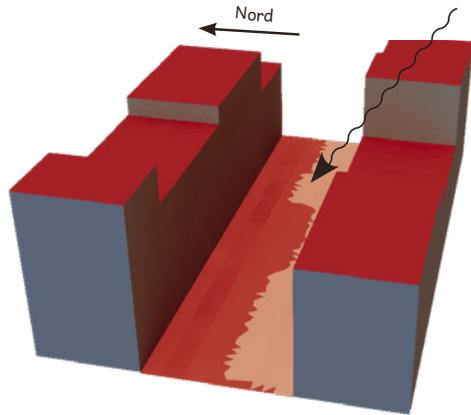
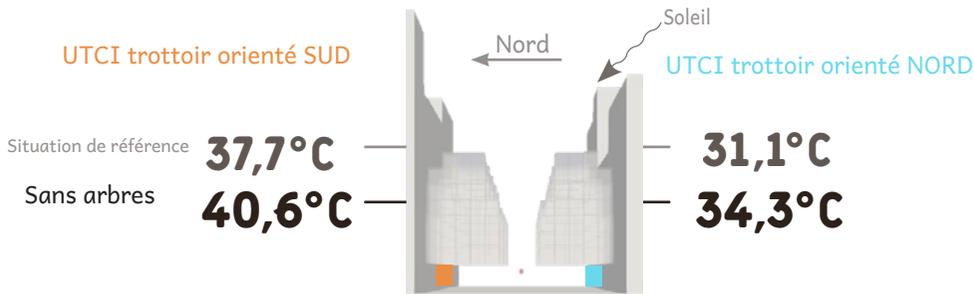


En fin de journée, on constate que la scène tend vers une homogénéisation des températures de surface. C'est ici le début d'un potentiel îlot de chaleur urbain, car les surfaces sont encore très chaudes, elles vont donc diffuser de la chaleur toute la nuit. Et l'UTCI est encore élevé à 18h (cf page précédente.)



Si on enlève les arbres ?

Échelle de température ressentie par l'utilisateur à 13h



Cette différence est directement liée à l'absence d'arbres dans la modélisation. De par leur ombrage et leur évapotranspiration, les 10 arbres de la scène de référence permettent de réduire la température de confort d'au moins 2°C.

Les chiffres clés, par rapport à la scène de référence, à 13h

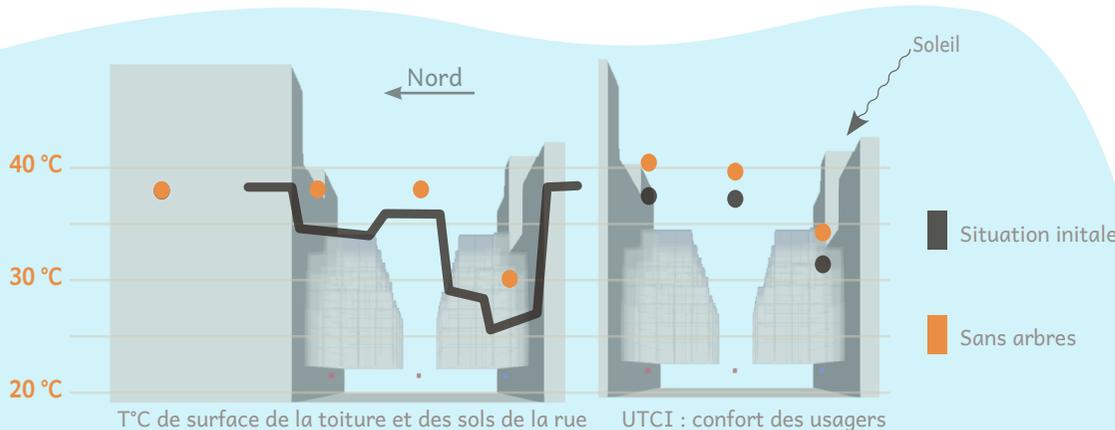
+ 1,6 °C
T°C SURFACE MINIMALE
RELEVÉE DE LA SCÈNE

+ 2,9°C
DE T°C RESENTIE
(UTCI POUR LE POINT LE PLUS FRAIS)

- 100 %
EVAPOTRANSPIRATION
PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE

Nous pouvons voir l'importance de l'impact des arbres sur le microclimat de la rue. En effet, les températures de surface de la scène n'augmentent que de 1°C, alors que nous observons une augmentation de plus de 2°C pour l'UTCI, qui est le seuil à partir duquel un individu ressent une différence.

Graphique des températures de surface et de confort UTCI par rapport à la scène de référence à 13h



Exemple d'une rue qui pourrait être le modèle de la modélisation réalisée ici, une rue sans arbres. Crédit photo : Image par StockSnap de Pixabay

Si on fait différentes densités de plantation ?

Qu'est ce qui change par rapport à la scène de référence ?

Cette modélisation montre comment réagit potentiellement le microclimat si l'on diminue le nombre d'arbres dans la rue. Pour le relier à la réalité de l'aménagement urbain, cela représente l'augmentation des distances de plantations entre les arbres sachant qu'ici, ils ont atteint leur maturité. Cela pourrait représenter une rue, juste après une campagne de dédensification et donc avant la reprise de la croissance du houppier.

Les chiffres clés, par rapport à la scène de référence, à 13h

Graphique de l'augmentation des T°C moyennes en fonction de la scène de référence



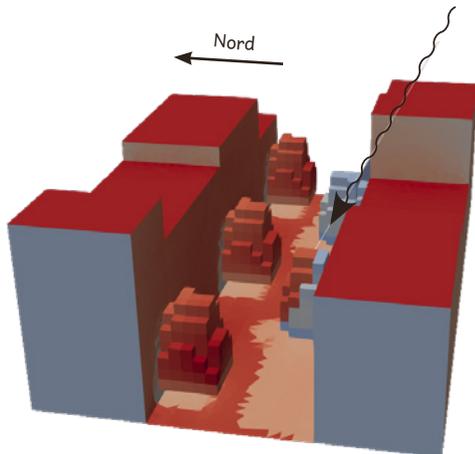
Les T°C de surface minimale et maximale évoluent de façon mineure avec des différences de 0°C à 1°C entre les différentes densités de plantation.

Contrairement aux T°C ressenties (UTCI) qui augmentent jusqu'à plus de 2°C lorsque l'on réduit à 2 arbres. Il faut donc conserver la continuité foliaire pour optimiser l'effet rafraîchissant des arbres.

Échelle de température ressentie par l'utilisateur à 13h

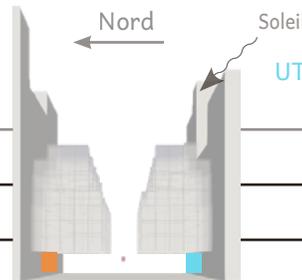
5 ARBRES

- 50 %
EVAPOTRANSPIRATION
PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE



UTCI trottoir orienté SUD

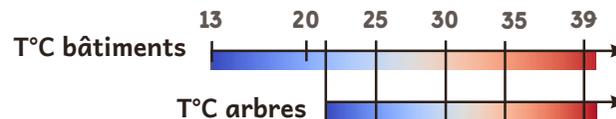
| | |
|-----------|---------------|
| Référence | 37,7°C |
| 5 arbres | 39,3°C |
| 2 arbres | 39,2°C |



UTCI trottoir orienté NORD

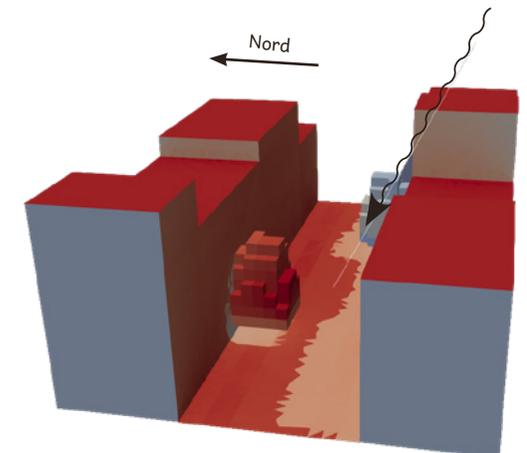
| | |
|-----------|---------------|
| Référence | 31,1°C |
| 5 arbres | 33,6°C |
| 2 arbres | 32,5°C |

La température ressentie minimale relevée est plus élevée lorsqu'il a cinq arbres qu'avec deux arbres car la disposition des arbres fait que, le capteur se trouve à l'ombre d'un d'eux.



2 ARBRES

- 70 %
EVAPOTRANSPIRATION
PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE



Si l'on forme les houppiers de façon différente ?

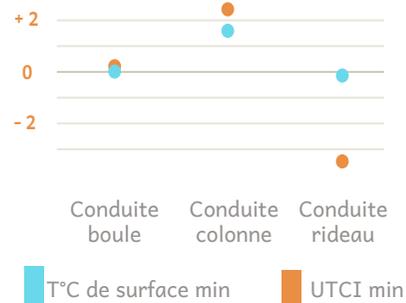
Qu'est ce qui change par rapport à la scène de référence ?

Nous conservons les mêmes caractéristiques optiques que celles du tilleul ainsi que le même LAI de $13 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Ce qui change est la forme donnée au houppier, la taille que l'on fait sur l'arbre. Ainsi, le volume du houppier change et donc la **surface foliaire** tout en ayant des arbres en bonne santé :

| | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 383 M² | 367 M² | 255 M² | 25 M² |
| Conduite rideau | Situation initiale | Conduite boule | Conduite colonne |
| 104 % | 100 % | 70 % | 10 % |

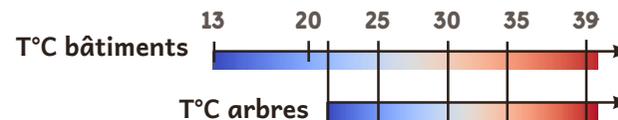
Les chiffres clés, par rapport à la scène de référence

Augmentation des T°C moyennes en fonction de la scène de référence.

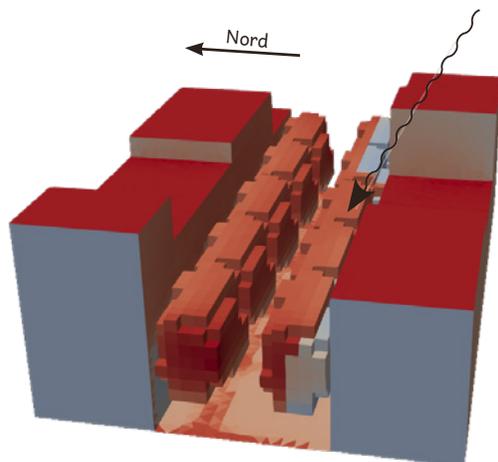


Les températures de surface de la scène ne sont pas très impactées par la taille du houppier des arbres.

Mais l'UTCI est très impactée, notamment dans la modalité «conduite rideau». Cela s'explique par le capteur orienté sud, qui se trouve au soleil lors de la scène de référence qui se retrouve ici à l'ombre. Dans la modélisation arbre en rideaux, l'effet ombrage est accentué, donc l'effet de rafraîchissement aussi

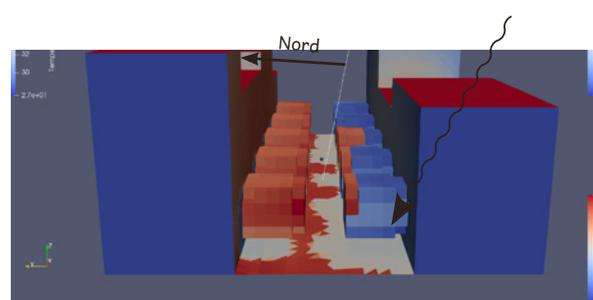


Houppier en rideau



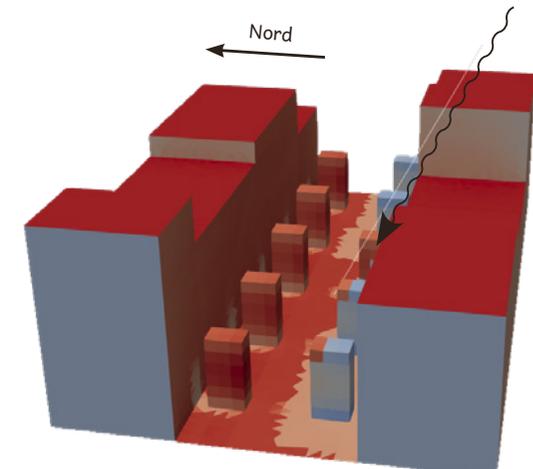
Les houppiers font 8 mètres de long sur 3,5 de large. Le houppier fait 6 mètres hauteur et le tronc 4 mètres de hauteur. En comptant le tronc, l'arbre fait environ 10 mètres de hauteur.

Houppier en boule



Les arbres font 5 mètres de diamètre et le houppier fait 2,5 mètres hauteur et le tronc 3 mètres de hauteur. En comptant le tronc, l'arbre fait environ 5,5 mètres de hauteur.

Houppier en colonne



Les arbres font 1,4 mètre de long sur 1,4 mètre de large. Le houppier fait 6 mètres hauteur et le tronc 0,5 mètre de hauteur. En comptant le tronc, l'arbre fait environ 6,5 mètres de hauteur.

La taille du houppier impacte directement l'évapotranspiration totale

Les différences d'évapotranspiration entre la scène initiale et la scène modélisée correspondent aux différences de taille de houppier. Il pourrait s'agir d'une relation linéaire entre la quantité d'évapotranspiration et la taille du houppier.

TOTAL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DE LA SCÈNE PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE :

+ 4 %

Conduite rideau

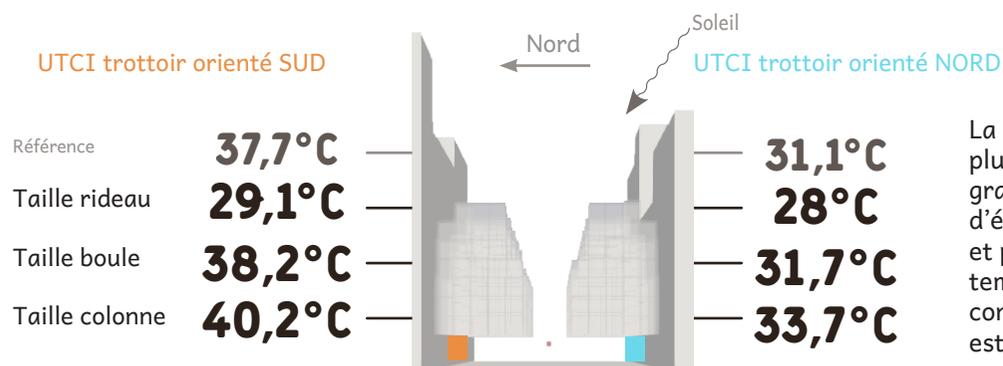
- 30 %

Conduite boule

- 90 %

Conduite colonne

Échelle de température ressentie par l'utilisateur à 13h



Des questions se soulèvent

Dans ce test, nous rejoignons les informations décrites en fiche information n°2 : plus le houppier est grand, plus l'impact sur le microclimat par l'arbre est grand.

Ici vient donc se poser la question du temps, des outils et des méthodes d'entretien. En effet, les villes pour la plupart aujourd'hui augmentent leur parc arboré. L'enjeu est d'adapter les ressources (budget, matériel, compétences) pour garantir la pérennité et la sécurité des arbres ainsi que la sécurité et le confort des usagers.



Exemple de conduite d'arbres se rapprochant de la modélisation houppier « boule ». Crédit photo : Plante & Cité/INRAE Loïse Triollet, 2021



Charmes en colonne, rue Fernand Rabier, Orléans. Crédit photo : Plante & Cité/Pauline Laille, 2018

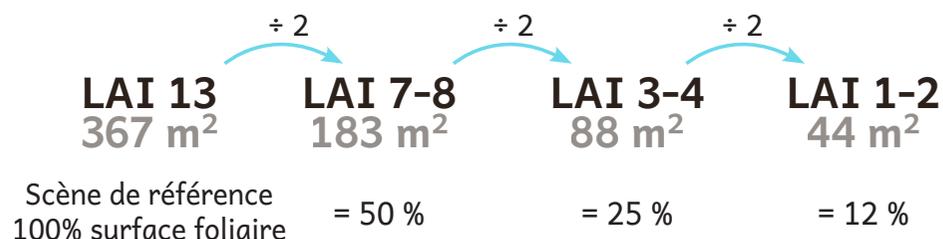


Houppiers conduits en rideaux, arbres situés à Saint-Etienne. Crédit photo : Plante & Cité / Camille 2007.

Si les caractéristiques du feuillage changent ?

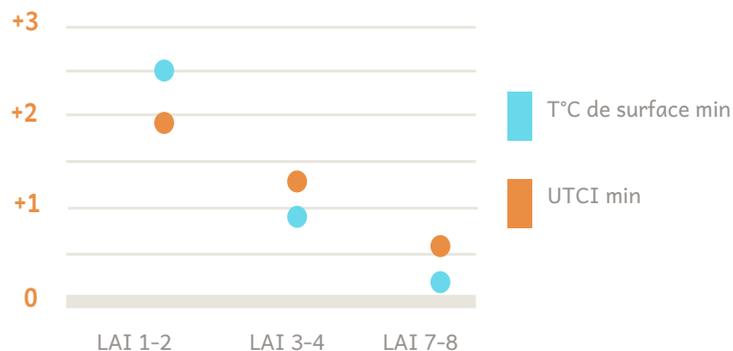
Qu'est ce qui change par rapport à la scène de référence ?

Nous conservons les mêmes formes de bâtiments, d'arbres, d'espacement ... La géométrie de la scène ne change pas. Là où nous pouvons observer un changement, c'est au niveau de la **surface foliaire des arbres**. Mais ceux-ci conservent leur forme de houppier, cela veut dire que l'arbre est plus ou moins « transparent ».



Les chiffres clés, par rapport à la scène de référence

Augmentation des T°C moyennes en fonction de la scène de référence



Les cas concrets auxquels peuvent être comparées ces modélisations

Les modélisations réalisées sont semblables à la comparaison de l'essence tilleul avec d'autres arbres dont la densité foliaire LAI est inférieure (cf fiche n°1).

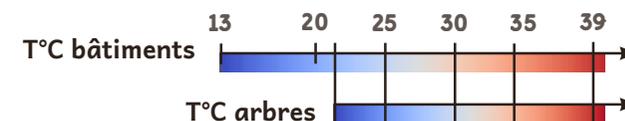
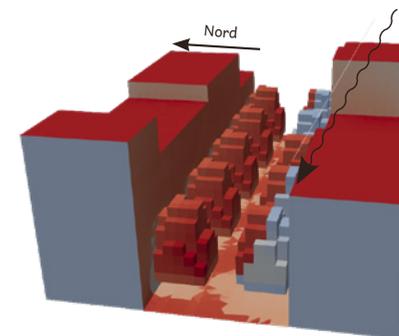
Il peut aussi s'agir d'un tilleul qui subit un stress physiologique ou biologique qui a eu un impact sur sa densité foliaire. Le stress physiologique peut être ponctuel tel un stress hydrique, ou chronique avec un sol peu favorable à la croissance d'arbre. Il en va de même pour le stress biologique, il peut s'agir d'un bioagresseur qui vient affaiblir durablement l'individu.



Voici la différence entre un arbre en bonne santé à droite et un arbre qui est en dépérissement à gauche. Ou alors, la comparaison entre un arbre avec un fort LAI à droite et un individu avec un faible LAI à gauche. Crédit photo : Kim D. Coder, 2013.

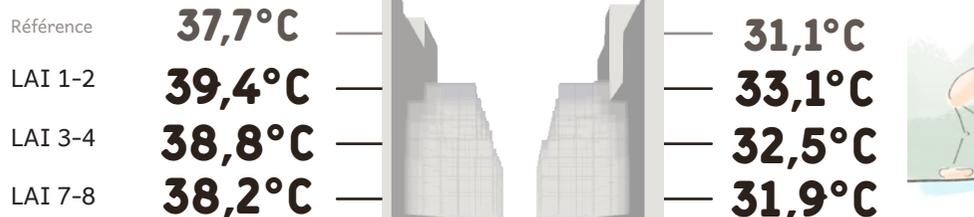
Plus le LAI est faible, plus les températures de surface et les températures ressenties augmentent.

Lorsque le LAI diminue, il est constaté une baisse de l'ombrage associée à une perte d'évapotranspiration. La perte des deux phénomènes impactant majoritairement l'effet rafraîchissant de l'arbre, cela fait monter drastiquement les températures.



Échelle de température ressentie par l'utilisateur à 13h

UTCI trottoir orienté SUD



Plus le LAI de l'arbre est grand et plus l'arbre a un effet rafraichissant, ce qui est logique puisque en augmentant le LAI, on augmente la surface foliaire de l'arbre et donc son évapotranspiration. Ici, on peut estimer qu'avec 1 pt de LAI augmenté, on gagne 1°C de température de confort.

Les variations de surface foliaire influent sur l'évapotranspiration totale

Les différences d'évapotranspiration entre la scène de référence et la scène test correspondent aux différences de surface foliaire au sein du houppier qui n'a pas changé de forme. On vient ici affiner la remarque des modélisations précédentes sur la taille du houppier, la quantité d'évapotranspiration pourrait être fortement impactée par la surface foliaire de l'arbre.

TOTAL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DE LA SCÈNE PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE :



Avec, bien entendu, tous les autres facteurs décrits dans les fiches informations qui ont aussi un impact plus ou moins fort sur la quantité d'évapotranspiration comme pour rappel : l'état de santé de l'arbre, ses réactions physiologiques aux divers stress extérieurs, la disponibilité en eau...

LAI élevé ←

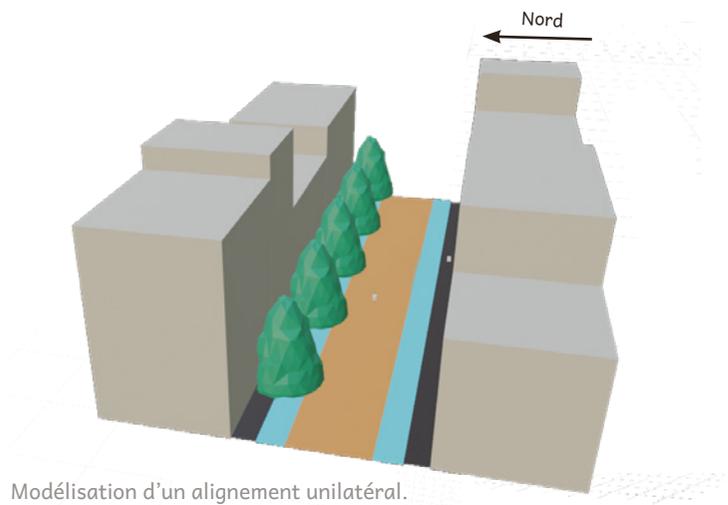
→ LAI faible



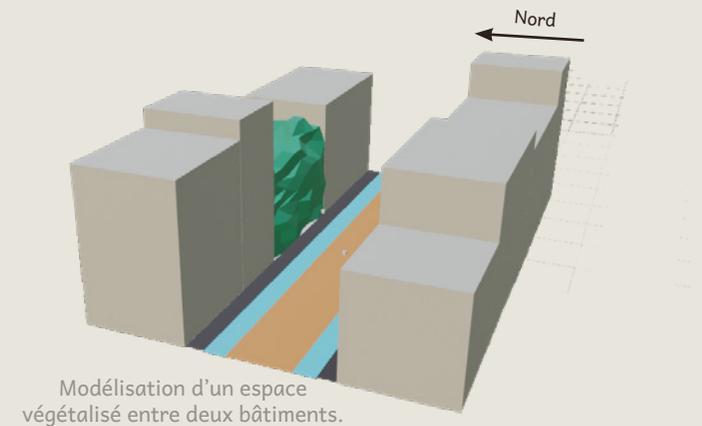
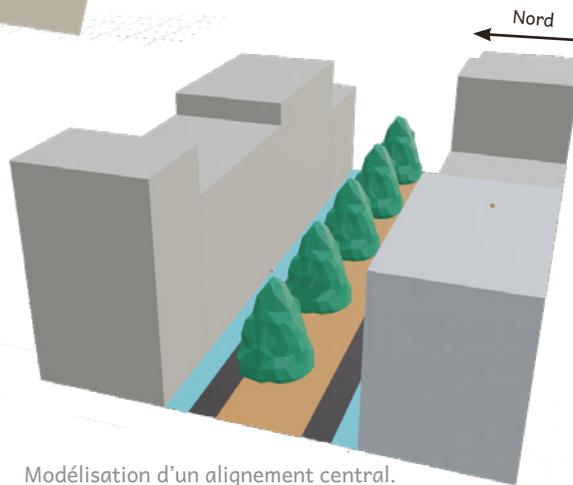
D'autres aménagements végétalisés et plus encore !

Nous vous avons présenté seulement la partie émergée de l'iceberg. Il est possible de tester de nombreuses formes d'aménagements, de végétaux, de matériaux... Voici quelques exemples illustrés de demandes, issues des entretiens auprès des professionnels qui ont calibré les scènes tests précédentes, mais qui n'ont pas été réalisés. Ensuite, laissez libre cours à votre imagination et à vos questionnements pour les tester dans le logiciel !

Quels seraient les effets d'un aménagement unilatéral ou central ?



La différence avec la dédensification testée précédemment, est que la continuité de la canopée n'est pas stoppée dans ces deux cas.



Et si le végétal trouve sa place en dehors des alignements ?

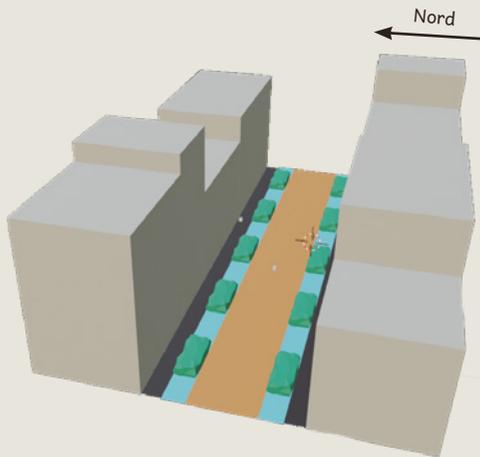
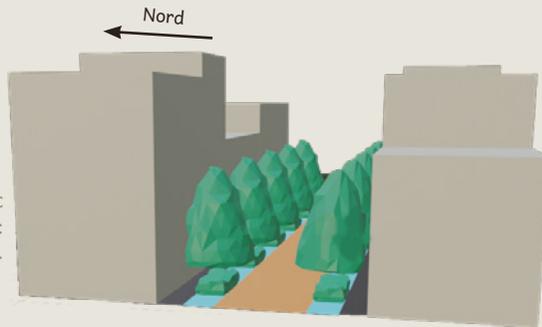
L'un des freins à l'implantation de végétal est le manque de place. L'un des leviers est d'identifier les espaces libres et de favoriser leur végétalisation.

Cela peut être des friches transformées en mini-parc ou les espaces privés des citoyens de la ville, qui peuvent être une source de végétation potentielle non négligeable.

Les arbres peuvent créer une grande canopée, peut-elle encore être augmentée ?

Il est possible de tester différentes stratifications de végétal, soit en les cumulant, soit en les testant individuellement. Cela permettrait de mieux arbitrer lorsque des usages de la rue entrent en concurrence pour l'espace, concilier les multi-usages de la rue et donc de mieux les concilier : transport, rafraîchissement, biodiversité, détente...

Modélisation d'une rue avec deux niveaux de strate végétale : arborée et arbustive.



Modélisation d'une rue avec un niveau de strate végétale : arbustive.

D'autres demandes issues de rencontres avec des professionnels de l'aménagement du végétal en ville :

Différentes largeurs de rue et hauteurs de bâtiments.

Tester l'aménagement sur tout un été, voire même une année entière.

Une météo représentative du climat estimé en 2050, pour Strasbourg, cela serait Marseille par exemple.

Utiliser des matériaux de différentes matières et couleurs.

Un autre espace qu'une rue comme une place ou une cour d'école.

Les différents stades phénologiques : croissance, fleurissement, ...

...

Vous avez une autre idée d'aménagement ou de variable dont vous souhaiteriez mieux connaître les effets sur la température d'un espace urbain ?



Marc Saudreau
Mail : marc.saudreau@inrae.fr

» BILAN et perspectives

“ Sur le plan scientifique, le projet COOLTREES a tenu la promesse de la mise en place d’un outil de modélisation intégrée des arbres dans un environnement urbain, le modèle LASER.T, à partir des travaux antérieurs des partenaires. Cet outil prometteur n’est qu’une première pierre et de nombreux développements restent à mettre en place notamment sur le fonctionnement racinaire.

L’originalité principale du projet réside dans l’interdisciplinarité autour d’un objet commun : les arbres urbains, et d’un objectif commun : la modélisation. En effet, tout au long de ce projet bioclimatologistes, topographes, écophysiologistes et service d’une grande métropole française ont réussi à travailler main dans la main et ce malgré des cultures scientifiques différentes et les nombreux aléas liés à la crise sanitaire. La promesse d’une collaboration fructueuse a été tenue puisque malgré la fin du projet COOLTREES, tous les partenaires de COOLTREES se retrouvent autour d’un nouveau projet ANR, le projet TIR4sTREEt, pour 4 nouvelles années de collaboration.

Marc SAUDREAU,
Chargé de recherche
UMR 574 PIAF
INRAE de Clermont-Ferrand
Porteur du projet COOLTREES



Jérôme NGAO,
Chercheur
INRAE de Montpellier



Thierry AMEGLIO,
Chercheur
UMR 574 PIAF
INRAE de Clermont-Ferrand

Chargé.s de workpackage ou étape du projet COOLTREES

Georges NAJJAR,
Chercheur
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357



Pierre KASTENDEUCH,
Chercheur
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357

Tania LANDES,
Enseignante et chercheuse
INSA de Strasbourg,
Équipe TRIO, laboratoire ICube
UMR 7357

Porteur du projet TIR4sTREEt



“ Ce sont les résultats prometteurs de COOLTREES et l’équipe agréable de chercheurs motivés qui ont insufflé l’énergie pour le montage et l’acceptation du projet suivant : TIR4sTREEt. Nous accueillons, en plus, l’INRAE de Nancy et de nouveaux chercheurs ICube.

Ce nouveau projet tire son originalité dans la future étude de plusieurs espèces d’arbres qui sont positionnés en alignement cette fois-ci et non dans un parc comme pour COOLTREES. Ils seront donc plus représentatifs des problématiques des chercheurs pour les modélisations dans le logiciel. De plus, les campagnes de mesures comporteront de nouveaux paramètres mesurés avec de nouveaux appareils de mesure (scanners laser avec capteurs thermiques, drone avec capteurs dédiés). Et bien entendu, continuer à développer le logiciel LASER.T et de valider son fonctionnement avec de nouvelles données terrains rassemblées dans une base de données.

Augustin BONNARDOT,
Forestier Arboriste Conseil
CAUE 77



“ Le choix des végétaux les plus aptes à assurer ce rôle de régulateur thermique est très important. Certains résistent aux fortes chaleurs en fermant leurs pores pour limiter l'évapotranspiration et survivre dans des conditions difficiles, d'autres perdent leurs feuilles de façon précoce et n'assurent plus ainsi leur action « rafraichissante ».

Il nous faut découvrir des végétaux continuant à assurer cet effet climatiseur tout en acceptant des périodes très chaudes mais peut être aussi des gels, des vents violents.

Pour que ces arbres offrent tout leur potentiel il faut qu'ils aient atteint l'âge adulte d'où l'urgence de conserver les arbres existants compatibles avec la vie de la cité et de planter dans de bonnes conditions.

Planter le bon arbre au bon endroit est absolument essentiel car pour que l'arbre apporte réellement ses bénéfices il doit être sain et vigoureux. Il doit correspondre au volume aérien et souterrain disponible, à l'esthétique, au climat, à l'usage du lieu et au sol. (Méthode VECUS permettant de choisir les végétaux les mieux adaptés aux sites)

Les praticiens attendent beaucoup des expérimentations en cours et qui vont durer encore longtemps (les arbres ont globalement une durée de vie plus importante que celle des hommes, que celle des carrières des employés communaux et des mandats électoraux). Il est très important pour nous que ces recherches soient consignées et suivies dans le temps pour donner à nos successeurs des éléments de réponse pertinents pour leurs choix d'essences.

”

Partenaire du projet

Carole BASTIANELLI,
Adjointe au chef,
service des Espaces Verts et de Nature
Ville et Eurométropole de Strasbourg.



Karen LECOMPTE,
Cheffe de projet
Plan Canopée
Ville et Eurométropole de Strasbourg.

Mathilde ELIE,
Chargée de projet multimédia - Chargée d'études
« Nature4Cities »
Plante & Cité



Pauline LAILLE,
Chargée de mission- Économie et management
Plante & Cité

“ Partant de cette base qu'apporte Cooltrees, nous nous interrogeons plus précisément sur la différence qu'il peut y avoir entre les essences en terme de rafraîchissement de l'air, leur efficacité et leurs capacités d'adaptation. Ces informations sont primordiales, dans un contexte de changements climatiques, pour choisir les essences qui permettront le mieux de lutter contre l'inconfort thermique urbain et les plus à même de perdurer dans le temps.

”

“ Mieux connaître les arbres urbains, leurs bonnes conditions de développement et les services écosystémiques qu'ils rendent sont des enjeux importants pour Plante & Cité. Dans ce cadre, les résultats de COOLTREES, tant en termes de prises de mesures que de modélisation, sont très prometteurs et contribuent à répondre aux questions que se posent les professionnels. Synthèse opérationnelle de ces travaux, ce recueil explique et illustre les mécanismes clés du rafraîchissement de la ville par les arbres. Des pistes d'action sont explorées pour inspirer les gestionnaires et les aménagés.

”

» Bibliographie – documents produits lors de COOLTREES

Articles scientifiques

1 . Bournez, E. et al. Simulation of urban vegetation impact based on the microclimate model ASER/F : the case study of a park in Strasbourg. 1–25 (2018).

Présentation d'une comparaison encourageante des résultats obtenus lors d'une modélisation réalisée dans le logiciel LASER/F (ex : évapotranspiration) avec les mesures réalisées in-situ dans le jardin de l'université de Strasbourg.

2 . Bournez, E. et al. Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. Urban For. Urban Green. 38, 1–10 (2019).

Présentation des différences de simulation de la quantité de lumière interceptée et du niveau de transpiration émis par les arbres, en fonction de leur niveau de détails de modélisation 3D.

3 . Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P. & Najjar, G. Impact of level of details in the 3D reconstruction of trees for microclimate modeling. (2016).

Présentation des résultats obtenus lors de sa thèse sur l'impact du niveau de détails de la reconstruction des arbres en 3D sur la justesse de la modélisation du microclimat urbain.

4 . Bournez, E., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P. & Najjar, G. From TLS point clouds, to 3D models of trees : a comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. <http://www.simpletree.uni-freiburg.de/> (2017).

Présentation de la comparaison de trois algorithmes de modélisation 3D d'arbres à partir de nuage de points.

5 . Hu, R. et al. Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 144, 357–368 (2018).

Présentation et test d'une méthode permettant d'estimer la surface foliaire d'un arbre urbain sans recourir à la méthode destructrice d'abattre l'arbre et de compter chaque feuille (technique utilisée en forêt).

Vidéo

6 . Woussen, M. Scène simplifiée pour présenter l'effet d'ombre sur la scène. (2021).

Vidéo de 20 secondes qui présente l'évolution de la température des sols et de l'ombre portée des bâtiments et des arbres au cours d'une journée.

Rapports (mémoires, thèse, rapports variés)

7 . Bournez, E. et al. Thèse, Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles. 1 – 238 (Ecole doctorale n°269 : Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (MSII), 2018).

Présentation de la modélisation du feuillage des arbres à partir d'un squelette (tronc + branches) en utilisant la méthode de la voxelisation et en les comparant pour déterminer le niveau de précision à avoir pour conserver une modélisation précise de la transpiration.

8 . Cathiard, L. L'impact de l'environnement urbain sur la modélisation des indices de confort. (2017).

Présentation de la bioclimatologie humaine, réalisation de modélisation et interprétations / résultats des variables climatiques et de l'UTCI (indice de confort) en fonction de certains types de matériaux, description des flux composants le bilan d'énergie, conclusion générale.

9 . Gourguechon, C. Classification de données images et vecteurs et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg. (2018).

Contexte et état de l'art, mise en place de la classification LCZ à Strasbourg (C'est une approche qui permet de construire une carte par zone climatique/paysage en prenant en compte la morphologie urbaine, l'occupation du sol, de l'activité anthropique et des propriétés thermiques et radiatives des surfaces et des matériaux).

10 . Maison, A. Understanding of the hydric function of vegetation in an urban park. (2019).

Mémoire de fin d'étude d'Alice Maison sur la correction et le remplacement des données ainsi que des calculs de profil de vent et de demande climatique.

11 . Montauban, O. Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg. (2019).

cf . Point 9, même sujet de stage.

12 . Saudreau, M. et al. Programme appel à projets générique 2017, fiche identité du projet. (2017).

Résumé des principaux aspects du projet COOLTREES (contexte, positionnement, objectifs, méthode, organisation, budget, impacts et retombées scientifiques) + découpage du budget par fiche partenaire

13 . Thoury, C. & Landes, T. Modélisation 3D d'arbres à partir de données LiDAR multi-échelles. (2017).

Etat de l'art, évaluation de la qualité des données LiDAR (nuages de points), travaux en vue d'une modélisation d'arbres (choix des arbres et représentation 3D), conclusion.

PowerPoints

14 . Bournez, E. Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. 1–102 (2018).
Présentation du contexte, du logiciel LASER/F, des outils de mesures sur le terrain de l'étude de cas, comparaison de la considération de la végétation entre LASER/F et RATP, présentation d'une reconstruction 3D d'un arbre, reconstruction de la zone d'étude en 3D, simulation du microclimat à l'échelle de l'arbre, modélisation au parc entier.

15 . Bournez, E. Reconstruction d'arbres en milieu urbain à partir de nuages de points. 1–20 (2015).
Présentation du travail réalisé en thèse : géoréférencement des acquisitions, réduction du bruit (dans les nuages de points, ce qui empêche de bien reconstruire le squelette des arbres ensuite), Volume de la canopée, Corrélation pousses / moignons et perspectives.

16 . Inconnu, Réunion ANR COOLTREES. 1–7 (2020).
Présentation très rapide d'une journée « séminaire » organisée lors du projet. Rappel des objectifs généraux, des objectifs techniques et méthodologiques, organisation des différentes étapes du projet COOLTREES, organisation de ces tâches.

17 . Maison, A. Présentation du travail réalisé par Alice Maison. 1–40 (2019).
Présentation des caractéristiques du parc (lieu d'étude du projet Cooltrees), descriptions des mesures réalisées et des données, analyse des données et corrections / remplacement des données manquantes, calcul du profil du vent et calcul de la demande climatique.

18 . Saudreau, M., Ameglio, T. & Ngao, J. Les arbres et les îlots de chaleur urbains. 1–22 (2019).
Présentation des liens entre arbres et îlots de chaleur urbains : climat urbain et enjeux sociétaux, climat urbain, Les services de l'arbre en ville, ombrage, rafraîchissement, T°C et transpiration, gérer la santé des arbres en ville, ...

19 . Saudreau, M. ANR COOLTREES, Le rafraîchissement des villes par les arbres, quantification et modélisation. 1–19 (2021).

Présentation du projet COOLTREES : le microclimat urbain, le projet COOLTREES.

20 . Saudreau, M. Architecture, Microclimat et Modélisation. 1–76 (2017).
Présentation étape lors de la mission de Maurin, : introduction et contexte du projet (modèles de départ, éléments en jeu dans la simulation, étapes de développement), présentation du programme (entrées/sorties), grandes étapes de la simulation, (structure du code), Etat actuel du développement, suite de l'activité.

21 . Saudreau, M., Landes, T., Kastendeuch, P. & Colin, J. ANNEXE, Le rafraîchissement des villes par les arbres – Quantification et modélisation pour le développement de villes durables. (2017).

Présentation de chaque responsable de Workpackage ou partie du projet COOLTREES.

22 . Saudreau, M., Kastendeuch, P. & Chakkour, T. Integration vegetal model (RATP) in urban environment LASER/F. 1–23 (2019).

Présentation du format de fichier « géo » pour transcrire la géométrie 3D d'un espace à LASER/F, description du fonctionnement de la géométrie 3D dans LASER/F, présentation de la méthode du ray-tracing (base du fonctionnement du logiciel pour qu'une maille sache de quelles mailles elle reçoit de l'énergie, et vers quelles mailles elle en renvoie).

23 . Woussen, M. Modélisation thermique du rôle des arbres sur le microclimat urbain : présentation d'un outil. 1–49 (2020).

Présentation de l'objectif de l'ANR COOLTREES d'intégrer dans une simulation de bilan d'énergie 3D, un modèle d'évapotranspiration de l'arbre. Ainsi qu'une description simplifiée des perspectives du fonctionnement du logiciel LASER.T.

Posters

24 . Bournez, E. Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains, approche combinée de mesure et de modélisation à différentes échelles. 1 (2017).

Présentation du travail réalisé lors de sa thèse : contexte, objectifs, étude à l'échelle d'un arbre, l'arbre dans le quartier, conclusion et perspectives.

25 . Hayot, C. Etude des solutions de modélisation d'un arbre en milieu urbain, en vue de son intégration dans les modèles météorologiques. 1 (2014)

Présentation d'une méthode de modélisation du squelette (tronc et branches) d'un Tilleul taillé en tête de chat à partir d'un nuage de points issu d'un relevé de lasergrammétrie.

26 . Montauban, O. Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg. 1 (2019).
Présentation d'une carte LCZ de niveau 1 valable pour les 33 communes de l'Eurométropole de Strasbourg. C'est une approche qui permet de construire une carte par zone climatique/paysage en prenant en compte la morphologie urbaine, l'occupation du sol, de l'activité anthropique et des propriétés thermiques et radiatives des surfaces et des matériaux.

27 . Landes, T. et al. 3D tree architecture modeling from laser scanning for urban microclimate study. 1 (2015).

Présentation très illustrée des différentes étapes entre le relevé des données sur le terrain en nuage de points et la modélisation totale du squelette de l'arbre.

28 . Inconnu, Modélisation thermique du rôle des arbres sur le microclimat urbain. 1 (2021).

Présentation de l'objectif de l'ANR COOLTREES d'intégrer dans une simulation de bilan d'énergie 3D, un modèle d'évapotranspiration de l'arbre. Ainsi qu'une description simplifiée des perspectives du fonctionnement du logiciel LASER.T.

29 . Bournez, E., Landes, T., Najjar, G., Ngao, J. & Saudreau, M. From LIDAR acquisition to FSPM – Application to 3D urban tree transpiration modeling. <http://www6.ara.inra.fr/piaf> (2016).

Présentation de la modélisation du feuillage des arbres à partir d'un squelette (tronc + branches) en utilisant la méthode de la voxelisation et en les comparant pour déterminer le niveau de précision à avoir pour conserver une modélisation précise de la transpiration.

Autres

30 . Coquet, Y. COOLTREES, Le rafraîchissement des villes par les arbres – Quantification et modélisation pour le développement de villes durables. 1-2 (2019).

Une page A4 qui présente les objectifs, les résultats majeurs et les productions scientifiques /valorisation + quelques illustrations.

31 . Inconnu, Liens_Internet_état-de-l-art_ANRCOOLTREES. 1 (2021).

Liens vers deux sites web : un article chez le Moniteur + vidéos Youtube au colloque ANR « Arbre, bois, forêt et sociétés ».

32 . Woussen, M. Proposition de stage recherche MII _ année universitaire 2020-2021. <https://sites.google.com/view/laserf/home> (2021).

Offre de stage pour le développement en C++ d'une méthode numérique permettant l'interaction géométrique 3D massive entre rayons, triangles et voxels, stage accepté par Samy Benhoussa.

33 . Woussen, M. Proposition de stage recherche M1 ou PRO - année universitaire 2020-2021. <https://sites.google.com/view/laserf/home> (2021).

Offre de stage pour le développement d'une première interface graphique pour LASER.T, stage réalisé par Claire Rondeaux.

34 . Woussen, M. sites_references. 1 (2021).

Liens vers deux sites web : présentation du logiciel RATP + présentation du logiciel LASER/F.

Site internet :

<https://www.inrae.fr/cooltrees>



» Bibliographie hors cooltrees

Ressources extérieures au projet ayant servi à l'écriture de ce livret

- 35 . Błazejczyk, K. et al. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geogr. Pol.* 86, 5–10 (2013).
- 37 . Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T. & Pauleit, S. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Build. Environ.* 114, 118–128 (2017).
- 36 . Hagemeyer, M. & Leuschner, C. Functional crown architecture of five temperate broadleaf tree species: Vertical gradients in leaf morphology, leaf angle, and leaf area density. *Forests* 10, (2019).
- 37 . Huang, Y. J. & Akbari, H. The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling : requirements. in 11–14 (1990).
- 38 . Kermap, <https://kermap.com/> (outil web semble inaccessible aujourd'hui, les contacter par mail)
- 39 . Klemm, Wiebke; Heusinkveld, Bert G.; Lenzholzer, Sanda; van Hove, Bert. Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 138(), 87–98. doi:10.1016/j.landurbplan.2015.02.009 (2015).
- 40 . Liu, J. et al. Pourcentage_répartition_angle_foret_europeenne. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 148, 208–220 (2019).
- 41 . McNeil, B. E., Pisek, J., Lepisk, H. & Flamenco, E. A. Measuring leaf angle distribution in broadleaf canopies using UAVs. *Agric. For. Meteorol.* 218–219, 204–208 (2016).
- 42 . Niinemets, Ü. Adjustment of foliage structure and function to a canopy light gradient in two co-existing deciduous trees. Variability in leaf inclination angles in relation to petiole morphology. *Trees* 446–451 (1998).
- 43 . Pisek, J., Sonntag, O., Richardson, A. D. & Möttus, M. Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species? *Agric. For. Meteorol.* 169, 186–194 (2013).

TIR4sTREEt

- 42 . Landes, T. Modeling of street trees for urban micro-climatology. <https://anr.fr/Projet-ANR-17-CE22-0012> (2021).
- 43 . Landes, T. Résumé, Modélisation des arbres de rue pour la micro-climatologie urbaine. <https://www.dextair.com/application>]. (2021).





Les pics de chaleur et les épisodes de sécheresses impactent fortement la végétation et les habitants des villes. Comment construire des villes résilientes qui favorisent le bien-être des habitants, l'épanouissement de la biodiversité et s'adapte aux changements à venir ? Quel rôle joue la végétation dans le rafraîchissement ? Quels processus précis régulent les masses d'air et leurs effets ? Le projet COOLTREES contribue à répondre à ces questions, à travers deux productions : une base de données open source autour du fonctionnement des arbres (dont l'évapotranspiration) et des échanges d'énergie entre les éléments du paysage urbain ; et un logiciel, LASER.T, qui permet une modélisation 3D du microclimat urbain à l'échelle d'une rue. Ces deux outils peuvent permettre de (re)-penser et évaluer des aménagements (choix des essences, densité, hauteur et emplacement des plantations) afin de maximiser les effets souhaités sur le microclimat urbain.

Site web : <https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/666>
<https://www.inrae.fr/cooltrees>