



HAL
open science

Étude du rôle de la végétation dans l'atténuation de la surchauffe urbaine

Julien Cravero

► **To cite this version:**

Julien Cravero. Étude du rôle de la végétation dans l'atténuation de la surchauffe urbaine. Structures. École des Ponts ParisTech, 2023. Français. NNT : 2023ENPC0010 . tel-04147231

HAL Id: tel-04147231

<https://pastel.hal.science/tel-04147231v1>

Submitted on 30 Jun 2023

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

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



École des Ponts
ParisTech

THÈSE DE DOCTORAT
de l'École des Ponts ParisTech

Étude du rôle de la végétation dans l'atténuation de la surchauffe urbaine

École doctorale N°531, Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE)

Structures et Matériaux

Thèse préparée au sein des laboratoires Navier (UMR 8205) et HM&Co

Thèse soutenue le 21 février 2023, par
Julien CRAVERO

Composition du jury :

Benoît GABRIELLE
Professeur, Agro ParisTech

Rapporteur

Georges NAJJAR
Maître de conférences, Université de Strasbourg

Rapporteur

Auline RODLER
Chargée de recherche, Cerema

Examinatrice

Bernard MAURIN
Professeur des Universités, Université de Montpellier

Président du jury

Jean-François CARON
Directeur de recherche, École des Ponts ParisTech

Directeur de thèse

Ioulia TCHIGUIRINSKAIA
Directrice de recherche, École des Ponts ParisTech

Co-directrice de thèse

Pierre-Antoine VERSINI
Maître de conférences, École des Ponts ParisTech

Encadrant de thèse

Adélaïde FERAILLE
Maître de conférences, École des Ponts ParisTech

Encadrante de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les rapporteurs pour leur lecture très attentive du manuscrit pendant les fêtes de fin d'année alors que ce n'était probablement pas le cadeau qu'ils avaient demandé au père Noël : Georges Najjar, pour votre enthousiasme et vos remarques très positives ; Benoit Gabrielle, pour avoir apporté votre point de vue d'agronome, d'ACViste et d'énergéticien à ce travail. Merci à tous deux pour vos commentaires précis.

Je remercie également Auline Rodler et Bernard Maurin d'avoir accepté d'être, respectivement, examinatrice et président du jury, et d'être venus de Nantes et Montpellier pour l'occasion.

Jean-François, merci de m'avoir aidé par ton intelligence, ton humour et ton énergie, que tu as tenté de mieux faire ruisseler que l'argent des plus riches sur les classes populaires. Merci Adélaïde de m'avoir soutenu continuellement et accueilli en résidence temporaire dans ton bureau, toujours plein de soleil, de café, de chocolats et de conseils de lectures. Merci à vous deux pour la liberté que vous m'avez laissée, vos conseils scientifiques et vos encouragements jusqu'au bout.

Merci Pierre-Antoine de m'avoir accompagné tout au long du trajet, même si ce n'était pas un TGV, et de m'avoir offert un compagnon de route en la personne de Dimitile. Merci Ioulia de m'avoir accueilli dans ton laboratoire et fait entrevoir les multifractals.

Merci Marie-Françoise Kaspi chez MSA et Catherine Charleux chez HM&Co pour votre dynamisme, votre efficacité, votre bonne humeur et votre connaissance des rouages secrets des Ponts.

Merci à Camil de m'avoir parlé pour la première fois de gridshells il y a bientôt neuf ans dans un préfabriqué de Malaquais. De la première géométrie du prototype au dernier câble tendu, merci à Romain Mesnil et Olivier Baverel pour leurs conseils, aussi bien pour bricoler sur Grasshopper que pour traiter les bugs de chantier. Merci à Cyril Douthe de m'avoir appris que si l'expérience est conforme à la théorie alors on peut considérer que la réalité est bonne. Merci de m'avoir appris beaucoup d'autres choses plus utiles encore. Merci Frédéric Tayeb d'avoir pris le temps d'inventer, d'imprimer et de tester des dizaines de connexions, avec toi le travail est une suite de surprises renouvelée chaque jour. Merci à Jean-François de m'avoir appris à faire des noeuds autobloquants parce que c'est pas très compliqué mais si on sait pas faire, on peut mourir au fond d'une crevasse. Merci aux doctorant.e.s de MSA présent.e.s lors des séjours au refuge des Drayères de ne m'avoir jamais abandonné au fond d'une crevasse. Merci à Hubert Michaudet et Elo-

die Grimoin d'avoir remplacé tous les noeuds autobloquants par des bloqueurs achetés dans un magasin d'escalade, la technologie a parfois du bon. Merci à Didier Navajas et à l'équipe d'Urban Canopee pour tous les coups de main et de meuleuse pour les montages des gridshells, les placements sur les capteurs, l'irrigation et l'entretien des plantes. Merci aux techniciens de MSA : Christophe Bernard, Gilles Moreau et surtout Hocine Delmi, pour toute son aide sur la construction des différents prototypes, sa bonne humeur à toute épreuve, et ses bricks, qui parviennent à être meilleurs d'année en année. Merci également à Christophe Courrier pour ses connaissances en RS-232 qui m'ont permis de communiquer avec mes capteurs alors que j'avais tendance à bloquer. Merci à Auguste Gires pour ses explications, ses scripts sur le Raspberry Pi et ses récits d'expériences du week-end. Merci à Vincent Maccario et Robin Mazzella de l'Ecole du Breuil pour leurs conseils horticoles et leurs avis sur les plantes grimpanes. Merci à Alain Fortineau et Jean-François Castell de m'avoir expliqué comment utiliser leur pince à photosynthèse à Grignon puis autorisé à m'amuser avec. Merci à Patrick Stella de m'avoir prêté radiomètres et station d'acquisition. Merci à Katya Kuzmenko d'avoir traduit du russe afin que je comprenne un peu ce que Choukhov voulait dire. Merci à tous les membres du groupe ACV : Adélaïde, Charlotte, Myriam, Katya, Koliann, Ingrid, Sébastien, Ambroise, Cyrille, Natalia, Willy, Pierre – et Tiffany que je remercie spécialement pour m'avoir intégré à son équipe briochine.

Merci Thibault de m'avoir aidé à finir le manuscrit, je te dois de nombreux coups à l'Hydromel Café. Merci Sophie et Valentin pour vos relectures à des heures indues.

Merci à toutes celles et ceux qui ont séjourné, pour un stage ou une thèse, dans l'équipe MSA ou le laboratoire HM&Co, et qui ont durant ces quelques années partagé leur pain quotidien, chose autant agréable qu'utile puisqu'il est bien connu que le partage de nourritures terrestres constitue dans toutes les cultures un préalable majeur au partage de contenus mentaux.

Merci aux amis et à la famille qui sont venus écouter la soutenance d'une oreille gourmande, et en particulier à Cécile, Erwan, Florian, Lorraine, Christophe et Emmanuel qui ont également fait à manger et à boire.

Merci enfin à mes parents, à ma sœur Cora, à mon chat Dimitile et à Alice, pour leur amour, leur patience et leurs ronrons inconditionnels.

Résumé

Ce travail s'intéresse au rôle joué par la végétation en ville d'un point de vue thermique, dans l'optique de comprendre de quelle manière les végétaux peuvent modérer la surchauffe urbaine. Les principales études expérimentales et les modèles utilisés pour décrire les effets de la végétation sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains sont d'abord passés en revue. Nous nous concentrons ensuite sur deux phénomènes physiques qui ressortent de la littérature – celui de l'ombre au sol et de l'évapotranspiration – en tentant de formaliser leurs effets sur la réduction de chaleur sensible transférée à l'air et en cherchant à définir plus précisément la notion de *rafraîchissement*. Pour cela, nous nous appuyons sur les bilans énergétiques de surface couramment employés en météorologie urbaine à l'échelle de la ville ou du quartier pour les adapter à une échelle plus petite, qui est celle de l'arbre. Nous en proposons alors un modèle analytique simple, décomposant l'impact de l'arbre sur la température de l'air en trois contributions : le flux de chaleur sensible de l'arbre non-évaporant intrinsèque à sa géométrie (déductible du rayonnement absorbé par sa géométrie), la réduction du flux de chaleur sensible des feuilles due à leur transpiration, et la réduction du flux de chaleur sensible du sol due à son ombrage par la végétation. Le poids relatif de ces trois termes permet de déterminer si, pour des conditions environnementales données, l'arbre est en train de réchauffer l'air, de le refroidir de manière relative (par comparaison avec une situation urbaine où l'arbre serait absent) ou de le refroidir de manière absolue. Nous cherchons ensuite à estimer ces trois contributions. Pour la première, nous utilisons l'interface HELIOS afin de simuler les échanges radiatifs au sein d'une végétation dont la géométrie en 3D est représentée explicitement. Pour les deux suivantes, nous les mesurons au moyen d'un dispositif expérimental original, qui est un gridshell élastique en matériaux composites servant de support à des plantes grimpances. Les enjeux de la conception et de la réalisation de ce type de structures sont exposés. Nous analysons ensuite les données recueillies afin d'apprécier les effets de l'évaporation et de l'ombrage procurés par ce prototype. Enfin, une analyse de cycle de vie de la structure végétalisée, visant à évaluer les impacts environnementaux potentiels causés par la réalisation de cet exemple de mobilier urbain, conclut notre travail.

Abstract

This work focuses on the role of vegetation in the city from a thermal point of view, aiming to understand how plants can moderate urban overheating. First, the main experimental studies and models describing the effects of vegetation on urban heat island mitigation are reviewed. We then focus on two physical phenomena that emerge from the literature – that of ground shading and evapotranspiration – by attempting to formalize their effects on the reduction of sensible heat transferred to the air and by seeking to define more precisely the notion of *cooling*. To do so, we rely on the surface energy balances commonly used in urban meteorology at the city or district scale to adapt them to a smaller scale, that of a tree. We propose a simple analytical model, decomposing the impact of the tree on the air temperature into three contributions : the sensible heat flux of the non-evaporating tree intrinsic to its geometry (deducible from the radiation absorbed by its geometry), the reduction of the sensible heat flux of the leaves due to their transpiration, and the reduction of the sensible heat flux of the soil due to its shading by the vegetation. The relative weight of these three terms determines whether, for given environmental conditions, the tree is warming the air, cooling it relatively (compared to an urban situation where the tree would be absent) or cooling it absolutely. Then, we seek to estimate these three contributions. For the first one, we use the interface HELIOS to simulate the radiative exchanges within a vegetation whose 3D geometry is explicitly represented. For the next two, we measure them using an original experimental device, which is an elastic gridshell made of composite materials used to support climbing plants. The challenges of the design and fabrication of this type of structures are then exposed. We then analyze the data collected to evaluate the effects of evaporation and shading provided by this prototype. A life cycle assessment of the vegetated structure, aiming at evaluating the potential environmental impacts caused by the realization of this example of urban furniture, concludes our work.

Table des matières

Introduction	13
1 Végétation et microclimat urbain	15
1.1 Contexte	15
1.1.1 Climatologie urbaine	15
1.1.2 Îlots de chaleur urbains, surchauffe urbaine et confort thermique extérieur	17
1.1.3 La végétation comme moyen de rafraîchir la ville	23
1.2 Structures végétalisées et expérimentations	34
1.2.1 Végétation arborée	34
1.2.2 Toitures végétalisées	35
1.2.3 Façades végétalisées	37
1.3 Végétation en ville et modélisations	39
1.3.1 Thermique du bâtiment – toitures végétalisées	39
1.3.2 Modèles de canopée urbaine	41
1.3.3 Modèles numériques de mécanique des fluides	43
1.4 Conclusions et positionnement de la thèse	47
2 Mécanismes de rafraîchissement	55
2.1 Généralités sur les transferts thermiques	55
2.1.1 Bilan énergétique de surface	55
2.1.2 Flux de rayonnement net ϕ^*	57
2.1.3 Flux de chaleur sensible ϕ_H	62
2.1.4 Flux de chaleur latente ϕ_E	65
2.1.5 Flux de chaleur par conduction ϕ_G	65
2.1.6 Équation de la chaleur	67
2.2 Exemples d'application du bilan énergétique	69
2.2.1 Effet de l'ombrage	70
2.2.2 Effet de l'évaporation	77
2.3 Régimes de rafraîchissement	82
2.3.1 Définition du rafraîchissement	82
2.3.2 Rafraîchissement absolu	84
2.3.3 Rafraîchissement relatif	86
2.4 Conclusion	89
3 Modélisation numérique des composantes du bilan énergétique	93
3.1 HELIOS	97
3.1.1 Présentation générale	97

3.1.2	La classe <i>Context</i>	98
3.1.3	Les plug-ins	99
3.2	Premier cas d'étude : le bilan énergétique d'un système élémentaire	103
3.2.1	Bilan énergétique de la feuille	104
3.2.2	Bilan énergétique du sol	106
3.2.3	Flux de chaleur sensible du système	108
3.2.4	Comparaison avec un modèle de bilan énergétique simplifié	109
3.3	Deuxième cas d'étude : le bilan énergétique d'un ensemble de feuilles su- perposées	114
3.4	Troisième cas d'étude : une place ombragée par un arbre	117
3.4.1	Flux de chaleur sensible émis par l'arbre non-transpirant	117
3.4.2	Effet de l'évaporation	119
3.4.3	Effet de l'ombre au sol	120
3.4.4	Bilan	121
3.4.5	Variations des paramètres d'entrée	121
3.5	Conclusions	123
4	Proposition d'un dispositif expérimental	129
4.1	Gridshells	129
4.1.1	Principe structurel	129
4.1.2	Historique	130
4.1.3	Gridshells en matériaux composites	142
4.1.4	Technologies existantes	145
4.1.5	Géométrie et mécanique	151
4.2	Corolle : un prototype de gridshell végétalisé et instrumenté	153
4.2.1	Conception du gridshell	153
4.2.2	Construction	161
4.2.3	Processus de montage	171
4.2.4	Pots et végétation	172
4.3	Conclusion	174
5	Résultats expérimentaux	179
5.1	Instrumentation	179
5.1.1	Mesures de la masse de la Corolle	179
5.1.2	Mesures de la transpiration à l'échelle de la feuille	182
5.1.3	Mesures de rayonnement	183
5.2	Résultats expérimentaux	186
5.2.1	Evapotranspiration de la Corolle	186
5.2.2	Précipitations interceptées	190
5.2.3	Transpiration des feuilles	191
5.2.4	Bilan radiatif du sol	194
5.3	Conclusion	198
6	Analyse de cycle de vie de la structure végétalisée	203
6.1	La méthode d'analyse du cycle de vie	203
6.2	Application de la méthode ACV au prototype	206
6.2.1	Définition des objectifs et du champ de l'étude	206
6.2.2	Inventaire du cycle de vie	207
6.2.3	Évaluation des impacts	210

6.2.4	Interprétation des résultats	210
6.3	Conclusion	213
Conclusion générale		217
A	Confort thermique extérieur	225
B	Résolution de l'équation de la chaleur dans un milieu semi-infini : étude du régime sinusoïdal forcé	229
B.1	Condition de Dirichlet	229
B.2	Condition de Robin	230
C	Propriétés thermiques de feuilles	231
D	Transpiration des feuilles de la Corolle mesurée avec une pince à photosynthèse	233

Introduction

Le milieu urbain doit faire face à un certain nombre de menaces du fait de sa densification toujours plus importante. La multiplication des surfaces minérales, imperméables et sombres contribue à la formation de microclimats artificiels caractérisés par des températures très élevées en période estivale. Appelés îlots de chaleur urbains, ces phénomènes risquent de s'amplifier sous l'action du changement climatique. L'augmentation des températures en ville pose problème pour le confort voire la santé des habitants et conduit également à un recours massif des bâtiments et des infrastructures à la climatisation, cette dernière aggravant le problème en participant à la dégradation du confort thermique extérieur (par le rejet d'air chaud dans les rues) et au réchauffement climatique (par la hausse de la consommation énergétique et l'utilisation de fluides frigorigènes qui, une fois dans l'atmosphère, sont des gaz à effet de serre à haut pouvoir de réchauffement global). Remettre de la végétation en ville semble une option séduisante pour atténuer la surchauffe urbaine dans une démarche de sobriété énergétique, tout en rendant d'autres services écosystémiques comme la rétention des eaux pluviales, le maintien de la qualité de l'air, la préservation de la biodiversité, la création de nouveaux espaces récréatifs...

Néanmoins, les services écosystémiques rendus par la végétation en ville ne sont pas tous correctement quantifiés, ce qui nuit à une planification urbaine efficace et une implantation de la végétation pertinente. Le laboratoire HM&Co a largement contribué à démontrer l'intérêt de la végétation en matière de gestion des eaux pluviales afin d'accroître la résilience de nos villes face aux effets du changement climatique. Il reste cependant nécessaire de comprendre et d'évaluer l'impact de la végétation urbaine sur les îlots de chaleur.

Par ailleurs, la végétalisation de la ville présente de nombreuses contraintes : il est difficile de planter des arbres dans les rues à des endroits où ils n'ont pas été prévus – du fait de leur développement qui crée un débordement sur la voirie et cause des problèmes de maintenance, des réseaux enterrés (électricité, gaz, eau...), des infrastructures souterraines de transport – ou de créer un parc ou un jardin *ex nihilo* dans un tissu urbain dense. Une solution technique actuelle face au manque de sol disponible consiste à utiliser les surfaces « perdues » comme les toitures et les murs mais elle est parfois difficilement applicable au bâti existant (coût, problèmes d'étanchéité, descentes de charge, esthétique, entretien...). Les villes sont demandeuses de solutions de végétalisation innovantes. Pour répondre à ce besoin, le laboratoire Navier propose d'utiliser un type de structures particulières, les gridshells, comme supports de plantes grimpantes. Dans le cadre de cette thèse, nous l'utilisons comme cas d'étude pour étudier l'impact d'une structure végétalisée sur l'îlot de chaleur, à petite échelle (qui serait celle d'un arbre, par exemple).

Le premier chapitre constitue le point de départ de notre recherche. Des concepts de climatologie urbaine sont exposés, qui permettent de discerner différents phénomènes d'îlots de chaleur. La place de la végétation dans les théories urbanistiques est également évoquée, afin d'appréhender le rôle thermique qu'elle peut jouer, qui est l'objet principal de ce travail de thèse. Un état de l'art sur les études expérimentales et sur les modèles numériques employés pour étudier les effets de la végétation sur le microclimat urbain est ensuite réalisé.

Le deuxième chapitre présente la théorie que nous utiliserons dans le reste du manuscrit. Il reprend des notions générales de thermique et décrit les modes de transfert qui interviennent dans les bilans énergétiques de surface. Ce cadre nous permet de proposer un modèle analytique des processus physiques par lesquels la végétation peut rafraîchir l'air. Nous l'appliquons à des exemples simples afin d'obtenir des ordres de grandeur des différents processus en jeu. Nous tentons enfin de préciser les sens que l'on peut donner au mot « rafraîchissement ».

Le troisième chapitre vise à identifier les paramètres du modèle du chapitre précédent qui méritent le plus d'attention lorsque l'on cherche à caractériser le rafraîchissement, et à étudier des géométries plus complexes. Pour ce faire, nous réalisons des simulations numériques au moyen du code HELIOS, qui nous permet de représenter explicitement des géométries de feuillages en trois dimensions et de simuler finement les transferts radiatifs au sein du couvert végétal.

Le quatrième chapitre décrit la conception et la réalisation d'un dispositif expérimental qui ressemble à un arbre afin de mesurer l'effet sur la température de l'air de la transpiration de la végétation et de l'ombre qu'elle peut fournir. Ce dispositif que nous souhaitons léger et couvrant, pour permettre les mesures évoquées, est un gridshell élastique en matériaux composites. Le chapitre détaille les caractéristiques géométriques, mécaniques et techniques de cette catégorie de structures puis retrace nos propres expérimentations pour aboutir au dispositif mis en œuvre.

Le cinquième chapitre rassemble les résultats expérimentaux obtenus sur plusieurs mois par le dispositif que nous avons construit. D'autres mesures ponctuelles, utiles à la caractérisation du rafraîchissement, viennent compléter les données recueillies en continu.

Le sixième chapitre traite de l'évaluation environnementale du gridshell végétalisé. La méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) est présentée puis appliquée au prototype présenté précédemment en vue d'évaluer les coûts et les bénéfices environnementaux de ce type de mobilier urbain.

Chapitre 1

Végétation et microclimat urbain

Nous commençons par donner quelques éléments contextuels qui permettent de situer notre travail. Ainsi, une brève présentation des différents phénomènes d'îlots de chaleurs urbains nous sert à énoncer les enjeux d'une atténuation de leurs effets. Nous rappelons dans quelle mesure la végétation est un outil de modération de la surchauffe urbaine et nous identifions les mécanismes en jeu, les bénéfiques réels ainsi que les limites des dispositifs de végétalisation urbaine. Nous complétons ce rappel d'un état de l'art des études expérimentales estimant les effets de tels dispositifs, puis passons en revue quelques modèles disponibles pour décrire les îlots de chaleurs urbains et l'impact de la végétation sur ces derniers. Une fois posé le cadre de ce travail, nous concluons ce chapitre en explicitant le positionnement de la thèse.

1.1 Contexte

1.1.1 Climatologie urbaine

La manière dont le climat façonne la ville, à toutes les échelles, est déjà évoquée par Vitruve dans son traité *De architectura*, au I^{er} siècle avant J.-C. L'architecte romain donne en effet quelques principes urbanistiques qui demandent de s'adapter au climat local :

S'agit-il de construire une ville ? La première chose à faire est de choisir un endroit sain. Il doit être élevé, à l'abri des brouillards et du givre, situé sous la douce température d'un ciel pur, sans avoir à souffrir ni d'une trop grande chaleur ni d'un trop grand froid. Ensuite il faudra éviter le voisinage des marais.¹ [...] Une fois l'enceinte terminée, on doit à l'intérieur s'occuper de l'emplacement des maisons, et de l'alignement des grandes rues et des petites, suivant l'aspect du ciel. Les dispositions seront bien faites, si l'on a eu soin d'empêcher que les vents n'enfilent les rues : s'ils sont froids, ils blessent ; s'ils sont chauds, ils corrompent ; s'ils sont humides, ils nuisent.²

Si, au départ, l'architecture se fonde sur une stratégie d'adaptation, par le choix d'un endroit propice aux conditions climatiques agréables, Vitruve finit par préconiser une méthode de transformation de ces conditions naturelles :

1. Livre I, chapitre IV. Sur le choix d'un lieu qui soit sain. Traduction de Maufras (1847).

2. Livre I, chapitre VI. De la distribution des bâtiments, et de la place qu'ils doivent occuper dans l'enceinte des murailles. *Ibid.*

Dans les pays septentrionaux, les maisons doivent être voûtées, parfaitement closes, avec de petites ouvertures, et tournées vers les parties où règne la chaleur. Au contraire, dans les régions méridionales qui sont exposées à l'action brûlante du soleil, elles doivent avoir de vastes ouvertures, et être tournées vers le septentrion et l'aquilon. Ainsi ce que la nature présente d'incommode, pourra être corrigé par l'art.³

Dès lors, l'un des enjeux de l'architecture sera non seulement de composer avec les conditions naturelles, mais également de créer, à partir d'un lieu *a priori* inhospitalier, un endroit habitable, voire confortable.

L'homme modifie tellement son territoire, dans certaines régions urbanisées, que l'on en vient à étudier non plus l'influence du climat sur la ville mais l'influence de la ville sur le climat. Ainsi, au début du XIX^{ème} siècle, Luke Howard compile pendant vingt-cinq ans des données météorologiques (température, humidité, pression, précipitations...) de Londres et de la campagne environnante, publiées sous le titre *The Climate of London* (Howard, 1833). L'étude comparative de ces relevés marque le début de la climatologie urbaine, domaine de recherche centré autour de la météorologie, de la climatologie et des sciences de l'environnement – en particulier la pollution de l'air – et intégrant, entre autres, des connaissances issues de la géographie, de l'urbanisme, de l'architecture ou encore de l'ingénierie du bâtiment.

Un bref historique de la discipline, dressé par Mills (2014), montre le passage d'une approche descriptive à une approche explicative des phénomènes observés :

- 1900** : Observation et description des effets de la ville sur le climat au moyen d'appareils météorologiques conventionnels (thermomètres, hygromètres, etc.).
- 1960** : Transition vers l'étude des variables caractérisant les processus physiques en jeu : rayonnement, échange de chaleur sensible et latente. Utilisation de méthodes statistiques pour résumer et généraliser les résultats.
- 1970** : Application de la théorie de la météorologie à l'étude des climats urbains. Utilisation du bilan énergétique comme cadre théorique pour expliquer les phénomènes. Estimation des flux du bilan énergétique. Utilisation de techniques de modélisation numérique. Définition plus rigoureuse de la « surface » et des échelles urbaines.
- 1980** : Approche expérimentale : sélection de formes urbaines standard (« la rue canyon » par exemple). Utilisation de modèles physiques réduits et mesure directe des flux.
- 1990** : Relations entre des formes urbaines réelles et leur effet sur le climat. Cas d'étude examinés par des équipes de recherche.
- 2000** : Développement de modèles de climat urbain réalistes. Usage de nouvelles techniques pour analyser le climat urbain." [notre traduction]

On peut toutefois s'interroger sur la notion de « modèles de climat urbain réalistes » dans la mesure où il peut être difficile de savoir s'ils évoluent conformément aux observations, ces dernières pouvant être compliquées à recueillir et interpréter en milieu urbain.

3. Livre VI, chapitre I. De la disposition des maisons appropriées aux localités. *Ibid.*

1.1.2 Îlots de chaleur urbains, surchauffe urbaine et confort thermique extérieur

L'un des phénomènes initialement décrits par Howard (1833) est une différence entre la température de l'air au centre-ville de Londres (qu'il nomme la température *urbaine* T_U), mesurée par la *Royal Society*, et la température de l'air en périphérie (la température *rurale* T_R), qu'il mesure à Plainstow, Stratford et Tottenham Green, à 5-10 kilomètres du centre-ville :

$$\Delta T_{U-R} = T_U - T_R \quad (1.1)$$

D'après ses relevés, cette différence de température est positive toute l'année et vaut pratiquement 1 °C en moyenne sur dix ans, comme indiqué sur la figure 1.1. Il en conclut que Londres a un excès artificiel de chaleur. Celui-ci serait dû, en faible proportion, à la quantité d'hommes et d'animaux qui réchaufferaient la ville par la température de leurs corps et, en majeure partie, par les feux alimentant l'activité humaine (fonderies, brasseries, machines à vapeur, feux des industries et des foyers), surtout en hiver. En été, Howard explique cet excès de chaleur par la géométrie de la ville – les rues piègent le rayonnement et les bâtiments bloquent les vents, tandis que les surfaces planes de la campagne rayonnent vers le ciel et sont balayées par des brises fraîches – ainsi que par la disponibilité en eau de la campagne qui lui permet de dissiper de l'énergie par évaporation.

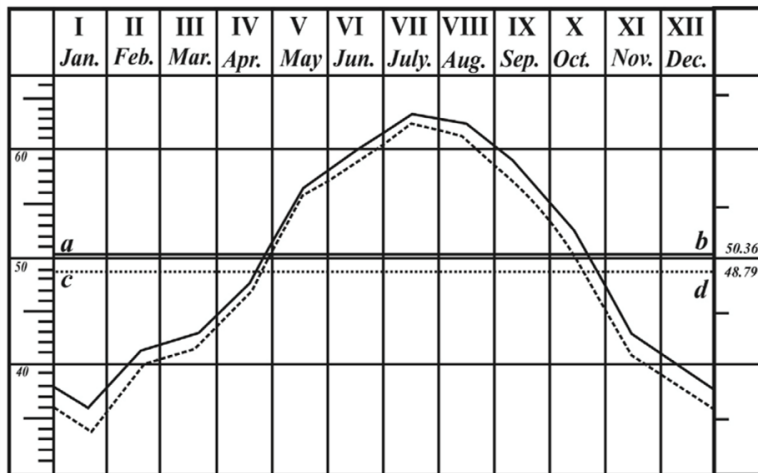


FIGURE 1.1 – Comparaison entre les relevés de la température de l'air à Londres (ligne pleine) et dans la campagne environnante (ligne pointillée). Les relevés ont été effectués entre 1807 et 1816. Pour chaque mois, la valeur indiquée correspond à une moyenne sur ces dix ans et sur les trois lieux. La température moyenne sur dix ans est indiquée à droite : 50.36 °F (10.20 °C) à Londres, 48.79 °F (9.33 °C) à la campagne (d'après Howard (1833)).

Ces observations préfigurent l'étude de ce que l'on appellera au milieu du XX^{ème} siècle *l'îlot de chaleur urbain* (ICU), par analogie entre les isothermes autour d'une zone urbanisée et les courbes de niveau d'une carte topographique (voir figure 1.2), qui sera mesuré et analysé à de nombreux endroits du globe.

Afin de généraliser les résultats obtenus pour différentes localités, Timothy Oke (1973)

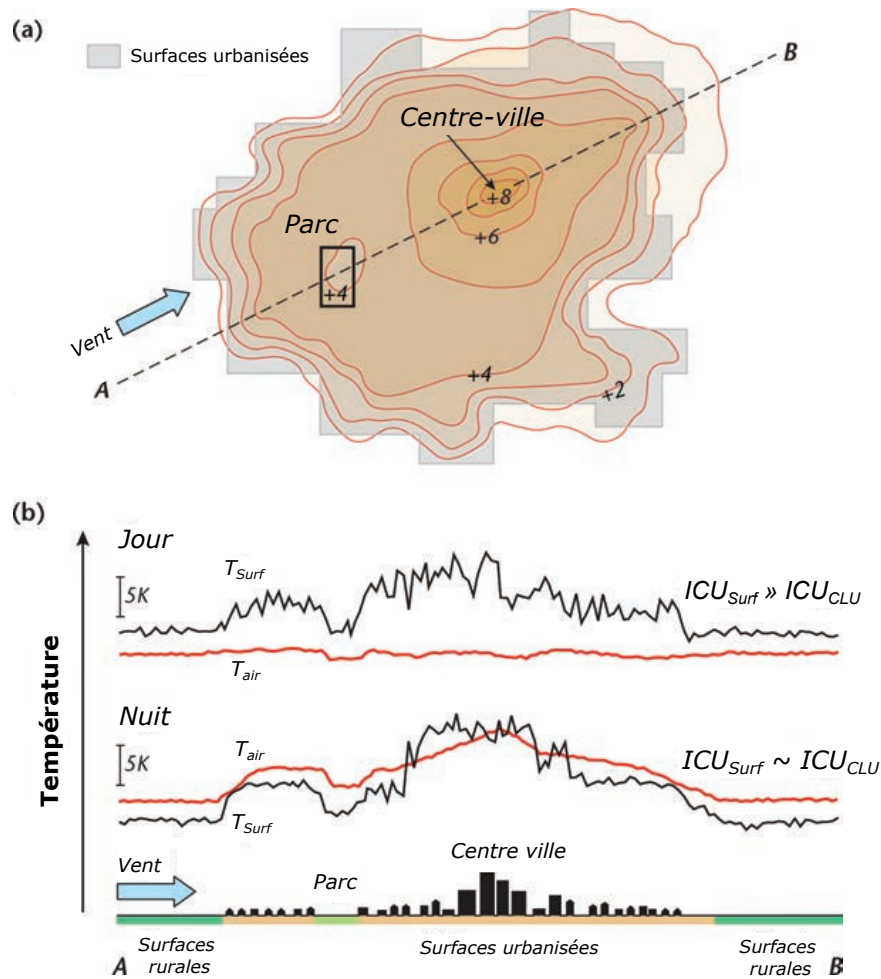


FIGURE 1.2 – Schéma d'un îlot de chaleur urbain (d'après Oke *et al.* (2017)).

tente d'établir une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la population P :

$$\Delta T_{U-R(max)} = \begin{cases} 2.96 \log P - 6.41 & \text{en Amérique du Nord} \\ 2.01 \log P - 4.06 & \text{en Europe} \end{cases} \quad (1.2)$$

la variable P servant de proxy pour caractériser la taille de la ville. La distinction entre les villes américaines et européennes serait due à des morphologies urbaines différentes.

Pour prendre en compte la géométrie de la ville, Oke choisit comme modèle élémentaire la *rue canyon*, rue idéale dont la longueur est grande par rapport à sa hauteur et sa largeur, qui lui semble représentative des centres-villes anciens, où sont enregistrées les températures les plus élevées. Cette géométrie est caractérisée par le rapport d'aspect H/W (le ratio entre la hauteur du bâti H et la largeur de la rue W) ou par le facteur de vue SVF (pour *sky-view factor*, qui est la fraction du ciel vue depuis un point de la rue, c'est-à-dire le rapport entre l'angle solide sous lequel le ciel est visible et l'angle solide d'un hémisphère), ce dernier permettant d'étendre les résultats à une multitude de configurations urbaines (voir figure 1.3). Ces indicateurs permettent à Oke (1981) de

proposer comme expression de l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain :

$$\Delta T_{U-R(max)} = 7.45 + 3.97 \ln \left(\frac{H}{W} \right) = 15.27 - 13.88 \text{ SVF} \quad (1.3)$$

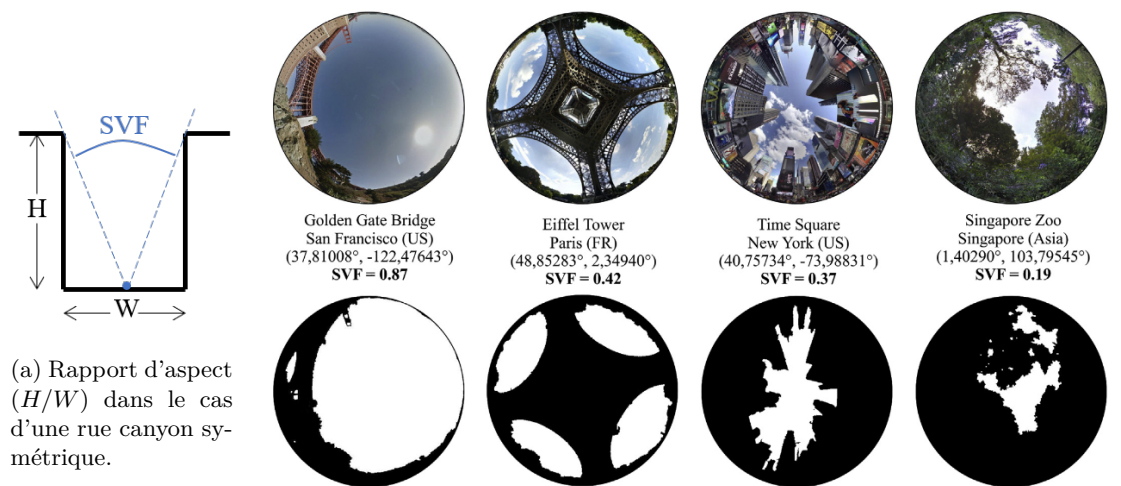


FIGURE 1.3 – Indicateurs de la géométrie de l'espace urbain.

Cette relation indique que l'îlot de chaleur est plus intense pour des villes aux rues étroites, c'est-à-dire présentant un rapport d'aspect élevé ou un facteur de vue faible. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un facteur de vue faible limite la déperdition d'énergie par rayonnement de la rue vers le ciel. Par conséquent, les surfaces composant la rue ont une température plus élevée et perdent plus d'énergie par chaleur sensible, en réchauffant l'air, en particulier la nuit.

Différents types d'îlots de chaleur

Afin de permettre une interprétation plus physique du phénomène, il devient nécessaire de le définir plus précisément. Oke *et al.* (2017) définissent quatre types d'îlots de chaleur urbains (ICU), représentés sur la figure 1.4, qui ont des échelles spatiale et temporelle ainsi que des dynamiques différentes :

- l'îlot de chaleur de la couche limite urbaine (ICU_{CLU}) ;
- l'îlot de chaleur de la canopée urbaine (ICU_{can}) ;
- l'îlot de chaleur urbain de surface (ICU_{surf}) ;
- l'îlot de chaleur urbain souterrain (ICU_{st}).

Le premier est pertinent à une échelle mésoscopique : de la même façon qu'une plaque chauffée en soufflerie perturberait l'écoulement, la ville génère une couche interne dans l'atmosphère qu'on appelle la couche limite urbaine (voir figure 1.5). L' ICU_{CLU} correspond à la différence de température de l'air entre le sommet de la couche limite urbaine (d'une épaisseur de l'ordre du kilomètre) et une altitude similaire au-dessus du milieu rural.

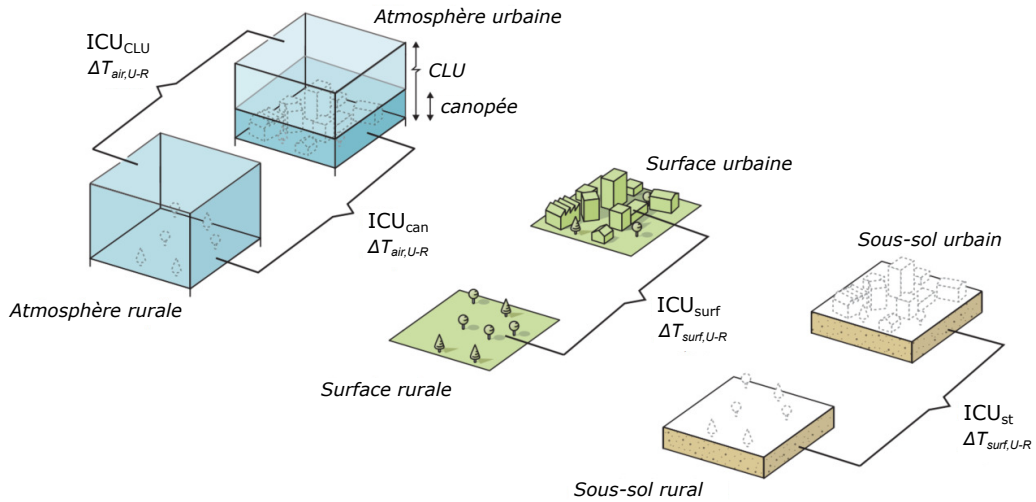


FIGURE 1.4 – Quatre types d'îlot de chaleur urbain (d'après Oke *et al.* (2017)).

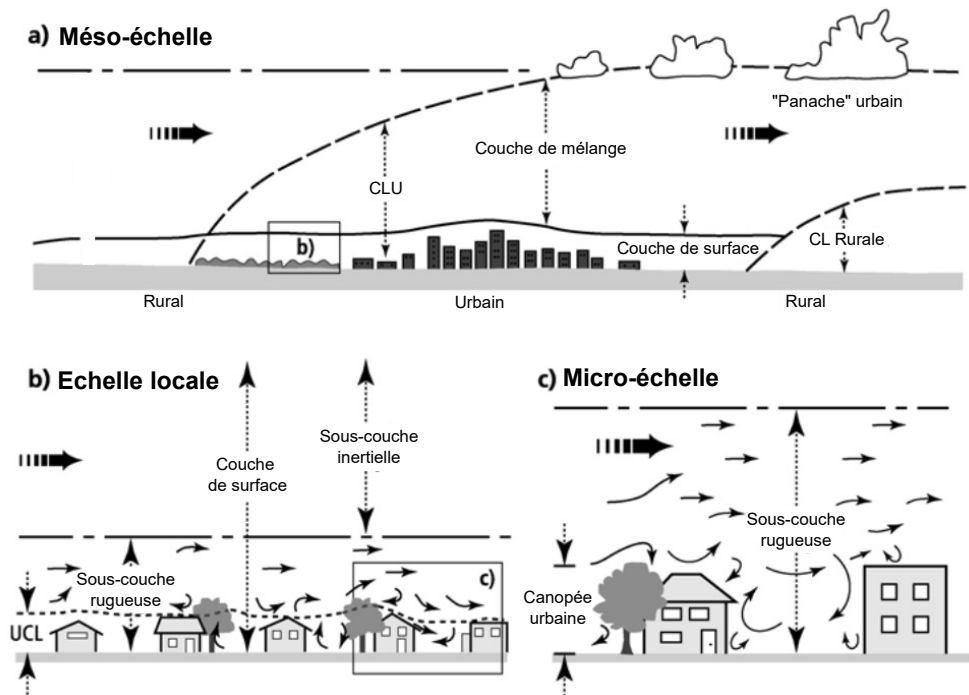


FIGURE 1.5 – Représentation du panache urbain et des couches internes dans la basse atmosphère (d'après Piringier *et al.* (2002)).

Le deuxième se conçoit à une échelle dite locale : il concerne l'air dans la couche de canopée urbaine, qui est la couche comprise entre le sol et les toits des bâtiments. Il se manifeste principalement de nuit, par temps calme, lorsque le rayonnement émis par le sol vers la voûte céleste est élevé et que le mélange de l'air par turbulence est faible (Oke *et al.*, 2017).

Le troisième, à micro-échelle, caractérise la différence de température de surface entre

la ville et le milieu rural. Par *surface*, on entend toutes les facettes d'un quartier telles que le sol, les façades, les toits, etc. La dynamique de l'ICU_{surf} peut se déduire de bilans énergétiques de surfaces, qui seront détaillés au chapitre suivant.

Le quatrième est la différence de température entre le sous-sol de la ville et le sous-sol rural.

D'autres notions pour aborder le problème

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'environnement thermique des habitants de la ville, en extérieur, en été. Une donnée importante est la température de l'air proche du sol, dans les rues, au niveau des piétons. Les études sur l'îlot de chaleur urbain susceptibles de nous aider dans notre travail concernent donc principalement l'ICU de surface et l'ICU de canopée urbaine.

En réalité, la notion d'îlot de chaleur urbain telle qu'elle a été définie précédemment n'est pas la plus pertinente lorsque l'on étudie des stratégies visant à ce qu'il fasse moins chaud en ville, comme le notent Martilli *et al.* (2020). Nous récapitulons ici les points importants qui ressortent de leur article, sur les raisons pour lesquelles l'ICU n'est pas la notion adéquate dans notre cas :

- L'intensité de l'ICU (ΔT_{U-R}) ne dépend pas uniquement de la morphologie d'une ville donnée ou des propriétés thermo-radiatives de ses matériaux : elle dépend du milieu urbain *et* du milieu rural environnant puisque l'on considère une différence de température entre deux endroits. Deux villes identiques, du point de vue de leur morphologie, leurs matériaux, leur population, etc., sujettes à des climats similaires, peuvent donc connaître des intensités d'ICU différentes si les milieux ruraux qui les environnent sont différents.
- Un corollaire est que l'intensité de l'ICU n'indique pas si les habitants de la ville ont trop chaud. Les auteurs prennent pour exemples Moscou ou des villes d'Amérique du Nord, pour lesquelles un ICU élevé serait bénéfique en hiver, ou au contraire Phoenix et Madrid, qui peuvent être plus fraîches la journée que les milieux désertiques ou semi-arides qui les environnent (elles ont donc un ICU faible voire négatif), ce qui ne veut pas dire que la chaleur qu'il fait dans la ville n'est pas un problème pour les habitants.
- L'ICU est souvent maximal à partir de la tombée de la nuit alors que les températures les plus élevées, dégradant le confort thermique des habitants et causant une forte demande d'énergie pour climatiser les bâtiments, ont lieu en journée. Une stratégie d'atténuation de la chaleur en ville en journée n'est donc pas forcément équivalente à une stratégie d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain.
- Une augmentation de l'ICU n'implique pas une dégradation du confort thermique des habitants de la ville. Les auteurs prennent l'exemple d'une couronne verte qui viendrait cerner une ville construite dans un environnement aride : il serait possible que l'ICU augmente et que la température de l'air en ville baisse dans le même temps.

Le problème qui nous préoccupe est qu'il fasse chaud dans la ville à un endroit et un moment donnés. Certaines études emploient le terme d'*îlot de chaleur* pour décrire cet

endroit⁴, ce qui peut prêter à confusion. Dorénavant, pour plus de clarté, nous ne parlons plus d'atténuation des effets d'îlot de chaleur urbain mais plutôt de stratégie pour limiter la surchauffe urbaine.

Un concept qui nous paraît plus adapté pour aborder ce problème est celui de *confort thermique*, ou de *confort thermique extérieur* (*extérieur* signifiant « à l'extérieur des bâtiments »). Cette notion vise à déterminer les conditions ambiantes pour lesquelles un individu est satisfait d'un point de vue thermique, c'est-à-dire qu'il n'a ni trop chaud ni trop froid ou, dit autrement, que les échanges thermiques qu'il a avec son environnement lui conviennent. Cette sensation de satisfaction thermique est propre à chaque personne et n'est donc pas définie uniquement par les conditions environnementales. Elle dépend, d'une part, de la personne elle-même – de paramètres physiologiques (son métabolisme, par exemple) et comportementaux (les vêtements qu'elle porte, son activité physique), de son état de fatigue, sa tolérance à la chaleur... – et d'autre part de l'environnement dans lequel elle se trouve – donc de paramètres physiques tels que la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse de l'air ou encore le rayonnement incident. Les indicateurs de confort thermique sont extrêmement nombreux et ont une base plus ou moins physique (Migliari *et al.*, 2022).

Parmi les modèles à base physique, on peut citer l'indice universel du climat thermique, UTCI (pour *Universal Thermal Climate Index*). Ce dernier donne une mesure du stress thermique humain en combinant quatre paramètres environnementaux (la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement) intervenant dans le bilan énergétique d'un individu dont le métabolisme, l'activité physique et l'habillement sont également modélisés (Jendritzky *et al.*, 2009, 2012; Havenith *et al.*, 2012; Bröde *et al.*, 2012). L'annexe A montre la sensibilité du modèle UTCI aux différents paramètres environnementaux, par rapport à une ambiance thermique de référence. Ces courbes de Kongsgaard (2021) permettent de voir que pour une situation de référence correspondant à une journée estivale, la température de l'air et le rayonnement sont les deux variables environnementales sur lesquelles il semble pertinent de jouer pour améliorer le confort thermique extérieur en ville.

Conséquences de la surchauffe urbaine

Un problème évident causé par la surchauffe urbaine est l'inconfort des habitants de la ville en période estivale. De surcroît, lors de vagues de chaleur⁵, la surchauffe urbaine augmente le risque que la sensation d'inconfort éprouvée par un individu se transforme en stress thermique prolongé, et qu'il ait des difficultés à réguler sa température corporelle, avec pour conséquences des troubles ou des maladies potentiellement graves. Pour exemple, la canicule de 2003 en France qui a exposé à des températures excessives une population peu préparée à de tels épisodes de chaleur, ce qui a entraîné une surmortalité de plus de 15000 personnes lors des trois premières semaines d'août sur l'ensemble du territoire. Ce pic de décès est illustré sur la figure 1.6. La surchauffe urbaine pose donc

4. Potentiellement par souci de vulgarisation, pour se faire comprendre du grand public, car on retrouve le terme très fréquemment dans les médias ou les textes de politiques publiques.

5. D'après le Ministère de la Santé (2022), ce terme regroupe plusieurs événements météorologiques – pic de chaleur, épisode persistant de chaleur, canicule et canicule extrême – qui diffèrent par leur durée, leur intensité et leur étendue géographique. Les seuils de température à prendre en compte pour définir ces événements diffèrent également selon les départements.

des questions en matière de santé publique puisqu'elle aggrave les risques sanitaires auxquels est soumise la population en ville, qui ne cesse d'augmenter.

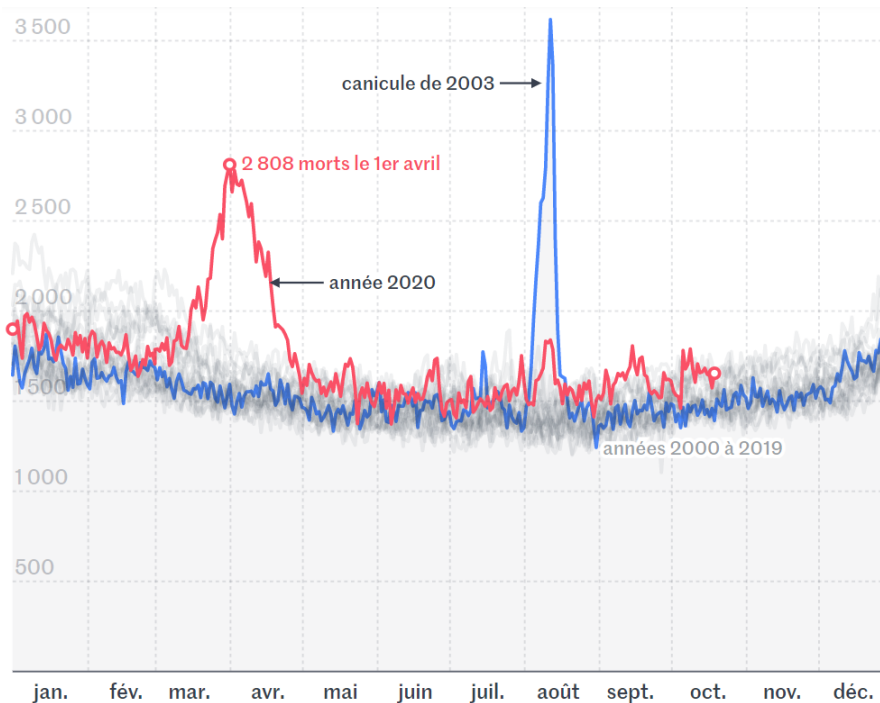


FIGURE 1.6 – Nombre de morts quotidiennes en France au cours de l'année, d'après des données de l'Insee. Les années entre 2000 et 2019 sont grisées, l'année 2003 est en bleu et l'année 2020 en rouge. La surmortalité due à la canicule de 2003 (du 1^{er} au 24 août) est estimée à 15300 personnes. En comparaison, celle due à l'épidémie de Covid-19 au printemps 2020 (10 mars au 8 mai) est estimée à 27300 personnes (image : site du journal Le Monde).

Une conséquence annexe de la hausse de la température de l'air en ville est l'utilisation accrue de systèmes de climatisation à l'intérieur des bâtiments. Celle-ci a elle-même deux conséquences : la première est une augmentation de la consommation énergétique des bâtiments ; la deuxième un rejet d'air chaud vers l'extérieur, qui participe à la surchauffe urbaine, de manière non négligeable, de jour comme de nuit. En effet, de Munck *et al.* (2013) ont estimé que lors de la canicule de 2003, la contribution des rejets des climatiseurs à l'îlot de chaleur urbain à Paris (dans l'étude citée, il s'agit de la température de l'air à 2 mètres du sol) était de 1 °C à 2 °C dans certains arrondissements entiers.

1.1.3 La végétation comme moyen de rafraîchir la ville

Avant de discuter des effets thermiques de la végétation en milieu urbain, nous présentons diverses fonctions qu'on a pu lui prêter au fil des ans. Le but des paragraphes qui suivent n'est pas de rappeler de manière exhaustive la place qu'a historiquement tenue la végétation en ville – on pourra pour cela se référer à la synthèse réalisée par Lotfi Mehdi *et al.* (2012) – mais de rappeler quelques exemples de théories urbaines s'appuyant sur des fonctions qui lui ont été affectées. En observant le rôle accordé à la végétation au sein des pensées urbanistiques, nous notons deux tendances qui ne s'excluent pas et perdurent depuis le XIX^{ème} siècle : celle d'abord de lui attribuer des vertus thérapeutiques ; celle ensuite de la réduire à ses fonctions pour l'homme tout en oubliant les besoins du végétal.

Une végétation thérapeutique

Arturo Soria (1844-1920) parle dès le XIX^{ème} siècle des grandes villes comme des « tumeurs menaçantes » contre lesquelles il propose un modèle de cité linéaire où des habitations entourées de « verdure » en forte proportion viendraient cerner une ligne de chemin de fer⁶. Le végétal vient ici répondre à un double enjeu de distanciation aux nécessaires infrastructures et de proximité à une nature avant tout nourricière. Il se voit conférer des fonctions vitales pour l'homme puisqu'il est censé le protéger à la fois des fumées du trafic ferroviaire et de son bruit (par la présence d'alignement d'arbres le long des voies) en plus de subvenir à ses besoins alimentaires (présence d'un potager pour chaque habitation).

En s'inspirant de Soria, Ebenezer Howard (1850 - 1928) développe un concept de ville radio-concentrique, la cité-jardin, qui à son tour vise à dépasser l'opposition ville-campagne et à rendre aux citoyens des « champs et parcs accessibles » ainsi que de « l'air et de l'eau purs », comme indiqué sur la figure 1.8. Le végétal permet ici à Howard d'imaginer une répartition des usages et de la population qu'il estime harmonieuse, par contraste avec la grande ville industrielle qu'il accuse de nombreux méfaits, notamment de trop grande densité et de paupérisation.

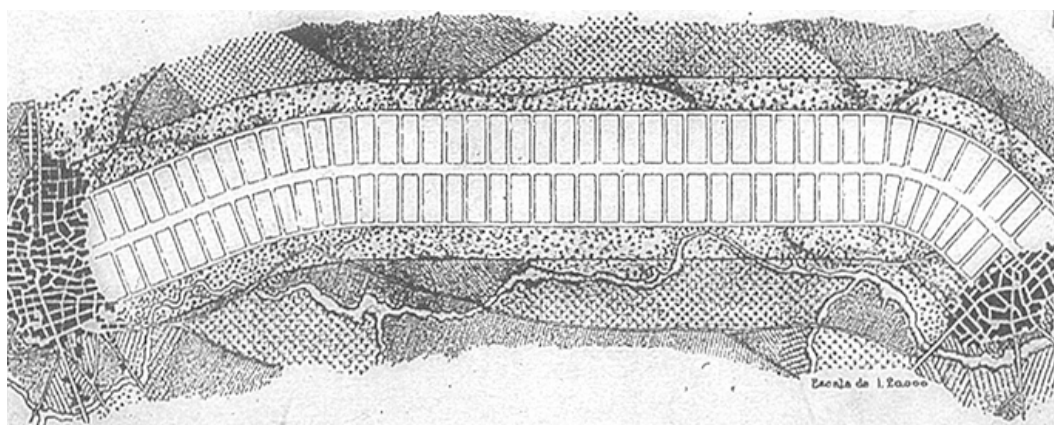


FIGURE 1.7 – Dessin de principe d'Arturo Soria de sa cité linéaire.

De la même manière, la proposition de Frank Lloyd Wright, *Broadacre City*, qui structure l'aménagement du territoire autour des grands espaces naturels et des sols agricoles, est conçue en opposition à la grande ville désignée comme « cancer »⁷. En regard d'une ville perçue comme menaçante et délétère pour la santé humaine, la végétation est encore une fois installée pour son rôle implicite de purification de l'air, et de manière plus explicite pour sa capacité à nourrir les hommes.

L'idée que le végétal a la faculté de soigner les maux de la ville est toujours prégnante. Si, dans les exemples évoqués, c'est la cité industrielle qui faisait office de repoussoir, c'est aujourd'hui la ville dense et automobile qu'il s'agit de traiter, dont des signes manifestes sont l'air pollué et l'îlot de chaleur urbain. Aussi, des dynamiques émergent à plusieurs échelles pour mettre en œuvre le traitement *ad hoc* parmi lesquelles nous

6. Les mots entre guillemets sont d'Arturo Soria, cité par Mehdi *et al.* (2012).

7. Expression de l'architecte, lu dans Maumi (2015).

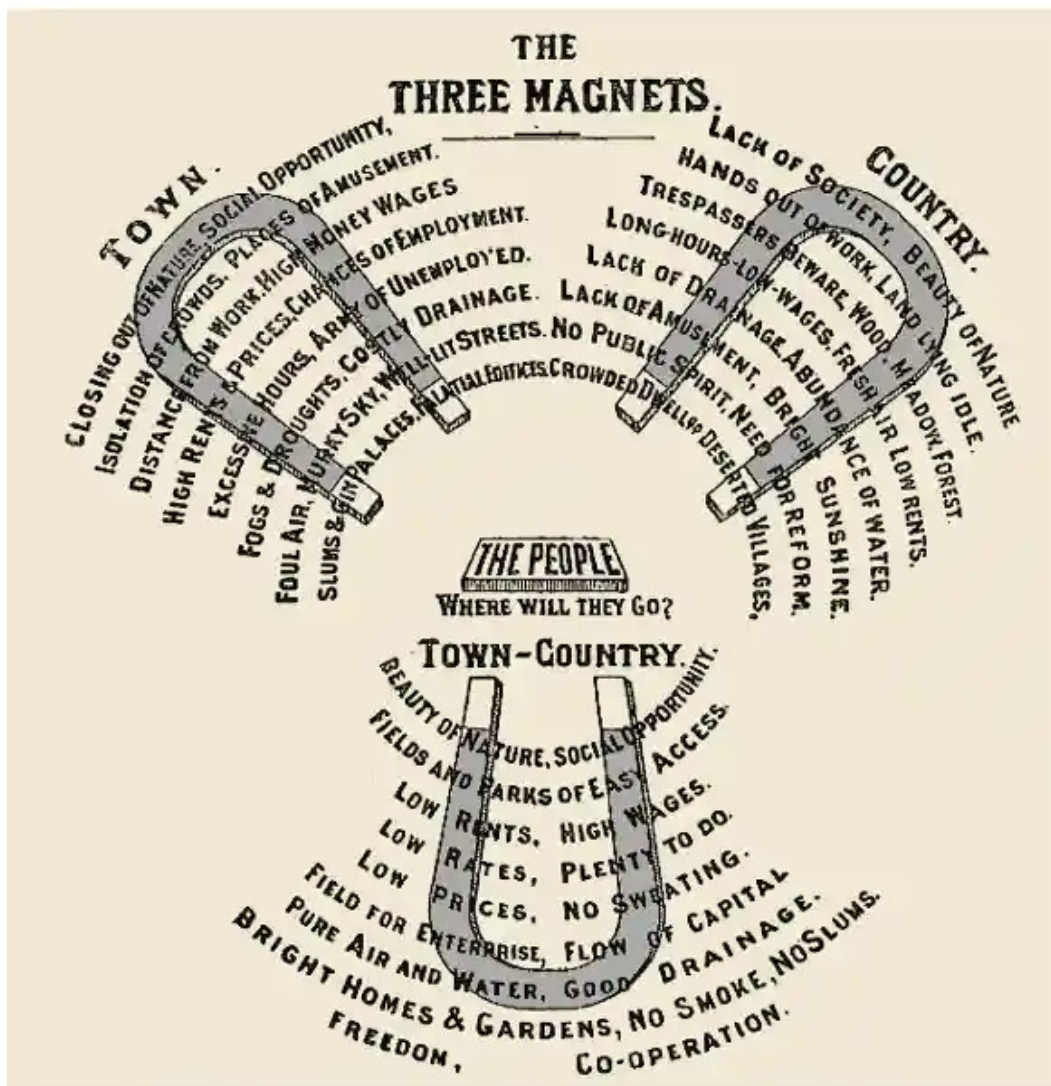


FIGURE 1.8 – Schéma des trois aimants de Ebenezer Howard.

pouvons citer les cours Oasis de la ville de Paris (figure 1.11b) pour une échelle urbaine, ou encore les *CityTrees* de l'entreprise *Green City Solutions* (figure 1.12) à l'échelle du mobilier urbain⁸. Le fait d'attribuer à la végétation des vertus thérapeutiques nous semble engendrer, pour l'aménageur du territoire, deux risques :

- Celui d'abord d'une attente excessive : on considère l'arbre comme un véritable climatiseur (voir la figure 1.11a), comme un purificateur d'air ou comme un puits de carbone, surestimant ses capacités et invitant à ne pas traiter les causes réelles du mal que la végétation est censée soigner. Si un arbre peut stocker temporairement le carbone ou améliorer la qualité de l'air, c'est bien l'arrêt des émissions de gaz à effet de serre qui limitera le réchauffement climatique et l'abandon de la voiture individuelle qui permettra de réduire la pollution de l'air en ville.
- Celui ensuite de restreindre la végétation à une fonction unique (par exemple sa

8. Ces dispositifs techniques sont décrits comme « des murs mobiles recouverts de mousse [qui] assainissent l'air pollué et font baisser les températures urbaines » dans un article publié sur le site du *Monde* intitulé *La nature de retour dans les villes*.

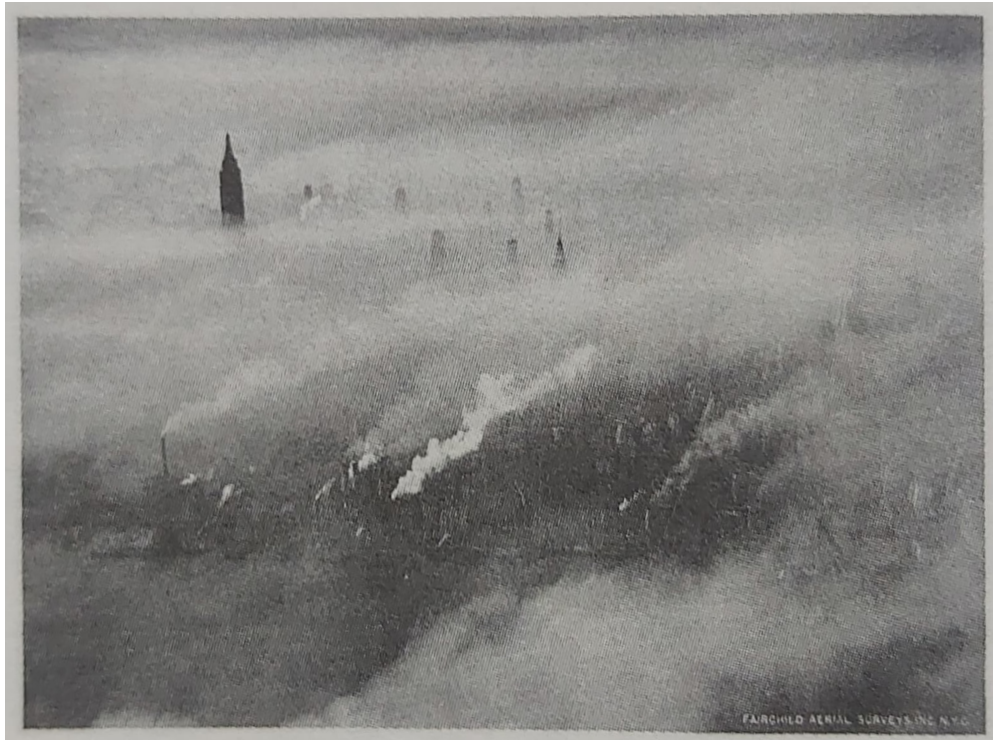
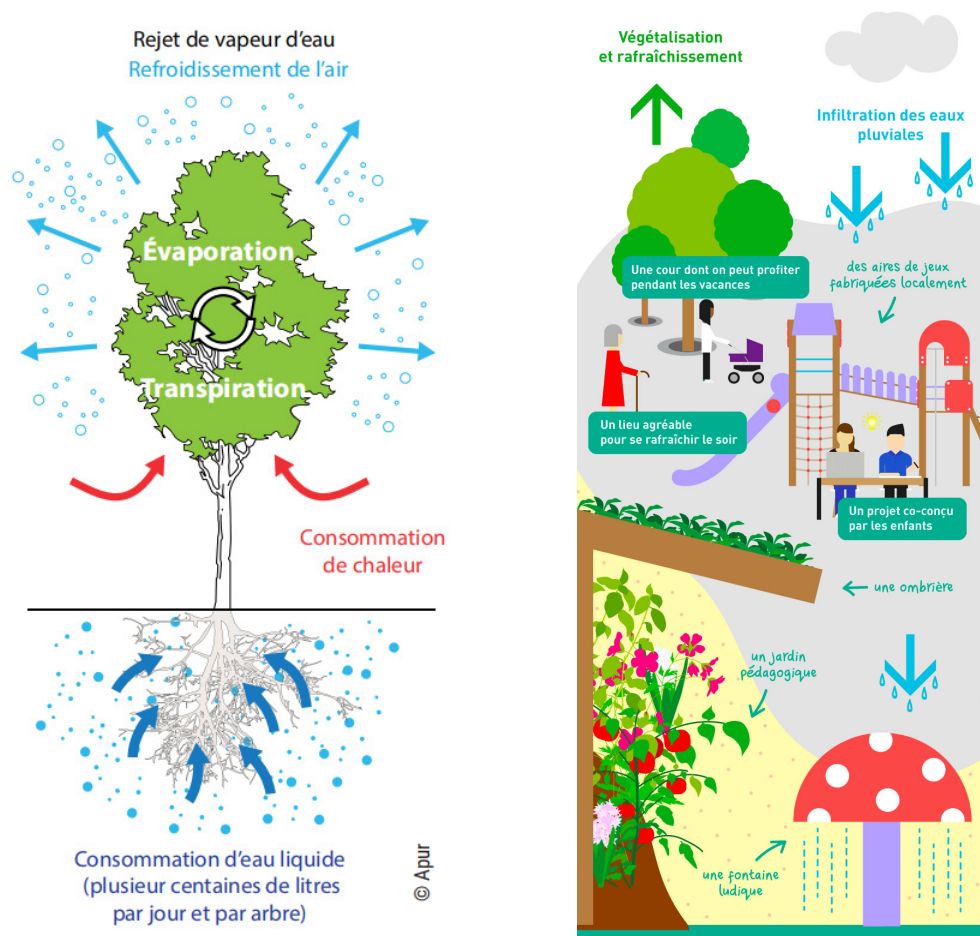


FIGURE 1.9 – Illustration du livre *The Disappearing City* (1932) de Wright. Dans le modèle de cité-jardin d’Ebenezer Howard comme dans la critique de la ville qu’opère Frank Lloyd Wright, la question de l’accès à un air pur est centrale. Dans leurs contre-propositions, la nature – en fait la végétation – joue un rôle tacite, alors inexplicité physiquement, de purification de l’air.



FIGURE 1.10 – Photographie de la maquette de *Broadacre City* réalisée pour l’exposition éponyme au Rockefeller Center en 1935 (source : Gray (2018)).



(a) « Effet microclimatique de l'arbre – Rafraîchissement » (source : cahier n° 5 de l'APUR (2020)) (b) Communication de la ville de Paris portant sur les cours Oasis

FIGURE 1.11 – On constate combien les aménageurs (ici la ville de Paris) « misent » sur les capacités de rafraîchissement des arbres, quitte à y voir de véritables climatiseurs urbains.



FIGURE 1.12 – Photographie du City Tree de Green City Solutions, « le mur végétal qui purifie l'air comme 275 arbres ».

capacité à capter des particules fines) en mettant de côté les autres (par exemple sa qualité à accueillir de la faune, ou simplement à faire de l'ombre). Ainsi, un système technique comme le *CityTree* évoqué précédemment devient comparable à une quantité d'arbres génériques (« 1 *CityTree* = 275 arbres »), devenus une simple unité de mesure, et perdant par là-même toute singularité. Du fait que le système *purifie l'air comme 275 arbres* au fait qu'il soit *équivalent à 275 arbres* (avec toutes les fonctions écosystémiques et les aménités que ces derniers peuvent fournir), il n'y a qu'un pas, qui peut rapidement mener au *greenwashing*.

Notre travail cherche à éviter ces deux écueils. Bien que nous portions notre attention sur le rôle que jouent les végétaux en ville d'un point de vue thermique uniquement, nous n'oublions pas leurs autres bienfaits. Quant à l'estimation correcte des services qu'ils pourraient rendre, c'est par la compréhension des phénomènes physiques en jeu que nous comptons y parvenir.

La végétation, une couleur comme les autres ?

Le modernisme architectural semble finir de réduire la végétation à des qualités fonctionnelles pour l'homme et c'est ainsi que la charte d'Athènes ne parle presque qu'exclusivement de « surfaces vertes » qui sont surtout le support d'équipements bien plus que de végétation⁹. Le végétal est donc réduit à une couleur, support idéal de la ville, libérée de la « rue corridor ». C'est une réduction qui passe par une grande valorisation de la végétation : celle-ci est tellement considérée comme le substrat naturel de l'établissement humain qu'on la suppose *in fine* partout et sans singularités, tapissant le territoire de façon homogène (voir figure 1.13).

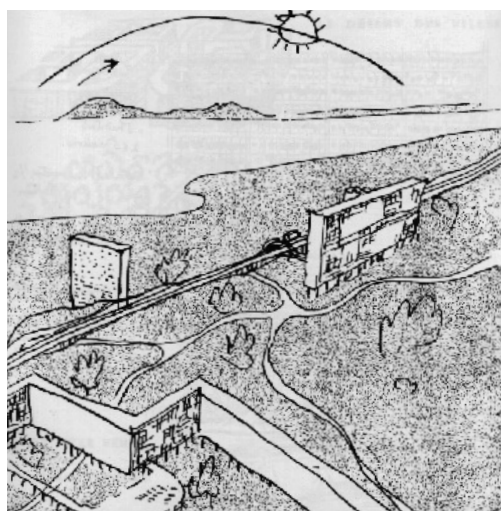
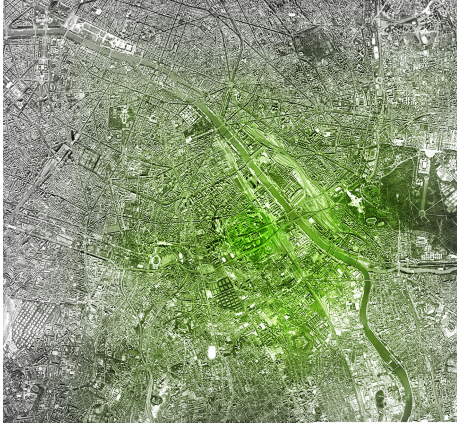


FIGURE 1.13 – Dessin de Le Corbusier, « La ville verte et l'unité d'habitation », extrait de *Les trois établissements humains* (1959).

La végétation se confond avec la couleur de la carte qui la représente, et l'on peut regretter que certains projets prennent au mot l'idée de verdissement des villes, sans finalement

9. Point 37 de la charte d'Athènes : « Les nouvelles surfaces vertes doivent servir à des buts nettement définis : contenir les jardins d'enfants, les écoles, les centres de jeunes ou tous bâtiments d'usage communautaire, rattachés intimement à l'habitation. »



(a) « L'aura green » (sic) de la tour.



(b) Vue de la « Tour de la Biodiversité ».

FIGURE 1.14 – Opération réalisée de la Tour de la Biodiversité dans le 13^{ème} arrondissement de Paris par l'architecte Edouard François. Si le bâtiment se voit orné d'un grillage devant permettre le développement d'une végétation grimpante, on mesure la primauté du vert en tant que couleur à deux échelles : celle de la ville qui profite de l'aura de la tour et celle du bâtiment dont les habitants bénéficient d'un revêtement en titane vert. (Images : site de la Maison Edouard François.)



(a) Image du projet *Tree house* (image : site de l'agence X-TU).



(b) Vue du projet *Mille Arbres* de Sou Fujimoto (image : site du promoteur OGIC).

FIGURE 1.15 – Deux projets lauréats du concours *Réinventer Paris* où l'arbre donne son nom au projet sans pouvoir trouver l'espace de se développer dans la configuration des projets tels qu'imaginés, avec notamment des épaisseurs de dalles qui suggèrent des substrats de trop faible épaisseur.

fournir à la végétation de bonnes conditions pour se développer (voir figure 1.14). La volonté forte d'intégration théorique de la végétation en ville semble avoir ainsi pu aboutir à un haut degré de dénégation de la réalité physique de ce qu'elle est et de ce que l'on peut raisonnablement en attendre.

Couplé à l'attente thérapeutique de la végétation, cet oubli des nécessités des végétaux (un substrat riche et épais, de l'eau, la présence d'une faune permettant l'éventuelle fructification, etc.) a pu mener ces dernières années à des propositions urbaines et architecturales parfois choquantes de contraste entre d'une part la centralité de la végétation dans la proposition et d'autre part la marginalité des dispositions concrètes permettant son développement, à l'image de certains projets lauréats du concours de promoteurs *Réinventer Paris* lancé en 2014 (voir figure 1.15). A nouveau, nous tirons de cette succincte revue deux pièges qui éclairent la finalité de notre travail, en ce qu'il fournit des outils pour ne pas y tomber :

- Le premier est celui de la fausse solution : à réduire la végétation à une couleur, on peut croire que l'on est en train de résoudre un problème physique ou écologique alors que nous créons simplement une esthétique : il est donc nécessaire d'identifier avec justesse l'attente que l'on a du végétal.
- Le second est celui d'une végétation qui ne tient pas dans le temps, ou de faible richesse écosystémique, ou même impossible du fait des conditions dans laquelle on l'insère en ville. Il est donc indispensable d'identifier les conditions nécessaires non seulement à la possibilité d'existence et de maintien de la végétation mais aussi à la réalisation de la fonction pour laquelle on l'installe en ville.

De justes fonctions du végétal

A identifier les écueils éventuels de la végétalisation des villes, on pourrait finir par croire que la chose ne participe que du *greenwashing* ou du ripolinage. Ce n'est évidemment pas le cas. Nous nous proposons donc pour conclure cette partie, et avant d'explicitier les raisons pour lesquelles il pourrait être pertinent de végétaliser les villes en vue d'atténuer l'îlot de chaleur urbain, de présenter certaines références qui nous semblent pertinentes.

Nous pouvons évoquer à ce titre le travail de Gilles Clément. Auteur du *Manifeste du tiers paysage* (Clément, 2004), son intérêt pour les délaissés sort presque immédiatement ses réalisations d'un usage esthétique et réducteur du végétal. Le parc Matisse à Lille laisse par exemple place à un bosquet inaccessible à l'homme, permettant à la végétation de se développer de manière autonome. Ce délaissé volontaire pourra, comme corollaire de son développement propre, apporter nombre des services écosystémiques attendus du végétal.

De la même manière, Alexandre Chemetoff, lorsqu'il réalise plusieurs espaces publics paysagers de l'île de Nantes au début des années 2000, est attentif à l'existant et le développe, ou le préserve. A l'instar du square Mabon, ancienne friche entretenue sans plantation et sans arrosage, la végétation qui se développe dans ses opérations est adaptée aux conditions climatiques locales et apporte sa juste contribution à la ville – au sens où aucun « forçage » n'est appliqué, que ce soit par arrosage, par introduction d'espèces exogènes, ou encore par apport d'engrais. La végétation rend ici les services écosystémiques qu'elle fournit naturellement, à sa juste capacité, et non dans des proportions



FIGURE 1.16 – Photographie de l'île Derborence au sein du parc Matisse à Lille, conçue par Gilles Clément et Empreinte (image : site d'Empreinte).

fantasmées.

A une échelle plus architecturale, nous pouvons citer, pour terminer, l'école-gymnase conçue par l'agence ChartierDalix à Boulogne-Billancourt. Celle-ci met en oeuvre une série de dispositifs d'accueil de la faune et de la flore qui tentent chacun de prendre en compte les besoins des espèces accueillies. Cela se traduit principalement par une variation des épaisseurs de substrat (jusqu'à 1 mètre) et par un suivi écologique qui, régulièrement et à partir d'un inventaire renouvelé, permet de mettre en place des mesures adaptatives : apport de matière organique, introduction d'espèces, ajustement des mesures d'entretien... C'est donc au prix d'un suivi assidu que la durabilité et l'efficacité de la toiture végétalisée sont assurées.

Comment la végétation permet-elle de rafraîchir ?

Le fait de remettre de la végétation en ville est souvent décrit comme un moyen efficace pour atténuer la surchauffe urbaine.

Une raison à cela a déjà été évoquée par Luke Howard : les zones rurales consomment une partie de l'énergie qu'elles reçoivent pour *évaporer*¹⁰ l'eau contenue dans le sol et la végétation. L'énergie nécessaire à ce changement d'état est appelée chaleur latente. *A contrario*, pour une surface sèche, ce mode de dissipation de l'énergie étant indisponible, toute l'énergie reçue contribue à la montée en température de la surface. A rayonnement absorbé égal, une surface évaporante a donc une température plus basse qu'une surface sèche et réchauffe moins l'air environnant. L'énergie qui est cédée par la surface à l'air par convection est appelée chaleur sensible.

Une deuxième raison est que la végétation, par ses propriétés thermo-radiatives différentes de celles des matériaux qui composent la ville, modifie les températures de surfaces

10. On parle souvent d'évapotranspiration pour englober deux phénomènes : l'évaporation de l'eau des sols et la transpiration de l'eau des plantes. Cette transpiration intervient principalement au niveau des stomates des feuilles, qui sont de petits orifices contrôlant les échanges gazeux entre la plante et l'air, un peu à la manière des pores de notre peau qui permettent d'évacuer la sueur.

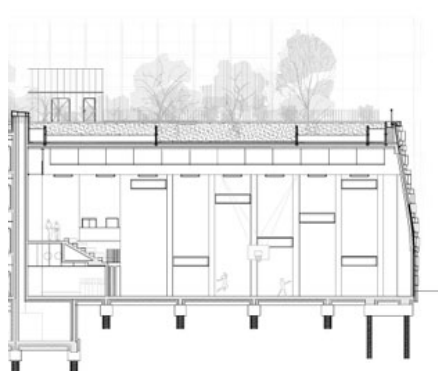


(a) Photographie du square Mabon.



(b) Photographie du Quai François Mitterrand.

FIGURE 1.17 – Paysages conçus par Alexandre Chemetoff (2002-2005) à l’occasion du réaménagement de l’île de Nantes, dont il a par ailleurs réalisé le plan guide. L’attention portée aux éléments urbains et aux paysages existants en est la caractéristique fondamentale. (Images : site d’Alexandre Chemetoff.)

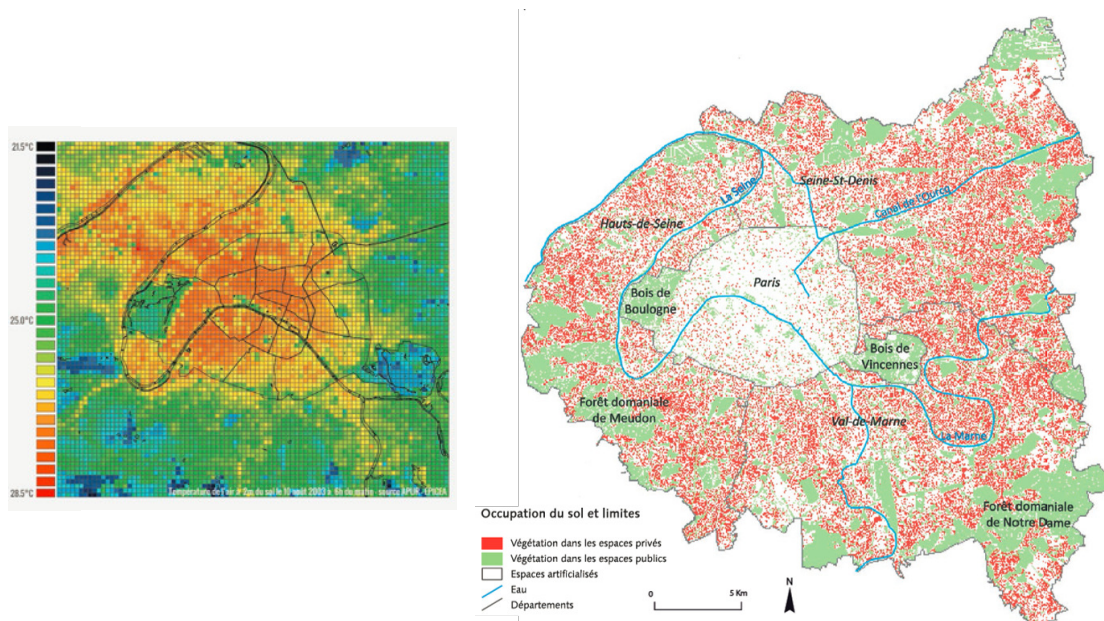


(a) Coupe du bâtiment végétalisé.



(b) Vue du toit végétalisé.

FIGURE 1.18 – Ecole à Boulogne-Billancourt conçue par l’agence ChartierDalix et livrée en 2015. Les épaisseurs de substrat sont adaptées à la végétation en présence et varient de 50 cm pour les herbacées à 1 m pour les arbres de faible hauteur. (Images : site de ChartierDalix.)



(a) Température de l'air à 2 mètres du sol (source : EPICEA 2012). (b) Végétation dans les espaces publics et privés (source : APUR 2010).

FIGURE 1.19 – Corrélation entre la température de l'air à Paris, obtenue par simulation, et le manque de surfaces végétalisées en ville. La simulation correspond à une journée d'été (le 10 août 2013 à 6h du matin). La différence de température entre le centre de Paris et le bois de Vincennes vaut environ 3 °C.

de l'espace urbain. Ainsi, un sol enherbé ou une façade végétalisée au sein d'une rue-canyon peut, potentiellement, absorber moins de rayonnement qu'une surface sombre et par conséquent avoir une température inférieure. Cela a plusieurs effets : la chaleur sensible cédée à l'air est moindre, le rayonnement infrarouge émis par la surface dans toutes les directions est plus faible et la conduction vers les couches inférieures du sol ou vers l'intérieur du bâtiment est également moins importante, ce qui réduit le stockage d'énergie thermique dans les matériaux au cours de la journée et le relargage de cette énergie la nuit.

Une troisième raison concerne plus particulièrement la végétation arborée. La présence d'arbres change la géométrie tridimensionnelle d'un quartier et modifie les échanges radiatifs au sein de cet espace. Les arbres font de l'ombre au sol ou sur les façades, baissant considérablement les températures des surfaces qui pavent la ville, ce qui induit les effets décrits précédemment (réduction de la chaleur sensible, du rayonnement infrarouge émis et du stockage¹¹). Ils font également de l'ombre aux piétons, réduisant considérablement le rayonnement solaire que ces derniers reçoivent.

Ces trois explications – présence d'eau, modification des propriétés physiques des matériaux, modification de la géométrie de la scène urbaine – sont pour le moment qualitatives. Les deux parties qui suivent résument les principaux travaux traitant du rôle de la végétation dans la thermique des espaces urbains, pour le dire de manière large, qui

11. Une description plus précise des modes de transfert de l'énergie thermique qui interviennent dans les bilans énergétiques de surface sera présentée au chapitre 2.

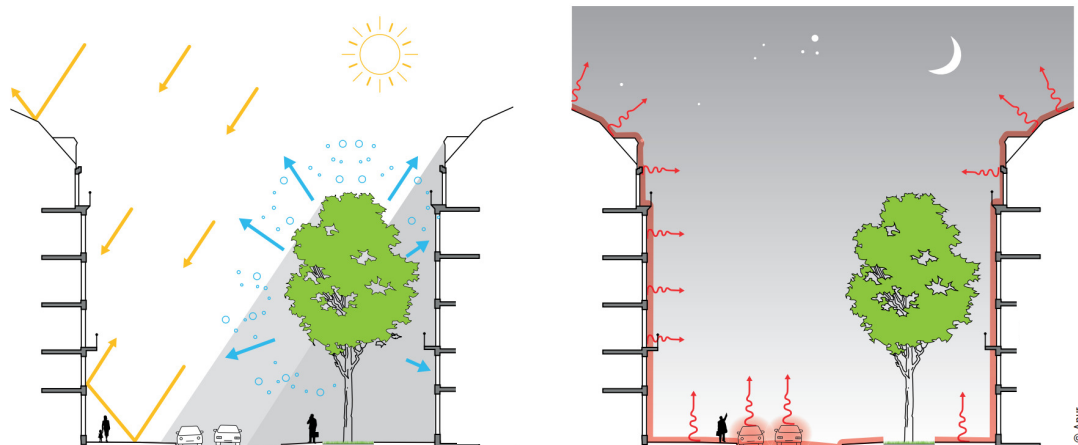


FIGURE 1.20 – Illustration du rôle de l'arbre en ville, suggérant ses trois fonctions pour atténuer les îlots de chaleur urbains (d'après le cahier n° 5 de l'APUR (2020)).

visent à quantifier les différents flux thermiques qui viennent d'être évoqués. La première partie rassemble des études expérimentales sur la végétation en ville, la seconde fait un état de l'art des modèles numériques.

1.2 Structures végétalisées et expérimentations

1.2.1 Végétation arborée

L'utilisation de la végétation pour lutter contre les îlots de chaleur urbains est étudiée dès la fin des années 80 par le *Heat Island Group* du *Lawrence Berkeley Laboratory* en Californie. L'intention première de ces travaux de recherche est de réduire les besoins énergétiques en climatisation des bâtiments (Huang *et al.*, 1987). Taha *et al.* (1991) se sont ainsi intéressés à l'effet sur la température de l'air d'un verger de 5 hectares à Davis, en Californie, pendant deux semaines d'automne. Comparé au terrain mitoyen sans végétation, le verger est globalement plus frais la journée (-1.5 K) et plus chaud la nuit ($+1.5\text{ K}$) par temps clair, avec des différences maximales relevées de -6 K et $+2\text{ K}$. Ces différences sont deux fois plus faibles par temps nuageux. Des thermomètres placés en aval du verger, sous le vent, permettent d'estimer grossièrement la portée de l'effet rafraîchissant de 20 à 100 m, soit cinq fois la hauteur des arbres. A plus grande échelle, Kurn *et al.* (1994) tentent d'utiliser les données d'un réseau de 23 stations météorologiques pour repérer des oasis urbaines dans le bassin de Los Angeles, en cherchant des différences de température et d'humidité de l'air dues à l'évapotranspiration. Cette tentative se solde par un échec à cause, principalement, de la distance trop importante entre les stations et des effets d'advection d'air humide provenant de l'océan Pacifique. L'étude, recentrée sur un parc de 5 km^2 , conclut que la température de l'air à l'intérieur du parc est inférieure de 1 à 2 K à celle de l'air aux extrémités du parc et qu'il n'y a pas de variation notable de l'humidité spécifique. Ce dernier point est expliqué par le manque de précision de l'instrumentation et par un manque de compréhension des écoulements d'air.

Sous un climat plus aride, à l'université Ben Gourion du Néguev, dans le sud d'Israël, Shashua-Bar *et al.* (2009) ont instrumenté pendant 45 jours en été deux cours intérieures d'environ 100 m^2 chacune. L'étude analyse les effets de diverses stratégies d'aménage-

ment urbain sur la température de surface du sol, la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité absolue à trois hauteurs. L'efficacité de six solutions est comparée : deux types de surfaces (gazon, sol nu entouré de pavés) sont combinés avec trois déclinaisons de protection solaire (cour à ciel ouvert, arbres, voile d'ombrage en polyester). La végétation est suffisamment irriguée pour ne pas limiter son évapotranspiration. L'évapotranspiration du gazon est mesurée par pesée avec de mini-lysimètres de dimensions 5 cm x 10 cm sur 3 cm de hauteur et celle des arbres par circulation du flux de sève. La stratégie la plus performante en matière de rafraîchissement est la combinaison gazon/arbres qui réduit la température de l'air de 1 à 2.5 K pendant la journée. Le treillis en polyester, qui apporte globalement la même quantité d'ombrage que l'arbre et réduit considérablement la température de surface du sol en journée, a étonnamment un effet de réchauffement de l'air (jusqu'à +1.9 K). Le gazon seul provoque un rafraîchissement faible, pour une consommation d'eau très élevée (environ 6 L/m² par jour). Cependant, lorsqu'il est ombragé, son potentiel rafraîchissant est plus important et sa consommation d'eau moindre. Il y a ainsi, dans les conditions de cette étude, une synergie positive entre l'évapotranspiration du gazon et l'ombre apporté par les arbres ou le voile. Enfin, pour chaque solution d'aménagement est calculé un indice d'efficacité de rafraîchissement, défini comme le ratio de la chaleur sensible évitée par la chaleur latente de vaporisation (correspondant à l'eau consommée). Avec ce critère, la solution « arbres seuls » est la plus efficace, trois fois plus performante que la combinaison gazon/arbres.

A Manchester cette fois-ci, Armson *et al.* (2012) ont étudié le potentiel de rafraîchissement, l'été, d'arbres en ville et dans un parc. Ils ont, dans un premier temps, mesuré les températures de deux types de surfaces – un sol en béton et un sol enherbé – soit exposées au soleil, soit à l'ombre d'un arbre. Au soleil, la différence de température entre l'air et le gazon reste inférieure à 3 K tout au long de la journée tandis que celle entre l'air et le sol en béton peut atteindre 20 K. Lorsque ces surfaces sont ombragées, la température de surface du gazon peut être inférieure à la température de l'air de quelques kelvins (jusqu'à 7 K de différence), et la différence de température maximale entre l'air et le sol en béton n'est plus que de 4 K. L'ombre créée par un arbre peut donc permettre d'abaisser considérablement les températures de surface. Dans un second temps ont été placés dans l'ombre de l'arbre, à un mètre du sol, des thermomètres à globe qui donnent, lorsqu'il s'agit d'évaluer le confort thermique, une indication plus pertinente que la température de l'air relevée par des thermomètres classiques. En effet, ces thermomètres à globe sont constitués de capteurs de température emprisonnés dans des petites sphères de 4 cm de diamètre, soumises – comme un être humain – à la convection de l'air mais également au rayonnement des surfaces environnantes. Au soleil, le thermomètre à globe atteint au maximum 9 K de plus que l'air, et à l'ombre 2 K de plus, quelle que soit la surface (gazon ou béton) au-dessus de laquelle il se trouve. Dans cette étude expérimentale, l'ombre de l'arbre s'avère donc plus efficace pour améliorer le confort thermique que le changement de surface du sol.

1.2.2 Toitures végétalisées

Lazzarin *et al.* (2005) ont étudié le comportement thermo-hydrrique de la toiture végétalisée d'un hôpital à Vicence, en Italie, durant plusieurs saisons. La toiture de 1000 m², dont on peut voir une coupe sur la figure 1.22, est recouverte de sedum et d'une épaisseur de substrat de 20 cm. Elle est comparée dans l'étude à une toiture « traditionnelle » sombre (albédo de 0.1). L'évapotranspiration est mesurée indirectement comme terme

résiduel du bilan énergétique d'une couche de sol. En été, pour un sol assez sec (teneur en eau massique de 10%), la toiture végétalisée réduit de 60% le flux de chaleur traversant la toiture traditionnelle, 12% de l'énergie solaire incidente étant utilisée pour l'évapotranspiration. Pour un sol saturé en eau, la toiture végétalisée isole complètement la pièce du dessous et le flux de chaleur sensible est réduit de moitié.

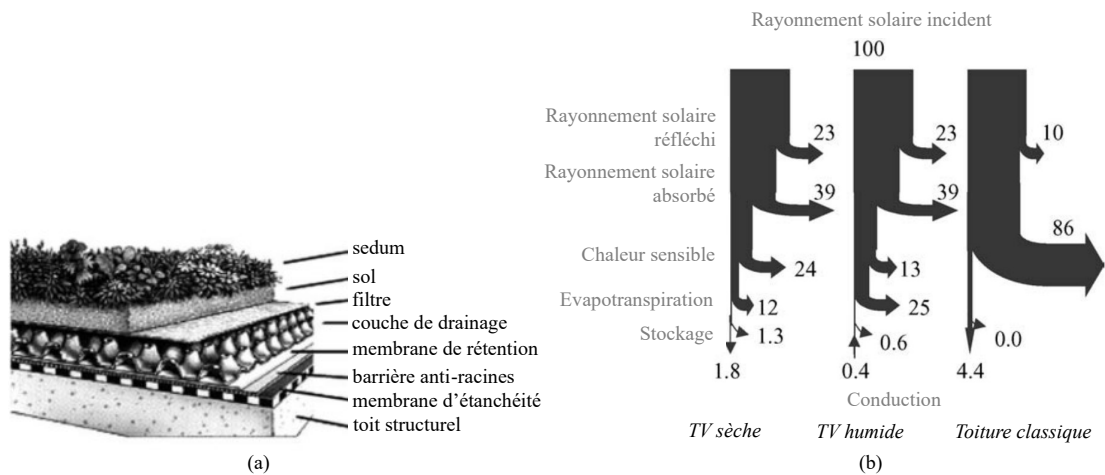


FIGURE 1.21 – (a) Composition de la toiture végétalisée étudiée et (b) comparaison de son bilan énergétique (normalisé pour un rayonnement incident de 100 W/m^2) avec celui d'une toiture classique (d'après Lazzarin *et al.* (2005)).

Klein et Coffman (2015) se sont également intéressés au potentiel rafraîchissant des toitures végétalisées et au type de végétation adapté à ces structures dans une région soumise à des événements climatiques extrêmes (tornades, vagues de chaleur, sécheresses, blizzards, etc.). 120 m^2 du toit du Centre national météorologique dans l'Oklahoma, situé dans les Grandes Plaines américaines, ont ainsi été recouverts de plantes succulentes (en majeure partie des sedums) et de végétation des prairies, sur une épaisseur de substrat de 10 à 20 cm. Les deux premières années du suivi de la composition de la communauté végétale montrent que les sedums ont subi des taux de mortalité importants tandis que la dominance des plantes des prairies s'est accrue. Pendant six mois, le rayonnement, la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité relative ont été enregistrés à deux hauteurs au-dessus de la partie végétalisée et comparés aux valeurs mesurées à une dizaine de mètres de là, au-dessus du toit en béton. La chaleur latente due à l'évapotranspiration et la conduction dans le sol n'étant pas mesurées, les auteurs n'ont pas pu établir le bilan énergétique de ces deux surfaces. La différence de température relevée à une hauteur de 1.5 m est faible (réduction de la température maximale journalière de l'air de 0.5 K en moyenne sur le mois).

Peng et Jim (2015) ont instrumenté une toiture végétalisée pendant trois ans afin d'analyser les variations saisonnières et journalières de ses performances thermiques selon les conditions météorologiques. Le site expérimental se situe sur le toit d'une gare à Hong Kong, en milieu tropical : environ 500 m^2 de la dalle de toiture en béton sont recouverts d'arachide pérenne, sur 7 cm de substrat. Les grandeurs mesurées sont les mêmes que dans l'étude de Klein et Coffman (2015), auxquelles il faut ajouter la température de surface et la teneur en eau du sol. Les effets de la couverture végétale sur l'air sont

également déduits par comparaison avec un site témoin proche. De manière générale, la toiture végétalisée réduit la température de l'air mesurée à 10 cm du sol tout au long de l'année à l'exception des journées en hiver. Pendant les trois autres saisons, le rafraîchissement nocturne est plus important que le rafraîchissement diurne, quelles que soient les conditions météorologiques. Ainsi, dans des conditions estivales ensoleillées, le rafraîchissement de jour est de 0.9 K et celui de nuit de 2.9 K en moyenne. Les auteurs ne disent pas si ce phénomène est dû à des différences d'évapotranspiration de la végétation entre le jour et la nuit ou plutôt à l'inertie thermique du béton constituant le site de référence. L'effet de la toiture végétalisée sur la température à 1.6 m du sol est encore perceptible bien qu'il soit moindre (de 0.2 K à 0.7 K en été). Un modèle prédictif de l'effet de la toiture végétalisée sur la température et l'humidité relative de l'air en fonction des paramètres climatiques est donné par les auteurs mais la causalité des mécanismes physiques n'est pas discutée.

Dans le cadre du projet *Blue Green Dream*, Solcerova *et al.* (2017) ont instrumenté des toitures végétalisées à Utrecht, aux Pays-Bas, afin d'analyser leur comportement thermohydrique pendant l'été. Ces toitures sont recouvertes de plusieurs espèces de sedums sur une fine épaisseur de substrat d'environ 3.5 cm. Leur effet sur la température de l'air à 15 cm et 30 cm du sol est comparé à celui d'un toit couvert de gravier blanc. A 15 cm au-dessus des toitures végétalisées, la température de l'air est légèrement plus haute durant le jour et légèrement plus basse durant la nuit, ce qui aboutit à une température moyenne plus haute (+0.2 K sur 24 heures). Cet effet est expliqué par l'albédo plus faible de la toiture végétalisée étudiée et par le type de végétation : les sedums sont des plantes à métabolisme acide crassulacéen (CAM) qui ouvrent leurs stomates la nuit. Leur transpiration est donc nulle en journée, ce qui leur confère un faible potentiel de rafraîchissement de l'air extérieur en été le jour.

1.2.3 Façades végétalisées

Une autre manière de ramener de la végétation en ville est d'exploiter les façades des bâtiments. Hunter *et al.* (2014) distinguent deux types de façades végétalisées : les façades végétalisées « directes » où des plantes grimpantes plantées au pied de la façade s'accrochent de manière autonome à la paroi, à l'aide de leurs crampons (comme le lierre) ou de leurs ventouses (comme la vigne vierge), et les façades végétalisées « double-peau » qui nécessitent une structure rapportée sur la façade (des câbles en acier par exemple) pour tuteurer ou palisser les grimpantes (des plantes volubiles comme le faux jasmin ou le chèvrefeuille, dont la tige principale s'enroule autour d'un support, ou des plantes à vrille telle la passiflore qui forme de petites tiges secondaires capables de s'enrouler au support). Dans le deuxième cas, il existe une lame d'air entre la façade et la végétation. On peut ajouter un troisième type de façade végétalisée, « avec substrat » : celui permettant de mettre en place un substrat (par exemple composé de feutre horticoles et de sphaigne) à la verticale, avec un système d'accroche et d'irrigation, à l'instar des murs végétaux de Patrick Blanc, qui permettent une très grande diversité végétale.

Du point de vue thermique, les principales expériences recensées concernent la performance thermique des façades végétalisées, c'est-à-dire la manière dont celles-ci isolent le bâtiment et réduisent les besoins de climatisation en été (Hunter *et al.*, 2014). L'effet des façades végétalisées sur le confort thermique dans la rue n'a été étudié que récemment (Oquendo-Di Cosola *et al.*, 2022). Certaines études expérimentales mesurent la réduction

des températures de parois due à la végétation ainsi que la réduction de la température de l'air extérieur à proximité de la paroi. Cameron *et al.* (2014), par exemple, ont choisi comme paroi des murs en briques et comme végétation de petits arbustes (des haies de laurier). L'expérience *in situ* s'est déroulée à l'université de Reading, au Royaume-Uni, durant les mois d'août et de septembre. Elle a été complétée par d'autres mesures en chambre contrôlée, en changeant le type de végétation (des plantes grimpantes ont été utilisées : du lierre, du jasmin et du chèvrefeuille, entre autres). En journée, les réductions maximales de température de paroi varient entre 4 K et 8 K, selon la végétation. Dans les cas des mesures *in situ*, la température de l'air proche de la végétation est inférieure à celle de l'air proche du mur nu (jusqu'à 3 K de différence), mais reste supérieure (d'environ d'1 à 2 K) à la température de l'air ambiant mesurée à quelques mètres du mur. Des images à la caméra thermique montrent en effet qu'en plein été, à 15h, les feuilles de laurier ont une température de 27.6 °C alors que la température de l'air est de 24.1 °C. Les chercheurs se sont également intéressés au poids de l'ombrage et de l'évapotranspiration sur la réduction des températures. Pour dissocier ces deux effets, ils ont comparé des plants normalement irrigués (4 litres d'eau par jour) à des plants dont ils ont sectionné la tige, afin qu'ils soient totalement secs. Pour toutes les plantes étudiées, l'ombrage et l'évapotranspiration sont estimés responsables du rafraîchissement pratiquement à parts égales.

Hoelscher *et al.* (2016) ont également réalisé des mesures en été *in situ* sur trois murs de bâtiments à Berlin recouverts, respectivement, de vigne vierge, de lierre et de renouée de Boukhara. Aucun effet de la végétation sur la température de l'air à 40 cm de la façade n'a été observé. En revanche, la température des feuilles est inférieure à la température de surface du mur nu (différence d'environ 3 K en moyenne sur 24 heures) et le mur à l'ombre de la végétation est bien plus frais que le mur exposé au soleil (environ 2 à 4 K de différence en moyenne sur 24 heures, avec une différence maximale de 15 K à 18h pour un mur exposé sud/sud-ouest). Pour dissocier les effets de l'ombrage et de la transpiration des feuilles sur une longue période, et éviter de sectionner les plantes grimpantes, des capteurs de flux de sève ont cette fois été utilisés. Les mesures indiquent que la réduction de température de surface de la paroi est due de manière prépondérante à l'ombrage (environ 80% au moment de la réduction maximale de température). La transpiration des feuilles a été estimée à 0.5 L par jour par m² de feuilles, soit 1-1.6 L par jour par m² de mur (dépendamment de l'espèce étudiée, qui recouvre la façade de manière plus ou moins dense), ce qui correspond à une consommation énergétique d'environ 30-45 W par m² de mur. En comparaison, la vigne vierge de l'étude permet d'abattre 75% du rayonnement solaire incident, soit environ 520 W.m⁻² à la période étudiée).

De nombreux autres travaux, antérieurs à 2010, ont été recensés par Bowler *et al.* (2010). Ils portent sur des toits végétalisés, des arbres de rue isolés mais également sur des parcs et des forêts urbaines appartenant en majorité à des villes en zone tempérée. De cette méta-analyse, les auteurs concluent, empiriquement, que les espaces verts étudiés rafraîchissent localement l'air de 1 K environ en moyenne. Les études ne leur permettent pas, toutefois, d'estimer la portée spatiale de ce rafraîchissement et de définir plus précisément ce « localement », et ils restent critiques sur le sens à donner à cette valeur moyenne qui agrège des résultats disparates. En ce qui concerne les toitures végétalisées et les arbres isolés, les mesures expérimentales ne concluent pas toutes à une réduction de la température de l'air.

1.3 Végétation en ville et modélisations

Dans une revue de la littérature sur les avancées récentes en modélisation des îlots de chaleur urbains, Mirzaei (2015) identifie six axes de recherche majeurs – l’écoulement du vent en ville et les matériaux de surface, la santé et le confort, les variations spatio-temporelles de l’îlot de chaleur, le couplage des modèles, la prévision des températures de l’air, la réduction de la demande énergétique des bâtiments – et trois échelles – celle du bâtiment, celle du quartier et celle de la ville. Le bâtiment est le lieu des simulations thermiques dynamiques (STD) sur des logiciels tels que Pléiades, TRNSys ou Energy-Plus qui effectuent le bilan énergétique d’un volume de contrôle à partir de conditions climatiques extérieures. A l’échelle du quartier, les modèles microclimatiques permettent de traiter les interactions entre plusieurs bâtiments, les rues et la végétation urbaine. Ils se répartissent principalement en deux catégories : les modèles de canopée urbaine qui résolvent le bilan énergétique de la couche limite urbaine comme TEB (Masson, 2000) ou VUCM (Lee et Park, 2008), et ceux utilisant la mécanique des fluides numérique (ou CFD, pour *Computational Fluid Dynamics*) tels ENVI-met (Bruse et Fler, 1998) et SOLENE-Microclimat (Malys *et al.*, 2014), simulant directement les écoulements d’air mais au prix de calculs plus lourds. Enfin, la ville peut être étudiée au moyen de modèles mésoscopiques, souvent calibrés grâce à de l’imagerie par télédétection (images satellite, LIDAR, par exemple). Ils permettent d’étudier l’îlot de chaleur urbain dans son intégralité mais sont dotés d’une résolution spatiale moins importante que les modèles d’énergétique du bâtiment et les modèles microclimatiques, qui sont ceux sur lesquels nous allons nous concentrer dans les paragraphes qui suivent.

1.3.1 Thermique du bâtiment – toitures végétalisées

Un modèle du comportement thermique et hydrique de toitures végétalisées, ROOFSOL, a été proposé par Del Barrio (1998) afin d’estimer leur potentiel de rafraîchissement des bâtiments en été. Celui-ci comporte des sous-modèles du support structurel, du substrat et de la végétation qui sont couplés au moyen de quatre bilans énergétiques distincts (toit, sol, végétation, air environnant) et d’un bilan de vapeur d’eau dans l’air de la canopée, qui traduit les échanges de masse entre le sol, l’air de la canopée, les feuilles et l’air extérieur. Des études de sensibilité ont permis d’identifier les paramètres du modèle influant sur le flux thermique à travers le toit : le rayonnement solaire transmis par la végétation (dépendant de l’indice foliaire, qui est la surface totale projetée de feuilles par unité de surface au sol, et de l’angle fait par les feuilles avec l’horizontale), l’épaisseur de la couche de substrat, sa densité apparente et sa teneur en eau. La toiture végétalisée modélisée est donc efficace pour la thermique du bâtiment par ses fonctions d’ombrage et d’isolation. L’inertie thermique apportée par la toiture végétalisée n’est pas discutée mais le décalage temporel de la réponse en température du système est visible sur les graphiques. Malheureusement, l’état thermique et hydrique de la canopée elle-même est peu analysé. La canopée est d’ailleurs représentée comme une couche homogène : l’air entre le feuillage et le sol est caractérisé par une unique valeur de température et d’humidité, le feuillage par une unique valeur de température. La résistance stomatale de la végétation joue un rôle important sur la température du feuillage (une augmentation de 4 K à midi est obtenue lorsque cette résistance est multipliée par 4) mais influence faiblement la température de l’air au sein de la canopée car cette dernière est supposée très ventilée. Ce point montre que des études aérauliques sont nécessaires pour bien simuler les effets de la végétation sur le microclimat. Globalement, cette étude met en évidence

deux problèmes significatifs liés à la modélisation des échanges thermiques entre la végétation et l'air : la forte hétérogénéité de la végétation, qui a un rôle majeur sur les transferts radiatifs, et l'écoulement de l'air dans la canopée.

Alexandri et Jones (2007) ont également proposé un modèle 1D de transfert thermique et massique au sein d'une toiture végétalisée en distinguant quatre milieux (toit, sol, canopée et air). La température du sol (mélange substrat-eau-air) obéit à une loi de conduction de la chaleur où la conductivité thermique et la capacité thermique du sol varient en fonction de la teneur en eau. La teneur en eau du sol a également une influence sur la transpiration des feuilles via la résistance stomatale de la canopée. Les résultats de ce modèle ont été comparés aux mesures effectuées sur deux prototypes instrumentés (une dalle en béton et une toiture végétalisée), ce qui a montré que la prise en compte des transferts d'eau améliorerait sensiblement le modèle.

Dans le même esprit que les deux modèles précédents, le modèle de toiture végétalisée de Sailor (2008), conçu comme module au logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus, sert à évaluer l'effet de la toiture sur la consommation énergétique du bâtiment. Deux bilans énergétiques sont écrits, l'un pour le sol et l'autre pour le feuillage (voir figure 1.22), suivant le modèle FASST développé par l'*US Army Corps of Engineers* (Frankenstein et Koenig, 2004). L'état hydrique du sol affecte le flux de chaleur latente de ces deux bilans ainsi que des caractéristiques thermo-radiatives du sol (albédo, conductivité et capacité thermiques). Là encore, une évaluation du modèle a été réalisée par comparaison avec des données expérimentales mais les flux de chaleur sensible et latente, ainsi que la température de l'air extérieur, ne sont pas mesurés. En effet, le modèle vise surtout à prédire le flux de chaleur transmis par conduction dans le bâtiment, qui est la grandeur de sortie principale, la simulation des échanges entre la végétation et l'air extérieur étant annexe.

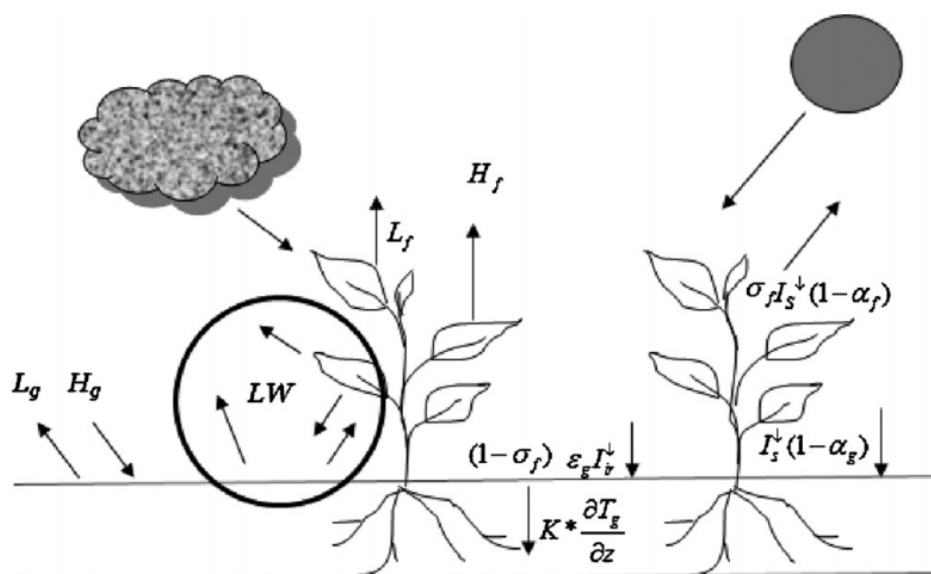


FIGURE 1.22 – Bilan énergétique d'une toiture végétalisée, incluant les flux de chaleur latente (L), les flux de chaleur sensible (H), le rayonnement de courte longueur d'onde (I_s), le rayonnement de grande longueur d'onde incident (I_{ir}), les échanges de grande longueur d'onde (LW) au sein de la canopée et la conduction dans le sol (source : Sailor (2008)).

1.3.2 Modèles de canopée urbaine

A l'échelle du quartier, en revanche, les flux de chaleur sensible et latente émis par la végétation vers l'air sont des sorties du modèle qui présentent un intérêt immédiat puisqu'elles vont permettre de déterminer la température et l'humidité spécifique de l'air dans la rue, qui comptent parmi les variables climatiques que cherche justement à prédire ce type de modèles. Nous décrivons ici l'un d'entre eux.

SURFEX, ISBA et TEB

La plateforme de modélisation SURFEX (pour SURFace EXternalisée) développée par Météo-France, utilise une approche par tuiles (voir figure 1.23). Les quatre types de surface (nature, ville, mer et lac) occupant la tuile sont paramétrés différemment. SURFEX permet de coupler, en particulier, le modèle ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) de Noilhan et Planton (1989) dédié aux surfaces continentales et le modèle TEB (*Town Energy Balance*) de Masson (2000) consacré aux surfaces urbanisées.

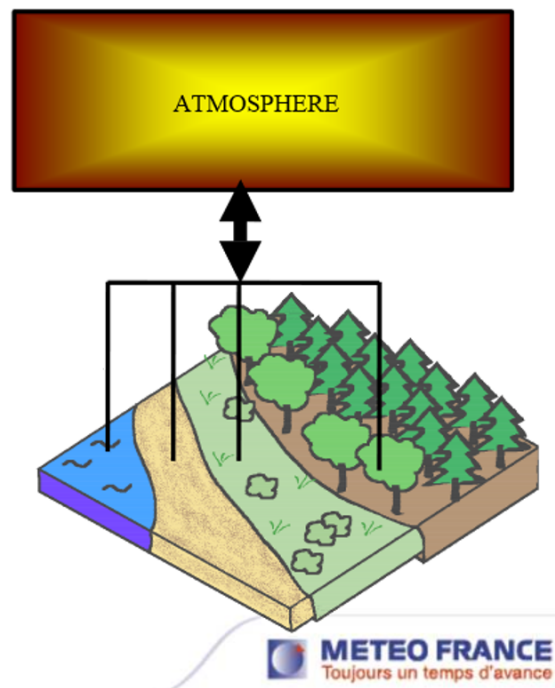


FIGURE 1.23 – Approche de type tuile ou mosaïque. Le domaine étudié est divisé en différentes surfaces. Chaque surface reçoit le même forçage atmosphérique, un bilan énergétique est réalisé (les variables climatiques, les flux d'entrée et de sortie dépendent des paramètres de la surface), les flux de sortie sont calculés et renvoyés vers l'atmosphère. Chaque bilan énergétique est simulé indépendamment des autres surfaces (il n'y a pas d'interactions entre les sous-modèles). Enfin, les flux sont agrégés en les pondérant selon les surfaces respectives d'occupation du domaine (d'après Météo-France).

La géométrie urbaine standard adoptée par TEB est une rue canyon aux surfaces imperméables constituée de deux bâtiments se faisant face, comme représenté sur la figure 1.24. Une zone urbaine hétérogène, comme une rue bordée d'arbres, est donc représentée par une tuile dont une fraction (ville) est modélisée par TEB d'un côté et dont la fraction

restante (nature) est modélisée par ISBA de l'autre. Les valeurs calculées par chacun des modèles sont ensuite agrégées dans SURFEX.

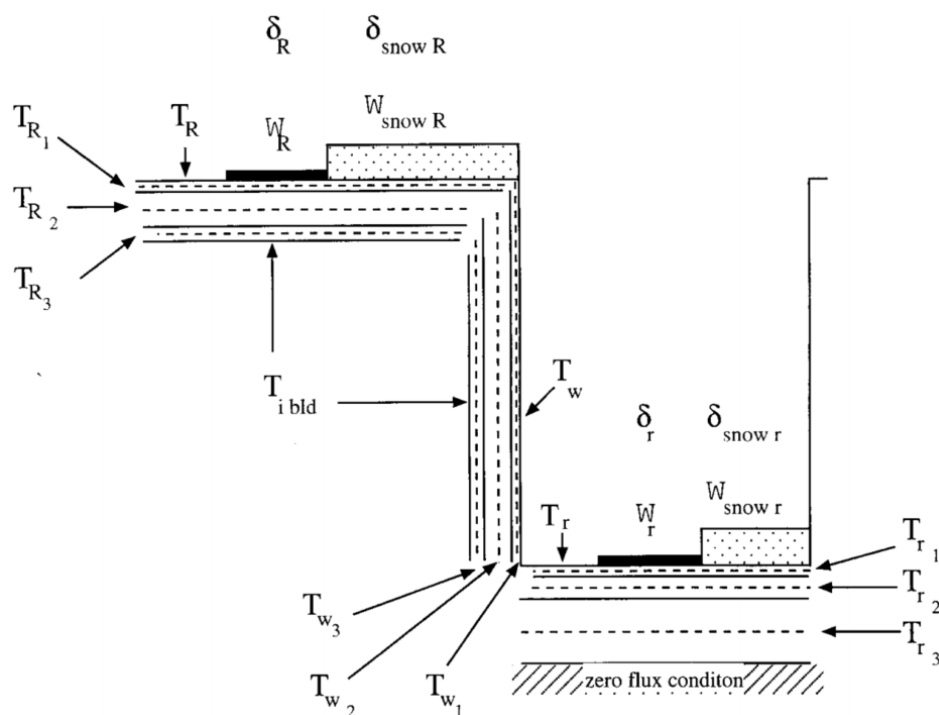


FIGURE 1.24 – Chaque tuile urbaine est représentée par TEB comme une rue-canyon. Un bilan énergétique (prenant en compte l’inertie de la couche, le rayonnement courte et grande longueur d’onde, la chaleur sensible, la chaleur latente et la conduction) est réalisé pour chacune des surfaces (toit R , mur du bâtiment w , rue r) (d’après Masson (2000)).

Les développements de TEB

Cette approche empêche certaines interactions physiques : par exemple, les arbres ne sont pas soumis aux conditions de rayonnement, vent, température et humidité dues à la géométrie de la rue. Afin de raffiner la modélisation de l’hétérogénéité de la ville à petite échelle, la végétation urbaine a été directement intégrée dans le schéma TEB-Veg (Lemonsu *et al.*, 2012), qui fait appel au modèle ISBA en interne (pour paramétrer la fraction f_{garden} sur la figure 1.25). Le schéma TEB-Veg, testé sur les données expérimentales de Shashua-Bar *et al.* (2009), aboutit à une meilleure représentation du microclimat.

Lors de ses travaux de thèse, De Munck (2013) a développé un module de TEB spécifiquement dédié à la représentation des toitures végétalisées. Celui-ci a pour objectif de modéliser les flux d’eau et de chaleur entre la végétation et l’atmosphère. Testé sur une toiture végétalisée instrumentée de Nancy, ce module TEB-GREENROOF a montré des résultats plutôt satisfaisants avec néanmoins une sous-estimation de la teneur en eau du substrat et une surestimation des températures de surface. Ce modèle a été enrichi par la suite par Redon (2017) afin de proposer une paramétrisation des surfaces urbaines prenant en compte les arbres de rue.

Suter *et al.* (2017) ont utilisé TEB afin d’estimer le rafraîchissement évaporatif produit

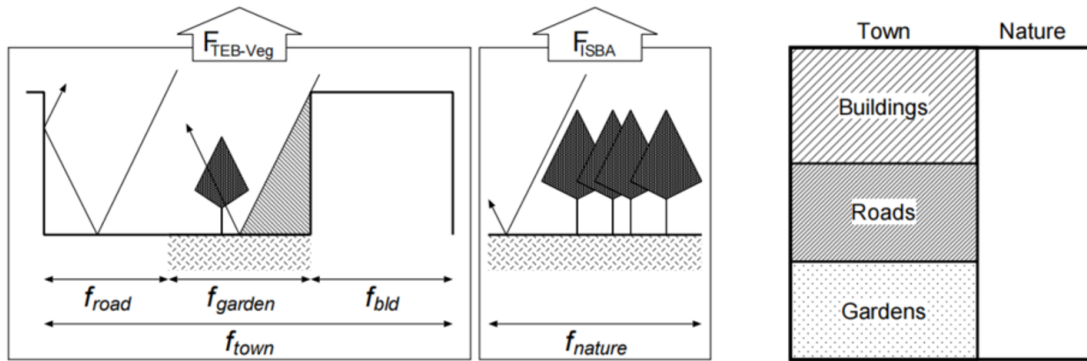


FIGURE 1.25 – Approche par tuiles utilisée dans TEB-Veg pour calculer les flux du bilan énergétique de surface (d’après Lemonsu *et al.* (2012)).

par un toit végétalisé, en considérant un albédo identique à celui d’une toiture classique et en modélisant l’évapotranspiration de la végétation au moyen de la formule de Penman-Monteith. Leurs simulations indiquent une relation linéaire entre la baisse de température de l’air et le flux moyen de chaleur latente \bar{E} (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) :

$$\Delta T = -0.014 \bar{E} \quad (1.4)$$

Pour la comparer à des taux de précipitations, cette relation peut s’écrire en fonction de la colonne d’eau évaporée mmW (en mm/jour) :

$$\Delta T = -0.35 mmW \quad (1.5)$$

Une expression analytique du potentiel de rafraîchissement évaporatif (qui est le coefficient de proportionnalité entre la température et le flux de chaleur latente) montre que le terme dominant est la résistance aérodynamique, qui caractérise l’écoulement de l’air au-dessus de la toiture.

Trente-deux autres modèles de bilan énergétique de surface urbaine ont été classifiés et comparés par Grimmond *et al.* (2010). Un quart de ces modèles ne tient pas compte de la présence de végétation en ville et ne modélise donc pas ses effets sur les différents flux du bilan énergétique de surface. Dans les autres, la végétation est prise en compte en changeant les paramètres de surface globaux de la tuile : modification de l’albédo, ajout d’un terme de flux de chaleur latente dans le bilan pour représenter l’évapotranspiration, augmentation de la rugosité de surface pour représenter l’impact des arbres sur les écoulements d’air, etc.

Ces paramétrisations de surface globales peuvent être pertinentes pour des flux agrégés à grande échelle, pour des modèles météorologiques par exemple, mais atteignent leurs limites lorsque l’on s’intéresse à l’effet d’une végétation 3D sur le microclimat, à l’échelle de la place ou de la rue, où il serait pratique de simuler un champ de température de l’air, ce qui est permis par les modèles CFD.

1.3.3 Modèles numériques de mécanique des fluides

Nous commençons par présenter deux outils de simulation numérique basés sur un code CFD et dédiés à la modélisation du microclimat à l’échelle du quartier : SOLENE-

microclimat et ENVI-met. Nous décrivons ensuite quelques études utilisant d'autres logiciels (PHOENICS, Ansys Fluent, OpenFOAM).

SOLENE-microclimat

SOLENE-microclimat est développé par le laboratoire CRENAU à l'école d'architecture de Nantes. L'outil sert à évaluer le confort thermique et les consommations énergétiques des bâtiments d'un quartier donné et à quantifier les impacts sur le microclimat de différentes solutions d'aménagement. Il couple un modèle radiatif (SOLENE), un modèle de thermique du bâtiment et un modèle CFD (Code_Saturne, développé par EDF). L'environnement urbain est représenté par une géométrie 3D.

Afin d'analyser l'effet de la végétation sur le confort extérieur et sur la consommation énergétique des bâtiments, Malys *et al.* (2014) y ont ajouté un modèle de façade végétalisée. Comparées aux toits végétalisés, les murs végétalisés possèdent une capacité de rétention d'eau plus faible mais influencent directement les échanges radiatifs et thermiques des canyons urbains. Le modèle se fonde sur les bilans énergétiques du feuillage, du substrat et de l'air présent dans la couche de feuillage afin de calculer leurs températures respectives (notées T_f , T_{es} et T_a sur la figure 1.26). Ces dernières dépendent de plusieurs variables climatiques : le rayonnement (solaire et infrarouge) incident, la température de l'air extérieur, l'humidité spécifique de l'air et la vitesse du vent.

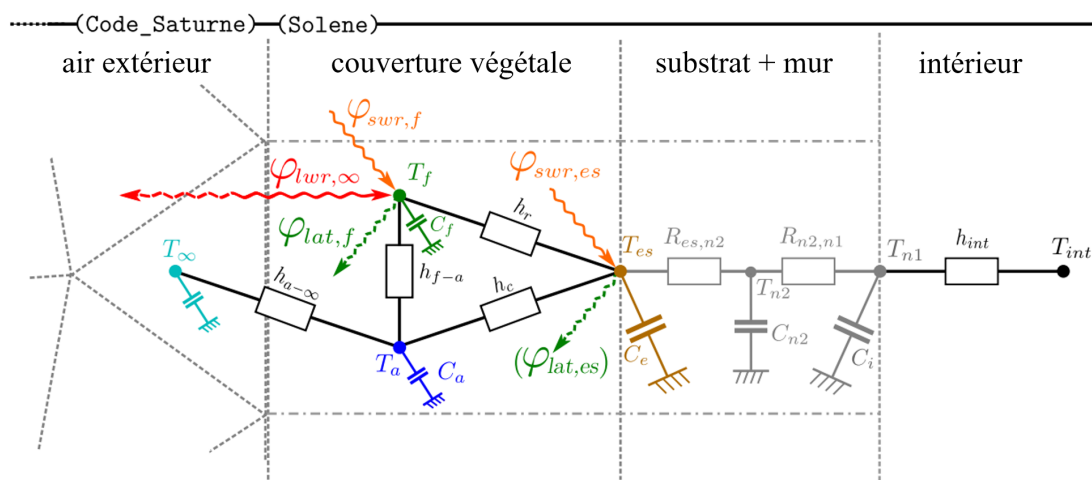


FIGURE 1.26 – Modèle de façade végétalisée (d'après Malys *et al.* (2014)).

L'approche adoptée est validée par des données expérimentales sur des prototypes de 1 m^2 instrumentés (mesure de l'évapotranspiration par pesée, de la température de surface, des variables climatiques, de l'irrigation et du drainage). En vue d'améliorer le modèle, les auteurs de l'étude conseillent d'avoir un suivi plus précis du bilan hydrique – en particulier de l'évapotranspiration –, de mesurer des structures réelles plutôt que des échantillons isolés et d'étendre la base de données à d'autres contextes climatiques.

SOLENE-microclimat a également été enrichi d'un modèle d'humidification/arrosage de la chaussée afin de jauger l'efficacité de cette technique lors de vagues de chaleur (Azam *et al.*, 2018). Les données expérimentales du programme ROSURE/Hydroville (Cohard

et al., 2018), obtenues sur un parking asphalté de 2500 m², ont servi à calibrer et à évaluer le modèle.

ENVI-met

Le modèle ENVI-met, mis au point par Bruse et Fleer (1998), vise également à simuler les interactions entre les bâtiments, la végétation et l'atmosphère. Il est lui aussi dédié à la simulation du microclimat à l'échelle du quartier : la résolution spatiale horizontale est de l'ordre du mètre et la durée d'analyse courte (typiquement, de 24 à 48 heures avec un pas de temps de quelques secondes). Il permet en particulier d'étudier l'influence de la morphologie et de la végétation urbaines sur le champ de température et sur l'écoulement de l'air de la zone considérée. ENVI-met combine un modèle atmosphérique 3D basé sur les équations de Navier-Stokes, un modèle de sol 1D et un modèle de végétation dans lequel le flux d'évapotranspiration suit une loi de Dalton modifiée par des résistances aérodynamique et stomatale. Un cas d'étude – un îlot standard modifié par l'ajout d'un parc – montre que le champ de température dépend fortement des écoulements autour des bâtiments et qu'il ne peut être déduit simplement de la modification paysagère apportée. Parmi les limitations d'ENVI-met, on peut citer certains paramètres à fixer en entrée du modèle, tels que des conditions atmosphériques non modifiables (rayonnement solaire) ou constantes (vitesse et direction du vent) pour toute la durée de la simulation (Liu *et al.*, 2018), ainsi qu'une valeur de température intérieure des bâtiments unique (Ambrosini *et al.*, 2014), ce qui empêche une interaction entre le bâti et l'atmosphère en ce qui concerne la température de l'air. Ambrosini *et al.* (2014) notent également une limitation importante sur la géométrie des bâtiments (lignes droites et perpendiculaires) et l'impossibilité de modéliser des murs végétalisés tandis que Toparlar *et al.* (2017) regrettent l'utilisation d'un seul modèle de turbulence et les options limitées de génération du maillage.

D'autres études CFD

L'effet de la végétation sur la température de l'air a été étudié par Dimoudi et Nikolopoulou (2003) par le biais d'un modèle basique de la physiologie des plantes. La transpiration végétale est représentée par la donnée d'un coefficient de culture et d'une évapotranspiration de référence, dépendant de la température de l'air et du rayonnement solaire absorbé. La géométrie 3D analysée est celle d'un environnement urbain générique : un parc carré entouré de huit immeubles identiques. L'influence de différents paramètres d'entrée (dimensions des bâtiments et du parc, vitesse et direction du vent, température de l'air, type de végétation, etc.) sur le champ de températures résultant est ensuite étudiée au moyen du logiciel de CFD PHOENICS. La température du parc et de la rue adjacente sous le vent est réduite du fait de la présence de végétation, le parc étant modélisé par un puits d'enthalpie. Dans ces zones, la tendance observée est une réduction de la température moyenne de l'ordre de 1 K pour 100 m² de végétation ajoutés au parc, avec les conditions climatiques et la configuration urbaine choisies.

Le rafraîchissement évaporatif causé par différents types de végétation (rangées d'arbres, murs végétalisés, toitures végétalisées) a également été étudié par Gromke *et al.* (2015) dans le cas d'une rue canyon d'Arnhem, aux Pays-Bas, et d'une chaude journée d'été. Les effets de la végétation sur la circulation de l'air et sur le champ de température

dans la rue ont été évalués au moyen du logiciel de CFD ANSYS FLUENT. Un pouvoir de rafraîchissement volumétrique, calculé à partir des données expérimentales de Shashua-Bar *et al.* (2009), a été assigné à chaque type de végétation en fonction de sa densité foliaire. La rangée d'arbres est la mesure de rafraîchissement la plus efficace, que ce soit en matière d'intensité (-1.6 K près de l'arbre) ou de distribution spatiale (-1 K sur tout le trottoir parallèle aux arbres). Des effets plus faibles et plus locaux ont été trouvés pour les façades végétalisées, tandis que les toitures végétalisées n'ont pas d'effet sur la température dans la rue, l'air au-dessus des toits n'y étant pas entraîné, avec la vitesse et la direction de vent considérées dans cette étude. La combinaison de tous les types de végétation aboutit à des réductions locales de température de l'air de 2 K et à un champ de température qui est une superposition linéaire des champs obtenus pour chaque solution de végétalisation.

Les travaux de Dimoudi et Nikolopoulou (2003) et Gromke *et al.* (2015) présentent des résultats similaires en matière d'intensité de rafraîchissement et de distribution des températures autour des zones végétalisées. Cependant, les échanges radiatifs (effets d'ombrage dus à la végétation mais également rayonnement infrarouge émis par cette dernière) sont omis, tout comme la quantité d'eau disponible - dans les deux modèles, l'évapotranspiration n'est pas limitée par les ressources hydriques. Dans les deux cas, cela conduit à traiter la végétation, par hypothèse, comme un climatiseur ou un puits de chaleur, ce qui n'est pas toujours le cas. L'utilisation du modèle CFD permet alors de simuler l'écoulement de l'air rafraîchi (et d'en déduire le champ de température autour de la zone végétalisée) mais le champ de température calculé n'est juste que si la puissance du climatiseur est correctement définie. L'étude de Gromke *et al.* (2015) présente un problème méthodologique analysé par Grylls et van Reeuwijk (2021) : le potentiel de rafraîchissement de l'arbre étudié par Shashua-Bar *et al.* (2009) en Israël, dans des conditions climatiques quasi-désertiques, n'est pas du tout le même aux Pays-Bas.

Manickathan *et al.* (2018) abordent certains de ces problèmes en simulant sur OpenFOAM¹² le rafraîchissement par évaporation et par ombrage d'un arbre, modélisé comme un milieu poreux. Avec une géométrie simple – un modèle 2D d'un espace ouvert contenant un arbre carré –, l'étude paramétrique qu'ils effectuent permet de mieux comprendre l'influence des facteurs environnementaux (vitesse du vent, température de l'air, humidité relative, rayonnement solaire), des caractéristiques des arbres (taille des feuilles, résistance stomatale, densité foliaire) et de la forme de végétation (rangée d'arbres, hauteur des arbres) sur la température de l'air et l'indicateur de confort thermique UTCI. Dans cette étude, seul le rayonnement solaire direct est pris en compte. Les échanges entre l'arbre et l'environnement sont effectués au moyen d'un bilan énergétique au niveau de la surface des feuilles. L'étude paramétrique montre que par vent faible, la température aux abords de l'arbre est plus basse, créant une zone fraîche, et que plus de chaleur sensible est retirée à l'air par vent fort. La température de l'air est maximale au sommet de l'arbre, près des feuilles qui reçoivent le plus de rayonnement solaire. En ce qui concerne le confort, l'effet du rafraîchissement évaporatif est faible par rapport à l'ombre apportée

12. OpenFOAM (pour *Open Source Field Operation and Manipulation*) est un logiciel de simulation multi-physiques développé à l'origine à l'*Imperial College* de Londres pour résoudre des problèmes de mécanique des milieux continus par la méthode des volumes finis (Weller *et al.*, 1998). Il est distribué librement depuis 2004 sous forme d'une boîte à outils programmable en C++, constituée de bibliothèques (outils de pré et post-traitement, modèles de turbulence, schémas numériques...) et d'applications (solveurs spécifiques, utilitaires de visualisation, de maillage).

par l'arbre. La solution recommandée consiste à combiner des arbres hauts et larges afin d'ombrager le sol et de la végétation basse qui apporte du rafraîchissement évaporatif à hauteur des passants. Cette étude éclaire les interactions entre certains facteurs et révèle les mécanismes dominants qui influent d'un côté sur la température de l'air, et de l'autre sur l'UTCI. Une disponibilité en eau variable et les échanges de rayonnements infrarouges restent toutefois à ajouter à ce modèle.

De nombreux autres travaux ont été recensés par Toparlar *et al.* (2017) dans une revue de la littérature très fournie sur les études CFD du microclimat urbain. Sur 183 articles – répartis entre 1998, avec la description du logiciel ENVI-met par Bruse et Fleer, et 2015 – la moitié traite de végétation urbaine. Environ un quart de ces 90 articles étudie les effets de la végétation dans des aires urbaines génériques à la géométrie simplifiée (plusieurs bâtiments parallélépipédiques, canyon(s) urbain(s), espace ouvert, cour intérieure fermée), le reste des articles analysant des aires urbaines réelles. Le nombre d'études de cas de l'influence de la végétation dans des quartiers existants a rapidement augmenté ces dernières années. Environ deux tiers des articles sur la végétation urbaine ne comportent pas de validation : ils s'intéressent pour la plupart au développement de nouveaux modèles ou se concentrent sur des comparaisons de configurations urbaines et des études paramétriques (conditions climatiques, matériaux, formes des bâtiments, scénarios de chauffage/climatisation, etc.). Quand il y en a une, la validation des études CFD se fait principalement sur maquette en soufflerie dans le cas des géométries génériques et avec des mesures expérimentales sur site dans le cas des quartiers réels. En raison des coûts de calcul, pratiquement toutes les études citées utilisent le modèle de turbulence RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) qui consiste à moyennner temporellement les équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles, quelques études seulement étant réalisées avec l'approche LES (*Large Eddy Simulation*) qui simule uniquement les grands tourbillons en filtrant les petites échelles.

1.4 Conclusions et positionnement de la thèse

Nous avons pu rappeler dans ce chapitre introductif que la notion d'îlot de chaleur urbain était plurielle et qu'elle ne semblait pas la plus adaptée à notre travail. Nous lui préférons le terme de surchauffe urbaine pour décrire le fait qu'il puisse faire trop chaud en un endroit de la ville et que l'on s'y sente en situation d'inconfort. La présence de végétation semble pouvoir limiter cette surchauffe en agissant sur les échanges radiatifs (par modification de la géométrie de la scène urbaine et modification des propriétés physiques des matériaux qui pavent la ville) et la dissipation d'énergie sous forme latente (par évapotranspiration) plutôt que sous forme sensible. Dans cette thèse, nous cherchons à estimer la contribution de la végétation à la réduction locale de la température de l'air ou, plus généralement, à l'amélioration du confort thermique extérieur, dont la température de l'air n'est qu'un des paramètres.

Nous avons présenté une sélection de travaux étudiant le rôle de la végétation dans la thermique des espaces urbains, en commençant par recenser les études expérimentales qui portaient sur trois types d'objets : des arbres, des toitures végétalisées et des façades végétalisées. Nous en avons tiré les conclusions suivantes :

- De nombreuses études se concentrent sur la manière dont la végétation permet de réduire les besoins en climatisation des bâtiments en été, en mesurant la réduction

des températures de surface de l'extérieur du bâtiment (due à un changement de matériau ou une réduction du rayonnement incident) ou la conduction à travers la paroi (toiture ou façade) végétalisée, mais ne s'intéressent pas à l'effet de la végétation sur la température de l'air à l'extérieur du bâtiment.

- Les mesures expérimentales s'obtiennent principalement par comparaison de valeurs entre deux points (par exemple, la température de l'air relevée par deux thermomètres placés, respectivement, au-dessus d'une toiture végétalisée et d'une toiture classique). La réduction de la température de l'air pouvant être faible, et donc difficile à mesurer, des mesures de flux thermiques (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, rayonnement, conduction) sont souvent réalisées et comparées pour essayer de comprendre comment la végétation modifie les flux du bilan énergétique du système étudié.
- Plusieurs études montrent que la présence de végétation permet dans la plupart des cas de réduire localement la température de l'air mais cette réduction semble faible (Bowler *et al.*, 2010). Ceci nous incite à penser que la végétation est plus à même d'améliorer le confort thermique par réduction du rayonnement incident sur un être humain (réduction du rayonnement direct par ombrage et réduction du rayonnement émis par des parois à la température plus basse) que par réduction de la température de l'air.

Concernant la modélisation des mécanismes en jeu, nous avons fait les constats suivants :

- Les modélisations existantes de la végétation en ville, notamment des toitures végétalisées, ont plutôt pour objectif d'identifier l'effet de celle-ci sur le bâti (rayonnement incident sur le toit, température du toit, température de l'air intérieur...) et non sur la température de l'air de la canopée urbaine. Les flux de chaleur sensible et latente de la végétation vers l'air ne sont en effet pas caractérisés la plupart du temps.
- Les modélisations en tuiles et canyons urbains, s'ils permettent d'intégrer ces flux, trouvent leur limite à l'échelle du microclimat par une paramétrisation trop globale des surfaces, et une échelle spatiale trop grande par rapport à celle que nous envisageons.
- Si les études CFD permettent d'obtenir des champs de température aux échelles microclimatiques qui nous intéressent ici, elles sont pour l'instant rarement validées et très peu le sont en conditions réelles.

Nous proposons donc au sein de cette thèse d'étudier les échanges thermiques entre végétation, facettes urbaines et air à une échelle microclimatique. Nous cherchons tout d'abord à identifier, comprendre et expliquer les mécanismes responsables d'un potentiel rafraîchissement par la végétation. Nous tenterons de modéliser ces processus en partant de bilans énergétiques du sol et de la végétation. Un modèle numérique simulant finement les géométries de feuillages et les transferts radiatifs puis un dispositif expérimental, occasionnant la mise en œuvre d'une structure particulière, un *gridshell* servant de support à des plantes grimpantes, nous permettront d'aller plus loin que le modèle analytique et nous fourniront des pistes pour quantifier plus précisément ce rafraîchissement.

Bibliographie

- Eleftheria ALEXANDRI et Phil JONES : Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8) :2835–2849, 2007.
- Dario AMBROSINI, Giorgio GALLI, Biagio MANCINI, Iole NARDI et Stefano SFARRA : Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10) :7013–7029, 2014.
- APUR : Atténuer les îlots de chaleur urbains – cahier n° 5 : méthodes et outils de conception des projets, 2020.
- David ARMSON, Pete STRINGER et Roland A ENNOS : The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3) :245–255, 2012.
- Marie-Hélène AZAM, Jérémy BERNARD, Benjamin MORILLE, Marjorie MUSY et Hervé ANDRIEU : A pavement-watering thermal model for solene-microclimat : development and evaluation. *Urban Climate*, 25 :22–36, 2018.
- Diana E BOWLER, Lisette BUYUNG-ALI, Teri M KNIGHT et Andrew S PULLIN : Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3) :147–155, 2010.
- Peter BRÖDE, Dusan FIALA, Krzysztof BŁAŻEJCZYK, Ingvar HOLMÉR, Gerd JENDRITZKY, Bernhard KAMPMANN, Birger TINZ et George HAVENITH : Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (utci). *International journal of biometeorology*, 56(3) :481–494, 2012.
- Michael BRUSE et Heribert FLEER : Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental modelling & software*, 13(3-4) :373–384, 1998.
- Ross WF CAMERON, Jane E TAYLOR et Martin R EMMETT : What’s cool in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and environment*, 73 :198–207, 2014.
- Gilles CLÉMENT : *Manifeste du Tiers paysage*. Sujet/Objet Paris, 2004.
- Jean-Martial COHARD, Jean-Michel ROSANT, Fabrice RODRIGUEZ, Hervé ANDRIEU, Patrice G MESTAYER et Pierre GUILLEVIC : Energy and water budgets of asphalt concrete pavement under simulated rain events. *Urban climate*, 24 :675–691, 2018.

- Ministère de la SANTÉ : Vagues de chaleur. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-climatiques/article/vagues-de-chaleur>, 2022.
- Cécile DE MUNCK : *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Thèse de doctorat, Toulouse, INPT, 2013.
- Cécile de MUNCK, Grégoire PIGEON, Valéry MASSON, Francis MEUNIER, Pierre BOUSQUET, Brice TRÉMÉAC, Michele MERCHAT, Pierre POEUF et Colette MARCHADIER : How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33(1) :210–227, 2013.
- Elena Palomo DEL BARRIO : Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and buildings*, 27(2) :179–193, 1998.
- Argiro DIMOUDI et Marialena NIKOLOPOULOU : Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35(1) :69–76, 2003.
- Susan FRANKENSTEIN et George KOENIG : F A S S T vegetation models. Rapport technique, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 2004.
- Jennifer GRAY : Reading broadacre, 2018.
- Christine Susan Betham GRIMMOND, Matthew BLACKETT, Martin J BEST, Matthew BARLOW, Jong-Jin BAIK, Stephen E BELCHER, SI BOHNENSTENGEL, I CALMET, F CHEN, A DANDOU *et al.* : The international urban energy balance models comparison project : First results from phase 1. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(6) :1268–1292, 2010.
- Christof GROMKE, Bert BLOCKEN, Wendy JANSSEN, Bart MEREMA, Twan van HOOFF et Harry TIMMERMANS : CFD analysis of transpirational cooling by vegetation : Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and environment*, 83 :11–26, 2015.
- Tom GRYLLS et Maarten van REEUWIJK : Tree model with drag, transpiration, shading and deposition : Identification of cooling regimes and large-eddy simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298 :108288, 2021.
- George HAVENITH, Dusan FIALA, Krzysztof BŁAZEJCZYK, Mark RICHARDS, Peter BRÖDE, Ingvar HOLMÉR, Hannu RINTAMAKI, Yael BENSABAT et Gerd JENDRITZKY : The utci-clothing model. *International journal of biometeorology*, 56(3) :461–470, 2012.
- Marie-Therese HOELSCHER, Thomas NEHLS, Britta JÄNICKE et Gerd WESSOLEK : Quantifying cooling effects of facade greening : Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114 :283–290, 2016.
- Luke HOWARD : *The climate of London : deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it*, volume 3. Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter, 1833.

- YJ HUANG, Hashem AKBARI, Haider TAHA et Arthur H ROSENFELD : The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 26(9) :1103–1116, 1987.
- Annie M HUNTER, Nicholas SG WILLIAMS, John P RAYNER, Lu AYE, Dominique HES et Stephen J LIVESLEY : Quantifying the thermal performance of green façades : A critical review. *Ecological Engineering*, 63 :102–113, 2014.
- Gerd JENDRITZKY, Richard de DEAR et George HAVENITH : UTCI – Why another thermal index? *International journal of biometeorology*, 56(3) :421–428, 2012.
- Gerd JENDRITZKY, George HAVENITH, Philipp WEIHS et Ekaterina BATCHVAROVA : Towards a universal thermal climate index utci for assessing the thermal environment of the human being. *Final Report COST Action*, 730(10), 2009.
- Petra M KLEIN et Reid COFFMAN : Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. *Science of the total environment*, 512 : 82–93, 2015.
- Christian KONGSGAARD : UtcI parameter sensitivity. https://compute.procedural.build/docs/comfort/utci_sensitivity, 2021.
- Dan M KURN, Sarah E BRETZ, Benson HUANG et Hashem AKBARI : The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling. Rapport technique, Lawrence Berkeley Lab., CA (United States), 1994.
- Renato M LAZZARIN, Francesco CASTELLOTTI et Filippo BUSATO : Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37 (12) :1260–1267, 2005.
- Sang-Hyun LEE et Soon-Ung PARK : A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1) :73–102, 2008.
- Aude LEMONSU, Valery MASSON, Limor SHASHUA-BAR, Evyatar ERELL et David PEARLMUTTER : Inclusion of vegetation in the town energy balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6) :1377–1393, 2012.
- Zhixin LIU, Senlin ZHENG et Lihua ZHAO : Evaluation of the ENVI-Met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area. *Atmosphere*, 9 (5) :198, 2018.
- Laurent MALYS, Marjorie MUSY et Christian INARD : A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and environment*, 73 :187–197, 2014.
- Lento MANICKATHAN, Thijs DEFRAEYE, Jonas ALLEGRINI, Dominique DEROME et Jan CARMELIET : Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and forest meteorology*, 248 :259–274, 2018.
- Alberto MARTILLI, E Scott KRAYENHOFF et Negin NAZARIAN : Is the urban heat island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31 :100541, 2020.

- Valéry MASSON : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94(3) :357–397, 2000.
- Ch.-L. MAUFRAS : *L'Architecture*. C. L. F. Panckoucke, 1847.
- Catherine MAUMI : *Frank Lloyd Wright Broadacre city, la nouvelle frontière*. Editions de la Villette, mai 2015. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01152476>.
- Lotfi MEHDI, Christiane WEBER, Francesca DI PIETRO et Wissal SELMI : Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert à la trame verte. *VertigO*, 12(2), 2012.
- Ariane MIDDEL, Jonas LUKASCZYK, Ross MACIEJEWSKI, Matthias DEMUZERE et Matthias ROTH : Sky view factor footprints for urban climate modeling. *Urban climate*, 25 :120–134, 2018.
- Matteo MIGLIARI, Rémi BABUT, Camille DE GAULMYN, Loïc CHESNE et Olivier BAVEREL : The metamatrix of thermal comfort : A compendious graphical methodology for appropriate selection of outdoor thermal comfort indices and thermo-physiological models for human-biometeorology research and urban planning. *Sustainable Cities and Society*, 81 :103852, 2022.
- Gerald MILLS : Urban climatology : History, status and prospects. *Urban climate*, 10 :479–489, 2014.
- Parham A MIRZAEI : Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable cities and society*, 19 :200–206, 2015.
- J NOILHAN et S PLANTON : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3) :536–549, 1989.
- Tim R OKE : City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 7 (8) :769–779, 1973.
- Tim R OKE : Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations. *Journal of climatology*, 1(3) :237–254, 1981.
- Timothy R OKE, Gerald MILLS, Andreas CHRISTEN et James A VOOGT : *Urban climates*. Cambridge University Press, 2017.
- Valentina OQUENDO-DI COSOLA, Francesca OLIVIERI et Luis RUIZ-GARCÍA : A systematic review of the impact of green walls on urban comfort : Temperature reduction and noise attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162 :112463, 2022.
- Lilliana LH PENG et Chi Yung JIM : Seasonal and diurnal thermal performance of a subtropical extensive green roof : The impacts of background weather parameters. *Sustainability*, 7(8) :11098–11113, 2015.
- Martin PIRINGER, C Sue B GRIMMOND, Sylvain M JOFFRE, P MESTAYER, DR MIDDLETON, MW ROTACH, A BAKLANOV, K DE RIDDER, J FERREIRA, E GUILLOTEAU *et al.* : Investigating the surface energy balance in urban areas—recent advances and future needs. *Water, Air and Soil Pollution : Focus*, 2(5) :1–16, 2002.

- Emilie REDON : *Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*.
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2017.
- David J SAILOR : A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 40(8) :1466–1478, 2008.
- Limor SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL : The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and urban planning*, 92 (3-4) :179–186, 2009.
- Anna SOLCEROVA, Frans van de VEN, Mengyu WANG, Michiel RIJSDIJK et Nick van de GIESEN : Do green roofs cool the air ? *Building and Environment*, 111 :249–255, 2017.
- Ivo SUTER, Čedo MAKSIMOVIĆ et Maarten van REEUWIJK : A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs. *Urban Climate*, 20 :33–45, 2017.
- Haider TAHA, Hashem AKBARI et Arthur ROSENFELD : Heat island and oasis effects of vegetative canopies : micro-meteorological field-measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 44(2) :123–138, 1991.
- Yacin TOPARLAR, Bert BLOCKEN, Bino MAIHEU et Gertjan Jan F VAN HEIJST : A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 :1613–1640, 2017.
- Henry G WELLER, Gavin TABOR, Hrvoje JASAK et Christer FUREBY : A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in physics*, 12(6) :620–631, 1998.

Chapitre 2

Mécanismes de rafraîchissement

Ce chapitre, composé de trois parties, présente la théorie que nous utiliserons dans le reste du manuscrit. La première partie consiste en des rappels généraux de thermique. La deuxième cherche à formaliser l'effet sur la température de l'air de deux phénomènes physiques qui ressortent de la revue de la littérature : l'évaporation de l'eau contenue dans la végétation et l'ombrage fait par la végétation sur le sol. La troisième revient sur la notion de « rafraîchissement » pour tenter de la préciser.

2.1 Généralités sur les transferts thermiques

Nous commençons par des rappels sur les différents modes de transfert thermique : la conduction, la convection, le rayonnement et le changement de phase (en se limitant à l'évaporation). La présentation du rayonnement s'inspire de l'ouvrage de Modest (2013) tandis que les parties traitant de conduction et de convection tirent de nombreux exemples et explications des cours de Lagrée (2018) et de Sacadura (2015). Nous prenons comme point de départ de ces rappels les bilans énergétiques de surface de Oke (1982), dans lesquels ces quatre processus se retrouvent combinés. Nous présentons ensuite l'équation de la chaleur dans un cas simple, qui nous permet de décrire divers types de conditions aux limites et d'introduire le nombre de Biot.

2.1.1 Bilan énergétique de surface

Une manière de comprendre les causes de l'îlot de chaleur urbain est de comparer un modèle thermique de la ville à un modèle thermique de la campagne, et d'identifier les facteurs responsables des réponses différentes entre les deux systèmes étudiés. De façon classique, ce modèle consiste en la définition d'un domaine – doté d'un certain nombre de paramètres (caractérisant la géométrie, les propriétés thermiques et radiatives des éléments, etc.) – dont on réalise le bilan énergétique, c'est-à-dire le compte de tous les flux d'énergie qui entrent et sortent de ce domaine.

Les travaux de Oke (1982) ont popularisé l'utilisation des bilans énergétiques de surface en météorologie urbaine. Le bilan énergétique de *surface* désigne souvent le bilan énergétique d'un volume de contrôle fictif. Celui-ci peut tout aussi bien englober un couvert forestier qu'une aire urbaine (cf. par exemple les travaux de Lhomme et Perrier (1983) ou de Pigeon (2007)). Cette approche globale, reproduite à la figure 2.1, permet de réduire la complexité des échanges qui ont lieu dans la couche limite urbaine en modélisant la

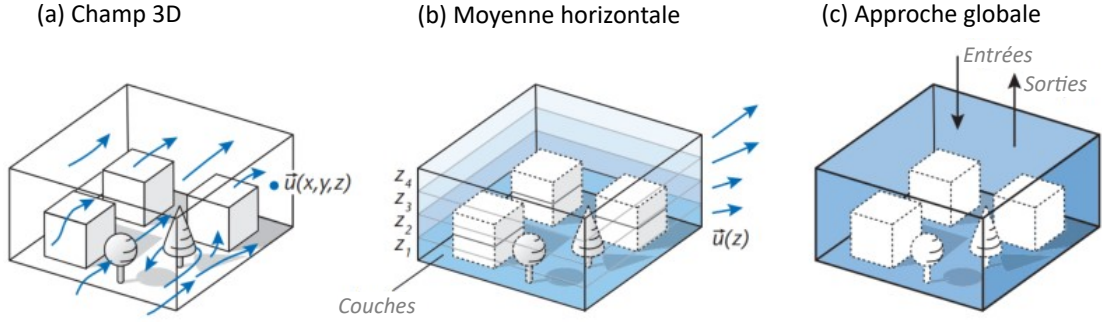


FIGURE 2.1 – Trois manières d’étudier le climat à l’interface ville/atmosphère : (a) chaque variable est décrite par un champ 3D ; (b) le système est scindé en différentes couches horizontales contenant des valeurs moyennes ; (c) le système est représenté par une "boîte noire" contenant des valeurs globales et les échanges à l’intérieur de la boîte ne sont pas considérés (d’après Oke *et al.* (2017)).

zone étudiée par une unique couche aux propriétés homogènes.

Une écriture typique du bilan énergétique à l’interface entre l’aire urbaine et l’atmosphère est la suivante :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2.1)$$

où Q^* est le flux de rayonnement net (le rayonnement solaire et atmosphérique reçu moins le rayonnement émis par la surface vers l’atmosphère), Q_F le flux de chaleur anthropique (émissions dues à l’activité humaine en ville, comme les gaz d’échappement des voitures et l’air chaud rejeté par les systèmes de climatisation dans les rues), Q_H le flux de chaleur sensible (échanges de chaleur par convection), Q_E le flux de chaleur latente (transfert d’énergie par changement d’état de l’eau), ΔQ_S le flux de chaleur stockée (augmentation de la température du système et conduction de la chaleur vers les couches de sol plus profondes) et ΔQ_A le flux net de chaleur advectée (la chaleur apportée ou retirée du volume par le vent, s’il existe des différences horizontales). Tous ces termes, représentés sur la figure 2.2a, sont homogènes à une densité de flux thermique, c’est-à-dire une puissance thermique par unité de surface, et sont donc exprimés en W.m^{-2} . Dans la suite du chapitre, ils seront notés ϕ , en minuscules, et on omettra le mot *densité* par commodité de langage dès que possible. La lettre capitale Φ sera réservée pour les flux thermiques agrégés sur toute la surface (avec la dimension d’une puissance, en watts). Les lettres q et Q désigneront, respectivement, les grandeurs ϕ et Φ intégrées sur une certaine durée, afin d’obtenir une énergie thermique par unité de surface (en J.m^{-2}) et une énergie thermique (en joules). L’équation 2.1 exprime la conservation de l’énergie du volume de contrôle.

Cette équation reste valide quelle que soit la taille du volume étudié. Par la suite, nous allons appliquer cet outil à des systèmes beaucoup plus petits, de l’échelle d’un arbre voire d’une feuille. A ces échelles, on peut négliger le flux de chaleur anthropique et le flux net de chaleur advectée (on pourra se référer à Oke *et al.* (2017) pour la signification de ces flux à l’échelle de la ville). Le bilan énergétique de surface s’écrit alors, comme sur la figure 2.2b :

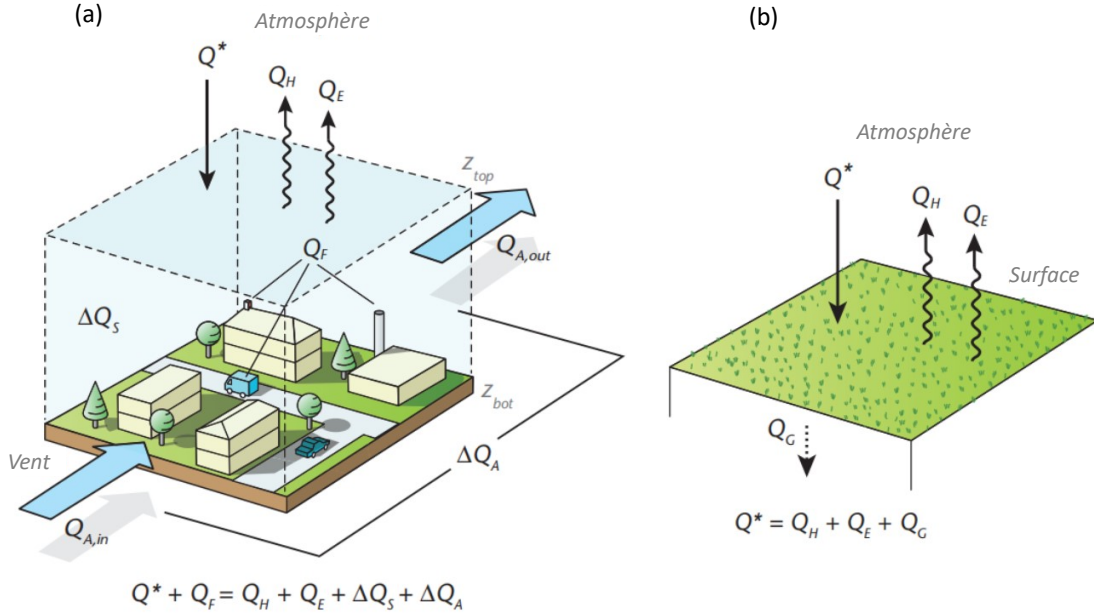


FIGURE 2.2 – Flux du bilan énergétique (a) d'un volume et (b) d'une surface plane (d'après Oke *et al.* (2017)).

$$\phi^* = \phi_H + \phi_E + \phi_G \quad (2.2)$$

où ϕ_G est le flux de chaleur transférée par conduction dans le sol. Les paragraphes suivants détaillent les différents termes de ce bilan, qui se rapportent chacun à un mode de transfert thermique spécifique.

2.1.2 Flux de rayonnement net ϕ^*

Nous effectuons d'abord des rappels généraux en nous inspirant de l'ouvrage de Modest (2013). Le rayonnement est un mode de transport d'énergie qui, contrairement à la conduction et la convection, se produit également dans le vide. Tout corps ayant une température supérieure au zéro absolu (0 K, soit -273.15°C) émet un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement thermique, dont la gamme de fréquences est représentée sur la figure 2.3. On peut étudier ce phénomène avec les outils de la physique ondulatoire, en considérant que le rayonnement est constitué d'ondes électromagnétiques, et ceux de la physique statistique, en considérant des paquets de photons, les deux approches étant complémentaires.

Corps noir

Le modèle du corps noir décrit le comportement d'un objet idéal qui absorbe intégralement le rayonnement incident. La conservation de l'énergie implique que le corps noir est également un émetteur parfait. À l'équilibre thermique, le spectre du rayonnement qu'il émet est défini par la loi de Planck et dépend uniquement de sa température :

$$E_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{n^2 \lambda^5 [e^{hc/n\lambda k_B T} - 1]} \quad (2.3)$$

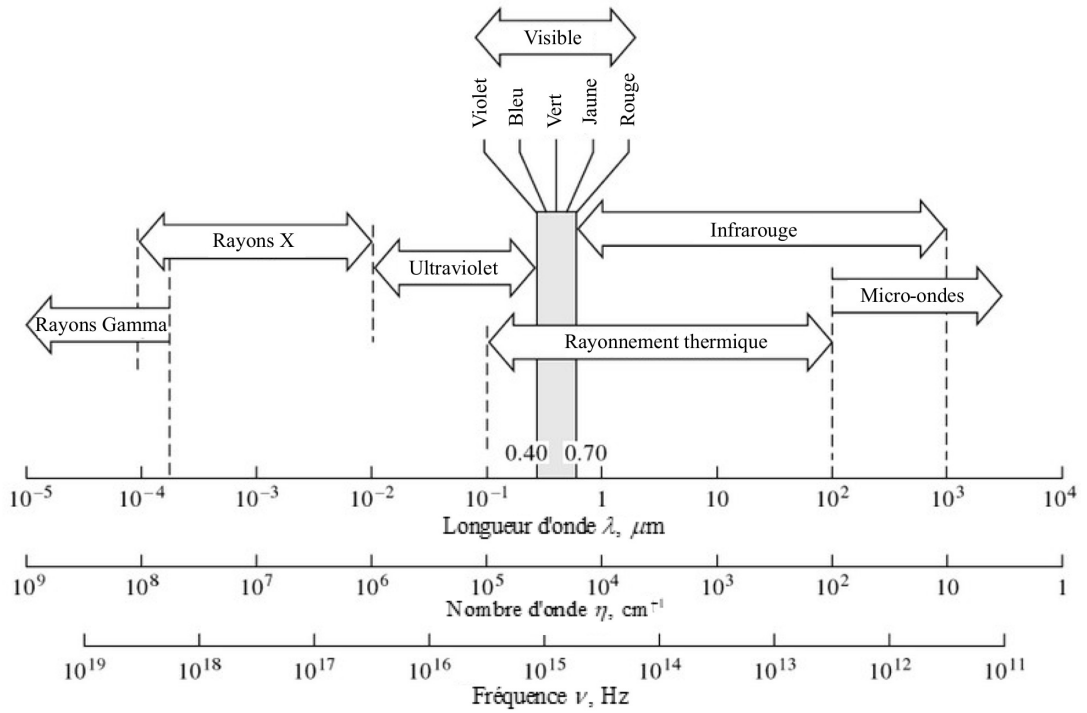


FIGURE 2.3 – Spectre des ondes électromagnétiques (d'après Modest (2013)).

où E_λ est l'émittance spectrale (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$), λ la longueur d'onde, h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide, n l'indice de réfraction du milieu et k_B la constante de Boltzmann. Ce spectre est tracé sur la figure 2.4 en échelle log-log pour un corps noir à différentes températures T . L'émittance du corps noir augmente donc avec sa température. A une température donnée, le maximum de l'émittance est atteint pour une longueur d'onde qui peut être calculée par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.4)$$

où λ_{max} est en micromètres et T en kelvins. L'émittance totale du corps noir, en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, qui est l'intégrale de E_λ sur tout le spectre, représente la puissance rayonnée par unité de surface du corps. C'est le terme que nous appelons *flux de rayonnement émis*, ϕ_R , dans le bilan énergétique. Celui-ci s'exprime, d'après la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\phi_R = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann.

Propriétés radiatives des corps réels

Contrairement au corps noir, un corps réel n'est ni un absorbeur ni un émetteur parfait. Lorsqu'un rayonnement incident parvient à un milieu quelconque, une partie de ce rayonnement peut être absorbée, une partie réfléchi et une partie transmise (voir figure 2.5a). Par conservation de l'énergie, on aboutit à la relation :

$$a + r + t = 1 \quad (2.6)$$

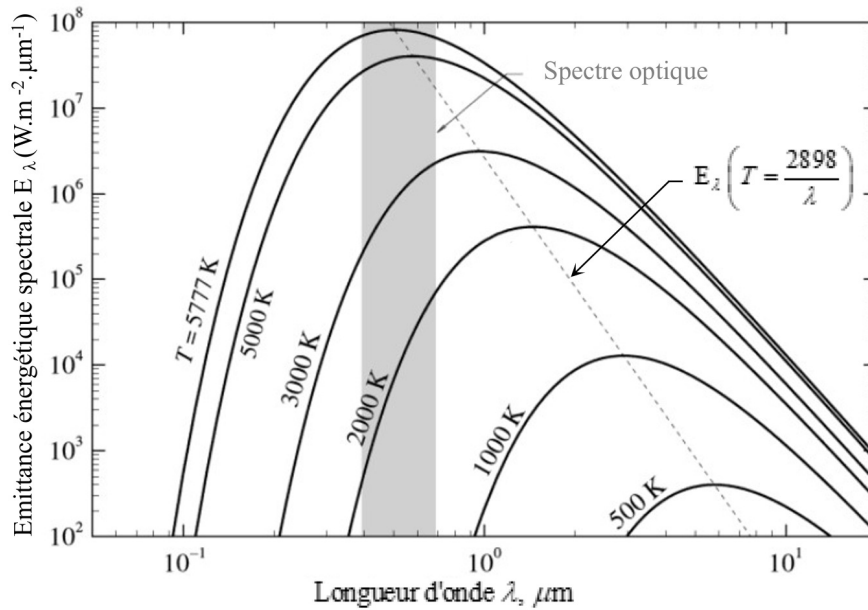


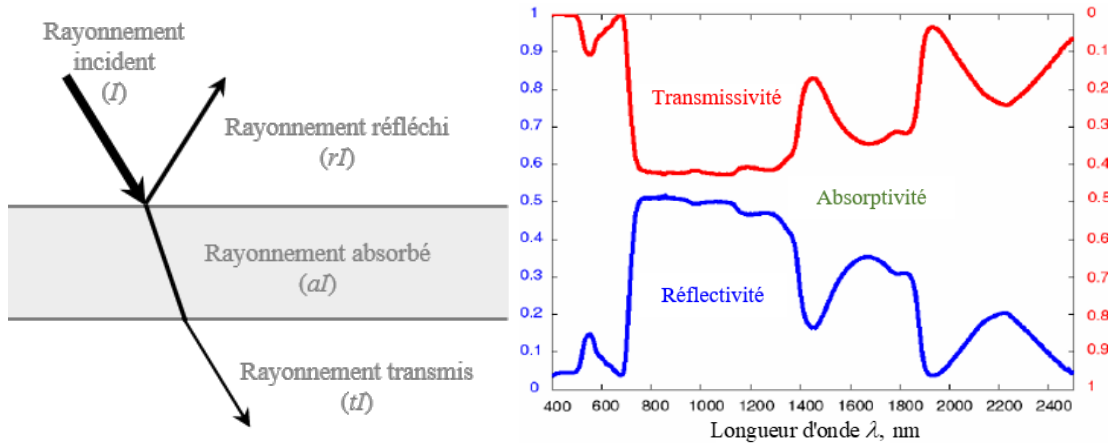
FIGURE 2.4 – Répartition spectrale de l'énergie émise par un corps noir à différentes températures d'après la loi de Planck. La distribution associée à la température $T = 5777 \text{ K}$ représente le rayonnement solaire. Le graphique illustre, en pointillés, la loi de déplacement de Wien : la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission est inversement proportionnelle à la température du corps (d'après Modest (2013)).

où a , r et t sont l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité totales du milieu. Ces coefficients sont compris entre 0 et 1. Si la transmissivité est nulle, on parlera de milieu *opaque* et si elle est égale à 1, de milieu *transparent*. Dans le cas général, il s'agira d'un milieu *semi-transparent*. Une absorptivité de 1 correspond au modèle du corps noir.

Ces propriétés dépendent de la longueur d'onde et de l'angle que fait le rayonnement incident (ou sortant) avec la surface. Elles peuvent donc être définies de façon spectrale (a_λ , r_λ , t_λ) ou totale (valeur moyennée sur tout le spectre), directionnelle ou hémisphérique (valeur moyennée sur toutes les directions). Dans la suite du chapitre, on ne tiendra pas compte de la direction du rayonnement donc on considérera uniquement des propriétés hémisphériques. La figure 2.5b donne l'exemple d'une feuille d'arbre pour laquelle les propriétés radiatives dépendent fortement de la longueur d'onde. On remarque sur cette figure que les courbes de la transmissivité t et de la réflectivité r sont très semblables. Cette représentation permet de voir l'absorptivité a comme étant le solde à 1, c'est-à-dire la distance entre les deux courbes ($a = 1 - t - r$). L'absorptivité est très importante dans une plage de longueurs d'onde allant de 400 à 700 nm (c'est approximativement le spectre visible pour l'œil humain), délimitant un rayonnement dit *photosynthétiquement actif* (en anglais, PAR, pour *Photosynthetically Active Radiation*) qui, comme son nom l'indique, est utilisé par certains organismes au cours du processus de photosynthèse.

Nous avons dit qu'un corps quelconque à une température T émettait un rayonnement thermique, l'émission étant maximale dans le cas du corps noir qui est un radiateur idéal. Il est donc utile de définir un quatrième coefficient, appelé émissivité :

$$\varepsilon = \frac{\text{rayonnement émis par un corps à } T}{\text{rayonnement émis par un corps noir à } T} \quad (2.7)$$



(a) Définition des coefficients pour un milieu semi-transparent. (b) Propriétés radiatives spectrales d'une feuille verte de peuplier (d'après Jacquemoud et Ustin (2001)).

FIGURE 2.5 – Interaction du rayonnement avec un milieu matériel.

avec $0 < \varepsilon < 1$ ($\varepsilon = 1$ pour le corps noir). Le flux de rayonnement émis s'écrit alors pour un corps quelconque :

$$\phi_R = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.8)$$

L'émission et l'absorption d'un objet sont liées par la loi de Kirchhoff qui établit leur égalité pour toute longueur d'onde λ :

$$a_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (2.9)$$

Cependant, dans le cas général, l'absorptivité totale a et l'émissivité totale ε ne sont pas égales. En effet, l'absorptivité totale est une moyenne de l'absorptivité spectrale pondérée par le rayonnement incident I_λ tandis que l'émissivité totale est pondérée par le rayonnement émis E_λ :

$$a = \frac{\int_\lambda a_\lambda I_\lambda d\lambda}{\int_\lambda I_\lambda d\lambda} \text{ et } \varepsilon = \frac{\int_\lambda a_\lambda E_\lambda d\lambda}{\int_\lambda E_\lambda d\lambda} \quad (2.10)$$

Par abus de langage, on parle des *propriétés radiatives d'un matériau* bien que les grandeurs totales ne soient pas intrinsèques au matériau. Prenons l'exemple de la neige, sur Terre, soumise au rayonnement solaire. Des valeurs d'absorptivité totale $a = 0.3$ et d'émissivité totale $\varepsilon = 0.98$ (ordres de grandeur tirés de Warren (1982)) traduisent le fait que l'absorptivité de la neige est faible aux courtes longueurs d'onde (le rayonnement incident I_λ correspond ici au rayonnement solaire, dont le spectre s'étend environ entre 0.1 et $3 \mu\text{m}$, avec un maximum autour de $0.5 \mu\text{m}$, dans le visible) et très élevée aux grandes longueurs d'onde (le rayonnement émis par la neige E_λ étant dans l'infrarouge, autour de $10 \mu\text{m}$). Si l'on étudie le bilan énergétique d'une surface enneigée en ville, on ne peut plus considérer une absorptivité totale de 0.3 puisque la quasi-totalité du rayonnement infrarouge émis par les murs vers la neige est absorbée (ε est très proche de 1). Lorsqu'une grandeur totale est utilisée, il faut donc faire attention à la plage de longueurs d'onde sur laquelle elle a été moyennée. En ce qui concerne la réflectivité des surfaces opaques, le terme *albédo* est souvent utilisé pour caractériser la réflectivité totale pour le rayonnement solaire, donc aux courtes longueurs d'onde.

Rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde

En première approche, par simplicité, on souhaite utiliser des valeurs moyennes sur certaines bandes spectrales. C'est pourquoi la littérature sur les bilans énergétiques de surface, en climatologie urbaine et en thermique du bâtiment, fait la distinction entre deux grandes plages de longueurs d'ondes appropriées pour le rayonnement thermique, qui correspondent aux spectres du rayonnement émis par le Soleil et la Terre (voir figure 2.6) :

- les courtes longueurs d'onde, qui appartiennent au spectre solaire, de 0.1 à 3 μm ;
- les grandes longueurs d'onde, qui composent le rayonnement infrarouge émis par la Terre et par les surfaces en ville – dont la température est comprise, approximativement, entre 0 et 100 $^{\circ}\text{C}$ – de 3 à 100 μm .

Dans le bilan radiatif d'une surface, on utilisera les abréviations *SW* (*shortwave*) et *LW* (*longwave*) pour désigner les rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde.

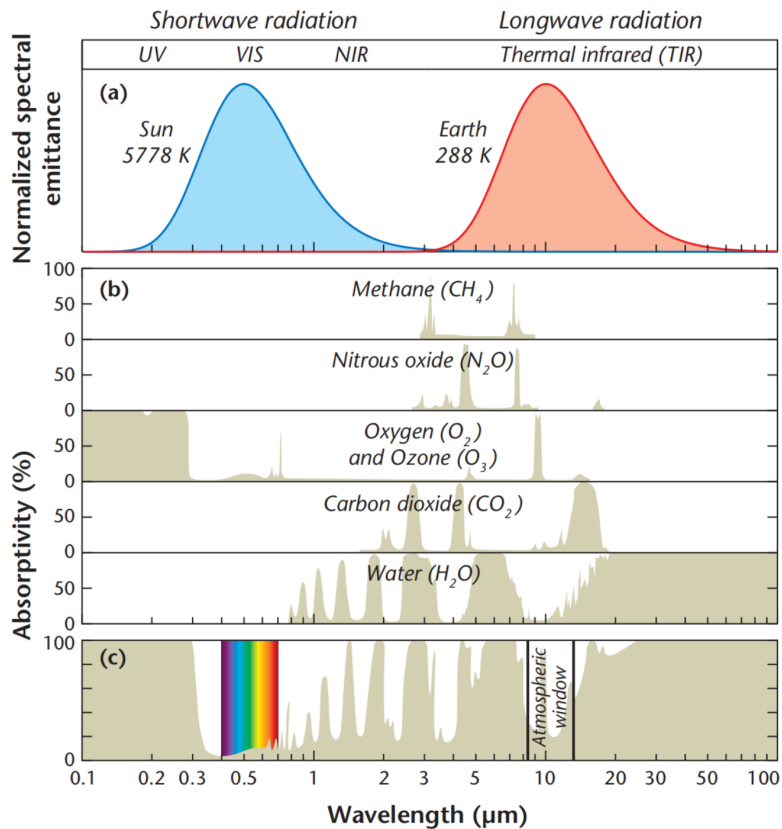


FIGURE 2.6 – (a) Les spectres du rayonnement émis par le Soleil et la Terre, considérés comme des corps noirs de températures de surface respectives $T = 5778 \text{ K}$ et $T = 288 \text{ K}$, (b) l'absorptivité (et l'émissivité) de gaz présents dans l'atmosphère, et (c) l'absorptivité (et l'émissivité) globale de l'atmosphère (d'après Oke *et al.* (2017)).

Bilan radiatif

Nous pouvons maintenant définir le flux de rayonnement net ϕ^* , qui correspond au bilan radiatif « flux entrants *moins* flux sortants » d'une surface, sur toutes les longueurs

d'onde. Le bilan radiatif total peut d'abord être séparé en deux bilans, sur les deux plages spectrales que nous avons identifiées :

$$\phi^* = SW^* + LW^* = (SW\downarrow - SW\uparrow) + (LW\downarrow - LW\uparrow) \quad (2.11)$$

Les flèches vers le bas désignent les flux incidents, dirigés vers la surface, et les flèches vers le haut désignent les flux sortants (réfléchis, transmis ou émis par la surface). Le rayonnement courtes longueurs d'onde sortant correspond à la proportion du rayonnement courtes longueurs d'onde incident qui n'a pas été absorbé par la surface :

$$SW\uparrow = (1 - a)SW\downarrow \quad (2.12)$$

et le rayonnement grandes longueurs d'onde sortant est la somme du rayonnement grandes longueurs d'onde incident qui n'a pas été absorbé par la surface (soit $(1-\varepsilon)LW\downarrow$) et du rayonnement émis¹ ϕ_R (soit $\varepsilon\sigma T^4$) :

$$LW\uparrow = (1 - \varepsilon)LW\downarrow + \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.13)$$

ce qui permet d'aboutir à l'expression :

$$\begin{aligned} \phi^* &= aSW\downarrow + \varepsilon LW\downarrow - \varepsilon\sigma T^4 \\ &= \phi_{abs} - \varepsilon\sigma T^4 \end{aligned} \quad (2.14)$$

en notant ϕ_{abs} le flux de rayonnement absorbé par la surface, toutes longueurs d'ondes confondues. Le rayonnement absorbé est toujours positif. Nous verrons plus loin l'intérêt d'introduire ce terme : contrairement au flux de rayonnement net, il peut être considéré comme un terme de forçage indépendant de la température de surface².

2.1.3 Flux de chaleur sensible ϕ_H

Le flux de chaleur sensible (H pour *heat*) correspond à l'énergie thermique échangée par convection entre le solide (le système) et le fluide (l'extérieur). Ce mode de transfert est dû à un mouvement du fluide, son importance dépend de l'écoulement autour du solide. On peut modéliser le transfert thermique par une loi phénoménologique, la loi de Newton, qui postule que le flux de chaleur sensible est proportionnel à la différence de température entre le solide et le fluide :

$$\phi_H = h(T - T_{air}) \quad (2.15)$$

où h est le coefficient de transfert thermique par convection (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), T la température de surface du système (en kelvins) et T_{air} la température de l'air (en kelvins) loin de la surface du système. Dans cette loi, la température du fluide hors de la couche limite est supposée uniforme.

Un flux de chaleur sensible positif au niveau de la surface correspond à de l'énergie thermique transférée à l'air, et donc à un réchauffement de l'air (le solide réchauffe le fluide).

1. La surface à la température T , aux alentours de 300-350 K, émet dans la plage LW , comme on peut le voir sur la figure 2.4.

2. Cette hypothèse doit être revue lorsqu'il y a une interaction importante entre le système étudié et son environnement. Par exemple, si l'on s'intéresse au bilan énergétique de l'océan : la température de l'océan a une influence sur la température des couches atmosphériques et donc sur le rayonnement incident $L\downarrow$ qu'il va recevoir de ces dernières (Yang et Roderick, 2019).

Le flux de chaleur sensible est négatif si la surface est plus froide que l'air et dans ce cas elle le refroidit (c'est l'air qui cède de l'énergie au solide).

La loi de Newton simplifie le problème thermique tout en déplaçant la difficulté car il s'agit maintenant d'évaluer le facteur d'échange h . De nombreuses méthodes pour le mesurer ont été répertoriées par Moreira *et al.* (2019) mais peuvent être difficiles à mettre en œuvre. Des expressions analytiques de ce coefficient dans des cas typiques (convection forcée interne ou externe, convection naturelle) sont données dans le cours de Lagrée (2018) ; le paragraphe suivant reprend brièvement une méthode d'estimation de h pour un exemple classique.

Analyse dimensionnelle

Si l'on prend le cas de la convection forcée pour une plaque de longueur L plongée dans un fluide de masse volumique ρ , de viscosité dynamique μ , de conductivité thermique λ et de capacité thermique massique à pression constante c_p , qui s'écoule en amont de la plaque à une vitesse U (voir figure 2.7), on peut construire trois variables sans dimension :

- le nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$, rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, qui caractérise l'écoulement du fluide (une augmentation de Re fait passer d'un régime laminaire à un régime transitoire puis à un régime turbulent) ;
- le nombre de Prandtl $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$, rapport entre la diffusion de la quantité de mouvement et la diffusion de la chaleur (un nombre de Prandtl élevé signifie que le profil de température dans le fluide est fortement influencé par le profil de vitesse) ;
- le nombre de Nusselt $Nu = \frac{hL}{\lambda}$, rapport entre le transfert par convection et le transfert par conduction (un nombre de Nusselt élevé indique que la convection domine devant la conduction).

Ces trois nombres adimensionnels sont liés entre eux d'après le théorème de Vaschy-Buckingham :

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.16)$$

On peut ensuite :

- déterminer cette relation expérimentalement en faisant varier Re et Pr - la littérature propose généralement des formes du type $Nu = CRe^a Pr^b$, qui dépendent de la géométrie du problème et des conditions de l'écoulement ;
- calculer des valeurs théoriques du nombre de Nusselt dans des cas spécifiques (pour certaines géométries, conditions aux limites, régimes d'écoulement, etc.).

On en déduit enfin le coefficient de transfert thermique, par définition du Nusselt :

$$h = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu \quad (2.17)$$

Expression analytique de h pour une plaque en convection forcée

Lagrée (2018) donne ainsi l'expression suivante du coefficient de transfert thermique local h_x pour une plaque plane de longueur L , de température uniforme imposée, en

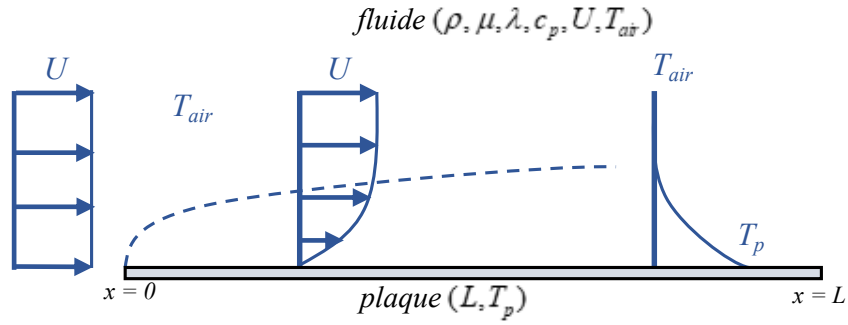


FIGURE 2.7 – Exemple de convection forcée externe : écoulement sur une plaque plane. Pour un nombre de Prandtl de 1, les couches limites thermique et hydrodynamique sont confondues.

régime laminaire ($Re_L < 10^5$) :

$$h_x = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.332 Pr^{1/3} Re_x^{1/2} \quad (2.18)$$

ce qui aboutit au coefficient d'échange moyen, en intégrant sur la longueur de la plaque :

$$h = \frac{\int_0^L h_x dx}{L} = \frac{\lambda}{L} \cdot 0.664 Pr^{1/3} Re_L^{1/2} \quad (2.19)$$

Le nombre de Prandtl de l'air vaut environ 0.7 et varie peu avec la température. En considérant les propriétés de l'air à 300K, on obtient comme expression approchée du coefficient de transfert :

$$h = 3.9 \left(\frac{U}{L} \right)^{1/2} \quad (2.20)$$

Cette dépendance en $L^{-1/2}$ suggère que les transferts convectifs sont plus importants pour les objets de petites dimensions. Cette propriété a par exemple été exploitée par Sakai *et al.* (2012) pour construire une toiture fractale composée d'une multitude de plaques de petite taille. En comparaison d'une toiture plane adjacente, formée d'une seule grande plaque, ces petites plaques ont une température plus proche de la température de l'air du fait de l'augmentation des échanges thermiques par convection.

Des expressions de h pour des feuilles d'arbre

Concernant les échanges thermiques entre des feuilles d'arbres et leur environnement, c'est la résistance aérodynamique $r_a = \frac{\rho c_p}{h}$ qui est donnée la plupart du temps (Monteith et Szeicz, 1962; Thom, 1968). Cette résistance peut s'exprimer sous la forme $r_a = K \left(\frac{L}{U} \right)^{1/2}$ (en $s \cdot m^{-1}$, où K est une constante). Des tests en soufflerie (Parlange *et al.*, 1971) et *in situ* (Parlange et Waggoner, 1972) ont permis d'établir expérimentalement la valeur $K = 130 s^{1/2} \cdot m^{-1}$ en régime turbulent, ce qui correspond à un coefficient de transfert :

$$h = 9.5 \left(\frac{U}{L} \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

soit environ 2.5 fois la valeur vue au paragraphe précédent pour la plaque de température imposée en régime laminaire.

C'est cette expression de h qui a été utilisée dans deux études CFD modélisant l'effet des arbres sur la température de l'air (Manickathan *et al.*, 2018 ; Grylls et van Reeuwijk, 2021) dont nous discuterons par la suite. Cela correspond à un coefficient d'échange $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour des feuilles de longueur $L = 0,1 \text{ m}$ et une vitesse de vent $U = 1 \text{ m.s}^{-1}$. D'autres auteurs proposent des résistances aérodynamiques du même ordre de grandeur ($K = 150 \text{ s}^{1/2}.\text{m}^{-1}$ pour Finnigan et Raupach (1987), $K = 223 \text{ s}^{1/2}.\text{m}^{-1}$ pour Nobel *et al.* (1983)). De nombreux autres travaux – analytiques, expérimentaux et numériques – visant à estimer le coefficient h ont été répertoriés par Defraeye *et al.* (2013). Il faut garder à l'esprit que les études listées présentent souvent des valeurs locales, instantanées et spécifiques du coefficient h pour une feuille (dans le cas d'un écoulement, d'une différence de température, d'une espèce, etc. donnés) alors que la variabilité spatiale et temporelle du coefficient d'échange au sein du feuillage est importante.

2.1.4 Flux de chaleur latente ϕ_E

La chaleur latente est l'énergie nécessaire pour effectuer un changement d'état. Dans le cas présent, il s'agit de la vaporisation de l'eau : c'est l'énergie qu'il faut apporter à une certaine quantité d'eau pour la faire passer de l'état liquide à l'état gazeux. Le flux de chaleur latente ϕ_E (E pour *evaporation*) peut donc s'écrire :

$$\phi_E = L_v E \quad (2.22)$$

où L_v est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau (en J.kg^{-1}) et E le taux d'évaporation surfacique (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). L_v dépend de la température d'évaporation mais varie faiblement entre 0°C ($L_v = 2,50 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$) et 100°C ($L_v = 2,25 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$). On prendra $L_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ par la suite.

2.1.5 Flux de chaleur par conduction ϕ_G

La conduction est un mode de transfert thermique qui s'effectue de proche en proche dans un corps, des parties chaudes vers les parties froides, par agitation thermique et sans déplacement macroscopique de matière. La loi de Fourier (1822) postule que la densité de flux de chaleur (aussi appelée *densité de courant thermique*) est proportionnelle au gradient de température dans le corps :

$$\vec{\phi}_G = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (2.23)$$

où λ est la conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). En 1D, dans le cas d'un sol (G pour *ground*), on peut donc écrire :

$$\phi_G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.24)$$

avec l'axe des x orienté suivant la profondeur.

Dans l'équation 2.1, ϕ_G n'apparaît pas puisque le volume de contrôle est défini de manière à ce que la paroi inférieure du système soit adiabatique : il n'y a pas de transfert de chaleur par conduction en sous-face du volume ($\phi_G = 0$). Un exemple est donné sur la figure 2.2a où le volume de contrôle a été prolongé vers le bas jusqu'à atteindre une profondeur dans le sol où le flux de chaleur par conduction puisse être considéré nul.

En revanche, il y a un stockage d'énergie dans les matériaux à l'intérieur du volume (le sol, l'air, les bâtiments, la végétation...). Le flux de chaleur stockée est alors égal à (Oke *et al.*, 2017) :

$$\Delta\phi_S = \sum_{i=1}^N \frac{1}{A_i} \int_{V_i} C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} dV_i \quad (2.25)$$

où l'indice i caractérise un type de surface au sein du volume de contrôle, A_i est l'aire de cette surface, V_i son volume et C_i sa capacité thermique volumique (en $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). Le lien entre conduction et stockage se comprend en effectuant le bilan intégral d'un volume de matière (figure 2.8).

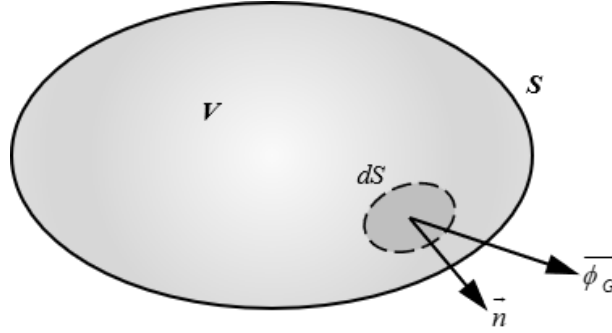


FIGURE 2.8 – Volume de contrôle V , de frontière S et de normale extérieure \vec{n} .

En reprenant la présentation de Sacadura (2015), le bilan s'énonce :

$$\left(\begin{array}{c} \text{Variation d'énergie} \\ \text{interne du corps} \\ \text{par unité de temps} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Quantité de chaleur} \\ \text{reçue par le corps au} \\ \text{travers de la frontière S} \\ \text{par unité de temps} \\ \text{(flux entrant - sortant)} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Quantité de chaleur} \\ \text{générée au sein du corps} \\ \text{par unité de temps} \\ \text{(sources ou puits)} \end{array} \right)$$

et s'écrit :

$$\int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_S -\vec{\phi} \cdot \vec{n} dS + \int_V P dV \quad (2.26)$$

où ρ est la masse volumique du solide, c sa capacité thermique massique et P la puissance volumique des sources et puits de chaleur (effet Joule, réactions chimiques, nucléaires, etc.). L'intégrale de surface peut ensuite être transformée en intégrale de volume par le théorème de Green-Ostrogradski (théorème de flux-divergence) :

$$\int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_V -\text{div } \vec{\phi} dV + \int_V P dV \quad (2.27)$$

ce qui permet d'aboutir à l'équation :

$$\int_V \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } \vec{\phi} - P \right) dV = 0 \quad (2.28)$$

qui doit être vérifiée pour tout volume V . Par conséquent :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div } \vec{\phi} + P \quad (2.29)$$

qui est une écriture générale de l'équation de diffusion de la chaleur. Cette équation étant fondamentale en thermique, nous allons au paragraphe suivant en présenter une forme simple, dans un cas basique, ce qui sera l'occasion de décrire plusieurs types de conditions aux limites et de voir l'intérêt du nombre de Biot.

2.1.6 Équation de la chaleur

En introduisant la loi de Fourier (équation 2.23) dans l'équation précédente, on obtient :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \left(\lambda \overrightarrow{\operatorname{grad}} T \right) + P \quad (2.30)$$

qui se simplifie, en considérant que la conductivité λ est constante dans le corps, en :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + P \quad (2.31)$$

où $\nabla^2 T$ est le laplacien de la température. Dans un milieu homogène et isotrope, en l'absence de sources et puits de chaleur, l'équation de la conduction s'écrit donc, sous forme locale :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (2.32)$$

soit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T \quad (2.33)$$

avec $\kappa = \lambda / (\rho c) = \lambda / C$ la diffusivité thermique du solide (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Conditions aux limites extérieures

Pour compléter la description du problème, il faut préciser des conditions aux limites (et une condition initiale si l'on s'intéresse à la solution transitoire). Les conditions au bord du domaine peuvent être de trois types :

- *Condition de température imposée*, appelée *condition de Dirichlet*. La température à la paroi est imposée :

$$T(M, t) = T_p(t) \quad (2.34)$$

- *Condition de flux imposé*, appelée *condition de Neumann*. Le flux à la paroi est imposé :

$$- \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{M,t} = \phi_P(t) \quad (2.35)$$

Un flux imposé nul ($\phi_P = 0$) correspond à une paroi adiabatique (pas d'échange de chaleur).

- *Condition mixte*, appelée *condition de Robin* (Lagrée, 2018) et parfois *de Fourier* ou *de Newton* (Sacadura, 2015). Le flux pariétal est relié à la différence entre la température de surface et la température extérieure par le coefficient d'échange :

$$- \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{M,t} = h [T(M, t) - T_{ext}(t)] \quad (2.36)$$

que l'on peut également écrire sous la forme :

$$hT + \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \phi_P \quad (2.37)$$

Cette condition est une généralisation des deux conditions précédentes, comme nous allons le voir au paragraphe suivant.

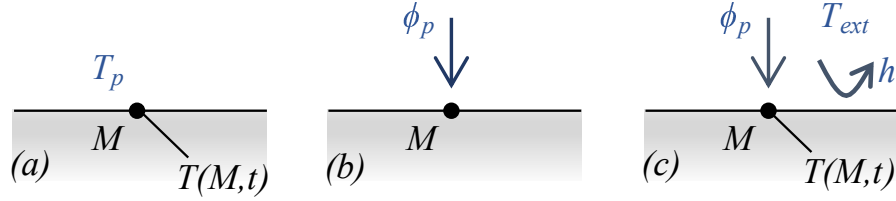


FIGURE 2.9 – Conditions aux limites : (a) température imposée; (b) flux imposé; (c) mixte (adapté de Sacadura (2015)).

Nombre de Biot

L'adimensionnement de la condition de Robin fait apparaître un nombre sans dimension qui est le *nombre de Biot*. En adimensionnant la composante normale n par une longueur caractéristique de l'objet L et en écrivant la température adimensionnée par rapport à la différence de température entre la surface à l'instant initial, T_0 , et l'extérieur T_{ext} :

$$\bar{n} = \frac{n}{L} \quad \text{et} \quad \bar{T} = \frac{T - T_{ext}}{T_0 - T_{ext}} \quad (2.38)$$

l'équation 2.36 devient :

$$-\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{n}} = Bi \bar{T} \quad (2.39)$$

avec $Bi = \frac{hL}{\lambda}$ le nombre de Biot, qui permet de savoir si la condition au bord est plus proche d'une condition de Dirichlet ou d'une condition de Neumann. En effet :

- si Bi est infini, on retrouve une condition de température imposée à la paroi : $\bar{T} = 0$ (les échanges thermiques avec l'extérieur sont très importants, le fluide impose sa température à la frontière);
- si Bi est nul, on retrouve une condition de paroi adiabatique : $\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{n}} = 0$ (pas d'échanges thermiques avec l'extérieur).

Systèmes minces

Un nombre de Biot petit indique que le phénomène de conduction à l'intérieur du solide domine par rapport aux échanges externes ($\lambda/L \gg h$). On dit alors du système qu'il est *thermiquement mince*. Qualitativement, on peut dire que la chaleur se diffuse rapidement dans l'objet et donc que la température du système est quasi-uniforme. Lagrée (2018) formalise cette idée de la façon suivante. En partant de l'équation de la chaleur

$$\int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_S -\vec{\phi} \cdot \vec{n} dS \quad (2.40)$$

et en écrivant la température, l'espace et le temps sous les formes adimensionnées $\bar{T} = (T - T_{ext})/(T_0 - T_{ext})$, $\bar{n} = n/L$ et $\bar{t} = t/\tau$, on obtient :

$$\frac{\rho c L}{\tau h} \int_V \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} d\bar{V} = - \int_S \bar{T} d\bar{S} \quad (2.41)$$

puisque à la frontière, le flux de chaleur par conduction est égal au flux emporté par convection $\vec{\phi} = h(T_0 - T_{ext}) \vec{n}$. Nous ne savons pas, a priori, quel temps caractéristique τ choisir – le but de ce calcul est justement de le déterminer. On utilise pour cela

le principe de moindre dégénérescence ; pour garder le maximum de termes, les deux membres de l'équation doivent être du même ordre de grandeur, ce qui implique que le groupe de coefficients $\frac{\rho c L}{\tau h}$ soit d'ordre 1. Ainsi :

$$\tau = \frac{\rho c L}{h} = \left(\frac{L^2}{\kappa} \right) \left(\frac{\lambda}{h L} \right) = \frac{\tau_d}{Bi} \quad (2.42)$$

où $\tau_d = L^2/\kappa$ est le temps caractéristique associé à la diffusion. Par conséquent, si le nombre de Biot est petit ($Bi \ll 1$) alors $\tau_d \ll \tau_d/Bi$: le temps de diffusion (τ_d) est court par rapport au temps d'évolution global du système (τ , qui est $1/Bi$ fois plus long). Par ailleurs, le gradient de température est faible à la frontière, la condition à la paroi s'écrivant $-\frac{\partial \bar{T}}{\partial n} = Bi \bar{T}$ avec $Bi \ll 1$. En supposant que le gradient de température soit du même ordre de grandeur (ou plus petit) dans le reste du domaine, on en déduit que les variations spatiales de température dans le système sont faibles. Si l'on fait l'hypothèse que la température ne dépend plus de l'espace ($\bar{T}(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{T}_m(\bar{t})$), l'équation 2.41 devient :

$$\frac{\partial \bar{T}_m}{\partial \bar{t}} = -D^{-1} \bar{T}_m \quad (2.43)$$

avec D un coefficient de forme (sans dimension). Dans ce modèle du corps de température uniforme, la température globale du système obéit à une équation différentielle d'ordre un ; sa décroissance en temps est exponentielle :

$$\bar{T}_m = e^{-\bar{t}/D} \quad (2.44)$$

Dans la pratique, Sacadura (2015) donne comme critère $Bi < 0.1$ pour caractériser les systèmes minces. Dans ce cas, il est possible de simplifier le problème en considérant une température d'ensemble et d'utiliser comme approximation le modèle du corps de température uniforme. Si le nombre de Biot est d'ordre 1, le système est dit *thermiquement épais* et cette simplification n'est plus valable.

2.2 Exemples d'application du bilan énergétique

Nous souhaitons appliquer ces outils au cas d'un arbre isolé sur une place pour essayer de quantifier la contribution de deux mécanismes de rafraîchissement : l'ombrage créé sur le sol par l'arbre et l'évaporation, à la surface de ses feuilles, de l'eau qu'il contient. Nous nous intéressons d'abord, de manière séparée, à deux systèmes simples, représentant un sol et une feuille d'arbre. Le bilan énergétique de ces systèmes nous permet d'estimer :

- dans le premier cas, l'effet de l'ombrage du sol sur la chaleur sensible transférée à l'air ;
- dans le deuxième cas, l'effet de l'évaporation à la surface de la feuille sur la chaleur sensible transférée à l'air.

Nous nous concentrons ici sur la réduction de chaleur sensible émise par le système vers l'air. Il s'agit donc d'un rafraîchissement *relatif* : le système (le sol ombragé dans le premier exemple, la surface évaporante dans le deuxième) cède moins d'énergie thermique à l'air que dans une situation de référence (le sol ensoleillé ou la feuille non-évaporante) mais cette quantité peut encore être positive. Dit autrement, le système réchauffe moins l'air. Les conditions dans lesquelles le rafraîchissement est absolu (c'est-à-dire les situations pour lesquelles le système retire des calories à l'air) seront examinées dans la partie suivante.

2.2.1 Effet de l'ombrage

La végétation arborée permet de diminuer la part du rayonnement solaire qui atteint le sol et donc de faire baisser la température de ce dernier. Une température du sol plus basse a trois effets sur les échanges thermiques : le flux de chaleur sensible vers l'air est réduit ; le stockage d'énergie thermique dans le sol pendant la journée puis son émission pendant la nuit sont moins importants ; le rayonnement émis vers les passants et les surfaces environnantes diminue. Dans cet exemple, nous nous concentrons sur la réduction, due à l'ombre, du flux de chaleur sensible émis par le sol.

Bilan énergétique d'une couche de sol

Une tranche de sol d'épaisseur e est représentée sur la figure 2.10. En considérant que le milieu a une température uniforme, on retrouve l'équation du bilan énergétique utilisée dans le modèle TEB (*Town Energy Balance*) de Masson (2000) :

$$eC \frac{\partial T}{\partial t} = \phi^* - \phi_H - \phi_E - \phi_G \quad (2.45)$$

Cette équation décrit l'évolution de la température du système : la température du sol augmente s'il y a un surplus d'énergie disponible, c'est-à-dire si à un instant donné le rayonnement net est supérieur à la somme des flux de chaleur sensible, de chaleur latente et de conduction ; elle diminue dans le cas contraire. On rappelle les expressions des différents flux, vues aux paragraphes précédents :

$$\phi^* = \phi_{abs} - \phi_R = \phi_{abs} - \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.46)$$

$$\phi_H = h(T - T_{air}) \quad (2.47)$$

$$\phi_E = L_v E \quad (2.48)$$

$$\phi_G = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} \quad (2.49)$$

En réordonnant les termes, on obtient la réponse en température du sol soumis à un rayonnement extérieur (rayonnement solaire et infrarouge en provenance de l'atmosphère et de l'environnement – bâtiments, végétation, etc.) :

$$\phi_{abs} = \varepsilon\sigma T^4 + h(T - T_{air}) + L_v E + eC \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} \quad (2.50)$$

qui indique les différents modes par lesquels l'énergie reçue par rayonnement est transférée – dans l'ordre, par rayonnement émis, par convection, par changement d'état et par stockage (variation d'énergie interne et conduction).

Une question se pose quant au choix de l'épaisseur de la couche, qui doit être assez petite pour que les variations de température y soient négligeables, afin de respecter l'hypothèse de départ (température uniforme dans la couche). Cette hypothèse est valide dans le cas d'un milieu mince, caractérisé par un nombre de Biot inférieur à 0.1 (Sacadura, 2015). Pour avoir un ordre de grandeur, dans le cas d'une dalle en béton de 10 cm d'épaisseur, de conductivité thermique $1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et en supposant $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, le nombre

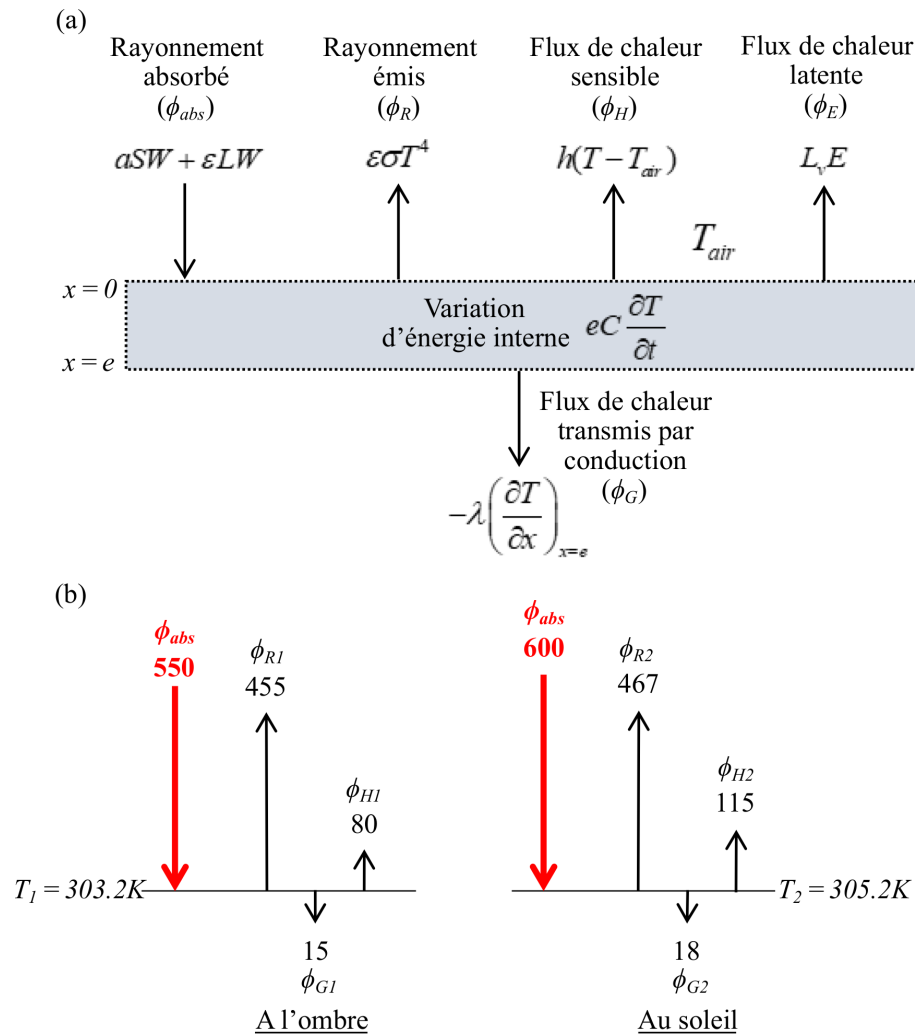


FIGURE 2.10 – (a) Bilan énergétique du sol. Le rayonnement net ϕ^* a été séparé entre un terme indépendant de la température de surface (ϕ_{abs}) et un terme dépendant d'elle (ϕ_R) afin de voir la réponse en température du système face à une différence de forçage radiatif (les rayonnements SW et LW incidents compris dans ϕ_{abs}). (b) Une différence de 50 W/m^2 de rayonnement absorbé est donnée à titre d'exemple pour illustrer l'effet de l'ombrage sur le sol à un instant t . Cette différence de forçage radiatif conduit à une température du sol ombragé de 2°C plus faible et un flux de chaleur sensible de 35 W/m^2 plus faible. On note que la différence de flux de chaleur sensible entre les deux sols n'est pas de 50 W/m^2 – ceci est principalement dû au fait que le sol au soleil a une température de surface plus élevée et par conséquent perd davantage d'énergie par rayonnement émis (le terme ϕ_R).

de Biot vaut déjà 1 et le système doit donc être considéré comme thermiquement épais : le gradient de température n'est pas négligeable. Pour obtenir un profil de température dans le sol, une possibilité est de le discrétiser en plusieurs tranches et d'appliquer la loi de Fourier pour calculer le flux de chaleur par conduction entre les différentes couches : c'est ce qui est réalisé numériquement dans le modèle TEB, par exemple. Nous allons détailler une autre approche, qui est de résoudre directement l'équation de la chaleur dans le sol pour obtenir le profil vertical de température et, en particulier, la température de surface.

Modélisation de la conduction instationnaire dans le sol

Cette fois, nous considérons le sol comme un milieu semi-infini, représenté à la figure 2.11. L'équation de la chaleur en 1D dans un milieu homogène isotrope, avec des coefficients thermodynamiques constants et sans terme source, s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.51)$$

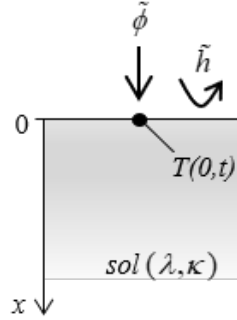


FIGURE 2.11 – Transfert unidirectionnel dans un milieu semi-infini ($x > 0$) avec condition mixte en surface.

Il n'y a qu'une condition aux limites, en $x = 0$, qui correspond au bilan énergétique de surface :

$$\phi_{abs} = \varepsilon\sigma T(0, t)^4 + h(T(0, t) - T_{air}) + L_v E - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (2.52)$$

Cette condition au bord, au niveau de l'interface fluide/solide, n'est pas linéaire en T à cause du terme de rayonnement émis. Cela posera problème par la suite pour utiliser le théorème de superposition. Une manière de contourner le problème est d'utiliser une approximation affine de la fonction $f : T \mapsto \varepsilon\sigma T^4$ au voisinage d'une température que l'on imagine proche de celle de la température de surface du sol, par exemple T_{air} :

$$\begin{aligned} f(T) &= f(T_{air}) + f'(T_{air})(T - T_{air}) \\ \varepsilon\sigma T(0, t)^4 &= \varepsilon\sigma T_{air}^4 + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3 (T(0, t) - T_{air}) \end{aligned} \quad (2.53)$$

On note $h_r = 4\varepsilon\sigma T_{air}^3$ le coefficient de transfert par rayonnement linéarisé³.

On aboutit à la condition au bord :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + \tilde{h}T(0, t) = \tilde{\phi} \quad (2.54)$$

avec $\tilde{h} = h + h_r$ le coefficient de transfert thermique global (convection et rayonnement) et $\tilde{\phi} = \phi_{abs} - \varepsilon\sigma T_{air}^4 + \tilde{h}T_{air} - L_v E$ le flux extérieur. C'est une condition aux limites de Robin, qui relie la valeur de la fonction cherchée et la valeur de sa dérivée au bord du domaine.

3. Si l'on pensait que la température de surface du sol était plutôt imposée par le rayonnement de grandes longueurs d'ondes incident, on aurait pu faire apparaître une température fictive $T_e : LW\downarrow = \sigma T_e^4$; puis, en supposant $T(0) - T_e \ll T_e$, approximer la différence $T(0)^4 - T_e^4$ par une fonction linéaire en $T(0)$ comme le fait Besson (2010) : $T(0)^4 - T_e^4 = (T(0)^2 + T_e^2)(T(0) + T_e)(T(0) - T_e) \approx 4T_e^3(T(0) - T_e)$, ce qui permet d'aboutir à un résultat similaire : $h_r = 4\varepsilon\sigma T_e^3$.

Solution en régime périodique établi

Le flux extérieur $\tilde{\phi}$ peut être constant mais peut également être une fonction du temps. Dans la suite, nous allons considérer un forçage périodique pour représenter les variations journalières du rayonnement incident et de la température extérieure. La réponse du sol à cette excitation comporte un régime transitoire, qui dépend du profil de température initial dans le sol, puis un régime périodique établi, après l'extinction du régime transitoire, pour lequel l'état initial du sol n'a plus d'influence. Nous nous intéressons à ce deuxième régime pour quantifier l'effet de l'ombre sur la température de surface du sol (et donc sur le flux de chaleur sensible) au cours de la journée. Nous traitons d'abord le cas d'un forçage sinusoïdal puis celui d'un forçage périodique quelconque.

Forçage sinusoïdal en surface

On étudie la propagation dans le sol d'une onde thermique imposée par les conditions environnementales, regroupées dans le terme de forçage $\tilde{\phi}$. La surface est donc soumise à une variation sinusoïdale du flux extérieur :

$$\tilde{\phi}(t) = \tilde{\phi}_m + A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.55)$$

La solution de l'équation 2.51, avec la condition au bord 2.54, s'écrit, en régime périodique établi (voir annexe B) :

$$T(x, t) = \frac{\tilde{\phi}_m}{\tilde{h}} + \frac{A}{\tilde{h} \sqrt{1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}}} e^{-x/\delta} \cos(\omega t - x/\delta - \varphi_T + \varphi) \quad (2.56)$$

où $Bi = \tilde{h}\delta/\lambda$ et $\varphi_T = \arctan\left(\frac{1}{1+Bi}\right)$ sont le nombre de Biot et le déphasage associés à la pulsation ω . La longueur caractéristique qui apparaît dans ce nombre de Biot est une épaisseur de peau : $\delta = \sqrt{2\kappa/\omega}$ (en mètres). Plus la pulsation de l'excitation extérieure est petite, plus la profondeur de pénétration est grande : une onde thermique de basse fréquence se propage plus loin dans le sol avant d'être totalement amortie.

Nous avons une expression générale de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps mais ce qui nous intéresse particulièrement, pour calculer le flux de chaleur sensible émis par le sol, est sa température de surface. En fait, pour estimer le rafraîchissement relatif dû à l'ombrage, nous nous intéressons plutôt à la différence de température de surface causée par une différence de rayonnement incident. Ainsi, la différence de température de surface (notée ΔT_s) entre deux sols S_1 (à l'ombre) et S_2 (au soleil) soumis à des flux extérieurs $\tilde{\phi}_1(t) = \tilde{\phi}_{m_1} + A_1 \cos(\omega t + \varphi)$ et $\tilde{\phi}_2(t) = \tilde{\phi}_{m_2} + A_2 \cos(\omega t + \varphi)$ vaut en régime périodique établi :

$$\Delta T_s(t) = T_2(0, t) - T_1(0, t) = \frac{\tilde{\phi}_{m_2} - \tilde{\phi}_{m_1}}{\tilde{h}} + \frac{A_2 - A_1}{\tilde{h} \sqrt{1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}}} \cos(\omega t - \varphi_T + \varphi) \quad (2.57)$$

Forçage périodique quelconque

Si le flux extérieur $\tilde{\phi}$ est un signal périodique non sinusoïdal, il est possible de calculer sa décomposition en série de Fourier puis, par le théorème de superposition, obtenir $T(x, t)$ comme la somme des solutions à chacune des excitations sinusoïdales du signal. Le théorème de superposition est applicable car l'équation de diffusion thermique et la

condition aux limites de Robin sont linéaires en T (équations 2.51 et 2.54).

Par exemple, supposons que seul le rayonnement absorbé soit différent entre les flux de forçage du sol à l'ombre et du sol au soleil, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs :

$$\begin{aligned}\tilde{\phi}_1(t) &= \phi_{abs_1}(t) - \varepsilon\sigma T_{air}(t)^4 + \tilde{h}T_{air}(t) - L_v E(t) \\ \tilde{\phi}_2(t) &= \phi_{abs_2}(t) - \varepsilon\sigma T_{air}(t)^4 + \tilde{h}T_{air}(t) - L_v E(t)\end{aligned}\quad (2.58)$$

On a alors :

$$\tilde{\phi}_2(t) - \tilde{\phi}_1(t) = \phi_{abs_2}(t) - \phi_{abs_1}(t) \quad (2.59)$$

Le signal $\tilde{\phi}_2 - \tilde{\phi}_1$ tracé sur la figure 2.12a représente des variations typiques en été, périodiques de période $T = 24\text{h}$ et d'amplitude maximale ΔA valant 400 W.m^{-2} dans l'exemple. Sa décomposition en série de Fourier est :

$$(\tilde{\phi}_2 - \tilde{\phi}_1)(t) = \Delta A \left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \cos(\omega t) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n+1)(2n-1)} \cos(2n\omega t) \right] \quad (2.60)$$

Par superposition, d'après l'équation 2.57, on obtient la différence de température de surface entre les deux sols :

$$\Delta T_s(t) = \frac{\Delta A}{\tilde{h}} \left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2D_0} \cos(\omega t - \varphi_{T_0}) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n+1)(2n-1)D_n} \cos(2n\omega t - \varphi_{T_n}) \right] \quad (2.61)$$

avec $D_n = \sqrt{1 + \frac{2}{Bi_n} + \frac{2}{Bi_n^2}}$, $\varphi_{T_n} = \arctan\left(\frac{1}{1+Bi_n}\right)$ et $Bi_n = \begin{cases} Bi & \text{si } n = 0 \\ Bi/\sqrt{2n} & \text{sinon} \end{cases}$.

La réponse $\Delta T_s(t)$ est tracée sur la figure 2.12b pour différentes valeurs du nombre de Biot. Des valeurs usuelles pour un sol en béton donnent une diffusivité thermique⁴ $\kappa = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1} = 1,8 \text{ cm}^2.\text{h}^{-1}$ et un nombre de Biot⁵ $Bi = 1.9$ qui correspond à la courbe en pointillés. Les courbes associées à $Bi = 0$ et $Bi = \infty$ servent d'enveloppes à la réponse thermique de la surface du sol.

Dans le cas $Bi = \infty$, la réponse a la même forme que le signal d'entrée : les échanges convectifs et radiatifs dominant, la température est imposée à la surface ; on peut modéliser la condition limite en $x = 0$ par une condition de Dirichlet ($T(0, t) = T_p(t) = \tilde{\phi}(t)/\tilde{h}$), ce qui fournit immédiatement la température de surface sans avoir besoin de résoudre l'équation de la chaleur dans le sol : $\Delta T_s(t) = \Delta\phi_{abs}(t)/\tilde{h}$. La différence maximale de température est obtenue à midi et vaut 25 K.

En ce qui concerne la réponse du sol en béton ($Bi = 1.9$), on constate un déphasage et un amortissement du signal d'entrée : une réduction du rayonnement absorbé de 400 W.m^{-2} à midi conduit à un écart de température entre le sol à l'ombre et le sol ensoleillé qui

4. avec $\lambda = 1\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2300\text{ kg.m}^{-3}$ et $C_p = 880\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

5. avec $\tilde{h} = 16\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\delta = 12\text{ cm}$

est maximal vers 13h et vaut 18 K (soit environ 70% du maximum, $\Delta A/\tilde{h}$, obtenu dans le cas $Bi = \infty$). L'inertie thermique du matériau fait qu'il subsiste un écart de température entre les deux sols pendant la nuit alors qu'ils sont soumis au même flux extérieur ($\tilde{\phi}_1(t) = \tilde{\phi}_2(t)$ entre 18h et 6h le lendemain matin) : le sol qui a été ombragé garde une température plus basse d'au moins 2 K comparativement au sol qui a été ensoleillé.

La solution trouvée pour $Bi = 0$ a moins de sens physique ici : le système est alors thermiquement mince mais a été modélisé comme un milieu semi-infini, ce qui peut être pertinent aux temps courts ou pour une excitation de très haute fréquence, ce qui n'est pas le cas dans cet exemple. Elle sert cependant de cas limite, correspondant à un transfert par conduction dominant, ce qui mène à un écart de température entre les deux sols constant dans le temps : $\Delta T_s(t) = \Delta A/\pi\tilde{h}$ (c'est-à-dire 8 K dans cet exemple, soit environ 30% de $\Delta A/\tilde{h}$).

Bilan : réduction de ϕ_H grâce à l'ombre

La différence de température de surface qui vient d'être calculée nous permet d'obtenir la réduction, causée par l'ombre, du flux de chaleur sensible émis par le sol vers l'air (en W.m^{-2}) :

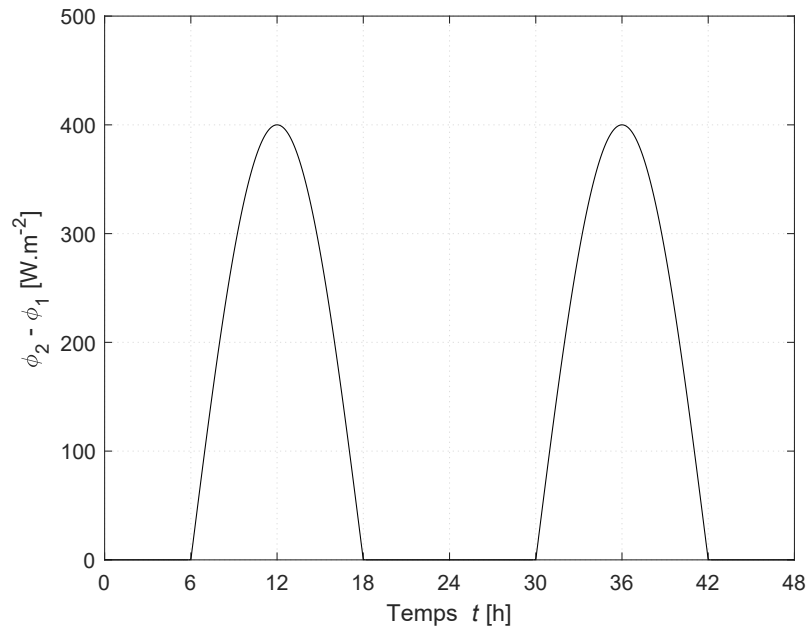
$$\Delta\phi_{H,ombre}(t) = -h\Delta T_s(t) = -\frac{h}{\tilde{h}}\Delta A f(t) \quad (2.62)$$

où f est la fonction du temps entre crochets dans l'équation 2.61.

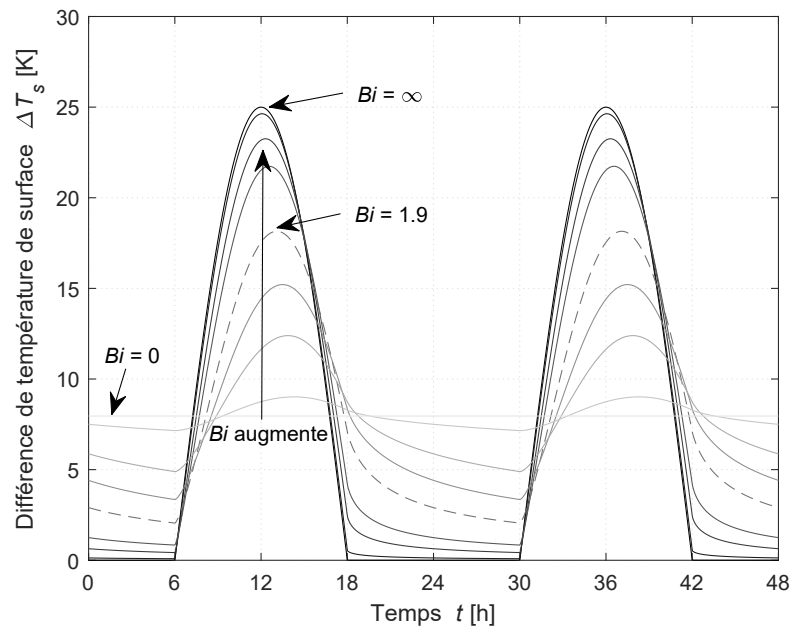
Nous pouvons faire quelques commentaires sur cette expression. Tout d'abord, toute la réduction du rayonnement absorbé n'est pas convertie en réduction du flux de chaleur sensible, comme cela avait déjà été illustré sur la figure 2.10, en raison des facteurs h/\tilde{h} et $f(t)$ qui sont inférieurs à 1. En effet, la réduction de ΔA de rayonnement absorbé se répartit en trois composantes : une réduction du flux de chaleur par conduction, une réduction du flux de chaleur sensible et une réduction du flux de rayonnement émis.

La fonction f décrit la dynamique de la répartition entre les transferts thermiques vers l'intérieur du sol (conduction) et l'extérieur (convection + rayonnement) ; elle dépend du nombre de Biot du système. En mettant le nombre de Biot sous la forme $Bi = \tilde{h}/(\lambda/\delta)$, on voit que ce nombre fait le rapport entre les échanges vers l'extérieur et les échanges vers l'intérieur. Plus il est élevé, plus les échanges vers l'extérieur dominent. Comme indiqué à la fin de la section 2.1.6, dans le cas $Bi = \infty$, ce sont les échanges convectifs et radiatifs qui sont prédominants. La réponse a la même forme que le signal d'entrée et elle est immédiate : l'effet de l'ombrage est maximal dans ce cas, le maximum de $\Delta\phi_{abs}$ et le maximum de $|\Delta\phi_{H,ombre}|$ sont simultanés. Lorsque Bi diminue, le transfert par conduction modifie le partage entre les différents modes d'échanges thermiques, le maximum de $|\Delta\phi_{H,ombre}|$ est alors plus faible et retardé. En contrepartie, l'effet de l'ombrage en journée continue de se faire ressentir pendant la nuit, le sol ayant été ombragé gardant une température plus basse et réchauffant moins l'air.

L'autre facteur, h/\tilde{h} , est le rapport entre le coefficient de transfert thermique par convection et le coefficient de transfert thermique global (convection plus rayonnement) : il indique la répartition entre les deux modes d'échanges extérieurs. Plus ce facteur est proche de 1 ($h \gg h_r$, il y a beaucoup de vent), plus la réduction du rayonnement absorbé se



(a) La différence $\tilde{\phi}_2 - \tilde{\phi}_1$ de flux extérieur reçu entre un sol au soleil ($\tilde{\phi}_2$) et un sol à l'ombre ($\tilde{\phi}_1$) est supposée égale à la différence de rayonnement absorbé $\phi_{abs2} - \phi_{abs1}$. Cette différence de forçage radiatif est modélisée par un signal en "saute-mouton" : elle est nulle entre 18h et 6h ($t = T/4$) puis suit un demi-sinus de 6h à 18h ($t = 3T/4$) avec un maximum à midi ($t = T/2$) où elle vaut $\Delta A = 400 \text{ W.m}^{-2}$.



(b) La différence de température de surface du sol est représentée pour différents nombres de Biot ($Bi = 0, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 10000$). La courbe en pointillés correspond à un sol en béton pour lequel $Bi = 1.9$. Le cas $Bi = \infty$ correspond à une condition limite de Dirichlet (température imposée à la paroi : $\Delta T(0, t) = \Delta \phi_{abs}(t)/\tilde{h}$).

FIGURE 2.12 – Évolution temporelle de la différence de température de surface entre un sol ensoleillé et un sol ombragé.

convertit en réduction du flux de chaleur sensible. Cela signifie également que le système émet le même rayonnement, donc que sa température a peu changé. S'il se rapproche de 0 ($h \ll h_r$, il n'y a aucun mouvement d'air près de la surface), cela signifie que l'échange par convection entre le sol et l'air est faible : la réduction du rayonnement absorbé se convertit par une baisse de température du système et une réduction du rayonnement émis. C'est surtout la valeur de h qui détermine la valeur de ce ratio car h_r varie peu : son expression est de la forme $h_r = 4\varepsilon\sigma T^3$, ce qui fait ⁶ $6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour $T = 298 \text{ K}$ (environ 25°C) et $8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour $T = 328 \text{ K}$ (environ 55°C). Dans l'exemple du sol en béton, nous avons considéré des valeurs respectives de 10 et $6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour h et h_r , ce qui donne un facteur $h/\tilde{h} = 0.63$. Finalement, la réduction maximale de ϕ_H est de 180 W.m^{-2} vers 13h, due à une ombre de 400 W.m^{-2} à midi.

Enfin, en intégrant la relation 2.62 entre deux instants t_1 et t_2 , on peut en déduire la réduction d'énergie thermique par unité de surface (en J.m^{-2}) transférée à l'air sur cette durée :

$$\Delta q_{H,ombre} = h \int_{t_1}^{t_2} \Delta T_s(t) dt = \frac{h}{\tilde{h}} \Delta A \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (2.63)$$

Remarques

En réalité, la diffusion de l'énergie thermique dans la dalle se fait dans toutes les directions – alors que nous nous sommes servis de l'équation de la chaleur en 1D afin de calculer la température de surface – et le rayonnement solaire reçu par le sol à l'ombre n'est pas uniforme. Une autre hypothèse a été faite pour calculer $\Delta\phi_{H,ombre}$: le coefficient d'échange h est identique pour le sol à l'ombre et celui au soleil. Cela signifie que la végétation modifie peu l'écoulement près du sol. Le résultat obtenu est donc d'autant plus correct que la surface ombragée est importante, que le feuillage est dense et que la végétation est haute. De plus, dans notre exemple, on a considéré dans la fonction de forçage (la différence de flux extérieur $\tilde{\phi}_2 - \tilde{\phi}_1$) que le rayonnement absorbé était différent uniquement durant la journée (la végétation permettant d'atténuer le rayonnement solaire incident) alors qu'il peut également l'être pendant la nuit en raison des échanges par rayonnement dans l'infrarouge (dans un cas le sol peut rayonner vers le ciel, dans l'autre la végétation l'en empêche). Cela modifie légèrement la forme de la fonction de forçage et celle de la réponse f durant la nuit.

2.2.2 Effet de l'évaporation

Nous nous intéressons maintenant à l'effet de l'évaporation sur la diminution de ϕ_H du système. Puisque la vaporisation de l'eau requiert de l'énergie, on peut dire, qualitativement, qu'une part moindre du rayonnement absorbé va être allouée au flux de rayonnement émis et au flux de chaleur sensible dans le cas d'une surface évaporante. Cet effet est illustré sur la figure 2.13 où le système est cette fois-ci une feuille d'arbre. Pour quantifier la diminution, due à l'évaporation, du flux de chaleur sensible émis par cette feuille, nous examinons son bilan énergétique lorsqu'elle est sèche et lorsqu'elle est humide.

6. on a pris ici l'émissivité égale à 1

Bilan énergétique d'une feuille

Sans évaporation

Nous cherchons tout d'abord à évaluer le flux de chaleur sensible émis par une feuille dans le cas où le flux de chaleur latente est nul. Nous étudions une feuille telle que schématisée sur la figure 2.13. On peut commencer par estimer son nombre de Biot en se servant des mesures expérimentales de Jayalakshmy et Philip (2010), tabulées dans l'annexe C, pour avoir un ordre de grandeur des propriétés thermiques des feuilles. Une estimation haute du nombre de Biot donne :

$$Bi = \frac{hL}{\lambda} = \frac{60 \cdot 0.0003}{0.3} = 0.06 < 0.1 \quad (2.64)$$

Le nombre de Biot étant petit, on peut considérer que le système est thermiquement mince et que sa température est uniforme. Son bilan énergétique s'écrit :

$$eC \frac{\partial T}{\partial t} = \phi_{abs} - 2\varepsilon\sigma T^4 - 2h(T - T_{air}) \quad (2.65)$$

La résolution de cette équation donne l'évolution au cours du temps de la température de la feuille. La plage de valeurs prises par T étant petite, on peut linéariser le rayonnement émis, comme dans la partie précédente, pour simplifier l'équation et aboutir à :

$$eC \frac{\partial T}{\partial t} = \phi_{abs} - 2\varepsilon\sigma T_{air}^4 - 2\tilde{h}(T - T_{air}) \quad (2.66)$$

avec le coefficient d'échange global $\tilde{h} = h + h_r$ et le coefficient radiatif linéarisé $h_r = 4\varepsilon\sigma T_{air}^3$. Sous l'hypothèse que le flux de rayonnement absorbé et le coefficient de transfert thermique global sont constants dans le temps, la température de la feuille obéit à l'équation différentielle linéaire d'ordre 1 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{eq,1}}{\tau} \quad (2.67)$$

avec la constante de temps $\tau = \frac{eC}{2\tilde{h}}$ et la température de la feuille à l'équilibre $T_{eq1} = T_{air} + \frac{\phi_{abs} - 2\varepsilon\sigma T_{air}^4}{2\tilde{h}}$. Cette équation admet pour solution :

$$T(t) = (T_0 - T_{eq1}) e^{-t/\tau} + T_{eq1} \quad (2.68)$$

où T_0 est la température de la feuille à $t = 0$.

Pour se fixer les idées, on peut donner quelques valeurs des propriétés thermiques utilisées. Pour une émissivité de feuilles $\varepsilon = 0.98$ (López *et al.*, 2012), le coefficient h_r vaut $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ lorsque $T_{air} = 298,15 \text{ K}$ (25°C). Le coefficient de transfert thermique h est évalué expérimentalement entre 7 et $35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ par Linacre (1964) dans le cas de la convection libre dans l'air. Ces valeurs peuvent être beaucoup plus importantes pour des feuilles au vent. Par exemple, Manickathan *et al.* (2018) considèrent $h = \frac{\rho c_p}{r_a}$, avec les propriétés de l'air $\rho = 1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p = 1004 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et la résistance aérodynamique $r_a = K \left(\frac{l}{u}\right)^{1/2}$ (en $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) où $K = 130 \text{ s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-1}$ est une constante, l la longueur caractéristique des feuilles et u la vitesse du vent, ce qui donne une valeur du coefficient d'échange $h = 60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pour $l = 0,1 \text{ m}$ et $u = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La constante de temps τ est donc de l'ordre de la dizaine de secondes (voir annexe C). L'hypothèse du flux de rayonnement absorbé et du coefficient d'échange constants est donc justifiée si ces deux

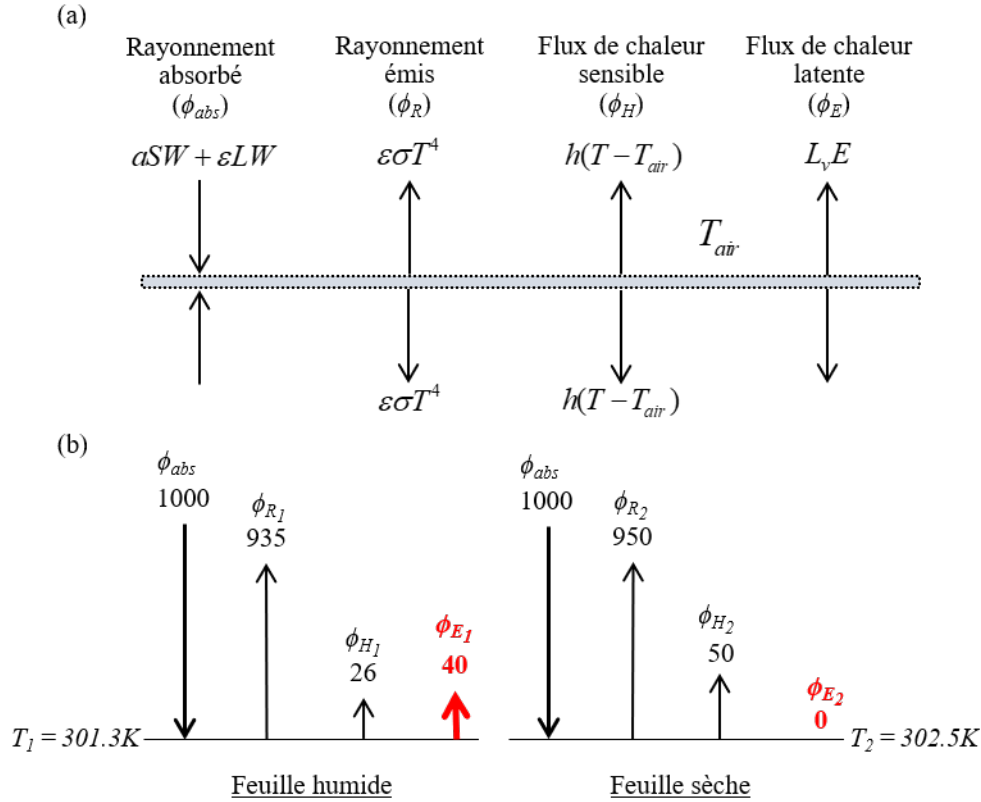


FIGURE 2.13 – (a) Bilan énergétique d’une feuille. On considère que le flux de rayonnement émis et le flux de chaleur sensible sont répartis des deux côtés de la feuille, pour avoir la même notation que le modèle numérique du chapitre suivant. Avec notre convention, le bilan énergétique du volume eS s’écrit :

$$(eS) \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} = [\phi_{abs} - \phi_R - \phi_H - \phi_E] \cdot S$$

soit :

$$(eS) \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} = [(aSW + \varepsilon LW) - 2\varepsilon\sigma T^4 - 2h(T - T_{air}) - L_v E] \cdot S$$

(b) Une différence de 40 W/m² de flux de chaleur latente est donnée à titre d’exemple pour illustrer la manière dont l’évaporation mène à une réduction du flux de chaleur sensible émis par la feuille. La feuille qui évapore de l’eau a une température plus faible de 1.2°C et un flux de chaleur sensible inférieur de 24 W/m². Comme dans le cas du sol ombragé, la réduction du flux de chaleur sensible est inférieure à la différence de 40 W/m² entre ϕ_{E_1} et ϕ_{E_2} car la feuille sèche dissipe davantage d’énergie par rayonnement émis que la feuille humide.

paramètres ne varient pas pendant une durée d'une minute environ.

Au passage, le flux de chaleur sensible émis par la feuille non-transpirante vaut, en régime permanent :

$$\phi_H = 2h(T_{eq1} - T_{air}) = \frac{h}{\tilde{h}}(\phi_{abs} - 2\varepsilon\sigma T_{air}^4) \quad (2.69)$$

Avec évaporation

Lorsque la feuille évapore de l'eau, le bilan énergétique s'écrit :

$$eC\frac{\partial T}{\partial t} = \phi_{abs} - L_v E - 2\varepsilon\sigma T_{air}^4 - 2\tilde{h}(T - T_{air}) \quad (2.70)$$

avec L_v l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau ($L_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$) et E le taux d'évaporation surfacique (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Si l'on fait les hypothèses que le taux d'évaporation E : (a) varie lentement dans le temps (par rapport à τ) et (b) reste identique si la température de surface varie de quelques kelvins, on obtient de nouveau l'équation 2.67 avec cette fois une température d'équilibre $T_{eq2} = T_{air} + \frac{\phi_{abs} - 2\varepsilon\sigma T_{air}^4 - L_v E}{2\tilde{h}}$.

L'évolution de la température de la feuille sèche et de la feuille humide est tracée à la figure 2.14, en prenant comme température initiale de la feuille la température de l'air. La différence de température entre les deux feuilles vaut :

$$\Delta T_f(t) = (T_{eq1} - T_{eq2}) \left(1 - e^{-t/\tau}\right) = \frac{L_v E}{2\tilde{h}} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (2.71)$$

En régime permanent ($t > 5\tau$), cet écart est égal à :

$$\Delta T_f(t_\infty) = T_{eq1} - T_{eq2} = \frac{L_v E}{2\tilde{h}} \quad (2.72)$$

Bilan : réduction de ϕ_H grâce à l'évaporation

La présence du flux de chaleur latente $L_v E$ dans le bilan énergétique de la feuille humide permet donc de diminuer le flux de chaleur sensible qu'elle émet vers l'air (comparativement à une feuille sèche) d'une quantité :

$$\Delta\phi_{H,evap} = -|\phi_{H1} - \phi_{H2}| = -2h|T_{eq1} - T_{eq2}| = -\frac{h}{\tilde{h}}L_v E \quad (2.73)$$

Cette différence de flux de chaleur sensible correspond au « rafraîchissement » évaporatif (*evaporative cooling*). Comme dans le cas de l'ombrage du sol, on constate que toute l'énergie retirée au bilan (ici, l'énergie nécessaire à l'évaporation, $L_v E$) n'est pas convertie en réduction du flux de chaleur sensible, en raison du facteur h/\tilde{h} inférieur à 1.

Sous l'hypothèse que le taux d'évaporation E varie lentement (par rapport à τ), en intégrant la relation 2.73 entre deux instants t_1 et t_2 et en multipliant par la surface foliaire S_{veg} (aire cumulée des feuilles de la végétation), on peut en déduire la réduction d'énergie thermique (en joules) transférée à l'air sur cette durée :

$$\Delta Q_{H,evap} = -2hS_{veg} \int_{t_1}^{t_2} \Delta T_f(t) dt = -\frac{h}{\tilde{h}}L_v \int_{t_1}^{t_2} E(t)S_{veg} dt = -\frac{h}{\tilde{h}}L_v |\Delta m| \quad (2.74)$$

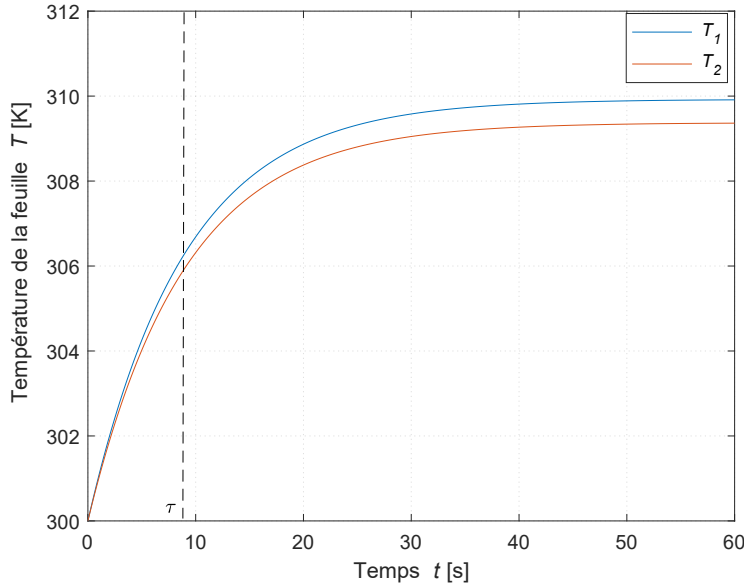


FIGURE 2.14 – Températures de la feuille sèche (T_1) et de la feuille humide (T_2) avec comme condition initiale dans les deux cas $T(0) = T_{air}$.

où Δm est la masse d'eau (en kg) évaporée par la feuille entre t_1 et t_2 .

Remarques

On s'attend à trouver, pour les feuilles, des ratios $(h/\tilde{h})_f$ supérieurs à celui d'un sol $(h/\tilde{h})_s$ car :

- les températures de feuilles sont généralement proches de la température de l'air, donc plus basses que les températures de surface des sols en ville, ce qui signifie que leur coefficient de transfert par rayonnement h_r est légèrement plus faible (proche de $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une feuille et $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pour un sol au soleil) ;
- surtout, le coefficient de transfert convectif h peut prendre des valeurs beaucoup plus importantes pour des feuilles que pour le sol, d'après les études citées précédemment, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il soit de la forme $h \propto \left(\frac{U}{L}\right)^{1/2}$ (voir équation 2.20), donc plus grand pour des objets de petites dimensions.

Les équations 2.71 et 2.73 montrent qu'un coefficient de transfert thermique convectif h élevé réduit l'écart de température entre une surface non-évaporante et une surface évaporante, mais augmente la différence entre les flux de chaleur sensible que ces surfaces émettent vers l'air. Cela est représenté graphiquement sur la figure 2.15 sur laquelle sont tracées les différentes composantes du bilan énergétique. Ce graphique a été réalisé de la manière suivante :

- La composante $\phi_R(T_f) = 2\varepsilon\sigma T_f^4$ est tracée.
- La composante $\phi_H = 2h(T_f - T_{air})$ est tracée. Elle peut également être tracée en tirant parti du fait que $\phi_H(T_f = T_{air}) = 0$ et en connaissant la pente de la droite $y = \phi_h(T_f)$, qui est $2h$.
- D'après le bilan énergétique, la troisième composante, $\phi_{abs} - \phi_E$, est égale à la somme des deux autres donc est tracée en additionnant la courbe bleue et la

courbe rouge.

Pour tracer la troisième composante, on a supposé que le flux de chaleur latente ϕ_E était indépendant de T : l'ajout d'un flux de chaleur latente est donc traité comme une réduction de ϕ_{abs} . Pour une densité de flux de chaleur latente $L_v E = 50 \text{ W.m}^{-2}$, on obtient : $\Delta T_f = -1,5 \text{ K}$ et $\Delta \phi_{H, evap} = -30 \text{ W.m}^{-2}$ lorsque $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $\Delta T_f = -0,69 \text{ K}$ et $\Delta \phi_{H, evap} = -41,4 \text{ W.m}^{-2}$ lorsque $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

2.3 Régimes de rafraîchissement

2.3.1 Définition du rafraîchissement

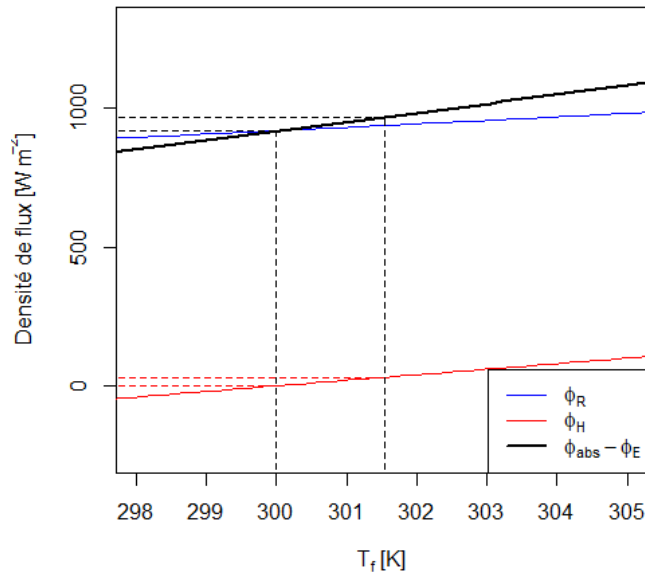
Avant de chercher à quantifier le *rafraîchissement apporté par la végétation*, il faut préciser le sens que l'on donne à cette expression qui comporte deux ambiguïtés.

La première chose à clarifier est la grandeur physique étudiée. Lorsqu'il est question d'îlot de chaleur urbain, il s'agit de la température de l'air – une valeur globale de la température de l'air moyennée sur un volume (ou prise à une certaine distance du sol) qu'il reste à définir, la notion d'îlot de chaleur urbain étant déjà très large. Lorsque l'on s'intéresse au confort thermique, il peut s'agir de la valeur locale soit d'un indicateur de confort agrégeant plusieurs grandeurs (quatre pour l'UTCI : la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air – voir annexe A), soit d'une seule de ces grandeurs (par exemple, la température de l'air relevée en un point précis).

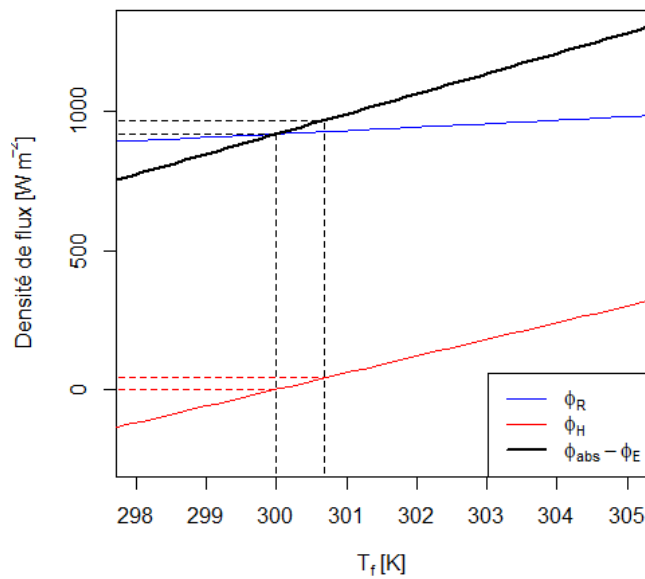
La deuxième chose à savoir est si l'on parle de rafraîchissement absolu ou relatif. Cette distinction est illustrée sur la figure 2.16 où la grandeur d'intérêt est la température de l'air mesurée par le thermomètre de droite.

Dans le cas (a), le flux de chaleur sensible est négatif : la végétation permet de retirer de l'énergie thermique à l'air, ce qui conduit à une baisse de la température de l'air. L'arbre agit comme un climatiseur, qui retire des calories à l'air qui le traverse : le rafraîchissement est absolu. Dans le cas (b), le flux de chaleur sensible du système {arbre + sol} est positif; cependant, il est inférieur à celui d'une situation de référence – ici, le flux de chaleur sensible émis par le sol en l'absence de végétation. Ce que l'on appelle « rafraîchissement relatif » correspond donc à *une réduction du flux de chaleur sensible* entre la situation de référence et la situation modifiée. Dans ce cas, plutôt que l'image du climatiseur, l'image du parasol est plus appropriée pour représenter l'arbre : celui-ci réchauffe l'air mais ce réchauffement est plus que compensé par l'effet d'ombrage du sol. Il peut également arriver que l'effet d'ombrage du sol ne compense pas le réchauffement causé par l'arbre : il n'y a alors ni rafraîchissement absolu ni rafraîchissement relatif mais réchauffement.

Toujours en gardant l'exemple de l'arbre sur une place et en s'intéressant au flux de chaleur sensible vers l'air, les parties suivantes visent à déterminer pour quels paramètres du système et quelles conditions environnementales (rayonnement, température de l'air, vitesse du vent) il y a rafraîchissement (absolu ou relatif) ou réchauffement.



(a) $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$



(b) $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

FIGURE 2.15 – Le bilan énergétique d’une feuille à l’équilibre thermique s’écrit : $\phi_{abs} - L_v E = \phi_R + \phi_H = 2\varepsilon\sigma T^4 + 2h(T - T_{air})$. Les différentes composantes du bilan sont représentées pour deux valeurs du coefficient d’échange thermique convectif. La température de l’air est égale à 300 K dans les deux cas. On examine la réduction de température de la feuille, ΔT_f , et la réduction de la densité de flux de chaleur sensible, $2h\Delta T_f$, lorsque $\phi_{abs} - \phi_E$ passe de 968 W.m^{-2} (surface non-évaporante) à 918 W.m^{-2} (surface évaporante), ce qui correspond à une différence de flux de chaleur latente de 50 W/m^2 . Sur la plage de températures considérée, la pente du rayonnement émis ϕ_R est proche de $12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (environ $2 \cdot 4\varepsilon\sigma T_{air}^3$).

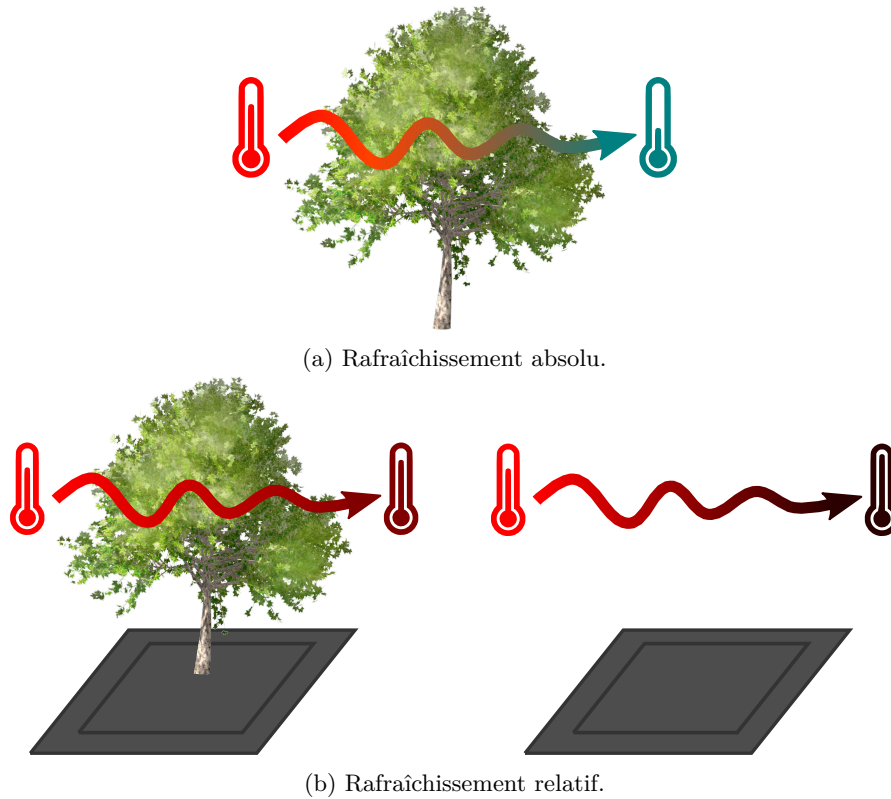


FIGURE 2.16 – Deux notions du rafraîchissement.

2.3.2 Rafraîchissement absolu

On cherche à savoir dans quelles conditions le flux de chaleur sensible ϕ_H émis par un système vers l'air est négatif. Nous étudions le cas le plus simple possible, représenté sur la figure 2.17 : un système mince, en l'absence d'évaporation, baigne dans un environnement où les conditions environnementales (SW , LW , T_{air} et U) sont constantes.

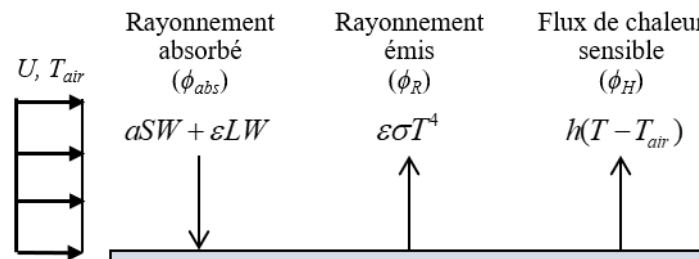


FIGURE 2.17 – Surface non-évaporante en régime stationnaire. Le forçage (radiatif et convectif) est constant.

Au bout d'un certain temps, le système a atteint une température d'équilibre T qui satisfait le bilan énergétique :

$$\phi_{abs} = \phi_R + \phi_H = \epsilon\sigma T^4 + h(T - T_{air}) \quad (2.75)$$

On en déduit :

$$\begin{aligned}
\phi_H \leq 0 &\iff T \leq T_{air} \\
&\iff \varepsilon\sigma T^4 + hT \leq \varepsilon\sigma T_{air}^4 + hT_{air} \\
&\iff \phi_{abs} \leq \varepsilon\sigma T_{air}^4
\end{aligned} \tag{2.76}$$

La première équivalence découle de la définition de ϕ_H , la deuxième de la croissance stricte de la fonction $T \mapsto \varepsilon\sigma T^4 + hT$ sur \mathbb{R}_+ (toutes les températures en kelvins sont positives), la troisième de l'expression de ϕ_{abs} (équation 2.75).

Pour une température de l'air donnée, il existe donc un seuil de rayonnement absorbé au-delà duquel le système réchauffe l'air et en deçà duquel il le refroidit. Le rayonnement absorbé dépend en partie des propriétés de la surface (son absorptivité et son émissivité) et en partie de paramètres environnementaux (les rayonnements solaire et infrarouge incidents).

Si l'on ajoute un flux de chaleur latente, en considérant pour simplifier les choses qu'il est indépendant de T , la condition pour laquelle le rafraîchissement est absolu devient :

$$\phi_H \leq 0 \iff \phi_{abs} \leq \varepsilon\sigma T_{air}^4 + \phi_E \tag{2.77}$$

On peut donc voir le flux de chaleur latente comme une « marge supplémentaire » qui, pour une température de l'air donnée, repousse le seuil de rayonnement absorbé à partir duquel le système réchauffe l'air, comme dessiné sur la figure 2.18. Pour un système qui échange de l'air des deux côtés de sa surface, comme une feuille, la condition 2.77 devient :

$$\phi_H \leq 0 \iff \phi_{abs} \leq 2\varepsilon\sigma T_{air}^4 + \phi_E \tag{2.78}$$

La figure 2.18 indique que les conditions environnementales propices à un rafraîchissement de l'air par le système sont une température de l'air élevée et un faible rayonnement incident (afin d'obtenir un faible rayonnement absorbé). Pour des températures de l'air classiques en France en été, on s'aperçoit que la valeur des seuils peut facilement être dépassée pour les surfaces (« sol » et « feuille ») que nous étudions. La figure 2.15 montre ainsi que pour une feuille d'émissivité $\varepsilon = 1$, un flux de chaleur latente $\phi_E = 50 \text{ W/m}^2$ et une température de l'air $T_{air} = 300 \text{ K}$, le seuil de rayonnement absorbé à ne pas dépasser pour que la feuille rafraîchisse l'air est d'environ 970 W/m^2 .

Remarque

Ceci nous amène à penser que de nombreuses situations peuvent survenir où l'on peut s'attendre à ce que la végétation ne rafraîchisse pas l'air de manière absolue, et que la température de surface des feuilles soit supérieure à la température de l'air. Pour comparaison, comme nous le verrons à la section 5.2.4, à la mi-septembre à 14h à Champs-sur-Marne, la densité de flux de rayonnement incident descendant *sur une surface horizontale* est de l'ordre de 800 W/m^2 pour le rayonnement solaire et 400 W/m^2 pour le rayonnement atmosphérique. Le rayonnement absorbé par la feuille, égal au rayonnement incident sur ses deux faces pondéré par son coefficient d'absorption, est alors supérieur à 970 W/m^2 si elle est placée à l'horizontale.

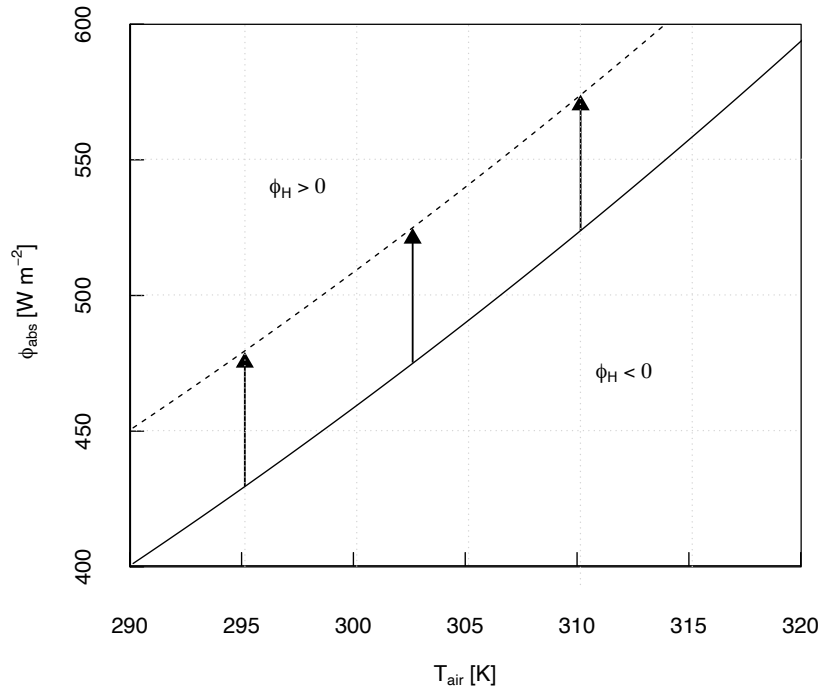


FIGURE 2.18 – Visualisation du seuil pour lequel un système à une face réchauffe l’air ($\phi_H > 0$) ou le refroidit ($\phi_H < 0$). La ligne pleine correspond à la courbe $\phi_{abs} = \varepsilon\sigma T_{air}^4$, la ligne en pointillés à la courbe $\phi_{abs} = \varepsilon\sigma T_{air}^4 + \phi_E$. On a pris comme valeurs : $\varepsilon = 1$ et $\phi_E = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

2.3.3 Rafraîchissement relatif

Examinons maintenant sous quelles conditions la végétation rafraîchit de manière relative. Comparons une zone ensoleillée comportant un sol uniquement, qui représente la « situation de référence », à la même zone ombragée cette fois-ci par un arbre, schématisée sur la figure 2.19.

Système : {sol + arbre}. Le sol ensoleillé émet vers l’air une densité de flux de chaleur sensible $\phi_{H_{solS}}$ sur une surface S , le sol à l’ombre $\phi_{H_{solO}}$ sur une surface S' et la végétation $\phi_{H_{veg}}$ sur une surface S_{veg} . On a négligé l’aire occupée par l’arbre au sol et considéré que les densités de flux de chaleur sont uniformes pour chacune des surfaces.

Système : {sol}. Dans le cas de référence, le sol est totalement ensoleillé et émet $\phi_{H_{solS}}$ sur toute la surface $S + S'$.

En comparant les flux de chaleur sensible émis vers l’air dans les deux cas, on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 \Phi_H - \Phi_{H_{ref}} &= [\phi_{H_{solS}} \cdot S + \phi_{H_{solO}} \cdot S' + \phi_{H_{veg}} \cdot S_{veg}] - [\phi_{H_{solS}} \cdot (S + S')] \\
 &= \phi_{H_{veg}} \cdot S_{veg} + (\phi_{H_{solO}} - \phi_{H_{solS}}) \cdot S' \\
 &= \Phi_{H_{veg}} + \Delta\Phi_{H_{ombre}}
 \end{aligned} \tag{2.79}$$

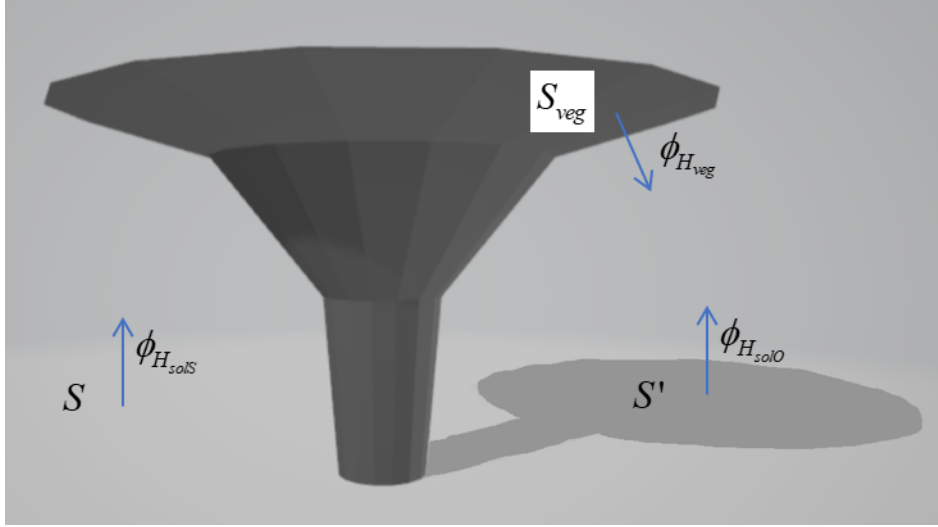


FIGURE 2.19 – Schéma d'un arbre sur une place publique.

où $\Delta\Phi_{H,ombre}$ (en watts) est la réduction du flux de chaleur sensible du sol due à l'ombrage⁷, agrégée sur la surface du sol à l'ombre. L'équation 2.79 montre qu'il faut également tenir compte du flux de chaleur sensible émis par la végétation pour savoir dans quel régime se placer :

- si $\Phi_{Hveg} < 0$, il y a rafraîchissement absolu : les feuilles de l'arbre sont plus fraîches que l'air ;
- si $0 \leq \Phi_{Hveg} \leq |\Delta\Phi_{H,ombre}|$, il y a rafraîchissement relatif : l'arbre réchauffe un peu l'air, mais ce réchauffement est compensé par la réduction de flux de chaleur sensible du sol à l'ombre ;
- si $\Phi_{Hveg} > |\Delta\Phi_{H,ombre}|$, il y a réchauffement : la présence de l'arbre a empiré la situation, du point de vue du flux de chaleur sensible vers l'air.

On peut, artificiellement, exhiber un troisième terme pour faire apparaître la réduction du flux de chaleur sensible due à la transpiration des feuilles⁸, étudiée précédemment :

$$\Phi_H - \Phi_{H,ref} = \Phi_{Hveg}^\circ + \Delta\Phi_{H,evap} + \Delta\Phi_{H,ombre} \quad (2.80)$$

où Φ_{Hveg}° est le flux de chaleur sensible de l'arbre obtenu en fixant le taux d'évaporation E à zéro⁹. D'après l'équation 2.69, ce flux peut s'écrire :

$$\Phi_{Hveg}^\circ = \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)_{veg} \cdot (\phi_{abs} - \varepsilon\sigma T_{air}^4) \cdot S_{veg} \quad (2.81)$$

Rappelons les écritures des deux autres flux :

7. D'après l'équation 2.62, cette réduction vaut $\Delta\Phi_{H,ombre} = -\frac{h}{\bar{h}} \Delta A f S'$, avec les notations de la section 3.2.1.

8. D'après l'équation 2.73, cette réduction vaut $\Delta\Phi_{H,evap} = -\frac{h}{\bar{h}} L_v E S_{veg}$, avec les notations de la section 3.2.2.

9. Nous voyons quatre cas où cette situation peut se produire, naturellement : (a) la quantité d'eau disponible est nulle ; (b) la quantité d'énergie disponible est nulle ; (c) l'air est déjà saturé en eau et (d) il n'y a pas d'interface liquide-gaz (les stomates des feuilles sont fermés ou l'évaporation est empêchée par une couche de graisse appliquée sur les feuilles, par exemple).

$$\Delta\Phi_{H,evap} = - \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)_{veg} \cdot L_v E \cdot S_{veg} \quad (2.82)$$

$$\Delta\Phi_{H,ombre} = - \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)_{sol} \cdot \Delta A \cdot f \cdot S' \quad (2.83)$$

Remarques

Le terme $\Delta\Phi_{H,ombre}$ est négatif dans ce chapitre. Il pourrait être positif si le rayonnement absorbé par la zone ombragée était supérieur à celui absorbé par la zone au soleil ($\Delta A < 0$). Cette condition peut se produire la nuit, lorsque le rayonnement solaire incident est nul, et que la zone sous l'arbre reçoit un rayonnement thermique émis par la végétation qui est supérieur au rayonnement thermique émis par le ciel vers le sol à proximité. Nous n'examinons pas cette situation et nous concentrons sur le flux de chaleur sensible émis pendant la journée.

De même, le terme $\Delta\Phi_{H,evap}$ est toujours négatif dans ce chapitre. Il serait positif dans le cas où l'on étudierait la condensation d'eau sur les feuilles.

Le terme Φ_{Hveg}° dépend du terme de rayonnement absorbé, qui lui-même dépend du rayonnement incident sur la surface et de l'orientation de cette dernière. La géométrie 3D du problème influence donc fortement ce terme.

Enfin, l'exemple que nous venons de traiter ne considère que des flux homogènes sur chacune des surfaces (la « surface arbre » et la « surface sol »). Cette hypothèse nous semble pertinente pour le sol mais pour ce qui est de l'arbre, chaque feuille reçoit un rayonnement incident différent (sans parler des autres conditions environnementales : température de l'air, vitesse de l'air...) et a une orientation particulière dans l'espace, de sorte que donner une valeur moyenne de ϕ_{abs} dans l'équation 2.81 n'est pas chose aisée. En effectuant un bilan énergétique de chacune des feuilles k qui composent la végétation, le flux de chaleur sensible de l'arbre « non-transpirant » s'écrit donc :

$$\Phi_{Hveg}^\circ = \sum_{k=1}^{n_{feuilles}} \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)_k \cdot (\phi_{abs,k} - \varepsilon\sigma T_{air}^4) \cdot S_k \quad (2.84)$$

avec $\sum_{k=1}^n S_k = S_{veg}$. Les termes $\Delta\Phi_{H,evap}$ et $\Delta\Phi_{H,ombre}$ peuvent être écrits de manière similaire. Le nombre de bilans énergétiques à effectuer est donc significativement augmenté et il devient pertinent d'utiliser l'outil numérique pour simuler les échanges radiatifs entre toutes ces surfaces.

Bilan

La différence de flux de chaleur sensible entre les deux systèmes vaut :

$$\Phi_H - \Phi_{Href} = \Phi_{Hveg}^\circ - |\Delta\Phi_{H,evap}| - |\Delta\Phi_{H,ombre}| \quad (2.85)$$

L'équation 2.85 fait intervenir de nombreuses propriétés du sol et de la végétation :

- des propriétés géométriques : l'aire de l'ombre au sol dessinée par l'arbre, la surface foliaire, l'orientation des surfaces qui détermine le rayonnement absorbé ;

- des propriétés thermiques : la conductivité et la diffusivité du sol, qui jouent sur la forme de la réponse temporelle f à un signal thermique ;
- des propriétés radiatives : l'absorptivité et l'émissivité des surfaces, la transmissivité de la végétation qui caractérise la proportion de rayonnement qu'elle laisse passer (qui modifie donc la valeur de ΔA) ;
- des propriétés aérodynamiques : les coefficients de transfert thermique convectif des surfaces ;
- des propriétés hydriques : le taux d'évaporation à la surface des feuilles.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de présenter sommairement le bilan énergétique de surface couramment employé en météorologie urbaine, souvent à l'échelle de la ville ou du quartier, et de détailler les différents modes de transfert thermique qui interviennent dans ce bilan. L'adimensionnement de l'équation de la chaleur a permis de faire émerger le nombre de Biot. Celui-ci permet de poser un critère ($Bi < 0.1$) pour identifier un système mince, qu'il est pertinent de considérer de température homogène et donc comme une « surface » lorsqu'on réalise son bilan énergétique. Le nombre de Biot apparaît également dans une condition aux limites mixte, dite condition de Robin, qui intervient dans la définition du problème thermique. Nous avons également introduit le terme de rayonnement absorbé qui nous semble plus pratique à manipuler dans l'équation du bilan énergétique. En effet, contrairement au rayonnement net, il peut être considéré comme un terme de forçage indépendant de la température de surface.

En s'appuyant sur ces concepts, nous avons tenté, à une échelle bien plus petite, de formaliser l'effet de deux phénomènes physiques, que sont l'ombrage du sol par la végétation et l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles, sur la réduction du flux de chaleur sensible émis par le système étudié. Des modèles simples ont été proposés pour quantifier cette réduction.

A partir de ces résultats, nous avons pu préciser la notion de rafraîchissement en distinguant les conditions dans lesquelles il est absolu (il s'agit d'une réduction de la température de l'air) de celles où il est relatif (il s'agit alors d'un réchauffement moindre de l'air, comparé à une autre situation). Nous avons également évoqué le fait que le mot « rafraîchissement » puisse être adapté pour parler de confort thermique, et non uniquement de température de l'air. Enfin, nous avons examiné le cas d'un arbre sur une place pour évaluer la contribution de l'ombrage et de l'évaporation à un rafraîchissement potentiel. L'effet global de l'arbre sur la température de l'air est piloté par de nombreux paramètres rappelés à la suite de l'équation 2.85. Le chapitre suivant vise à jouer sur ces paramètres, au moyen de simulations numériques, pour comprendre leur effet sur la température de l'air et estimer leur importance.

Bibliographie

Ugo BESSON : Cooling and warming laws : an exact analytical solution. *European Journal of Physics*, 31(5) :1107, 2010.

Thijs DEFRAEYE, Pieter VERBOVEN, Quang Tri HO et Bart NICOLAI : Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces : Applications, methods and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96 :180–201, 2013.

JJ FINNIGAN et MR RAUPACH : Transfer processes in plant canopies in relation to stomatal characteristics. In *Stomatal function*, pages 385–429. Standford, California, standford university press édition, 1987. ISBN 978-0-8047-1347-4.

Tom GRYLLES et Maarten van REEUWIJK : Tree model with drag, transpiration, shading and deposition : Identification of cooling regimes and large-eddy simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298 :108288, 2021.

Stephane JACQUEMOUD et Susan L USTIN : Leaf optical properties : A state of the art. In *8th International Symposium of Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, pages 223–332. CNES Aussois France, 2001.

MS JAYALAKSHMY et Jacob PHILIP : Thermophysical properties of plant leaves and their influence on the environment temperature. *International journal of Thermophysics*, 31(11-12) :2295–2304, 2010.

Pierre-Yves LAGRÉE : Transferts thermiques dans les fluides. <http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/ENSTA/coursMF204.pdf>, 2018. Dernier accès : 11-11-2019.

Jean-Paul LHOMME et Alain PERRIER : Les régimes transitoires en microclimatologie : Analyse théorique. *J. Rech. Atmos*, 17 :121–137, 1983.

Edward Thornton LINACRE : Determinations of the heat transfer coefficient of a leaf. *Plant physiology*, 39(4) :687, 1964.

A LÓPEZ, FD MOLINA-AIZ, DL VALERA et A PEÑA : Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*, 137 :49–58, 2012.

Lento MANICKATHAN, Thijs DEFRAEYE, Jonas ALLEGRINI, Dominique DEROME et Jan CARMELIET : Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and forest meteorology*, 248 :259–274, 2018.

- Valéry MASSON : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94(3) :357–397, 2000.
- Michael F MODEST : *Radiative heat transfer*. Academic press, 2013.
- J L MONTEITH et G SZEICZ : Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88(378) :496–507, 1962.
- Tiago Augusto MOREIRA, Alex Roger Almeida COLMANETTI et Cristiano Bigonha TIBIRIÇÁ : Heat transfer coefficient : a review of measurement techniques. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6) :264, 2019.
- Park S NOBEL *et al.* : *Biophysical plant physiology and ecology*. WH Freeman and company, 1983.
- Timothy R OKE : The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455) :1–24, 1982.
- Timothy R OKE, Gerald MILLS, Andreas CHRISTEN et James A VOOGT : *Urban climates*. Cambridge University Press, 2017.
- Jean-Yves PARLANGE et Paul E WAGGONER : Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves : II. Field experiments. *Plant Physiology*, 50(1) :60–63, 1972.
- Jean-Yves PARLANGE, Paul E WAGGONER et Gary H HEICHEL : Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves : I. Theory and laboratory experiments. *Plant Physiology*, 48(4) :437–442, 1971.
- Grégoire PIGEON : *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLUESCOMPTE et CAPITOU*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2007.
- Jean-François SACADURA : *Transferts thermiques : Initiation et approfondissement*. Editions Lavoisier Tec&Doc, 2015.
- Satoshi SAKAI, Motonori NAKAMURA, K FURUYA, N AMEMURA, M ONISHI, I IIZAWA, J NAKATA, K YAMAJI, R ASANO et Kuwata TAMOTSU : Sierpinski’s forest : New technology of cool roof with fractal shapes. *Energy and buildings*, 55 :28–34, 2012.
- AS THOM : The exchange of momentum, mass, and heat between an artificial leaf and the airflow in a wind-tunnel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 94(399) :44–55, 1968.
- Stephen G WARREN : Optical properties of snow. *Reviews of Geophysics*, 20(1) :67–89, 1982.
- Yuting YANG et Michael L RODERICK : Radiation, surface temperature and evaporation over wet surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(720) : 1118–1129, 2019.

Chapitre 3

Modélisation numérique des composantes du bilan énergétique

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le bilan énergétique était un outil fondamental pour étudier les interactions entre un système et son environnement, quelles que soient l'échelle temporelle (fluctuations rapides de l'ordre de la minute ou cycle annuel des saisons) et l'échelle spatiale en jeu, le système en question pouvant aussi bien être une facette individuelle 2D (sol, mur, toit) qu'un élément 3D de la ville (un bâtiment, un arbre, un homme) ou une couche de l'atmosphère. Le cas du bilan énergétique de végétaux est particulier puisqu'il exprime un couplage entre le bilan radiatif de la plante, son bilan en eau et son métabolisme, comme le montre la figure 3.1. Nous rappelons l'écriture du bilan pour une couche d'épaisseur e et de capacité thermique C , vue au chapitre 2 (section 2.2.1) :

$$eC \frac{\partial T}{\partial t} = \phi^* - \phi_H - \phi_E - \phi_G \quad (3.1)$$

où T est la température du système, ϕ^* est la densité de flux de rayonnement net, ϕ_H est la densité de flux de chaleur sensible, ϕ_E est la densité de flux de chaleur latente et ϕ_G est la densité de flux de chaleur transmise par conduction.

Chacun de ces termes a reçu plus ou moins d'attention selon l'objet d'étude et le domaine d'application. Ainsi, le terme de conduction ϕ_G est la grandeur recherchée en thermique du bâtiment pour déterminer l'impact d'une toiture (Del Barrio, 1998 ; Lazarin *et al.*, 2005 ; Sailor, 2008) ou d'une façade végétalisée (Malys *et al.*, 2014) sur le besoin en chauffage ou en climatisation du bâtiment. Le terme relatif à l'évapotranspiration ϕ_E est étudié en agronomie pour définir les besoins en eau des cultures (Gosse, 1976) et améliorer la gestion du climat sous serre (Boulard *et al.*, 1991). Ce terme est également primordial pour les hydrologues et les météorologues dans l'étude du cycle de l'eau (Penman, 1948 ; Bouchet, 1963 ; Morton, 1994). ϕ^* intéresse les agronomes qui cherchent à évaluer le rayonnement utile à la photosynthèse absorbé par un végétal pour estimer sa croissance (Gosse *et al.*, 1986). Dans le cas de l'îlot de chaleur urbain, c'est la connaissance de ϕ_H qui est essentielle pour savoir si le système – une toiture végétalisée (Takebayashi et Moriyama, 2007 ; Alexandri et Jones, 2007), un parc (Kurn *et al.*, 1994) – cède ou retire de l'énergie à l'atmosphère. Dans les exemples cités, le terme de gauche de l'équation 3.1 est nul la plupart du temps, soit parce que le système est très mince et a une capacité thermique faible (modèle du système thermiquement mince), soit parce

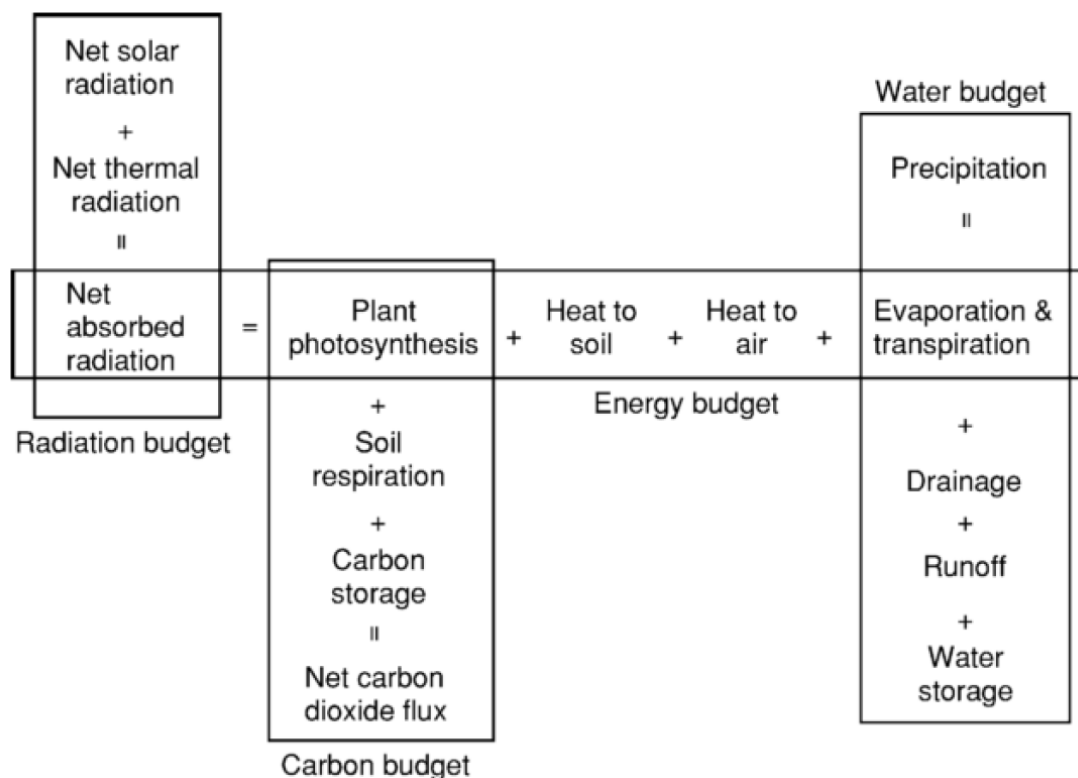


FIGURE 3.1 – Couplage du bilan radiatif, du bilan carbone et du bilan hydrique via un bilan énergétique (d’après Manickathan (2019)).

que les flux sont calculés en régime permanent (par hypothèse, approximation ou oubli...). Ce terme inertiel fait l’objet de certaines études qui s’intéressent à la dynamique du système : une feuille dans le cas de Linacre (1964) et Schymanski *et al.* (2013), un couvert végétal pour Lhomme (1983).

Il est courant que l’on ait recours au bilan énergétique pour déduire la grandeur recherchée *par fermeture du bilan*, ce qui est possible si l’on connaît la valeur de *tous les autres* flux, par mesure expérimentale ou modélisation. Dans ce cas, il faut prêter une attention particulière à chaque flux car les erreurs effectuées sur chacun des termes s’accumulent dans le terme restant, qui est celui qui nous intéresse. Il arrive également que plusieurs termes du bilan soient des grandeurs d’intérêt. Ainsi, dans les modèles météorologiques, les flux de chaleur sensible ϕ_H et latente ϕ_E sont nécessaires pour caractériser les échanges de chaleur et d’eau entre la végétation et l’atmosphère.

A grande échelle (par exemple à une échelle régionale) existent les modèles météorologiques de type *tuile* ou *mosaïque* présentés au chapitre 1. Chaque tuile modélise différemment les composantes du bilan énergétique selon le type de surface représenté. Certaines tuiles sont dédiées aux surfaces continentales, tel le modèle ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) (Noilhan et Planton, 1989), d’autres aux surfaces urbaines, comme TEB (*Town Energy Balance*) (Lemonsu *et al.*, 2012) ou VUCM (*Vegetated Urban Canopy Model*) (Lee et Park, 2008). Trente autres modèles de bilan énergétique de surface urbaine ont été classifiés et comparés par Grimmond *et al.* (2010). Un quart de

ces modèles ne tiennent pas compte de la présence de végétation en ville et ne modélisent donc pas ses effets sur les différents flux du bilan énergétique de surface. Dans les autres, la végétation est prise en compte en changeant les paramètres de surface globaux de la tuile : modification de l'albédo, ajout d'un terme de flux de chaleur latente dans le bilan, augmentation de la rugosité de surface, etc. Ces paramétrisations de surface globales peuvent être pertinentes à grande échelle, lorsque l'on cherche la valeur des flux au niveau de la canopée urbaine : on peut voir le bois de Vincennes, par exemple, comme une surface homogène avec un flux de chaleur sensible ϕ_H global, agrégé sur toute la surface – donnée intéressante pour étudier l'effet du parc sur l'îlot de chaleur urbain. Cependant, elles ne sont plus suffisantes à plus petite échelle – les arbres ont un volume, et le flux de chaleur sensible émis par une feuille au soleil au sommet de l'arbre est différent de celui d'une feuille à l'ombre, trois mètres plus bas. Ces modèles ne sont donc pas pratiques pour étudier l'effet d'une végétation 3D sur le microclimat, à l'échelle de la place ou de la rue.

A cette échelle-là, pour rendre compte des hétérogénéités spatiales, il devient nécessaire de réaliser les bilans énergétiques de sous-systèmes plus petits : sur des ensembles de feuilles (voire sur chaque feuille de la végétation) et sur chacune des facettes (sol, mur, toit, etc.), à l'ombre ou au soleil. On a alors une valeur de ϕ_H et ϕ_E par sous-système, ce qui permet d'étudier la variabilité de ces flux dans l'espace. C'est l'approche adoptée par Manickathan *et al.* (2018), qui couplent un modèle de bilan énergétique des feuilles avec un code de mécanique des fluides numériques (CFD) afin d'évaluer l'effet d'un arbre sur le microclimat. Dans leur étude, la végétation est représentée comme un milieu poreux et son impact sur l'écoulement de l'air est modélisé via des termes sources dans les équations de conservation d'énergie, de masse et de quantité de mouvement. Le domaine est discrétisé en de petits volumes de contrôle, que l'on appelle des *cellules*, contenant une certaine densité de feuilles. Le couplage entre les flux ϕ_H et ϕ_E du bilan énergétique (qui permettent de définir les termes sources de chaleur et d'humidité dans le modèle CFD) et l'écoulement de l'air est réalisé par des coefficients de transfert de chaleur et de masse au niveau des feuilles, paramétrés en fonction de la vitesse du vent dans chaque cellule. Cette démarche est séduisante car elle considère les interactions entre l'arbre et l'air qui le traverse, et permet de voir quels paramètres du modèle (vitesse du vent, humidité relative, rayonnement solaire, hauteur de l'arbre...) influent sur le rafraîchissement. De plus, elle permet d'obtenir les champs de température, d'humidité et de vitesse de l'air autour de l'arbre, grandeurs utiles dans l'étude du confort thermique extérieur. Cependant, l'absorption du rayonnement solaire par la végétation est très simplifiée dans leur modèle et le rayonnement thermique émis par le sol n'est pas pris en compte¹. Or, d'après le chapitre précédent, les termes de rayonnement ont un poids important dans le bilan énergétique des feuilles et du sol et, par conséquent, contrôlent en grande partie la température de ces surfaces et les flux de chaleur sensible qu'elles émettent (voir par exemple la figure 2.15).

Une approche complémentaire à celle que nous venons de décrire est de tenter de simuler de manière plus réaliste les transferts radiatifs mais de simplifier la modélisation des

1. De manière générale, de nombreux modèles CFD sur le microclimat urbain représentent assez grossièrement la géométrie de la végétation (Salim *et al.*, 2015). Il s'ensuit qu'à l'échelle de l'arbre, les échanges radiatifs entre l'atmosphère, la végétation et les différentes facettes urbaines sont rarement modélisés de manière réaliste.

écoulements au sein du couvert végétal. C'est la démarche de Gastellu-Etcheberry *et al.* (1996) qui développent depuis une trentaine d'années le modèle DART (*Discrete Anisotropic Radiative Transfer*) au CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère), à Toulouse, pour simuler les transferts radiatifs dans des scènes 3D hétérogènes. La végétation est discrétisée en cellules cubiques (ou *voxels*, pour *volumetric pixels*) remplies d'un milieu turbide, qui est un nuage d'éléments diffusants avec une certaine loi de distribution, et le profil de vent au-dessus, dans et sous le couvert végétal est paramétrisé (et non simulé). Une des finalités de ce modèle est d'obtenir le rayonnement réfléchi par la végétation, pour des applications de télédétection à une échelle régionale. Avec une résolution plus fine que DART, le modèle RATP (*Radiation Absorption, Transpiration and Photosynthesis*) de Sinoquet *et al.* (2001) permet également de simuler l'interception du rayonnement par une végétation 3D hétérogène. Ce modèle est développé à Clermont Ferrand par l'unité PIAF (Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant) qui s'intéresse au microclimat à l'échelle des organes de la plante et aux processus aux temps courts (infra-horaires) pour comprendre leurs impacts sur le fonctionnement de l'arbre. Il permet d'étudier la variabilité du rayonnement absorbé, de la transpiration et de la photosynthèse au sein de la couronne de l'arbre. RATP représente la végétation par un milieu turbide pour le rayonnement (voxels caractérisés par une densité de feuilles dont l'inclinaison suit une loi de probabilité) et calcule la transpiration des feuilles en effectuant un bilan énergétique local (par voxel). Récemment, Woods *et al.* (2018) ont montré que le champ de température au sein du feuillage prédit par le modèle RATP était plus sensible aux paramètres structuraux (densité foliaire, densité de probabilité de l'angle d'inclinaison des feuilles) qu'aux paramètres physiologiques (contrôle de la transpiration des feuilles par les stomates, dont l'ouverture est fonction de la température, du déficit de pression de vapeur, etc.). Ceci incite à privilégier les modèles représentant de manière réaliste la géométrie du feuillage si l'on souhaite étudier le flux de chaleur sensible émis par la végétation.

Pour résumer, tous les modèles décrits plus haut se basent sur un bilan énergétique de la végétation mais la représentent de manière plus ou moins implicite. Ceux de type *tuile* ne modélisent pas la végétation directement mais modélisent ses effets sur les différents flux par des changements des paramètres de surface globaux. Le modèle de Manickathan *et al.* (2018) modélise la végétation par un milieu poreux pour les écoulements et par un milieu turbide homogène pour le rayonnement. Puisqu'elle néglige certains échanges radiatifs, cette étude permet donc plus d'appréhender les effets aérodynamiques de la végétation urbaine sur les écoulements et de simuler les transports de chaleur et de masse (vapeur d'eau) que de prédire les flux du bilan énergétique du feuillage. Le modèle RATP représente la structure du feuillage de manière plus fidèle, par des milieux turbides hétérogènes qui traduisent la structure du couvert végétal. En revanche, la température de l'air est uniforme et prescrite donc ce modèle ne permet pas d'analyser les interactions entre le flux de chaleur sensible émis par la végétation et la température de l'air, contrairement au modèle de Manickathan *et al.* (2018). Enfin, il est possible de représenter explicitement la géométrie du feuillage en 3D, de tenter de simuler le plus précisément possible les transferts radiatifs et de réaliser un bilan énergétique de chaque feuille, ce que nous proposons par la suite.

Nous avons identifié deux outils numériques susceptibles de nous aider dans notre travail : OPENALEA (Pradal *et al.*, 2008) et HELIOS (Bailey, 2019b). Le premier, OpenAlea,

conçu par Christophe Pradal, de l'UMR AGAP (équipe mixte *Virtual Plants* Cirad – Inria – Inrae), est une plateforme d'intégration de modèles structuraux et fonctionnels de plantes, à plusieurs échelles. Le but de l'outil est de comprendre les mécanismes physiques, physiologiques et génétiques qui contrôlent le processus de développement des plantes et de simuler numériquement la morphogenèse. A ce titre, il se sert, entre autres, du modèle RATP. Le second, HELIOS, développé par Brian Bailey du *Plant Simulation Lab* de l'Université de Californie à Davis (Bailey, 2019b), est également une plateforme open-source qui permet d'assembler plusieurs modèles, dont un modèle de végétation 3D, un modèle de transfert radiatif et un modèle de bilan énergétique de surface. Nous avons privilégié HELIOS, implémenté en C++, afin de pouvoir faire du développement. Il est en outre conçu pour réduire les temps de calcul malgré une géométrie complexe, ce qui est pratique pour effectuer des études paramétriques sur un nombre important de paramètres. Une description plus détaillée de HELIOS est donnée dans la partie suivante.

Dans ce chapitre, nous souhaitons estimer le rafraîchissement créé par une végétation 3D, en distinguant la contribution de l'évapotranspiration de celle de l'ombrage. Nous cherchons d'abord à évaluer l'effet de différentes variables du modèle sur le rafraîchissement total ainsi que sur la répartition des flux. L'objectif est d'identifier les paramètres qui méritent le plus d'attention lorsque l'on étudie l'impact de la végétation sur la température de l'air et sur le confort thermique. Des modèles élémentaires sont examinés, en commençant par un modèle à une feuille, pour aller vers des géométries plus complexes.

3.1 Helios

3.1.1 Présentation générale

HELIOS est une interface de programmation d'application (ou API, pour *Application Programming Interface*) en C++ qui regroupe des classes, des fonctions et des bibliothèques utiles à la simulation 3D de processus physiques. Ce n'est donc pas un programme en soi mais un ensemble de bibliothèques mises à disposition de l'utilisateur pour construire un modèle et effectuer des simulations. L'interface est constituée d'une classe principale, appelée *Context*, qui sert à créer une géométrie et y associer des informations, et de différents plug-ins qui accèdent aux données contenues dans le *Context*, les manipulent et réalisent des opérations.

HELIOS a été créé à l'origine pour fournir une interface utilisateur à un code de lancés de rayons visant à simuler les échanges radiatifs au sein d'une végétation 3D représentée finement (Bailey, 2018, 2019b). Ce code de rayonnement, qui effectue du calcul parallèle sur GPU (*Graphics Processing Unit*), est devenu l'un des plug-ins de l'API. L'interface se veut flexible, dans la mesure où l'utilisateur peut modifier les modules existants, développer un module implémentant une nouvelle fonctionnalité et le coupler aux autres, ou encore importer une géométrie 3D créée par d'autres logiciels de simulation de croissance de plantes. Cette flexibilité se fait au prix d'une complexité accrue car le programmeur doit apprendre à maîtriser les outils fournis par l'API et décider de la manière dont il couple les modèles. Certains plug-ins utilisent nécessairement le GPU pour gérer la complexité des calculs.

3.1.2 La classe *Context*

Le *Context* est la classe C++ principale de HELIOS. Il contient des *primitives*, auxquelles sont associées des données : leur adresse mémoire, leur nom, leur géométrie, leurs coordonnées, etc. Il contient aussi des données globales qui ne sont pas reliées à des primitives en particulier, comme la date, l'heure et la localisation du lieu modélisé. Enfin, il contient des fonctions qui aident à manipuler ces données : soit des accesseurs qui servent à connaître l'état d'une variable sans la modifier (par exemple, *getDate()* permet de lire la valeur de la variable globale correspondant à la date), soit des modificateurs qui sont autorisés à modifier cet état (*setDate()* permet de changer de jour).

Cette classe ne modélise donc rien mais stocke les informations et sert d'interface entre les différents plug-ins, chacun étant une classe C++ qui lit les informations du *Context* et y ajoute de nouvelles données. La figure 3.2 schématise les échanges entre le *Context* et deux plug-ins.

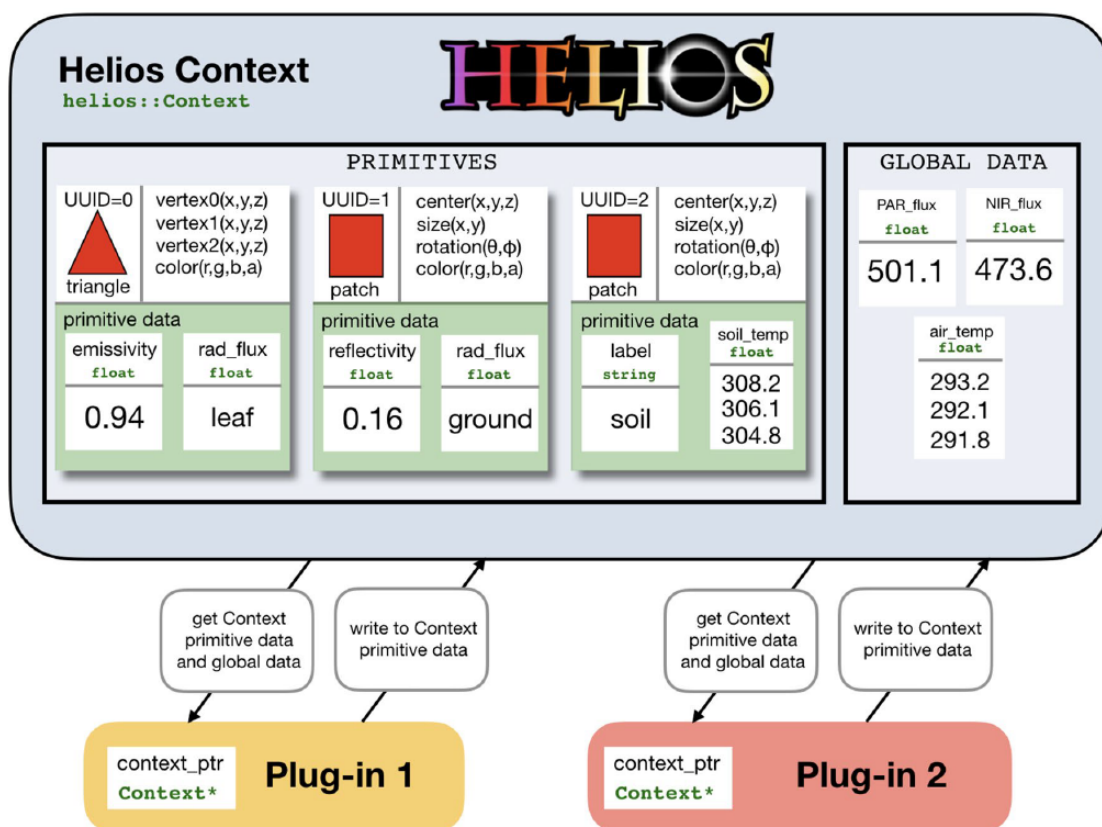


FIGURE 3.2 – Représentation du couplage de deux plug-ins par l'intermédiaire du *Context* dans HELIOS. Dans cet exemple, le *Context* contient trois primitives (un triangle et deux rectangles) auxquelles sont rattachés différents types de données, ainsi que des données globales (deux flux de rayonnement intégrés dans les bandes spectrales PAR (*Photosynthetically active radiation*, 400-700 nm) et NIR (*Near-infrared*, 700-1400 nm) et une série temporelle pour la température de l'air). Les plug-ins manipulent ces données via un pointeur vers le *Context*. (D'après Bailey (2019b).)

3.1.3 Les plug-ins

Il y a neuf plug-ins disponibles dans HELIOS :

- *Visualizer* : pour afficher la géométrie et certaines données associées ;
- *Weber-Penn Tree* : pour générer de manière procédurale l'architecture d'un arbre ;
- *Radiation Model* : pour modéliser les transferts radiatifs ;
- *Energy Balance Model* : pour modéliser les composantes du bilan énergétique à l'équilibre thermique ;
- *LiDAR* : pour traiter et visualiser des données LiDAR ;
- *Photosynthesis Model* : pour modéliser l'assimilation photosynthétique de CO₂ ;
- *Stomatal Conductance Model* : pour modéliser les échanges gazeux qui s'effectuent au niveau des stomates des feuilles ;
- *Solar Position Model* : pour modéliser la course du soleil ainsi que les flux de rayonnement provenant du soleil et du ciel ;
- *Voxel Intersection* : pour déterminer quelles primitives 2D appartiennent à un voxel.

Les paragraphes suivants décrivent plus précisément les plug-ins utilisés dans le cadre de ce travail. La présentation des différents modules reprend la documentation disponible en ligne (Bailey, 2019a), en mettant de côté ce qui a trait au langage de programmation pour insister sur les modèles et leurs paramètres.

Visualisation de la géométrie

Ce plug-in ouvre une fenêtre graphique interactive afin de visualiser la géométrie créée et certaines données associées (par exemple, la température des primitives en les colorant, avec une légende). On peut afficher toutes les primitives géométriques déclarées dans le *Context* ou seulement une partie d'entre elles. Un arrière-plan, des objets et du texte peuvent être ajoutés à l'image. Un modèle d'ombrage est disponible pour simuler l'éclairage.

Génération procédurale d'arbre

Ce plug-in permet de générer de manière procédurale des géométries 3D d'arbres d'après le modèle de Weber et Penn (Weber et Penn, 1995). Cette méthode nécessite de spécifier plus d'une trentaine de paramètres dans un fichier XML qui sera lu par le plug-in. Les primitives correspondant au tronc, aux branches et aux feuilles sont ajoutées au *Context*. La figure 3.3(a) montre un fichier type de définition d'arbre. Le plug-in contient une bibliothèque de neuf arbres (figure 3.3(b)) dont la géométrie peut être modifiée en changeant les paramètres du fichier XML correspondant. Cette bibliothèque peut être enrichie en ajoutant un fichier XML et une image de la feuille de l'arbre qu'on modélise.

Modèle de rayonnement

Ce plug-in est le cœur de HELIOS. Il modélise le transport d'énergie radiative grâce à un algorithme de *ray tracing* (lancer de rayons) inverse qui utilise une implémentation *multithread* : le traitement des calculs est parallélisé et effectué sur un processeur graphique

(a)

```

<WeberPennTree label="Olive">
  <Shape> 1 </Shape>
  <BaseSize> 0.1 </BaseSize>
  <BaseSplits> 4 </BaseSplits>
  <BaseSplitSize> 0.05 </BaseSplitSize>
  <Scale> 7 </Scale>
  <ScaleV> 0 </ScaleV>
  <ZScale> 1 </ZScale>
  <ZScaleV> 0 </ZScaleV>
  <Ratio> 0.017 </Ratio>
  <RatioPower> 1. </RatioPower>
  <Lobes> 7 </Lobes>
  <LobeDepth> 0.1 </LobeDepth>
  <Flare> 0.5 </Flare>
  <Levels> 3 </Levels>
  <nSegSplits> 0 0 0 0 </nSegSplits>
  <nSplitAngle> 33 30 0 0 </nSplitAngle>
  <nSplitAngleV> 5 0 0 0 </nSplitAngleV>
  <nCurveRes> 4 4 4 0 </nCurveRes>
  <nCurve> -50 -60 -60 0 </nCurve>
  <nCurveV> 5 5 5 0 </nCurveV>
  <nCurveBack> 0 0 0 0 </nCurveBack>
  <nLength> 1 0.5 0.3 0 </nLength>
  <nLengthV> 0 0.15 0.15 0 </nLengthV>
  <nTaper> 1 1 1 0 </nTaper>
  <nDownAngle> 65 45 45 35 </nDownAngle>
  <nDownAngleV> 0 0 0 0 </nDownAngleV>
  <nRotate> 140 140 140 140 </nRotate>
  <nRotateV> 0 10 10 0 </nRotateV>
  <nBranches> 40 45 35 0 </nBranches>
  <Leaves> 25 </Leaves>
  <LeafFile> plugins/weberpenntree/leaves/OliveLeaf.png </LeafFile>
  <LeafScale> 0.14 </LeafScale>
  <LeafScaleX> 0.2 </LeafScaleX>
  <WoodFile> plugins/visualizer/textures/wood.jpg </WoodFile>
</WeberPennTree>

```

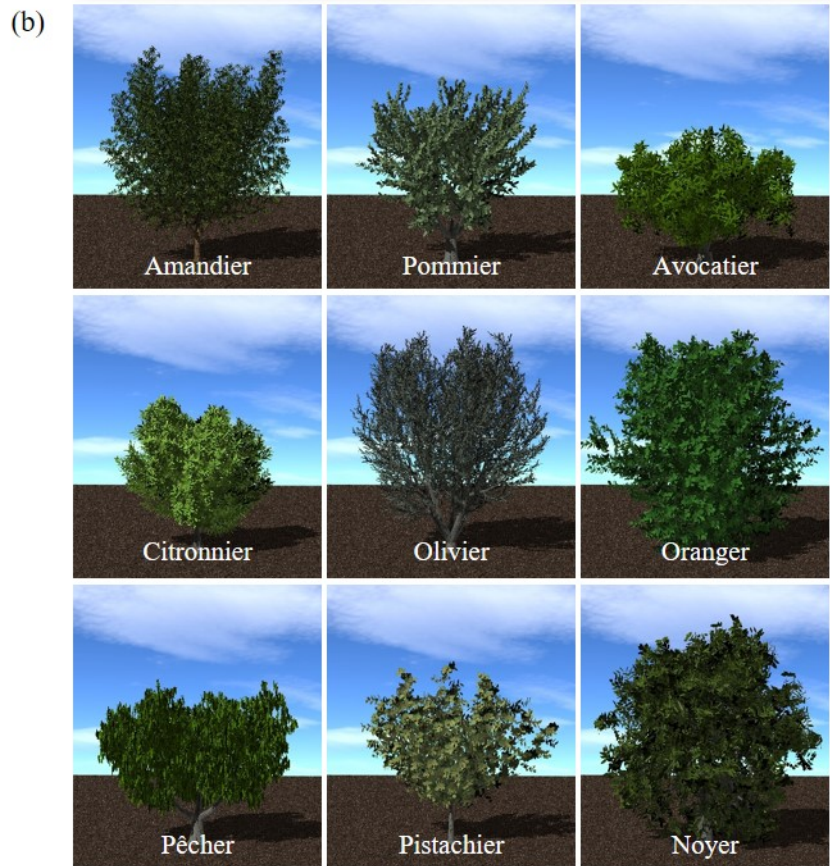


FIGURE 3.3 – (a) Exemple de fichier XML contenant les paramètres qui déterminent la structure d'un olivier et (b) affichage avec le *Visualizer* des arbres modélisés dans la bibliothèque de *Weber-Penn Tree*.

performant avec le moteur OptiX de Nvidia et le langage de programmation CUDA. L'algorithme est dit inverse car pour modéliser l'émission de rayonnement thermique, les rayons sont lancés depuis chaque élément vers les sources de rayonnement, ce qui assure de « toucher » tous les éléments, même s'ils sont petits, et ce quel que soit le nombre de rayons lancés. Ce modèle est décrit en détail dans l'article de Bailey (2018). Le plug-in permet, suivant cette méthode, de simuler la transmission, l'absorption et l'émission de rayonnement par la végétation et les facettes urbaines. Le rayonnement peut être découpé en un nombre arbitraire de bandes spectrales. La table 3.1 résume les variables utilisées en entrée de modèle et les variables de sortie générées.

DONNÉES D'ENTRÉE DES PRIMITIVES				
Donnée	Unité	Description	Plug-in	Valeur par défaut
temperature	Kelvin	Température de surface	<i>Energy Balance</i>	300 K
reflectivity_*	-	Réfectivité dans la bande *	-	0
transmissivity_*	-	Transmissivité dans la bande *	-	0
emissivity_*	-	Emissivité dans la bande *	-	1.0
twosided_flag	-	Indique si la primitive a une (=0) ou deux faces (=1)	-	1
DONNÉES DE SORTIE DES PRIMITIVES				
Donnée	Unité	Description		
radiation_flux_*	W.m ⁻²	Flux de rayonnement absorbé dans la bande *		

TABLE 3.1 – Variables d'entrée et de sortie pour le plug-in *Radiation Model*.

Bilan énergétique

Pour chaque primitive, ce plug-in modélise les différentes composantes du bilan énergétique de surface et détermine la température d'équilibre, qui est solution de l'équation :

$$R - \varepsilon\sigma T_s^4 = c_p g_H (T_s - T_a) + \lambda g_M \left(\frac{e_s(T_s)f_s - e_s(T_a)h}{p_{atm}} \right) + Q_{other} \quad (3.2)$$

avec R le flux de rayonnement (toutes longueurs d'ondes confondues) absorbé (en W.m⁻²), T_s la température de surface (en K), c_p (= 29,25 J.mol⁻¹.K⁻¹) la capacité thermique de l'air, g_H la conductance de transfert thermique (en mol.m⁻².s⁻¹), T_a la température de l'air (en K), λ (= 4,4 · 10⁴ J.mol⁻¹) la chaleur latente de vaporisation de l'eau, g_M la conductance de transfert de vapeur d'eau (en mol.m⁻².s⁻¹), $e_s(T)$ la pression de vapeur saturante à la température T (en Pa), f_s l'humidité relative de l'air à la surface de la primitive, h l'humidité relative de l'air hors de la couche limite, p_{atm} la pression atmosphérique (en Pa) et Q_{other} potentiellement d'autres flux qui pourraient intervenir dans le bilan (en W.m⁻²). A droite du signe égal, le premier terme correspond au flux de chaleur sensible et le deuxième au flux de chaleur latente. Dans les simulations qui suivent, le flux de chaleur par conduction dans le sol n'a pas été pris en compte.

Le tableau 3.2 liste les variables d'entrée et de sortie du modèle pour chacune des primitives. Si une des variables requises n'est pas définie, la valeur par défaut indiquée dans le tableau est affectée à la primitive.

DONNÉES D'ENTRÉE DES PRIMITIVES				
Donnée	Unité	Description	Plug-in	Valeur par défaut
radiation_flux_[*]	W.m^{-2}	Flux de rayonnement net dans la bande spectrale *	<i>Radiation</i>	0
wind_speed	m.s^{-1}	Vitesse de l'air hors de la couche limite	-	$= 1,0 \text{ m.s}^{-1}$
object_length	m	Dimension caractéristique de la primitive	-	Racine carrée de l'aire
boundarylayer_conductance	$\text{mol air.m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Coefficient de transfert de chaleur	-	$0.135\sqrt{U/L}$
air_temperature	Kelvin	Température de l'air hors de la couche limite	-	300 K
moisture_conductance	$\text{mol air.m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Coefficient de transfert de vapeur d'eau	<i>Stomatal Cond.</i>	0
surface_humidity	-	Humidité relative de l'air juste au-dessus de la surface évaporante	-	1.0 (saturé)
air_humidity	-	Humidité relative de l'air hors de la couche limite	-	0.5
air_pressure	Pa	Pression atmosphérique	-	101000 Pa
other_surface_flux	W.m^{-2}	Autres flux d'énergie (ex : conduction, stockage, etc.)	-	0

DONNÉES DE SORTIE DES PRIMITIVES		
Donnée	Unité	Description
temperature	Kelvin	Température de surface
sensible_flux	W.m^{-2}	Flux de chaleur sensible
latent_flux	W.m^{-2}	Flux de chaleur latente

DONNÉES DE SORTIE OPTIONNELLES		
Donnée	Unité	Description
boundarylayer_conductance_out	$\text{mol air.m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Coefficient de transfert de chaleur calculé par ce plug-in
vapor_pressure_deficit	mol.mol^{-1}	Déficit de pression de vapeur

TABLE 3.2 – Variables d'entrée et de sortie pour le plug-in *Energy Balance Model*.

Les flux de rayonnement sont calculés par le plug-in *Radiation Model*. Pour obtenir le flux de chaleur sensible, la conductance de transfert de chaleur doit être précisée. Elle vaut sinon, par défaut, $g_H = 0.135\sqrt{U/L}$ où U est la vitesse du vent et L la dimension caractéristique de la primitive (Campbell et Norman, 2012). La conductance stomatale g_S est fournie par le plug-in *Stomatal Conductance Model*. La conductance de transfert de vapeur d'eau est alors modélisée comme étant : $g_M = 0.97g_Hg_S/(0.97g_H + g_S)$ (Campbell et Norman, 2012). La pression de vapeur saturante est calculée par la formule de Tetens (1930) : $e_s(T) = 611 \exp(17.502(T - 273)/((T - 273) + 240.97))$.

Position du soleil et modèle de transmission atmosphérique

Ce plug-in calcule la position du soleil pour un lieu, une date et une heure donnés d'après le modèle de Iqbal (2012). Il faut préciser au *Context* la date et l'heure et au plug-in les coordonnées du lieu et son UTC (temps universel coordonné). Il permet également de calculer les flux de rayonnement incidents. Le modèle de transmission atmosphérique REST-2 de Gueymard (2008) est utilisé pour obtenir les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire par temps clair tandis que celui de Prata (1996) donne le flux de rayonnement thermique (rayonnement de grandes longueurs d'ondes) émis par le ciel.

3.2 Premier cas d'étude : le bilan énergétique d'un système élémentaire

Nous commençons par l'étude d'un système élémentaire composé d'un sol et d'une seule feuille. Le but de cette partie est de se familiariser avec la terminologie employée par la suite, de développer son intuition du poids qu'ont les différentes variables sur le flux de chaleur sensible total émis par le système et de comparer les résultats de cette simulation avec le modèle analytique décrit au chapitre précédent.

Le sol est modélisé par un carré de côté 20 mètres dont le centre est l'origine O du repère. La feuille est un carré de côté 1 mètre dont le centre est à 2 mètres de haut. Le soleil est dans le plan Oxz et forme un angle d'élevation β avec l'horizon. L'inclinaison de la feuille par rapport à l'horizontale est notée θ . Cette configuration est schématisée sur la figure 3.4.

Le flux de chaleur transmise par conduction dans le sol et le flux de chaleur latente ne sont pas pris en compte dans cette simulation. Négliger le flux de chaleur latente revient à dire que le sol et la feuille sont secs ou ne peuvent pas évaporer d'eau. Vue autrement, cette simulation représente un parasol d' 1 m^2 ombrageant le sol, ce parasol ayant les mêmes propriétés thermo-radiatives qu'une feuille. Négliger la conduction revient à considérer que le sol a un nombre de Biot infini (cas $Bi = \infty$ sur la figure 2.12b du chapitre précédent).

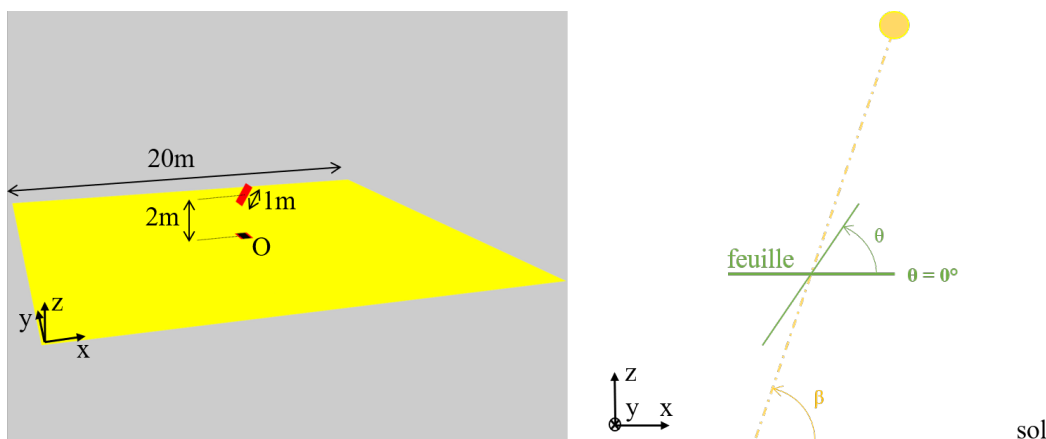


FIGURE 3.4 – Géométrie du premier cas d'étude.

Le rayonnement est séparé en deux domaines de longueurs d'ondes : le rayonnement solaire (SW pour *short-wave*) de courte longueur d'onde et le rayonnement thermique (LW pour *long-wave*) de grande longueur d'onde. Le rayonnement solaire incident est fixé à 600 W/m^2 et le rayonnement thermique incident à 400 W/m^2 . Une partie du rayonnement solaire incident est directe (faisceau collimaté provenant du soleil), l'autre partie est diffuse (rayons diffractés par l'atmosphère provenant de toutes les parties du ciel). La proportion est ici fixée à 90% pour le rayonnement solaire direct et 10% pour le rayonnement solaire diffus. Le rayonnement thermique est diffus. On considère que l'air a une température uniforme T_{air} de 300 K (environ 27°C) et l'on modélise le flux de chaleur sensible émis par chaque surface par la loi de Newton.

Les bilans énergétiques surfaciques de la feuille (indice f) et du sol (indice s) à l'équilibre thermique s'écrivent donc, respectivement :

$$\phi_{SW,f} + \phi_{LW,f} = 2\varepsilon_f \sigma T_f^4 + 2h_f (T_f - T_{air}) \quad (3.3)$$

$$\phi_{SW,s} + \phi_{LW,s} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + h_s (T_s - T_{air}) \quad (3.4)$$

avec $\phi_{X,k}$ le rayonnement absorbé par la surface k dans le domaine X : $\phi_{X,k} = a_{X,k} \phi_{X,k}^{inc} = (1 - \rho_{X,k} - \tau_{X,k}) \phi_{X,k}^{inc}$, où a , ρ et τ désignent l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité et $\phi_{X,k}^{inc}$ est le rayonnement incident vers la surface k dans la bande de longueurs d'onde X . Par exemple, $\phi_{LW,f}^{inc}$ qui est le rayonnement thermique incident sur la feuille comprend : le rayonnement thermique atmosphérique LW_{diff} venant du ciel (un des paramètres prescrits de la simulation), le rayonnement thermique atmosphérique réfléchi par le sol (calculé lors de la simulation, et nul ici car la réflectivité du sol dans le domaine des grandes longueurs d'ondes a été fixé à 0) et le rayonnement thermique émis par le sol (calculé – ici $\varepsilon_s = a_{LW,s} = 1 - \rho_{LW,s} - \tau_{LW,s} = 1$ donc le sol est modélisé comme un corps noir). Les paramètres fixés dans ces simulations sont récapitulés dans la table 3.3.

Dans ces simulations, nous imposons des valeurs constantes au rayonnement incident en provenance du soleil et de l'atmosphère, à la température de l'air et aux coefficients d'échange thermique convectif. La température de chaque surface évolue alors vers une température stationnaire permettant d'équilibrer les bilans énergétiques 3.3 et 3.4. Dans les sections suivantes, nous essayons de décortiquer ces deux bilans en étudiant leurs composantes lorsque l'on fait varier l'angle d'inclinaison θ de la feuille, le soleil étant au zénith ($\beta = 90^\circ$).

3.2.1 Bilan énergétique de la feuille

Nous nous intéressons dans un premier temps au bilan énergétique de la feuille et à sa température (voir figure 3.5).

Puisque le soleil est au zénith, la configuration présente une symétrie verticale et l'étude peut être restreinte à une variation de θ de 0° à 90° . Lorsque la feuille est à l'horizontale ($\theta = 0^\circ$), le rayonnement solaire absorbé est maximal ($\phi_{SW,f} = 427 \text{ W.m}^{-2}$, en rouge sur la figure). La feuille reçoit moins de rayonnement solaire à mesure que θ augmente, jusqu'à atteindre une valeur minimale ($\phi_{SW,f} = 105 \text{ W.m}^{-2}$) quand elle est verticale. Étant donné que le rayonnement thermique absorbé $\phi_{LW,f}$ varie peu avec l'inclinaison

PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE LA FEUILLE		
Donnée	Valeur	Description
$\rho_{SW,f}$	0.2	Réfectivité de la feuille dans le domaine des CLO
$\tau_{SW,f}$	0.2	Transmissivité de la feuille dans le domaine des CLO
$\rho_{LW,f}$	0.01	Réfectivité de la feuille dans le domaine des GLO
$\tau_{LW,f}$	0.01	Transmissivité de la feuille dans le domaine des GLO
PROPRIÉTÉS RADIATIVES DU SOL		
Donnée	Valeur	Description
$\rho_{SW,s}$	0.2	Réfectivité du sol dans le domaine des CLO
$\tau_{SW,s}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des CLO
$\rho_{LW,s}$	0	Réfectivité du sol dans le domaine des GLO
$\tau_{LW,s}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des GLO
SOURCE DE RAYONNEMENT		
Donnée	Valeur	Description
β	90	Angle d'élévation du soleil par rapport à l'horizon
SW_{dir}	540	Rayonnement solaire direct
SW_{diff}	60	Rayonnement solaire diffus
LW_{diff}	400	Rayonnement thermique diffus
VARIABLES DU BILAN ÉNERGÉTIQUE		
Donnée	Valeur	Description
T_{air}	300	Température de l'air
$2h_f$	12.5	Coefficient d'échange thermique convectif feuille/air
h_s	3.95	Coefficient d'échange thermique convectif sol/air
g_s	0	Conductance stomatale

TABLE 3.3 – Variables d'entrée des simulations.

de la feuille (moins de 50 W.m^{-2} , voir la courbe bleue de la figure 3.5a), le rayonnement total absorbé $\phi_{SW,f} + \phi_{LW,f}$ décroît pour θ allant de 0° à 90° . Par conséquent, d'après l'équation du bilan énergétique 3.3, le flux de rayonnement thermique émis, le flux de chaleur sensible émis (figure 3.5a) et la température de la feuille (figure 3.5b) décroissent également pour θ allant de 0° à 90° .

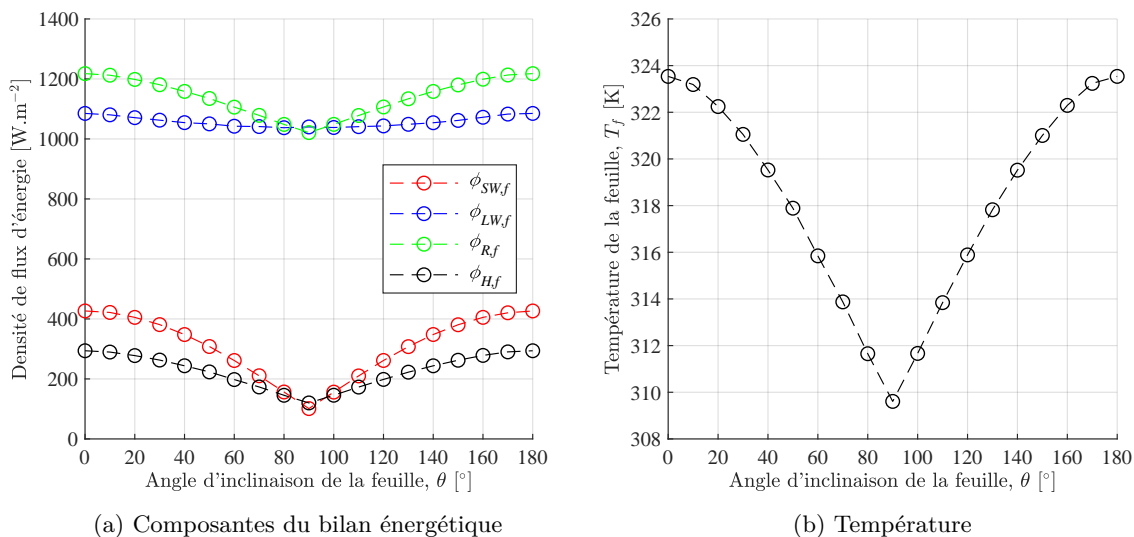


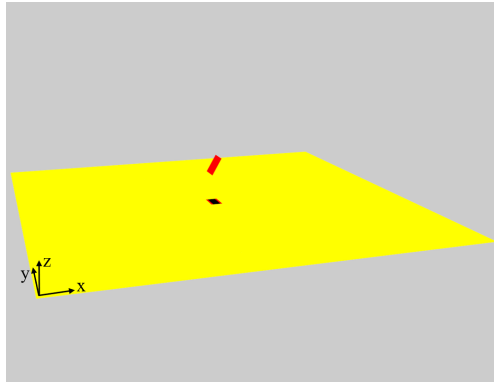
FIGURE 3.5 – Étude du bilan énergétique de la feuille pour différentes inclinaisons de la feuille.

3.2.2 Bilan énergétique du sol

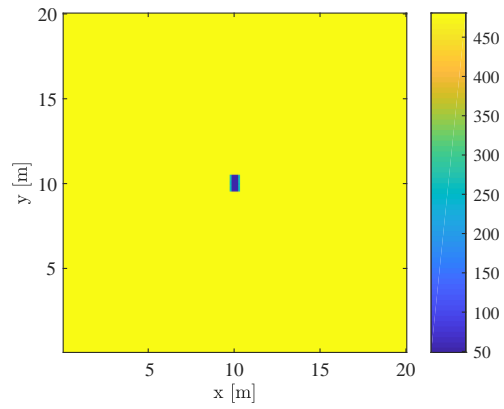
Examinons maintenant le bilan énergétique du sol, subdivisé en 40 000 carrés de 10 centimètres de côté. Pour se fixer les idées, la figure 3.6 présente chacune des composantes du bilan énergétique ainsi que la température du sol pour un angle d'inclinaison de la feuille de 60° . Seule une petite portion du sol, qui correspond à l'ombre projetée par la feuille, voit son bilan énergétique nettement modifié. Ceci est causé par l'atténuation du rayonnement solaire par la feuille (figure 3.6b). Autour de la zone ombragée, il existe une petite variation du rayonnement thermique absorbé par le sol (figure 3.6c) due au rayonnement thermique émis par la feuille dans toutes les directions.

La moyenne de chaque composante, sur les 400 m^2 de sol, est tracée pour différentes valeurs de θ sur la figure 3.7a. En la comparant avec la figure 3.5a, on observe que la densité de flux de rayonnement total absorbé par le sol est inférieure à celle de la feuille car cette dernière a deux faces et absorbe donc le rayonnement des deux côtés. Cependant, la température du sol – 337 K en moyenne quel que soit θ – est bien plus élevée que celle de la feuille car son coefficient de transfert thermique convectif est trois fois plus faible que celui de la feuille dans cette simulation : la feuille perd plus facilement que le sol de l'énergie sous forme de chaleur sensible. Cela mène à des densités de flux de chaleur sensible émises par le sol et la feuille qui sont proches malgré des températures de surface différentes.

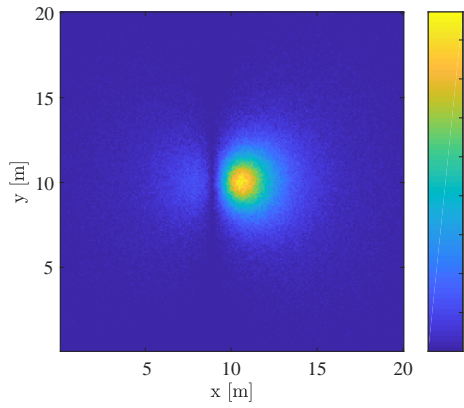
Lorsque l'on fait varier θ , environ 1 m^2 de sol voit son bilan énergétique modifié du fait de l'ombre créée par la feuille, ce qui n'est pas perceptible sur les composantes moyennées



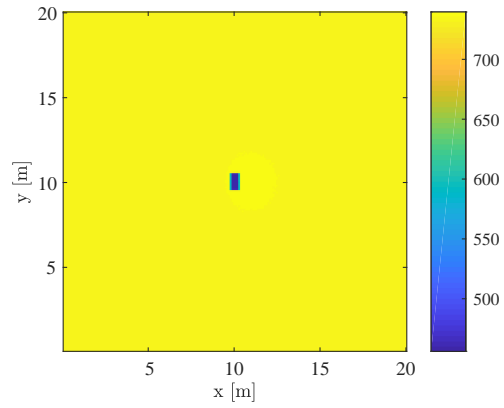
(a) Vue en perspective



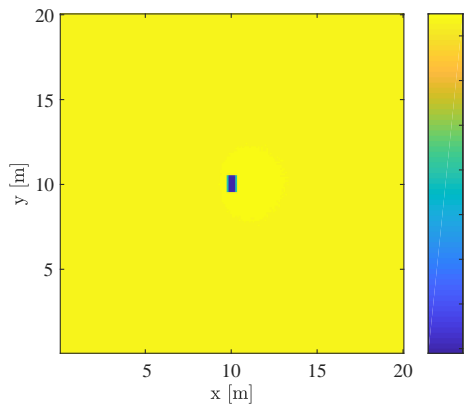
(b) Densité de flux de rayonnement solaire absorbé par le sol, $\phi_{SW,s}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]



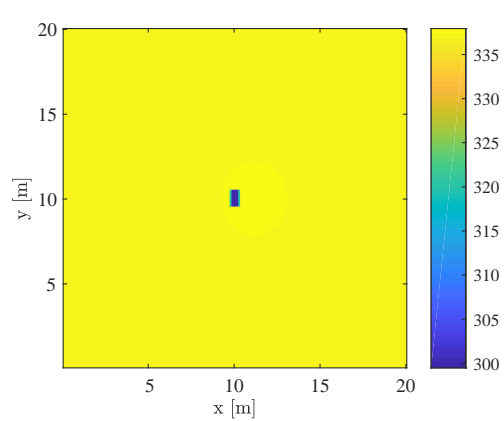
(c) Densité de flux de rayonnement thermique absorbé par le sol, $\phi_{LW,s}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]



(d) Densité de flux de rayonnement thermique émis par le sol, $\phi_{R,s}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]



(e) Densité de flux de chaleur sensible émis par le sol, $\phi_{H,s}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]



(f) Température du sol, T_s [K]

FIGURE 3.6 – Bilan énergétique du sol pour un angle d'inclinaison de la feuille $\theta = 60^\circ$

sur 400 m^2 de la figure 3.7a. Afin de visualiser l'effet de l'inclinaison de la feuille sur le bilan énergétique du sol, on peut sommer les densités de flux sur toute la surface du sol pour obtenir les flux globaux ($\Phi_{.,s}$) et étudier leur écart aux flux d'un sol « de référence » qui ne serait pas ombragé par une feuille ($\Delta\Phi_{.,s} = \Phi_{.,s} - \Phi_{.,ref}$). Ces différences de flux sont représentées sur la figure 3.7b. Ici, une valeur négative de $\Delta\Phi_{H,s}$ correspond à un rafraîchissement relatif (par rapport à la situation de référence sans feuille) dû à l'ombrage. Par « rafraîchissement », on entend une réduction du flux de chaleur sensible : le sol ombragé réchauffe moins l'air, ou cède moins d'énergie thermique à l'air par convection, que le sol au soleil. Dans ce cas-ci, il ne s'agit pas d'un rafraîchissement absolu car le sol ombragé reste à une température supérieure à celle de l'air ($T_s > 300 \text{ K}$). Lorsque la feuille est à l'horizontale ($\theta = 0^\circ$), l'ombre portée au sol est la plus grande et le rayonnement solaire absorbé par le sol est donc minimal. En revanche, le rayonnement thermique (LW) absorbé par le sol est maximal dans cette configuration car c'est l'angle pour lequel la feuille émet le plus de rayonnement thermique (voir la courbe verte de la figure 3.5a).

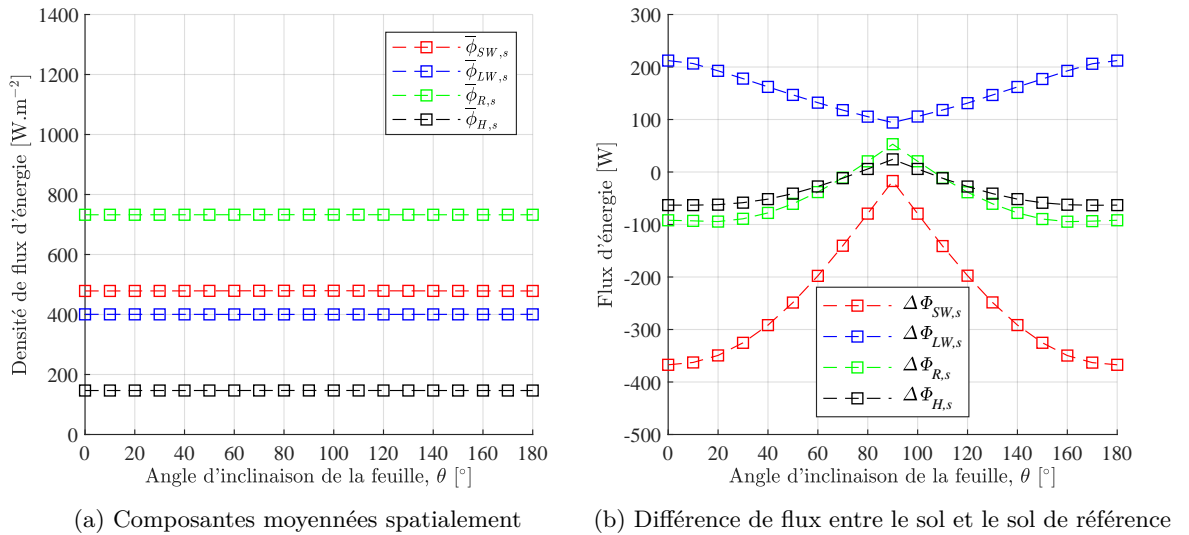


FIGURE 3.7 – Étude du bilan énergétique du sol pour différentes inclinaisons de la feuille.

3.2.3 Flux de chaleur sensible du système

La différence du flux de chaleur sensible total $\Delta\Phi_{H,total} = \Phi_{H,f} + \Delta\Phi_{H,s}$, qui comprend le flux de chaleur sensible émis par la feuille ainsi que la réduction due à l'ombrage (le flux de chaleur sensible évité parce qu'une partie du sol est à l'ombre), caractérise l'impact de la feuille sur la température de l'air, par rapport à la situation de référence. Ces flux sont tracés sur la figure 3.8. Le flux de chaleur sensible total est positif quel que soit l'angle d'inclinaison de la feuille, ce qui signifie qu'avec les paramètres de cette simulation, le système {sol + feuille} réchauffe toujours l'air par rapport à la situation de référence. Autrement dit, le rafraîchissement dû à l'ombre au sol ne compense pas le réchauffement causé par la feuille.

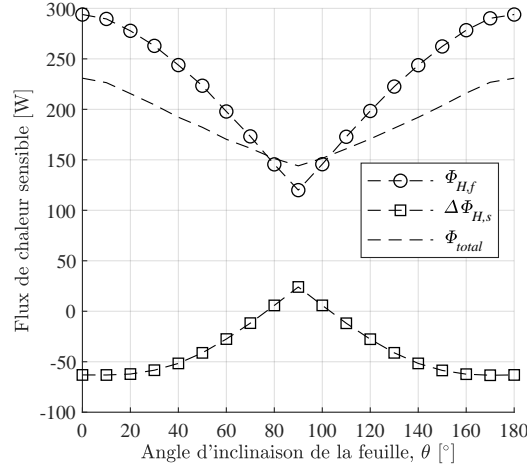


FIGURE 3.8 – Variation des flux de chaleur sensible de la feuille et du sol en fonction de l'inclinaison de la feuille.

3.2.4 Comparaison avec un modèle de bilan énergétique simplifié

Le calcul à la main permet-il de retrouver les valeurs obtenues par la simulation ? En considérant que la simulation donne des résultats corrects, nous cherchons à savoir si un modèle simplifié (faisant des hypothèses sur les échanges radiatifs, qui seront détaillées au fur et à mesure dans les paragraphes suivants) permettrait de faire des prédictions raisonnables.

Sol de référence

On peut commencer par effectuer le bilan énergétique du sol de référence (au soleil, en l'absence de feuille). Puisqu'il n'y a qu'une seule surface, on s'attend à retrouver exactement les résultats de la simulation. Le rayonnement solaire absorbé par le sol est égal au produit du rayonnement solaire incident par le coefficient d'absorption du sol dans le domaine des courtes longueurs d'ondes :

$$\phi_{SW,ref} = a_s \phi_{SW,ref}^{inc} = a_s (SW_{dir} + SW_{diff}) = 0.8 \cdot (540 + 60) = 480 \text{ W/m}^2 \quad (3.5)$$

De même, le rayonnement thermique absorbé vaut :

$$\phi_{LW,ref} = \varepsilon_s \phi_{LW,ref}^{inc} = \varepsilon_s LW_{diff} = 1 \cdot 400 = 400 \text{ W/m}^2 \quad (3.6)$$

Le bilan énergétique du sol de référence s'écrit :

$$\phi_{SW,ref} + \phi_{LW,ref} = \varepsilon_s \sigma T_{ref}^4 + h_s (T_{ref} - T_{air}) \quad (3.7)$$

où la seule inconnue est T_{ref} , que l'on peut calculer par itération, par exemple. Un schéma de Newton, en prenant comme approximation initiale de T_{ref} la température de l'air, permet, en requérant une erreur entre les deux membres de l'équation 3.7 inférieure à $0,001 \text{ W/m}^2$, d'obtenir en trois itérations comme valeur approchée :

$$T_{ref} = 337,20 \text{ K} \quad (3.8)$$

On obtient, en même temps que la température du sol, le rayonnement thermique émis par le sol ($\phi_R = \varepsilon_s \sigma T_{ref}^4$) et le flux de chaleur sensible ($\phi_H = h_s (T_{ref} - T_{air})$). Les valeurs obtenues par simulation et par le modèle analytique simplifié sont listées dans la table 3.4, qui indique des valeurs extrêmement proches. Ceci était attendu car le bilan énergétique implémenté dans HELIOS pour le sol (équation 3.2) est identique au nôtre en absence de conduction (équation 2.75).

	T_{ref}	$\phi_{SW,ref}$	$\phi_{LW,ref}$	ϕ_R	ϕ_H
simulation	337.16	479.4	400	732.7	146.7
modèle analytique	337.20	480	400	733.1	146.9

TABLE 3.4 – Comparaison des flux du bilan énergétique pour le sol de référence. La température est en kelvins, les densités de flux en W.m^{-2} .

Feuille

La feuille a deux faces. Pour ce qui est du rayonnement solaire, on peut considérer que la face supérieure absorbe uniquement le rayonnement provenant du ciel (le rayonnement direct absorbé diminuant avec l'angle d'incidence θ) et que la face inférieure absorbe le rayonnement solaire réfléchi par le sol. On considère que ce dernier terme est constant quelle que soit l'inclinaison de la feuille. De plus, on néglige l'ombre qu'elle fait sur le sol, ce qui permet pour calculer le rayonnement solaire réfléchi par le sol vers la feuille de se servir de la valeur du rayonnement incident calculée précédemment pour le sol de référence. Le rayonnement solaire absorbé par la feuille vaut donc :

$$\phi_{SW,f} = a_f \phi_{SW,f}^{inc} = a_f [SW_{dir} |\cos \theta| + SW_{diff} + r_s \phi_{SW,ref}^{inc}] \quad (3.9)$$

Le rayonnement thermique absorbé par la feuille a également deux composantes – on considère que le rayonnement incident sur la face supérieure vient du ciel et que celui sur la face inférieure correspond au rayonnement thermique émis par le sol, en négligeant encore l'effet de l'ombre sur la température du sol et en ne prenant pas en compte l'inclinaison de la feuille :

$$\phi_{LW,f} = \varepsilon_f \phi_{LW,f}^{inc} = \varepsilon_f (LW_{diff} + \varepsilon_s \sigma T_{ref}^4) \quad (3.10)$$

Le bilan énergétique de la feuille s'écrit :

$$\phi_{SW,f} + \phi_{LW,f} = 2\varepsilon_f \sigma T_f^4 + 2h_f (T_f - T_{air}) \quad (3.11)$$

ce qui permet, comme précédemment, d'obtenir la température de la feuille, le flux de rayonnement émis et le flux de chaleur sensible.

Ces valeurs sont données dans la table 3.5 dans le cas d'une feuille horizontale. L'écart en température entre la simulation et le modèle analytique vaut un peu plus d'1 K, ce qui correspond à un écart de la densité de flux de chaleur sensible de 14 W/m^2 – acceptable pour une surface de feuille de 1 m^2 mais qui peut s'avérer problématique pour une surface foliaire de plusieurs centaines de mètres carrés, ce que l'on peut retrouver pour un arbre. Par exemple, pour un arbre ayant une surface foliaire $S_{veg} = 500 \text{ m}^2$, l'erreur du flux de chaleur sensible serait égale à 7 kW.

	T_f	$\phi_{SW,f}$	$\phi_{LW,f}$	ϕ_R	ϕ_H
simulation	323.53	427	1085	1218	293.9
modèle analytique	324.65	432	1110	1235	307.8

TABLE 3.5 – Comparaison des flux du bilan énergétique pour la feuille horizontale ($\theta = 0^\circ$).

Lorsque l'on augmente l'angle d'inclinaison jusqu'à obtenir une feuille verticale, le modèle simplifié s'écarte un peu plus de la simulation comme on peut le voir sur la figure 3.9. Pour $\theta = 90^\circ$, la différence de température entre la simulation et notre calcul vaut 3 K. Cela est dû aux simplifications que nous avons faites sur les échanges radiatifs entre la feuille et son environnement dans notre modèle analytique (équations 3.9 et 3.10) lorsque l'inclinaison de la feuille varie – par exemple, les deux faces de la feuille verticale reçoivent du rayonnement thermique en provenance du ciel et du sol, ce que nous avons négligé dans notre modèle simplifié.

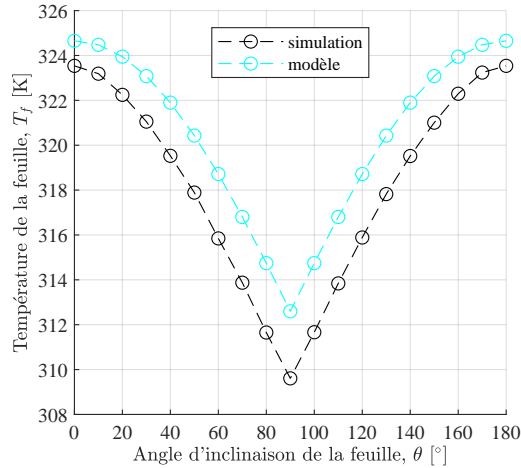


FIGURE 3.9 – Comparaison de la température de la feuille entre la simulation et le modèle simplifié.

Sol ombragé

On peut enfin essayer de calculer manuellement le gain dû à l'ombrage, c'est-à-dire la différence de flux de chaleur sensible entre le sol ombragé et le sol de référence. On parle ici du flux, en watts, agrégé sur la surface ombragée. On reprend pour cela le modèle détaillé au chapitre précédent (section 2.2.1) dont on rappelle brièvement le principe. On considère que la feuille permet uniquement d'atténuer le rayonnement solaire incident qui est direct et qu'elle ne modifie pas la quantité de rayonnement solaire diffus incident sur le sol. Cette atténuation vaut :

$$\Delta A = (1 - \tau_f) a_s SW_{dir} \quad (3.12)$$

On vérifie que l'atténuation est nulle si le sol n'absorbe pas le rayonnement solaire ($a_s = 0$, c'est-à-dire qu'il réfléchit tout le rayonnement courtes longueurs d'ondes), si la feuille est transparente au rayonnement solaire ($\tau_f = 1$) ou si le rayonnement solaire incident direct est nul. Cette atténuation a lieu sur la zone à l'ombre, de surface $S_{veg} |\cos \theta|$.

Enfin, la réduction du rayonnement absorbé par la surface conduit à une réduction du flux de rayonnement émis (en proportion $h_{r,s}/(h_{r,s} + h_s)$) et du flux de chaleur sensible (en proportion $h_s/(h_{r,s} + h_s)$).

Le gain dû à l'ombrage vaut finalement :

$$\Delta\Phi_{H,s} = -\frac{h_s}{h_{r,s} + h_s} (1 - \tau_f) a_s SW_{dir} S_{veg} |\cos \theta| \quad (3.13)$$

et est tracé sur la figure 3.10. L'écart entre la simulation et le modèle simplifié est compris entre 45 W lorsque la feuille est horizontale et 25 W lorsqu'elle est verticale ($\theta = 90^\circ$). Pour cet angle, la feuille ne projette pas d'ombre au sol, et on pourrait s'attendre à ce que le flux de chaleur sensible du sol soit similaire à celui du cas de référence (on s'attend donc à ce que $\Delta\Phi_{H,s}$ soit nul). En réalité, $\Delta\Phi_{H,s}$ est positif dans cette configuration car la feuille, à une température de 310 K, émet un rayonnement thermique (dans toutes les directions) dont une partie est absorbée par le sol – alors que ce surplus de rayonnement est absent du bilan énergétique du sol de référence.

Cet écart de 25 à 45 W peut sembler faible mais il faut le rapporter à une ombre au sol de 1 m^2 . L'erreur est de l'ordre du kilowatt pour une ombre au sol de 30 m^2 .

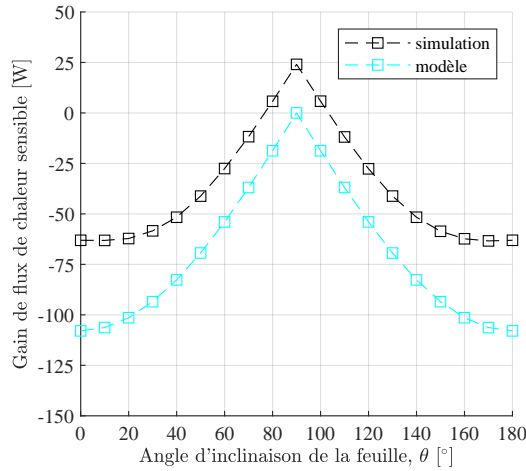


FIGURE 3.10 – Comparaison du gain dû à l'ombrage entre la simulation et le modèle simplifié.

Flux de chaleur sensible du système {sol + feuille}

La densité du flux de chaleur sensible émis par la feuille peut être estimée comme au chapitre précédent :

$$\phi_{H,f} = \frac{h_f}{h_{r,f} + h_f} (\phi_{abs} - 2\varepsilon_f \sigma T_{air}^4) \quad (3.14)$$

avec $h_{r,f} = 2\varepsilon_f \sigma T_{air}^3$. En développant le terme de rayonnement absorbé et en faisant ressortir la dépendance en θ :

$$\phi_{H,f} = \left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_f \left[a_f (SW_{diff} + r_s(SW_{dir} + SW_{diff})) + \varepsilon_f (LW_{diff} + \varepsilon_s \sigma T_{ref}^4) - 2\varepsilon_f \sigma T_{air}^4 \right] + \left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_f a_f SW_{dir} |\cos \theta| \quad (3.15)$$

On l'intègre ensuite sur la surface de la feuille pour obtenir un flux de chaleur sensible, en watts, afin de le comparer au gain de chaleur sensible dû à l'ombre :

$$\Phi_{H,f} = \phi_{H,f} S_f \quad (3.16)$$

On rappelle le gain dû à l'ombrage :

$$\Delta\Phi_{H,s} = - \left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_s (1 - \tau_f) a_s SW_{dir} S_{veg} |\cos \theta| \quad (3.17)$$

Par conséquent, la différence du flux de chaleur sensible total s'écrit :

$$\Delta\Phi_{H,total} = \Phi_{H,f} + \Delta\Phi_{H,s} = A + B |\cos \theta| \quad (3.18)$$

avec

$$A = \left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_f \left[a_f (SW_{diff} + r_s(SW_{dir} + SW_{diff})) + \varepsilon_f (LW_{diff} + \varepsilon_s \sigma T_{ref}^4) - 2\varepsilon_f \sigma T_{air}^4 \right] S_{veg} \quad (3.19)$$

et

$$B = \left[\left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_f a_f - \left(\frac{h}{\bar{h}}\right)_s (1 - \tau_f) a_s \right] SW_{dir} S_{veg} \quad (3.20)$$

Le coefficient A correspond au flux de chaleur sensible de la feuille lorsqu'elle est verticale ($\theta = 90^\circ$) : c'est le flux de chaleur sensible minimal émis par la feuille car c'est l'inclinaison où elle reçoit le moins de rayonnement de son environnement. Le signe de A indique si la feuille en position verticale réchauffe ($A > 0$) ou rafraîchit ($A < 0$) l'air. Si A est positif, alors la feuille réchauffe l'air quelle que soit son inclinaison. L'équation 3.19 indique que la feuille verticale rafraîchit l'air ($A < 0$) si elle reçoit peu de rayonnement de son environnement (solaire et thermique, provenant du ciel et du sol, capté par ses deux faces) et que la température de l'air est élevée.

Le coefficient B correspond à la variation du flux de chaleur sensible total lorsque θ passe de 0° à 90° . Il comprend un terme lié au surplus de chaleur sensible émise par la feuille lorsqu'elle capte un surplus de rayonnement et un terme lié à la chaleur sensible évitée par la partie du sol qui est à l'ombre. Lorsque B est positif, cela signifie que l'excédent de chaleur émise par la feuille en position horizontale est supérieur à l'économie de chaleur réalisée sur la zone ombragée du sol : par conséquent, le flux de chaleur sensible du système est maximal pour $\theta = 0^\circ$ et minimal pour $\theta = 90^\circ$. Au contraire, $\Delta\Phi_{H,s}$ est une fonction croissante de θ si B est négatif.

La figure 3.11 permet de récapituler les différents cas (on n'a pas tracé les cas où A ou B est nul), qui dépendent du signe de A , du signe de B et du signe de $|A| - |B|$. Le calcul de A et B pour la simulation permet de vérifier la tendance. L'application numérique donne : $A = 160 \text{ W}$ et $B = 60 \text{ W}$, donc $|A| > |B|$, $A > 0$ et $B > 0$ (courbe rouge en haut à gauche de la figure 3.11). On retrouve assez bien la tendance et les valeurs de la courbe en pointillés de la figure 3.8. Les équations 3.2.4, 3.19 et 3.20 permettent donc de se faire rapidement une idée du flux de chaleur sensible total d'un système de type « parasol » et indiquent sur quels paramètres jouer pour que ce flux soit le plus bas possible.

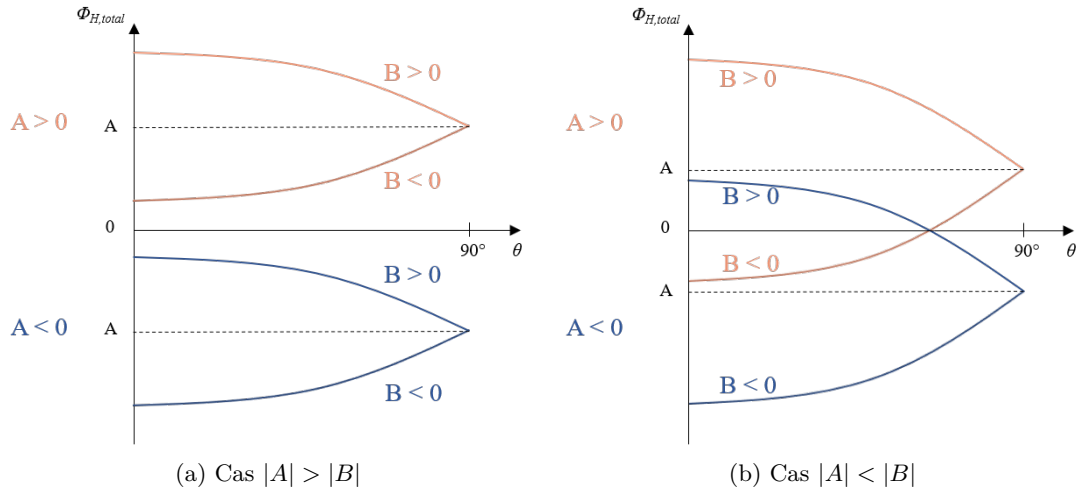


FIGURE 3.11 – Graphe de la différence du flux de chaleur sensible total en fonction de l'angle d'inclinaison de la feuille ; huit cas possibles.

3.3 Deuxième cas d'étude : le bilan énergétique d'un ensemble de feuilles superposées

Nous examinons maintenant une situation avec plusieurs feuilles superposées. La première feuille est placée à 1 mètre du sol. Ensuite, à chaque simulation, une feuille est empilée 10 cm au-dessus de la précédente, comme représenté à la figure 3.12. A la dixième simulation, la dixième feuille est donc à 2 mètres du sol, comme dans la simulation du cas d'étude 1. Toutes les variables d'entrée sont similaires au cas d'étude 1 (cf. table 3.3), et les feuilles sont toujours horizontales ($\theta = 0^\circ$).

Le bilan global, pour le système {feuilles + sol}, est représenté sur la figure 3.13. Lorsqu'il n'y a qu'une feuille, la situation s'apparente au cas d'étude 1, à ceci près que la feuille est un peu plus proche du sol (1 mètre ici, 2 mètres dans le cas 1) et donc reçoit une proportion plus importante de rayonnement émis par le sol à l'ombre (et une proportion moins importante de rayonnement émis par le sol au soleil). Le rayonnement absorbé par la feuille est donc légèrement plus faible, et par conséquent son flux de chaleur sensible et sa température également (les valeurs obtenues ici peuvent être comparées avec la table 3.5).

Le flux de chaleur sensible émis par les feuilles augmente à chaque feuille ajoutée. Après la troisième feuille, cette augmentation est constante (environ +30 W à chaque nouvelle

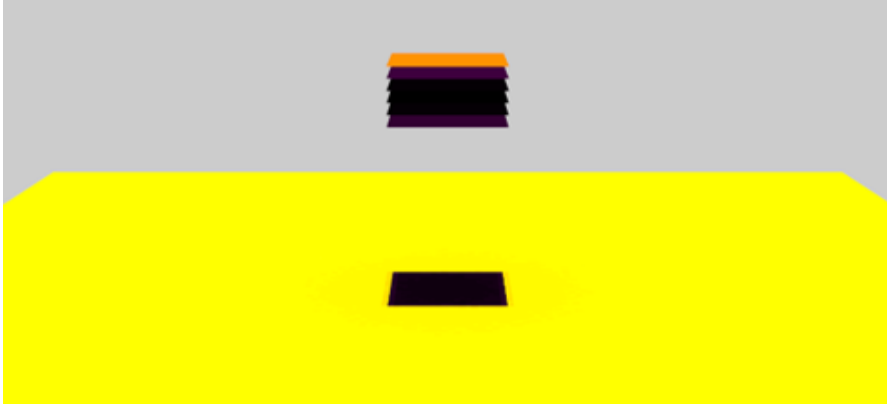


FIGURE 3.12 – Simulation avec 6 feuilles superposées. La feuille qui absorbe le plus de rayonnement est la feuille 6 (la feuille du haut sur l'image), suivie de la feuille 1 (la feuille du bas) puis de la feuille 5.

feuille d' 1 m^2). On remarque qu'à partir de trois feuilles, $\Delta\Phi_{H,sol}$ reste constant : cela signifie qu'au-delà de trois feuilles, l'ajout de feuilles supplémentaires ne renforce pas l'effet de l'ombrage. En effet, d'après la table 3.3, la transmissivité des feuilles dans la plage de longueurs d'ondes correspondant au rayonnement solaire est $\tau_{SW,f} = 0.2$, ce qui implique que la proportion de rayonnement solaire direct qui atteint le sol lorsqu'il est protégé par trois feuilles vaut $\tau_{SW,f}^3 = 0.8\%$ du rayonnement solaire direct incident ($SW_{dir} = 540$). Trois feuilles suffisent donc à empêcher la quasi-totalité du rayonnement solaire direct d'atteindre le sol.

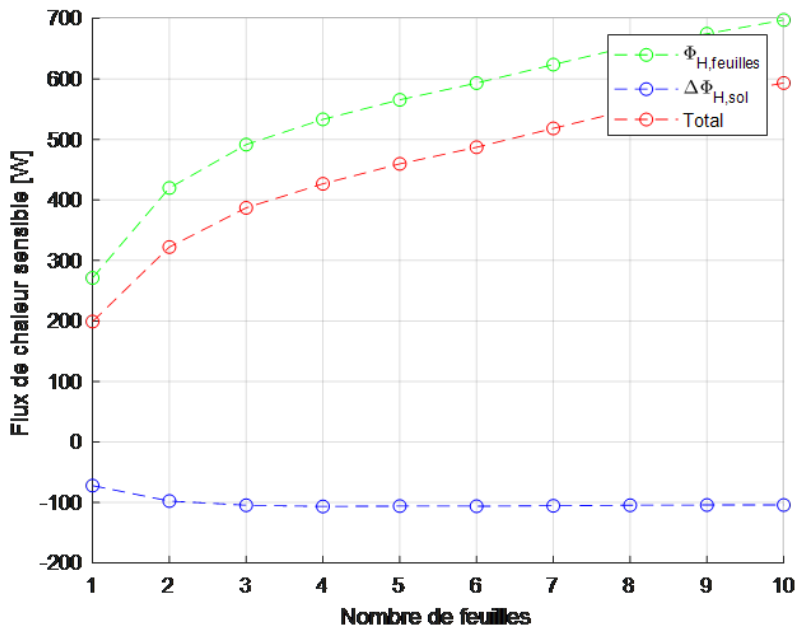


FIGURE 3.13 – Composantes du flux de chaleur sensible du système en fonction du nombre de feuilles superposées. Comme $|\Delta\Phi_{H,sol}|$ est inférieur à $\Phi_{H,feuilles}$, le flux de chaleur sensible total du système est positif : il réchauffe l'air.

La figure 3.14 permet de voir l'évolution de la température des feuilles lorsqu'on en ajoute une à la pile. Lorsqu'elle est toute seule, la feuille 1 (courbe bleue) a une température de 323 K. Lorsqu'elle est protégée par la feuille 2 (courbe orange), sa température baisse de 5 K. Lorsqu'on superpose une troisième feuille (courbe jaune), sa température baisse encore de 4 K. Après l'ajout de la feuille 4, les ajouts successifs de feuilles modifient peu sa température, comme expliqué précédemment. On remarque que les feuilles qui ont les températures les plus élevées sont systématiquement la feuille du haut (qui reçoit un maximum de rayonnement solaire) et la feuille du bas (qui reçoit le plus de rayonnement solaire réfléchi par le sol ainsi que le plus de rayonnement thermique émis par le sol). Toutes les feuilles au milieu de ce « sandwich » sont protégées du rayonnement solaire direct. Elles reçoivent majoritairement le rayonnement émis par les feuilles voisines. Pour la dernière simulation, les 6 feuilles du milieu ont une température proche de celle de l'air (leur température est comprise entre 302 K et 304 K).

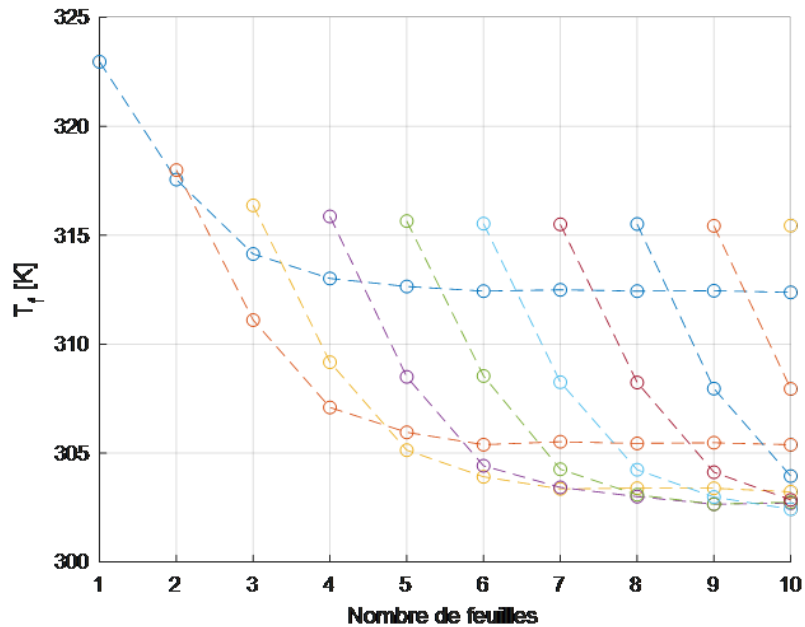


FIGURE 3.14 – Températures des feuilles.

Les observations que nous avons pu faire sur ce cas d'étude numéro 2 ont une conséquence pratique importante : il semble difficile, d'un point de vue expérimental, de déduire un indicateur du nombre de feuilles d'un feuillage (par exemple, l'indice de surface foliaire ²) en mesurant la différence de rayonnement absorbé (ou de température, ou de flux de chaleur sensible...) entre un sol à l'ombre et un sol ensoleillé car au-delà d'un certain nombre de feuilles on arrive « à saturation » : on peut ajouter des feuilles à la pile (et donc augmenter ou baisser – selon les conditions de rayonnement et de température de l'air – le terme $\Phi_{H,feuilles}$ autant que l'on souhaite), sans que cela ne se ressente (et soit mesurable) au niveau du sol.

2. L'indice de surface foliaire (en anglais *Leaf Area Index*) indique la surface de feuilles par unité de surface de sol. Il est sans dimension, ou parfois explicité en « mètres carrés de feuilles par mètre carré de sol ».

3.4 Troisième cas d'étude : une place ombragée par un arbre

Dans cet exemple, nous étudions cette fois un arbre en 3D faisant de l'ombre au sol. L'arbre est un noyer provenant d'une bibliothèque de HELIOS (voir figure 3.3(b)), dont le feuillage forme approximativement une boule de 8 m de diamètre. Le sol est un carré de dimensions 20 m x 20 m ayant les mêmes propriétés que dans les cas d'étude précédents. Les autres variables d'entrée de la simulation sont données dans la table 3.6. En particulier, on considère que le soleil est à la verticale de l'arbre. Afin d'évaluer l'effet de l'ombre et de la transpiration des feuilles sur la température de l'air, nous comparons trois simulations : (a) avec un arbre transpirant ($E = 45 \text{ kg/h}$), (b) avec un arbre non-transpirant ($E = 0 \text{ kg/h}$) et (c) sans arbre.

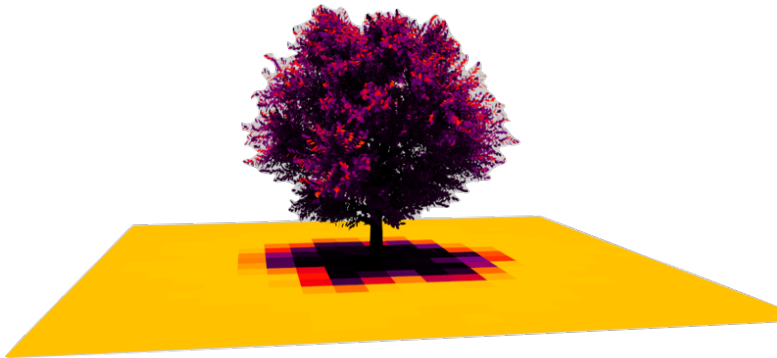


FIGURE 3.15 – Géométrie de la simulation : un arbre en 3D (noyer) placé au centre d'un carré de 20 m de côté.

3.4.1 Flux de chaleur sensible émis par l'arbre non-transpirant

Nous avons vu dans le chapitre précédent (cf. équation 2.85) que le flux $\Phi_{H_{arbre}}^{\circ}$ était difficile à estimer analytiquement. Pour commencer, il dépend du nombre de feuilles de l'arbre. Ensuite, il faut soit réussir à réaliser un bilan énergétique global du feuillage, soit réaliser un grand nombre de bilans : un bilan énergétique par feuille, chaque feuille absorbant un flux de rayonnement différent, en fonction de son orientation, de sa position dans le feuillage, etc. D'autres conditions environnementales varient, en conditions réelles : la température de l'air au voisinage de la feuille, l'humidité de l'air, la vitesse de l'air (qui a un impact sur le coefficient de transfert thermique par convection)... Ces conditions environnementales sont homogènes dans tout le domaine, dans cette simulation, de sorte que les différences observées dans les composantes du bilan énergétique de chaque feuille sont essentiellement dues au rayonnement reçu par la feuille. Les différences entre les feuilles sont donc causées par le forçage radiatif (solaire et infrarouge) que nous imposons et par la géométrie de l'arbre et de la scène urbaine (ici, un sol uniquement).

Le flux de chaleur sensible émis par l'arbre non-transpirant est le résultat de la simulation (b). Dans cette simulation, nous avons fixé le taux d'évaporation à zéro, ce qui correspond à un flux de chaleur latente nul. L'arbre est donc équivalent à un parasol fictif, ayant la même géométrie que l'arbre, fait d'une étoffe possédant les propriétés thermo-radiatives des feuilles et ne pouvant pas transpirer. Ce flux vaut dans notre cas : $\Phi_{H_{arbre}}^{\circ} = 11,3 \text{ kW}$.

PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE LA FEUILLE		
Donnée	Valeur	Description
$\rho_{SW,f}$	0.2	Réfectivité de la feuille dans le domaine des CLO
$\tau_{SW,f}$	0.2	Transmissivité de la feuille dans le domaine des CLO
$\rho_{LW,f}$	0.01	Réfectivité de la feuille dans le domaine des GLO
$\tau_{LW,f}$	0.01	Transmissivité de la feuille dans le domaine des GLO
PROPRIÉTÉS RADIATIVES DES BRANCHES ET DU TRONC		
Donnée	Valeur	Description
$\rho_{SW,b}$	0.2	Réfectivité du sol dans le domaine des CLO
$\tau_{SW,b}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des CLO
$\rho_{LW,b}$	0	Réfectivité du sol dans le domaine des GLO
$\tau_{LW,b}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des GLO
PROPRIÉTÉS RADIATIVES DU SOL		
Donnée	Valeur	Description
$\rho_{SW,s}$	0.2	Réfectivité du sol dans le domaine des CLO
$\tau_{SW,s}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des CLO
$\rho_{LW,s}$	0	Réfectivité du sol dans le domaine des GLO
$\tau_{LW,s}$	0	Transmissivité du sol dans le domaine des GLO
SOURCE DE RAYONNEMENT		
Donnée	Valeur	Description
β	90	Angle d'élévation du soleil par rapport à l'horizon
SW_{dir}	800	Rayonnement solaire direct
SW_{diff}	0	Rayonnement solaire diffus
LW_{diff}	400	Rayonnement thermique diffus
VARIABLES DU BILAN ÉNERGÉTIQUE		
Donnée	Valeur	Description
T_{air}	300	Température de l'air
$2h_f$	11.8	Coefficient d'échange thermique convectif feuille/air
h_b	3.95	Coefficient d'échange thermique convectif branches/air
h_s	3.95	Coefficient d'échange thermique convectif sol/air
g_s	0.1	Conductance stomatale

TABLE 3.6 – Variables d'entrée des simulations.

Pour donner un ordre de grandeur, cela correspond à la puissance de quelques radiateurs électriques dans une maison³.

3.4.2 Effet de l'évaporation

Nous comparons le flux de chaleur sensible émis par les feuilles entre la simulation (a) « arbre transpirant » et la simulation (b) « arbre non-transpirant » afin d'isoler l'effet de l'évaporation. La masse d'eau globale évaporée par l'arbre en une heure vaut $E_{tot} = 45 \text{ kg/h}$. Ce taux d'évaporation est converti en d'autres unités dans la table 3.7, pour comparaison avec des résultats expérimentaux ou d'autres flux d'énergie thermique. Les facteurs pour réaliser ces conversions sont une enthalpie massique de vaporisation de l'eau $L_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$, une masse molaire de l'eau $M_{H_2O} = 18 \text{ g/mol}$ et une surface foliaire totale $S_{veg} = 573 \text{ m}^2$.

$E_{tot} \text{ (kg h}^{-1}\text{)}$	$E_{tot} \text{ (g s}^{-1}\text{)}$	$\Phi_E \text{ (kW)}$	$\phi_E \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$E \text{ (mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$
45	12.5	28	50	1.21

TABLE 3.7 – Taux d'évaporation de l'arbre (par heure et par seconde), flux de chaleur latente de l'arbre, densité de flux de chaleur latente moyenne émise par les feuilles et taux d'évaporation surfacique moyen.

Les résultats des deux simulations sont retranscrits dans la table 3.8. Lorsque le flux de chaleur latente Φ_E passe de 0 à 29 kW, le flux de chaleur sensible Φ_H émis par l'arbre passe de 11,3 kW à $-2,7 \text{ kW}$: l'effet de l'évaporation vaut donc $\Delta\Phi_{H,evap} = -14 \text{ kW}$. En valeur absolue, il s'agit environ de la moitié de $\Delta\Phi_E$ car le ratio $\frac{h_f}{h_{r,f} + h_f}$ est proche de 0.5 (le coefficient de transfert thermique par convection h_f est proche de $6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, cf table 3.6, qui est la valeur d'un coefficient de transfert par rayonnement linéarisé autour de $T = 300 \text{ K}$).

	$\Phi_H \text{ (kW)}$	$\Phi_E \text{ (kW)}$	$\phi_H \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$\phi_E \text{ (W m}^{-2}\text{)}$
(a) Feuilles avec transpiration	-2.7	29	-4.7	50
(b) Feuilles sans transpiration	11.3	0	20	0

TABLE 3.8 – Comparaison des simulations (a) et (b) : effet de l'évaporation. Les flux Φ_H et Φ_E sont sommés sur la surface totale des feuilles de l'arbre.

Le flux de chaleur latente est assez important, ici, pour que l'arbre rafraîchisse l'air de manière absolue ($\Phi_H < 0$). Il est donc équivalent, dans cette simulation, à un petit climatiseur. Cela signifie qu'en moyenne, les températures des feuilles sont inférieures à la température de l'air, bien que certaines feuilles, au sommet et en périphérie de l'arbre, reçoivent beaucoup de rayonnement et aient une température supérieure à celle de l'air. La figure 3.16 illustre cette variabilité en indiquant les densités de flux de chaleur sensible prises par les feuilles de l'arbre transpirant.

3. La puissance requise pour maintenir un logement parisien de 100 m^2 et 250 m^3 « avec une isolation normale » à 19°C quand il fait 0°C dehors est ainsi de 10 kW d'après le site internet de *Marie Claire Maison*.

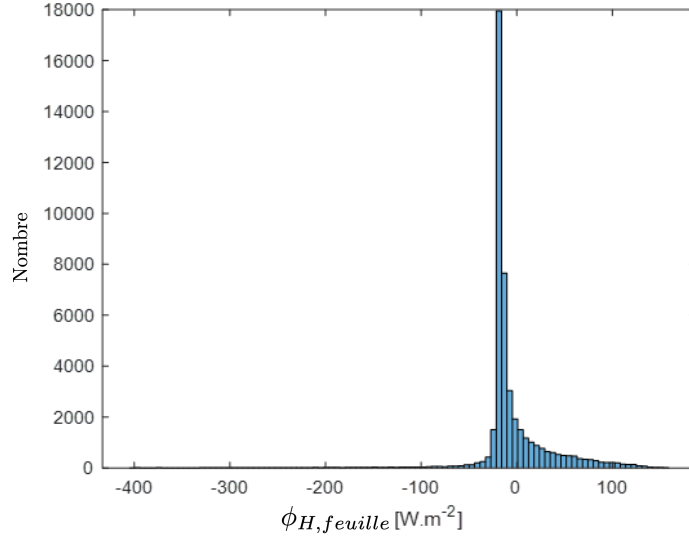


FIGURE 3.16 – Nombre de feuilles de l’arbre transpirant ayant une valeur donnée de ϕ_H . En l’absence du flux de chaleur latente, toutes les températures des feuilles seraient plus élevées et cet histogramme de fréquences serait décalé vers la droite.

3.4.3 Effet de l’ombre au sol

Nous comparons le flux de chaleur sensible émis par le sol entre la simulation (b) « arbre non-transpirant » et la simulation (c) « sans arbre » afin d’isoler l’effet de l’ombrage. Le sol a une surface totale de 400 m^2 et il est discrétisé en 400 tuiles de 1 m^2 chacune. Les résultats des deux simulations sont retranscrits dans la table 3.9.

Lorsque l’arbre est ajouté sur la place, le flux de chaleur sensible Φ_H passe de $78,4 \text{ kW}$ à $66,8 \text{ kW}$: l’effet de l’ombrage vaut donc $\Delta\Phi_{H,ombre} = -11,6 \text{ kW}$. On peut obtenir une estimation de cette valeur à la main en calculant $-\left(\frac{h}{\tilde{h}}\right)_s \Delta\Phi_{SW_{abs}}$, c’est-à-dire en négligeant les différences de rayonnement thermique induits par la présence de l’arbre⁴ et en prenant une valeur moyenne de h_r pour le sol :

$$-\left(\frac{h}{\tilde{h}}\right)_s \Delta\Phi_{SW_{abs}} = -\frac{3.95}{3.95 + 7}(256 - 219) = -13,3 \text{ kW} \quad (3.21)$$

D’après la table 3.9, l’arbre permet au sol d’absorber 37 kW de rayonnement solaire en moins, et ce sur une surface de 79 m^2 (ombre projetée au sol⁵). Le sol ombragé absorbe donc 170 W/m^2 en moyenne, contre 640 W/m^2 pour le sol au soleil. Autrement dit, dans la zone à l’ombre, l’arbre permet d’abattre environ trois quarts du rayonnement solaire.

4. D’après la section 2.2.1, $\Delta\Phi_{H,ombre}(t) = -\frac{h}{\tilde{h}}\Delta\Phi_{abs}(t)$ car la conduction dans le sol n’est pas prise en compte. Cela équivaut à considérer que le sol a un nombre de Biot infini : cas $Bi = \infty$ sur la figure 2.12b. La différence du flux de rayonnement absorbé $\Delta\Phi_{abs}$ comprend la différence de rayonnement solaire absorbé par le sol $\Delta\Phi_{SW_{abs}}$ et la différence de rayonnement thermique absorbé par le sol (dans la simulation où l’arbre est présent, le sol reçoit un rayonnement thermique supplémentaire qui est celui émis par l’arbre). On néglige cette dernière ici pour présenter une estimation simplifiée de $\Delta\Phi_{H,ombre}$.

5. Pour indication, l’indice de surface foliaire, qui indique la surface de feuilles par unité de surface de sol, vaut : $LAI = 573/79 = 7.3$.

	Φ_H (kW)	$\Phi_{SW_{abs}}$ (kW)	ϕ_H (W m ⁻²)	$\phi_{SW_{abs}}$ (W m ⁻²)
(b) Sol avec arbre n.-t.	66.8	219	167	548
(c) Sol sans arbre	78.4	256	196	640

TABLE 3.9 – Comparaison des simulations (b) et (c) : effet de l’ombrage. Les flux Φ_H et $\Phi_{SW_{abs}}$ sont sommés sur la surface totale du sol.

3.4.4 Bilan

En sommant les deux premiers termes étudiés, $\Phi_{H_{arbre}}^\circ$ et $\Delta\Phi_{H,evap}$, nous avons vu que l’arbre tout seul rafraîchissait l’air de manière absolue dans cette simulation :

$$\Phi_{H_{arbre}}^\circ + \Delta\Phi_{H,evap} = \Phi_{H_{arbre}} < 0$$

En ajoutant le troisième terme, nous aboutissons à l’effet thermique global de l’arbre sur la température de l’air, relativement à la situation de référence (sol sans arbre) :

$$\Delta\Phi_{H,tot} = \Phi_{H_{arbre}}^\circ + \Delta\Phi_{H,evap} + \Delta\Phi_{H,ombre} = 11.3 - 14.0 - 11.6 = -14.3 \text{ kW}$$

3.4.5 Variations des paramètres d’entrée

Nous présentons succinctement la sensibilité du modèle à quelques paramètres d’entrée.

Taille du maillage du sol

Le sol a été discrétisé en carrés plus petits, en divisant la longueur de chaque carré par 2, 4 puis 8 (voir figure 3.17). L’impact sur les résultats est négligeable (pour un temps de calcul plus long et un stockage mémoire plus important). Pour caractériser l’effet de l’arbre sur la température de l’air, il semble donc superflu de raffiner le maillage du sol. En revanche, si l’on veut étudier l’effet de l’arbre sur le confort thermique d’une personne sous l’arbre, il peut être nécessaire d’avoir un maillage fin dans cette zone afin que les échanges de rayonnement infrarouge y soient simulés plus précisément.



FIGURE 3.17 – Le sol est découpé en tuiles de 12,5 cm de côté.

Rayonnement solaire incident

Trois valeurs de rayonnement solaire incident ont été testées afin de voir comment ce paramètre impacte l’effet de l’arbre sur la température de l’air et modifie les contributions

relatives de l'ombre et de l'évaporation. Un rayonnement solaire diffus de 100 W/m^2 a également été appliqué à chaque simulation. Les résultats sont synthétisés dans la table 3.10 et sur la figure 3.18.

	$\Phi_{H,arbre}^\circ$ (kW)	$\Delta\Phi_{H,evap}$ (kW)	$\Delta\Phi_{H,ombre}$ (kW)	$\Delta\Phi_{H,tot}$ (kW)
$SW_{dir} = 400$	8.27	-14.3	-4.97	-11.0
$SW_{dir} = 600$	13.2	-15.3	-7.69	-9.85
$SW_{dir} = 800$	17.9	-16.2	-10.3	-8.59

TABLE 3.10 – Contributions, pour différentes valeurs d'entrée du rayonnement solaire direct incident SW_{dir} (en W.m^{-2}), (1) du flux de chaleur sensible émis par l'arbre non-transpirant $\Phi_{H,arbre}^\circ$, (2) de la réduction de chaleur sensible due à l'évaporation $\Delta\Phi_{H,evap}$ et (3) de la réduction de chaleur sensible due à l'ombre $\Delta\Phi_{H,ombre}$ au rafraîchissement relatif $\Delta\Phi_{H,tot}$ entre la situation avec arbre et la situation sans arbre.

On remarque qu'une augmentation du rayonnement solaire incident conduit à une augmentation, en valeur absolue, du terme 2 : l'effet de l'évaporation (sur la réduction du flux de chaleur sensible émis par les feuilles). Ceci s'explique par le fait que la feuille a une quantité d'énergie disponible plus importante et qu'elle utilise une partie de cette énergie pour évaporer plus d'eau. Dans notre modèle, l'évaporation à la surface des feuilles a été traité de manière basique et il n'y a pas d'effet de seuil qui régule l'ouverture des stomates et les ferme pour une quantité de rayonnement absorbé trop importante, par exemple, comme dans le modèle ISBA de Noilhan et Planton (1989) employé par TEB-GREENROOF (De Munck, 2013).

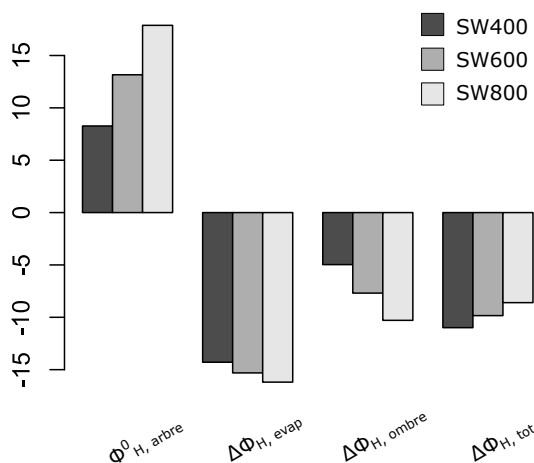


FIGURE 3.18 – Comparaison des résultats pour trois valeurs du rayonnement solaire direct incident. L'effet de l'arbre sur la température de l'air, relativement à la situation de référence, est : $\Delta\Phi_{H,tot} = \Phi_{H,arbre}^\circ + \Delta\Phi_{H,evap} + \Delta\Phi_{H,ombre}$. Les flux sont en kW.

Une augmentation du rayonnement solaire incident conduit aussi à une augmentation,

en valeur absolue, du terme 3 : l'effet de l'ombrage (sur la réduction du flux de chaleur sensible émis par le sol). Cela est dû au fait que plus le sol reçoit de rayonnement, plus il est chaud, et plus il devient « intéressant » de l'ombrager pour éviter qu'il ne réchauffe l'air.

En revanche, une augmentation du rayonnement solaire incident diminue le rafraîchissement total causé par l'arbre. Cela est dû au terme 1, le flux de chaleur sensible émis par l'arbre, qui augmente avec le rayonnement solaire incident (puisque l'arbre absorbe plus de rayonnement), cette augmentation étant plus importante que les réductions cumulées des termes 2 et 3.

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations numériques au moyen de l'interface HELIOS, qui est adapté à l'étude de transferts par rayonnement au sein d'une végétation et permet de simuler finement les échanges radiatifs entre un très grand nombre de surfaces définies explicitement en 3D.

Un premier cas d'étude (cas d'un parasol), que nous avons qualifié d'élémentaire, composé d'un sol et d'une unique feuille, a été l'occasion de prendre en main ce code et de comparer les résultats de la simulation à ceux obtenus par un modèle analytique simplifié. Pour la feuille par exemple, l'écart en température minimal entre la simulation et le modèle analytique vaut un peu plus d'1 K, ce qui correspond à un écart de la densité de flux de chaleur sensible de 14 W/m^2 – acceptable pour une surface de feuille de 1 m^2 mais qui peut s'avérer problématique pour une surface foliaire de plusieurs centaines de mètres carrés, ce que l'on peut retrouver pour un arbre. Par exemple, pour un arbre ayant une surface foliaire $S_{veg} = 500 \text{ m}^2$, l'erreur du flux de chaleur sensible serait égale à 7 kW, ce qui n'est pas négligeable. En considérant que les résultats de la simulation sont corrects, l'erreur est due aux simplifications des échanges radiatifs que nous avons effectuées dans notre modèle. Nous avons ainsi pu voir que les résultats étaient très sensibles à l'inclinaison de notre feuille-parasol.

Un deuxième cas d'étude a consisté à analyser le bilan énergétique d'un ensemble de feuilles superposées. Il a permis de montrer que la densité de flux de chaleur sensible émis par une feuille peut varier fortement selon sa position dans le feuillage et qu'assigner une valeur globale au flux de chaleur sensible émis par le feuillage dans notre modèle analytique peut sembler illusoire ou arbitraire car ce flux dépend de la géométrie de la végétation étudiée (à commencer par le nombre de feuilles qui la composent). Ceci motive notre intérêt pour cet outil numérique qui représente la géométrie 3D de l'arbre jusqu'à l'échelle de la feuille. Au passage, nous avons vu que trois feuilles superposées suffisaient à empêcher la quasi-totalité du rayonnement solaire direct d'atteindre le sol.

Un troisième cas d'étude a permis d'étudier l'effet d'un arbre au centre d'une place sur la température de l'air, en utilisant la décomposition des flux décrite au chapitre précédent, afin de dissocier le rayonnement absorbé par la géométrie de l'arbre, de la transpiration des feuilles et de l'ombre faite au sol. Dans l'exemple traité, l'arbre, d'une surface foliaire d'environ 600 m^2 , rafraîchit l'air comme un climatiseur d'une puissance

de 14 kW à condition qu'il évapore 45 litres d'eau par heure. Le rafraîchissement devient nul en l'absence d'eau, c'est-à-dire que le flux de chaleur sensible évité grâce à l'ombre au sol est égal au flux de chaleur sensible émis par l'arbre (dont les feuilles ont alors une température moyenne supérieure à celle de l'air). Si la valeur du rayonnement solaire incident est augmentée, le rafraîchissement total causé par l'arbre diminue.

Nous identifions plusieurs limites à cette étude et indiquons des pistes de travail ultérieur :

1) Nos simulations donnent comme résultats des puissances thermiques, évaluées à un instant t . Il serait intéressant d'effectuer des simulations qui représenteraient une journée entière, par exemple, où les paramètres d'entrée seraient des séries temporelles donnant des conditions de rayonnement, de température de l'air, de résistance stomatale, etc. réalistes, afin d'analyser l'effet thermique de l'arbre au cours du temps. Cela permettrait en outre d'étudier le taux d'évaporation de l'arbre au cours de la journée, qui est une donnée peu facile à obtenir expérimentalement, comme nous allons le voir dans la suite du manuscrit. Baisser numériquement ce taux d'évaporation permettrait ensuite d'étudier le potentiel de rafraîchissement de l'arbre en cas de vague de chaleur, lorsque l'eau du sol vient à manquer.

2) Toujours dans l'optique de réaliser des simulations journalières, le transfert par conduction dans le sol pourrait être ajouté au modèle numérique, afin d'affiner le terme de réduction de flux de chaleur sensible par ombrage au sol et d'étudier le relargage pendant la nuit de la chaleur stockée pendant le jour.

3) Nos simulations concernent le flux de chaleur sensible émis par les surfaces, donc l'énergie thermique transférée à l'air. D'après ces simulations, cet effet ne semble pas très important : dans les conditions environnementales étudiées, un arbre ne semble pas rafraîchir ou réchauffer beaucoup l'air. En revanche, il est très efficace pour faire de l'ombre, localement : son effet sur le confort thermique extérieur pourrait donc être étudié au moyen de cet outil, en plaçant dans le domaine de petites sphères noires qui représenteraient des thermomètres à globe noir, et dont on pourrait effectuer le bilan énergétique. HELIOS ne permet pas d'obtenir le champ de température de l'air autour de l'arbre mais pourrait ainsi être utilisé pour afficher des valeurs ponctuelles de confort thermique autour de l'arbre, en se servant par exemple de l'indicateur UTCI qui se base sur le bilan énergétique d'une personne (voir annexe A).

Dans ce chapitre, nous avons fixé une valeur du paramètre *résistance stomatale*, qui pilote le flux de chaleur latente, de manière assez arbitraire. Nous souhaitons avoir plus de recul sur la magnitude du flux de chaleur latente au moyen de mesures expérimentales. Le chapitre suivant décrit le dispositif expérimental que nous avons construit pour effectuer cette mesure.

Bibliographie

- Eleftheria ALEXANDRI et Phil JONES : Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8) :2835–2849, 2007.
- Brian BAILEY : Helios documentation v.1.1.0. <https://baileylab.ucdavis.edu/software/helios/>, 2019a. Dernier accès : 04-16-2020.
- Brian N BAILEY : A reverse ray-tracing method for modelling the net radiative flux in leaf-resolving plant canopy simulations. *Ecological Modelling*, 368 :233–245, 2018.
- Brian N BAILEY : Helios : A scalable 3d plant and environmental biophysical modeling framework. *Frontiers in plant science*, 10, 2019b.
- R J_ BOUCHET : Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. 1963.
- Thierry BOULARD, Alain BAILLE et Florence LE GALL : Etude de différentes méthodes de refroidissement sur le climat et la transpiration de tomates de serre. 1991.
- Gaylon S CAMPBELL et John NORMAN : *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Elena Palomo DEL BARRIO : Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and buildings*, 27(2) :179–193, 1998.
- Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY, V DEMAREZ, V PINEL et F ZAGOLSKI : Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-d vegetation canopies. *Remote sensing of environment*, 58(2) :131–156, 1996.
- Ghislain GOSSE : Evapotranspiration et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide. 1976.
- Ghislain GOSSE, Claude VARLET-GRANCHER, Raymond BONHOMME, Michel CHARTIER, Jean-Michel ALLIRAND et Gilles LEMAIRE : Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. 1986.
- Christine Susan Betham GRIMMOND, Matthew BLACKETT, MJ BEST, J BARLOW, JJ BAIK, SE BELCHER, SI BOHNENSTENGEL, I CALMET, Fei CHEN, A DANDOU *et al.* : The international urban energy balance models comparison project : first results from phase 1. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(6) :1268–1292, 2010.
- Christian A GUEYMARD : Rest2 : High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation–validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, 82(3) :272–285, 2008.

- Muhammad IQBAL : *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 2012.
- Dan M KURN, Sarah E BRETZ, Benson HUANG et Hashem AKBARI : The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling. Rapport technique, Lawrence Berkeley Lab., CA (United States), 1994.
- Renato M LAZZARIN, Francesco CASTELLOTTI et Filippo BUSATO : Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37 (12) :1260–1267, 2005.
- Sang-Hyun LEE et Soon-Ung PARK : A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1) :73–102, 2008.
- A LEMONSU, V MASSON, L SHASHUA-BAR, E ERELL et D PEARLMUTTER : Inclusion of vegetation in the town energy balance model for modelling urban green areas. 2012.
- A LHOMME, Jean-Paul et Perrier : Les régimes transitoires en microclimatologie : Analyse théorique. *J. Rech. Atmos*, 17 :121–137, 1983.
- Edward Thornton LINACRE : Determinations of the heat transfer coefficient of a leaf. *Plant physiology*, 39(4) :687, 1964.
- Laurent MALYS, Marjorie MUSY et Christian INARD : A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment*, 73 :187–197, 2014.
- Lento MANICKATHAN : *Impact of vegetation on urban microclimate*. Thèse de doctorat, ETH Zurich, 2019.
- Lento MANICKATHAN, Thijs DEFRAEYE, Jonas ALLEGRI, Dominique DEROME et Jan CARMELIET : Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and forest meteorology*, 248 :259–274, 2018.
- FI MORTON : Evaporation researcha critical review and its lessons for the environmental sciences. *Critical reviews in environmental science and technology*, 24(3) :237–280, 1994.
- J NOILHAN et S PLANTON : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3) :536–549, 1989.
- Howard Latimer PENMAN : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032) :120–145, 1948.
- Christophe PRADAL, Samuel DUFOUR-KOWALSKI, Frédéric BOUDON, Christian FOURNIER et Christophe GODIN : Openlea : a visual programming and component-based software platform for plant modelling. *Functional plant biology*, 35(10) :751–760, 2008.
- AJ PRATA : A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(533) :1127–1151, 1996.

- David J SAILOR : A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 40(8) :1466–1478, 2008.
- Mohamed Hefny SALIM, K Heinke SCHLÜNZEN et David GRAWE : Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas : should we care? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144 :84–95, 2015.
- Stanislaus J SCHYMANSKI, Dani OR et Maciej ZWIENIECKI : Stomatal control and leaf thermal and hydraulic capacitances under rapid environmental fluctuations. *PloS one*, 8(1), 2013.
- Hervé SINOQUET, Xavier LE ROUX, Boris ADAM, Thierry AMEGLIO et François-Alain DAUDET : Ratp : a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies : application to an isolated tree crown. *Plant, Cell & Environment*, 24(4) :395–406, 2001.
- Hideki TAKEBAYASHI et Masakazu MORIYAMA : Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and environment*, 42 (8) :2971–2979, 2007.
- O TETENS : Uber einige meteorologische begriffe. *Zeitschrift fur Geophysik*, 1930.
- Jason WEBER et Joseph PENN : Creation and rendering of realistic trees. *In Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 119–128, 1995.
- H Arthur WOODS, Marc SAUDREAU et Sylvain PINCEBOURDE : Structure is more important than physiology for estimating intracanalopy distributions of leaf temperatures. *Ecology and evolution*, 8(10) :5206–5218, 2018.

Chapitre 4

Proposition d'un dispositif expérimental

Nous avons présenté dans les chapitres précédents les rôles de l'évaporation et de l'ombrage au sol dans la réduction du flux de chaleur sensible émis par un système {végétation + sol} vers l'air. Nous décrivons dans ce chapitre un dispositif expérimental permettant de quantifier ces contributions. Si le flux d'évapotranspiration est souvent obtenu indirectement par fermeture du bilan énergétique, nous proposons ici une mesure directe de celui-ci. Plusieurs techniques permettent cette mesure :

- la mesure par scintillométrie, qui est tout à fait adaptée aux grandes surfaces, de type toiture végétalisée par exemple (Diaz, 2022), mais semble peu appropriée dans le cas d'un dispositif expérimental que nous souhaitons de faibles dimensions ;
- la mesure par lysimétrie (Allen *et al.*, 1991), qui permet de réaliser des bilans hydriques de sols, mais reste un dispositif onéreux ;
- la mesure par chambre d'évapotranspiration, directe et facile de mise en œuvre, adaptée principalement à de petites surfaces de sol de l'ordre du mètre carré, pour celle du Cerema (Bouzouidja *et al.*, 2018), ou même de quelques cm² pour une pince à photosynthèse.

La pesée nous semble être une méthode adéquate pour obtenir la transpiration de la végétation à une échelle réduite. Nous proposons donc dans la suite une structure à la fois légère (afin de pouvoir déceler la mesure des variations de masse d'eau de l'ordre de quelques kilogrammes par jour) et couvrante : un gridshell élastique en matériaux composites. Ce chapitre s'applique à décrire les caractéristiques géométriques, mécaniques et techniques de telles structures, puis retrace nos propres expérimentations pour aboutir au dispositif mis en œuvre afin d'effectuer les mesures évoquées.

4.1 Gridshells

4.1.1 Principe structurel

Le terme *gridshell*, traduction littérale de l'allemand *Gitterschale*, renvoie à la forme et au comportement mécanique de l'objet : il s'agit à la fois d'une *grille*, donc d'un assemblage de barres continues, et d'une *coque*, structure spatiale dont la courbure lui permet de résister efficacement aux efforts. On peut ainsi décrire ce type de structures

comme une « résille gauche » (Douthe, 2007), par opposition à une résille plane, ou une « coque discrète » (Bouhaya, 2010), par opposition à une coque continue. L'expression *gridshell élastique* associe à ce principe structural un procédé de montage : c'est par la déformation élastique d'une grille initialement plane, généralement, qu'est obtenue la géométrie finale. Cette transformation de la grille à plat en une résille gauche requiert l'utilisation de poutres élancées, qui vont pouvoir être déformées par flexion, et l'existence d'un mécanisme global, qui va d'abord permettre de déployer la grille puis qu'il s'agira de bloquer afin d'obtenir une structure stable et de conférer à l'ensemble un fonctionnement de coque.

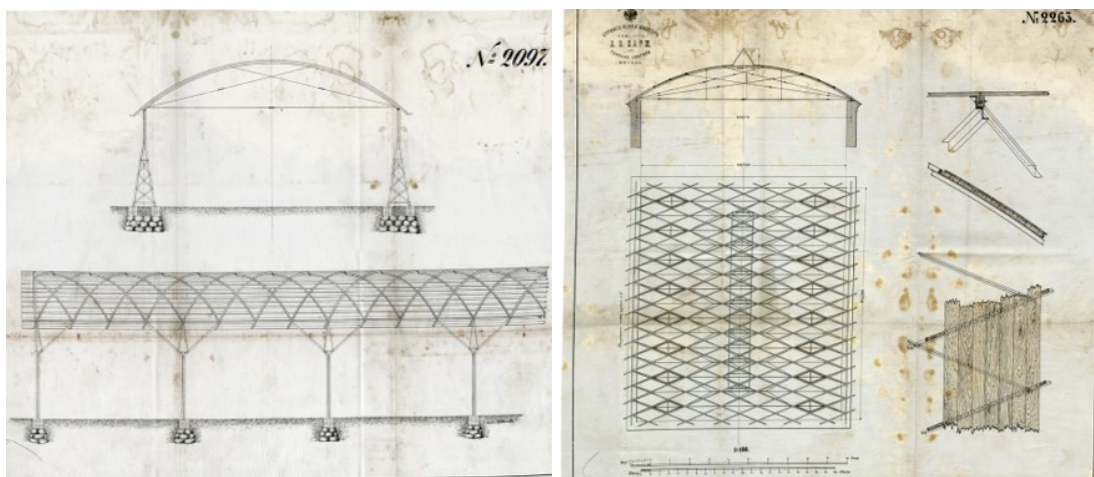
4.1.2 Historique

Dans cette partie, nous dressons un historique des gridshells en nous arrêtant sur deux ouvrages en particulier : l'aciérie de Vyksa, réalisée par Vladimir Choukhov à la fin du XIX^{ème} siècle, et la *Multihalle* de Mannheim, conçue 75 ans plus tard par Frei Otto. La toiture de l'usine de Vyksa, peu documentée, semble être la première couverture à double courbure présentant les caractéristiques d'un gridshell (Beckh et Barthel, 2009). Il s'agit d'un gridshell rigide et son procédé de montage diffère de celui des gridshells élastiques, mais il permet déjà de présenter certains enjeux propres à cette typologie structurale. La *Multihalle* de Mannheim est l'exemple le plus emblématique des gridshells élastiques et représente le point d'orgue des recherches de Frei Otto et de l'*Institut für Leichte Flächentragwerke* (Institut pour les structures légères, abrégé en *IL*) qui ont fourni une documentation abondante de ce projet et ont inspiré toutes les réalisations de gridshell ultérieures.

1896-1897 : des pavillons de Nizhny-Novgorod à l'aciérie de Vyksa

Suite à des études à l'École technique impériale de Moscou, Choukhov décline l'offre de son professeur de mathématiques Pafnouti Tchebychev qui lui propose un poste d'assistant et s'oriente vers l'ingénierie, apportant des contributions majeures dans l'industrie pétrolière, la construction navale et le génie civil entre 1880 et 1940 (Shukhova, 2019 ; RGANTD, 2013). Au début de sa carrière, il met au point des chaudières à vapeur, dessine le réseau d'approvisionnement en eau de Moscou et invente un procédé de craquage thermique du pétrole. Pour le bureau d'études Bari, il réalise alors des citernes, des pipelines, des pompes, toutes sortes de machines afin d'extraire, de stocker, de transporter et de transformer le pétrole, ainsi que des barges, des pétroliers et des usines, qui l'amènent à se pencher sur la conception et la construction de structures métalliques. Dès 1890, pour couvrir des stations de pompage à Grozny, il construit des voûtes en berceau composées d'un réseau de poutrelles superposées et rivetées entre elles, avec un motif en losanges (Beckh et Barthel, 2009). Comme on peut le voir sur la figure 4.1, la grille est régulière, constituée d'éléments identiques et contreventée par des tirants qui rayonnent à partir des butées afin de raidir l'arche. Chaque poutrelle, qui est l'intersection d'un plan avec la voûte cylindrique, suit un arc d'ellipse. Choukhov fait breveter en 1895 ce système de couverture à simple courbure et le décline sous des formes extrêmement innovantes lors de l'*Exposition panrusse industrielle et artistique* qui se tient à Nizhny Novgorod l'année suivante.

L'exposition de 1896 lui offre la possibilité de réaliser un château d'eau (voir figure 4.2) et huit pavillons – couvrant une surface de 28 000 m², avec des portées allant jusqu'à 32 m.



(a) Elévation et coupe longitudinale.

(b) Elévation et vue en plan (22m x 24m).

FIGURE 4.1 – Plans de Choukhov pour des « arches-treillis », constituées (a) de cornières ou (b) de sections en Z (images :archives RGANTD).

Le château d'eau a la forme d'un hyperboloïde, qui est une surface réglée. Cette propriété permet à Choukhov de placer les poutrelles de manière rectiligne pour construire la grille. Il appliquera par la suite cette technique à divers types de constructions – des relais radio (tour Chabolovka à Moscou), des pylônes électriques (tours NiGRES de la rivière Oka), des phares (Adziogol en Ukraine) ou encore des mâts de bateau (le cuirassé *Empereur Paul Ier*) – au cours de centaines de projets qui feront sa renommée et éclipsent ses autres innovations architecturales. Pourtant, les couvertures de ses pavillons à Nizhny Novgorod sont tout aussi remarquables. Outre les voûtes cylindriques de plusieurs bâtiments construites sur le même principe qu'à Grozny, qui seront baptisées « toitures sans charpente », Choukhov propose des toitures suspendues pour deux pavillons. Pour réaliser ces structures tendues, il adapte son système de résille métallique avec des plats en acier, beaucoup plus fins que les profils en Z et les cornières, et des boulons à la place des rivets, afin de pouvoir démonter ces structures temporaires à la fin de l'Exposition et les reconstruire à différents endroits. D'après Graefe *et al.* (1990), Choukhov mentionne des poutres tubulaires dans son brevet de toiture en résille métallique pour gagner en légèreté mais les abandonne pour des raisons économiques, trouvant leur fabrication et leur assemblage trop cher et trop compliqué. Les profils en Z, en L et les plats ont une résistance à la torsion plus faibles que les sections circulaires, ce qui leur permet d'accommoder des torsions comme celle visible sur l'hyperboloïde de la figure 4.2a.

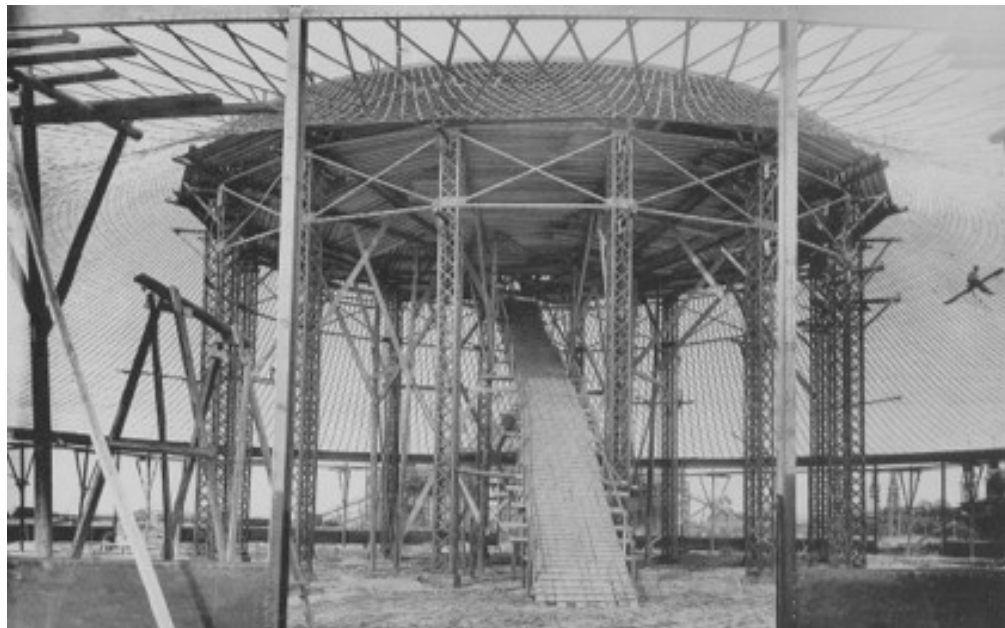
Le journal anglais *The Engineer* (1897) voit le potentiel de ces structures : « Leur trait commun est l'absence totale de fermes ou de poutres. Celles-ci ont été remplacées par un maillage (*a lattice network*) de cornières en acier ou de profils en Z pour les voûtes, et de fers plats pour les toitures suspendues. [...] Une réduction considérable du poids par mètre carré a été réalisée, comparé à une charpente métallique classique. Les éléments étant identiques et de section constante, ils peuvent être préfabriqués avec un gabarit de perçage et sont interchangeables. Ils sont livrés en barres sur le chantier puis rivetés ensemble sans avoir recours aux échafaudages lourds ou aux dispositifs de levage nécessaires à la construction des fermes-treillis. Cette combinaison entre légèreté, transport bon marché et montage simplifié confère à ce type de bâtiment un avantage considérable



(a) Château d'eau (Beckh et Hoheisel).



(b) Pavillon oval.

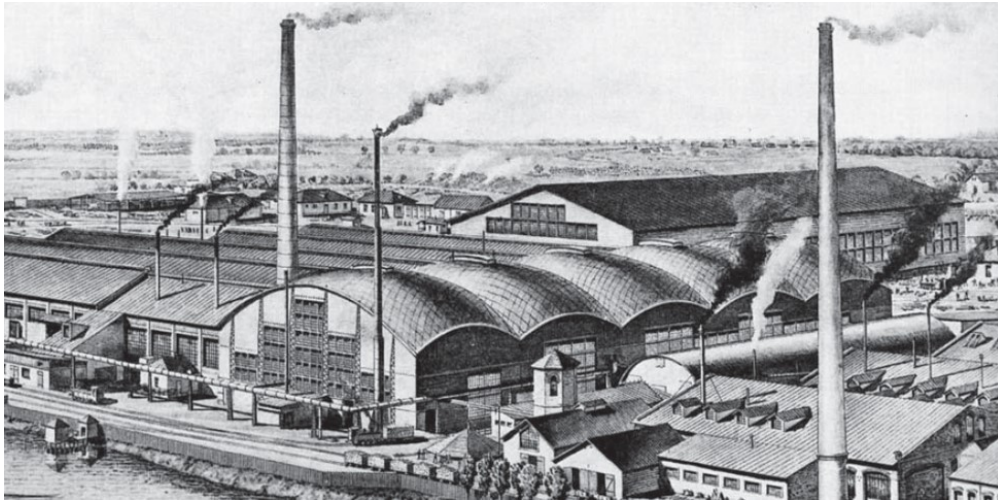


(c) Rotonde.

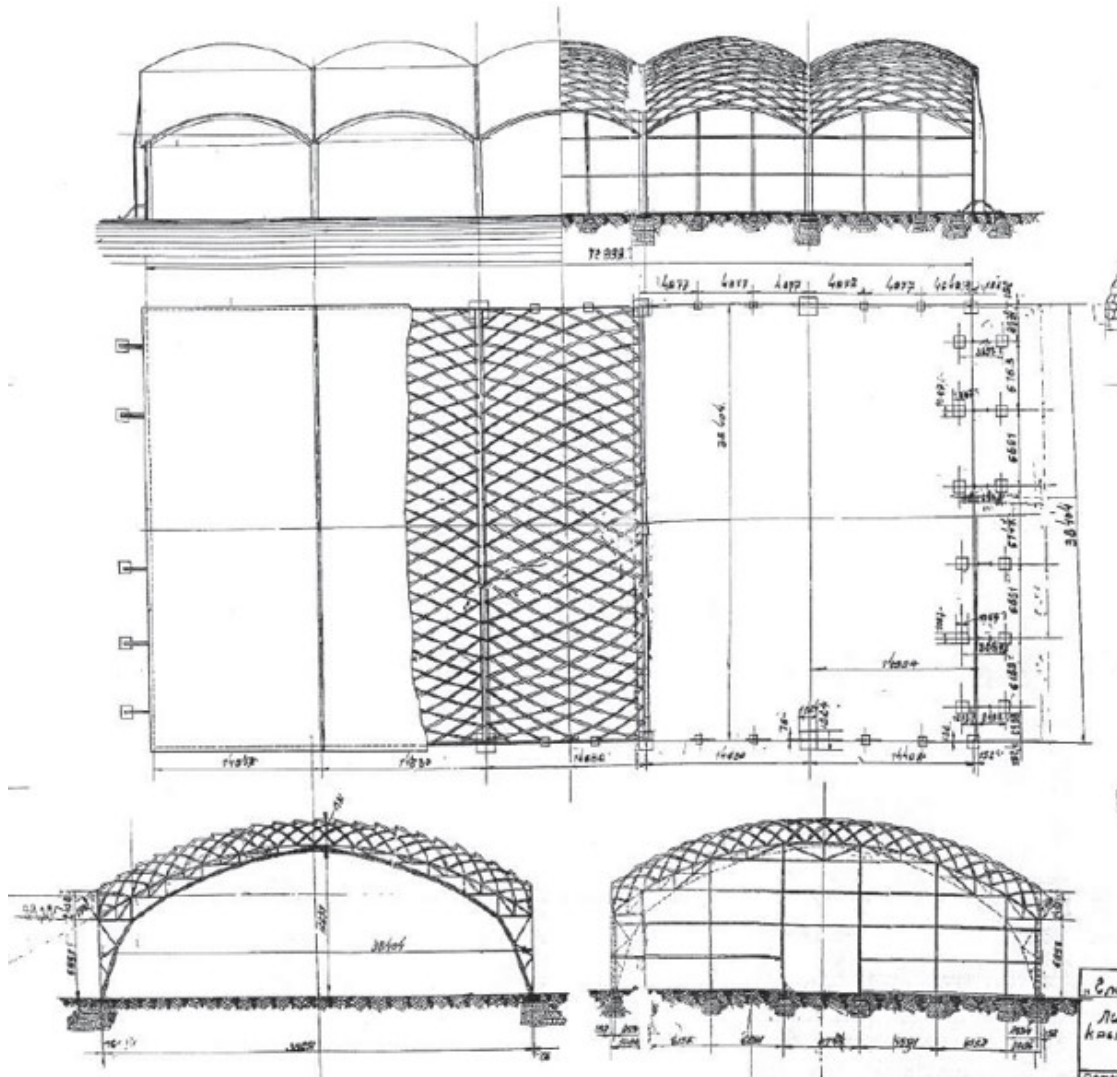
FIGURE 4.2 – Pavillons de Choukhov lors de l'Exposition 1896 de Nizhny Novgorod.

sur le prix de revient par rapport aux modes de construction habituels, et c'est encore plus flagrant pour les bâtiments non-rectangulaires en plan. »

En 1897, Choukhov construit une usine à Vyksa, une petite ville entre Nizhny Novgorod et Moscou, pour le compte du métallurgiste *Vyksa Steel Works*. Le bâtiment fait 39 m de large pour 73 m de long, avec cinq travées de 14,6 m séparées par des arches en treillis (figure 4.3). La technologie qu'il a développée lui permet d'optimiser le volume intérieur et d'éviter les poteaux et les charpentes qui encombreraient l'espace. Pour couvrir l'édi-



(a) Lithographie vers 1900 (Graefe *et al.*).



(b) Plans d'exécution (Graefe *et al.*).

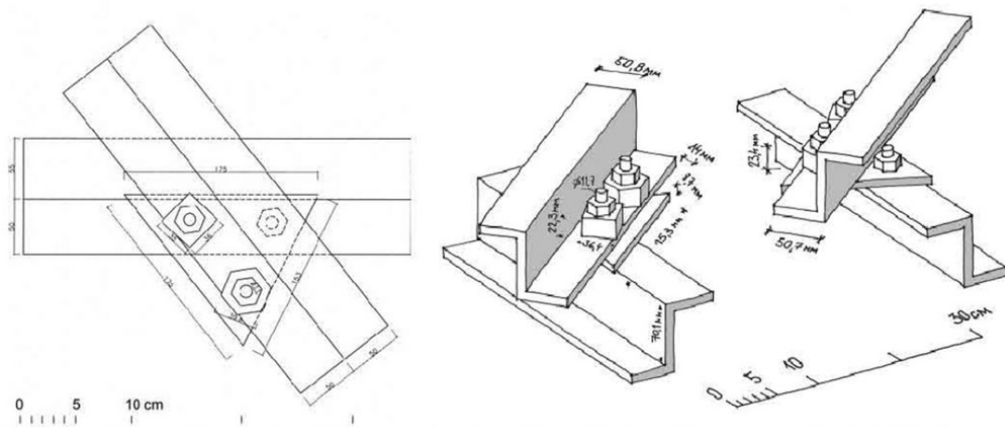
FIGURE 4.3 – L'aciérie de Vyksa.



(a) Avant le montage du gridshell (Schusev MA).



(b) Après le montage.



(c) Détail de connexion des poutrelles en Z (Barthel *et al.*).

FIGURE 4.4 – Construction des toitures de l'usine.

fi ce, il utilise le même maillage régulier fait de poutrelles métalliques mais cette fois, toutes les poutres de rive sont courbes : ces toitures ont donc une double courbure. Ce sont les premiers gridshells dont nous ayons connaissance.

En revanche, nous n'avons ni de plan détaillé de leur géométrie ni de documentation sur le procédé de montage (figure 4.4). Plusieurs hypothèses de génération de la géométrie sont passées en revue par Beckh et Barthel (2009), qui penchent pour une surface de translation avec des poutrelles identiques, ce qui permettrait de les préfabriquer facilement. Les sections sont des Z de 7 mm d'épaisseur dont l'âme fait 80 mm et les semelles 50 mm (voir figure 4.4c). Elles sont connectées entre elles par trois boulons au moyen de plaques triangulaires. Barthel *et al.* (2009) notent que ce type d'assemblages permet de transmettre des moments d'une poutre à l'autre. Nous notons également qu'ils pourraient autoriser une rotation entre les poutres dans le plan tangentiel à la surface, pendant le montage, même si cette propriété n'a pas dû être utilisée ici, la courbure des poutrelles étant trop importante pour que leur déformation reste dans le domaine élastique. La figure 4.4a laisse supposer que les arches en treillis séparant les travées ont été disposées avant que les poutrelles ne soient placées une à une par dessus, afin de « tisser » le gridshell. Des pannes et des plaques de tôle d'1 mm d'épaisseur ont ensuite été fixées au gridshell pour assurer la couverture du bâtiment.

La halle est utilisée jusque dans les années 1980 avant d'être abandonnée. Elle est aujourd'hui proche de la ruine. Rainer Graefe, un historien de la construction qui a travaillé avec Frei Otto à l'Institut pour les structures légères (*IL*) de Stuttgart, a monté en 2006 une équipe avec les universités d'Innsbruck, de Munich, de Zurich et de Vienne pour réaliser un diagnostic de la structure, la documenter et tenter de la préserver (Barthel *et al.*, 2009). Des photographies de la structure actuelle – ainsi que de nombreuses archives sur Choukhov et ses ouvrages – sont disponibles grâce à leur travail. Elles montrent qu'aujourd'hui encore, malgré le piètre état du bâtiment, la structure n'a rien perdu de son élégance (figure 4.5).



FIGURE 4.5 – L'intérieur de la halle de Vyksa en 2011 (image : Rainer Barthel).

1962-1975 : des premiers gridshells élastiques de Frei Otto à la *Multihalle*

Cette longue digression sur le gridshell rigide de Choukhov nous permet de souligner les nombreuses contributions de Frei Otto, soixante-quinze ans plus tard. L'architecte allemand enrichit le concept en y apportant des modifications considérables : la recherche de forme par la méthode du filet inversé, la mise en forme de la grille en exploitant la déformation élastique des poutres et les rotations aux nœuds, la rigidification de la structure après le déploiement, l'utilisation de la raideur géométrique conférée par la double courbure. Les gridshells de Frei Otto et sa méthode de travail sont décrits en détails dans les publications de l'*IL*, qu'il fonde en 1964 et qu'il dirigera jusqu'en 1990. Les deux premiers gridshells élastiques construits en 1962 sont de taille modeste : un prototype de 200 m² réalisé avec des poutres en pin de section rectangulaire pour la foire-exposition de Essen (*Deutsche Bauausstellung*, figure 4.6) et un prototype de 50 m² avec des barres en acier lors d'un atelier à l'université de Berkeley (Otto *et al.*, 1974).

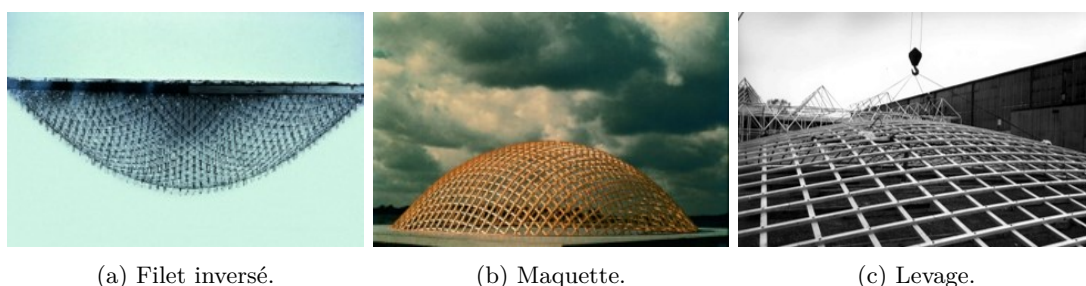


FIGURE 4.6 – Gridshell de la *Deubau* à Essen (1962).

En 1967, à l'occasion de l'Exposition universelle à Montréal, Frei Otto conçoit deux gridshells en bois, d'une surface totale de 365 m², pour abriter les auditoriums du pavillon allemand (figure 4.7). La principale différence par rapport à l'ouvrage de Essen est que les gridshells ont été assemblés en Allemagne, repliés puis transportés en fagots jusqu'au Canada où ils ont été redéployés.

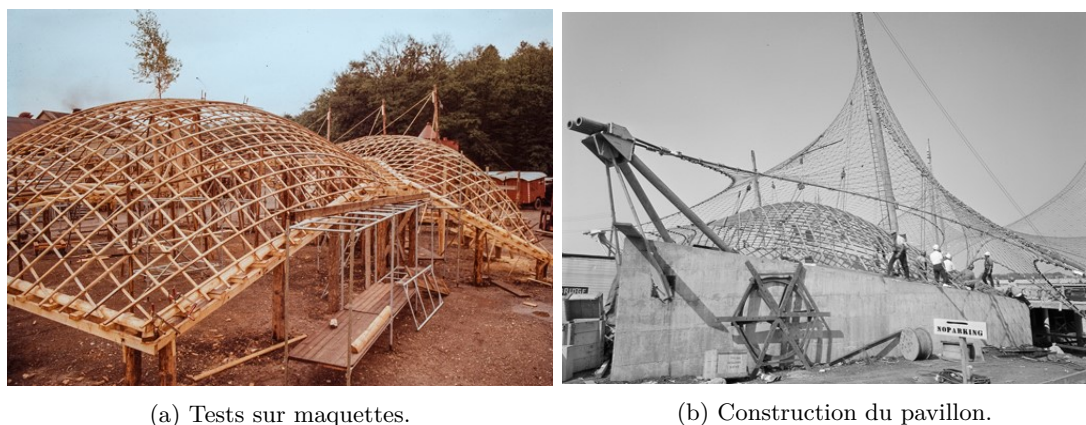
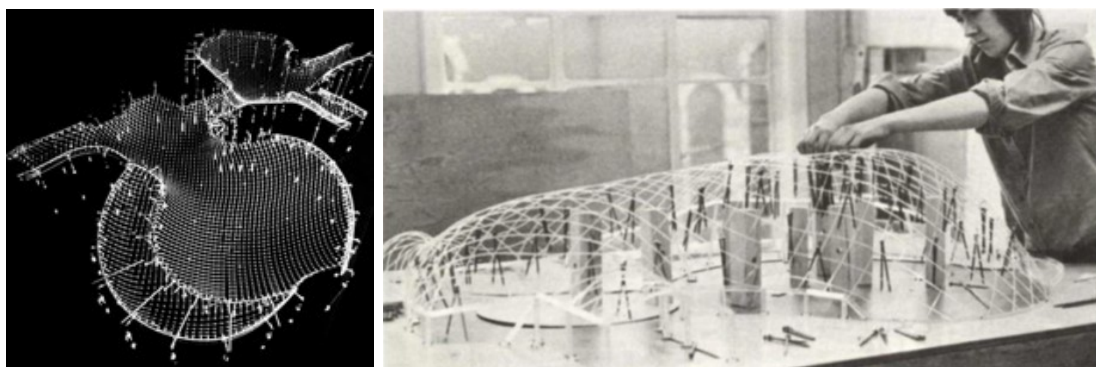


FIGURE 4.7 – Gridshells du pavillon allemand pour Expo 67 à Montréal.

Plusieurs études de gridshells sont ensuite réalisées par l'*IL* mais aucun autre projet ne voit le jour avant 1975. Cette année-là, le *Bundesgartenschau* – un salon horticole qui

accueille plusieurs millions de visiteurs – a lieu à Mannheim et Frei Otto doit concevoir un bâtiment polyvalent avec l’agence d’architecture *Mutschler & Partners*. Il propose pour la structure de cette *Multihalle* des gridshells en bois reliés par des tunnels. L’Institut d’application de la géodésie dans la construction (IAGB) de Stuttgart – avec qui Frei Otto avait collaboré pour le pavillon d’Expo 67 à Montréal et le stade olympique de Munich – est chargée de définir la géométrie des gridshells par photogrammétrie, en photographiant un filet inversé afin d’obtenir les coordonnées des nœuds (figure 4.8a).

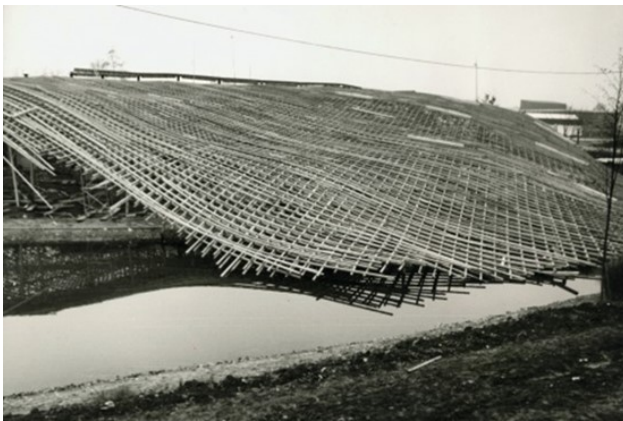
Un an et demi avant le début de l’exposition, le bureau d’études structure initial se retirant du projet, Frei Otto fait appel au bureau d’études britannique *Ove Arup & Partners*. Ted Happold et Ian Liddell, ingénieurs chez *Arup*, doivent alors assurer la constructibilité de l’ouvrage en un temps très court. Ils racontent dans plusieurs articles leur plan d’attaque pour appréhender cette nouvelle typologie structurelle, d’une ampleur inédite (environ 9 000 m²), en attendant la géométrie définitive mesurée par l’IAGB (Happold *et al.*, 1975 ; Happold et Liddell, 1975 ; Liddell, 2015) : ils décident en parallèle d’estimer les charges de design qui vont s’appliquer sur le bâtiment, d’évaluer les charges critiques qui conduiraient à un claquage de la coque, d’entreprendre des tests sur modèles réduits en soufflerie et essaient d’avoir une idée des efforts intérieurs dans les poutres. En extrapolant les résultats obtenus sur des maquettes du gridshell de Essen, les ingénieurs prédisent une charge uniforme critique pour la *Multihalle* de 3,8 kg/m² si une seule nappe de poutres est utilisée, bien inférieure à la charge de neige estimée entre 15 et 40 kg/m². Deux modifications permettent de raidir la coque : la charge critique devient 26 fois plus importante pour un gridshell à deux nappes, et 42 fois plus importante si la grille est contreventée par des câbles. Les tests de chargement de la maquette du gridshell de Essen sont accompagnés de simulations numériques aboutissant à des résultats similaires, à 10% près, ce qui donne confiance à Happold et Liddell dans leur modèle numérique. L’IAGB ayant fini de calculer la géométrie du gridshell, une analyse plus fine peut commencer. Ils procèdent alors à des tests sur une maquette de la *Multihalle* (figure 4.8b), à des simulations numériques avec un maillage grossier et à des essais matériau (du pruche de l’Ouest, une essence choisie par Frei Otto pour l’élancement de son tronc, l’arbre pouvant atteindre 60 m de haut pour un diamètre d’environ 2 m). Les essais incluent des tests de fluage, pour déterminer le comportement du bois à long terme, et des tests des assemblages, dont les résultats alimentent le modèle numérique.



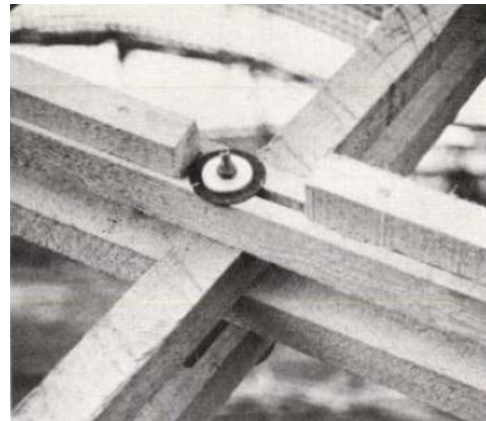
(a) Filet inversé à l’échelle 1:100. (b) Maquette à l’échelle 1:60 chargée avec des clous. Chaque poutre Un fil correspond à trois poutres. du modèle représente six poutres de la structure réelle.

FIGURE 4.8 – Définition de la géométrie et tests de chargement sur maquette.

La construction du gridshell débute sept mois avant l'ouverture du salon. La grille est d'abord assemblée au sol avec des poutres de section 5 x 5 cm, raboutées pour obtenir des longueurs de 30 à 40 m (figure 4.9a). Un important travail est réalisé sur les connexions, qui doivent autoriser des mouvements entre les poutres dans un premier temps puis les bloquer pour rigidifier la structure dans un deuxième temps. Pour cela, des tiges filetées de 8 mm sont placées dans des trous oblongs et vissées de manière lâche pour permettre des rotations entre les poutres ainsi qu'un glissement des deux nappes l'une par rapport à l'autre (figure 4.9b). En effet, lors du montage, la nappe supérieure a tendance à s'allonger tandis que la nappe inférieure se raccourcit. Pour mettre en forme la grille, on la soulève depuis le sol avec des tours d'échafaudage, levées petit à petit au moyen d'un transpalette (figure 4.9c), selon une séquence préparée une fois encore à l'aide de maquettes. Lorsqu'une portion de la grille atteint la géométrie souhaitée, on resserre les connexions aux nœuds correspondants pour générer de la friction entre les lattes et la figer dans sa position. Des rondelles ressorts sont utilisées pour que la force de serrage ne varie pas trop dans le temps même si le bois travaille. Une fois que les bords du gridshell sont fixés, des cales de cisaillement sont insérées entre les deux nappes afin de les solidariser et des câbles sont tendus pour contreventer la grille. Les étais sont alors retirés et des voiles de PVC transparent sont déroulés sur le gridshell pour le rendre étanche (figure 4.9d).



(a) Grille.



(b) Connexion.

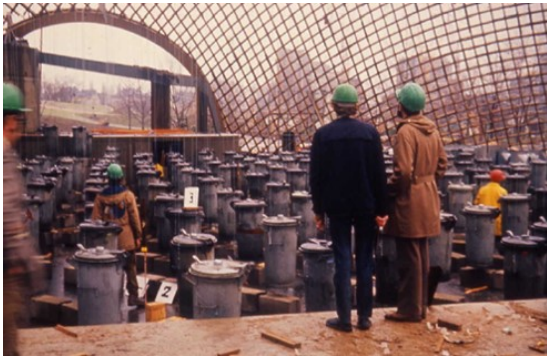


(c) Levage.



(d) Couverture.

FIGURE 4.9 – Construction du gridshell de Mannheim (1974-1975).



(a) Chargement de 40 kg/m^2 sur 500 m^2 .



(b) Exposition le 18 avril 1975.



(c) L'intérieur aujourd'hui.



(d) Vue aérienne du *Herzogenriedpark*.



(e) De nuit.

FIGURE 4.10 – La *Multiphalle* de Mannheim.

Pour vérifier les calculs, un test de chargement est effectué en suspendant à une partie du gridshell des poubelles de la municipalité remplies d'eau, qui confirme que les déplacements mesurés sont proches des prédictions (figure 4.10a). Le bâtiment ouvre dans les temps, avec une exposition florale (figure 4.10b). La couverture laisse passer environ 20% de la lumière du jour dans la Multihalle et laisse transparente, de nuit, ses courbes en filigrane. Conçue comme une structure temporaire et expérimentale, la Multihalle est toujours debout aujourd'hui, malgré certaines zones en mauvais état. Classée monument historique depuis 1998, elle attend qu'on lui trouve de nouveaux usages.

Depuis 2000

Il faut attendre 25 ans pour qu'un projet de grande ampleur ait de nouveau recours à cette typologie structurelle : en 2000, aidé de Frei Otto et de *Buro Happold* – le bureau d'études créé par Ted Happold – Shigeru Ban construit un gridshell en carton de 2 500 m² pour l'Exposition universelle de Hanovre. La structure du pavillon japonais est constituée de rouleaux de papier carton joints par des rubans en tissu.

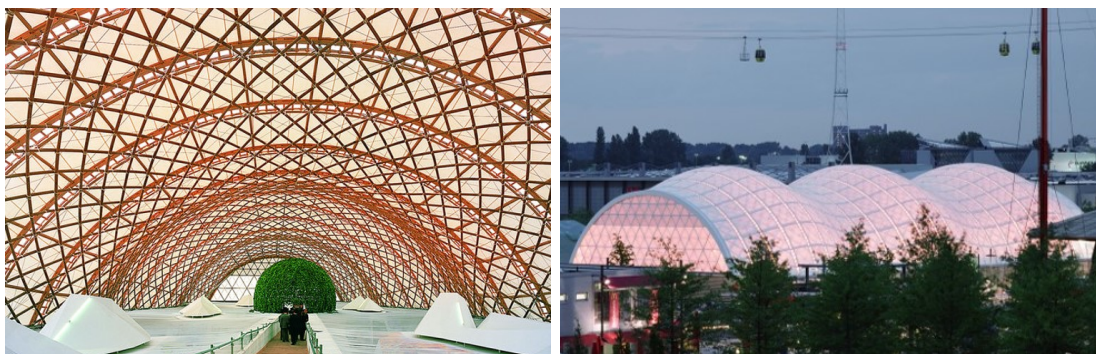


FIGURE 4.11 – Pavillon du Japon pour Expo 2000 à Hanovre.

En 2002, un ouvrage de forme comparable est construit au Royaume-Uni : le gridshell du musée de Downland. Les ingénieurs de Buro Happold accompagnent cette fois l'architecte Edward Cullinan. La structure, d'une superficie de 700 m², est une double nappe en chêne.



FIGURE 4.12 – Gridshell du *Weald & Downland Museum* (2002).

En 2006, un autre gridshell remarquable est réalisé au Royaume-Uni par l'agence d'ar-

chitecture Glenn Howells et *Buro Happold*. Il s'agit de la toiture du *Savill Building*, le pavillon qui permet d'accéder aux jardins de Savill dans le grand parc de Windsor. Couvrant une surface de 2000 m², elle est composée de deux nappes en mélèze construites séparément puis solidarisiées par des cales.

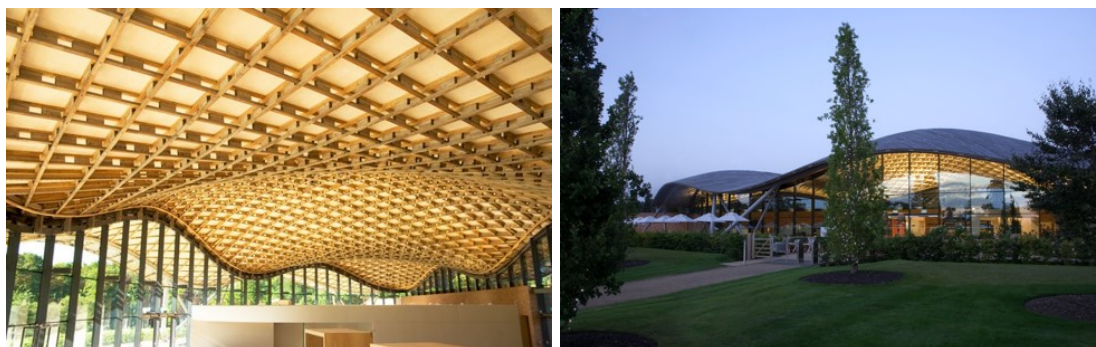


FIGURE 4.13 – Gridshell du *Savill Building* (2006).

Il existe de nombreuses autres réalisations de gridshells élastiques, de taille plus modeste, faits en bois dans la majorité des cas, dont on trouvera une liste exhaustive dans la thèse de Lionel du Peloux (2017), résumée par la figure 4.14. Les thèses de Cyril Douthe (2007), Lina Bouhaya (2010) et Frédéric Tayeb (2015) dressent également un historique des gridshells en décrivant dans le détail les projets marquants. Nous renvoyons à leurs travaux, réalisés au sein du laboratoire Navier, pour de plus amples développements.

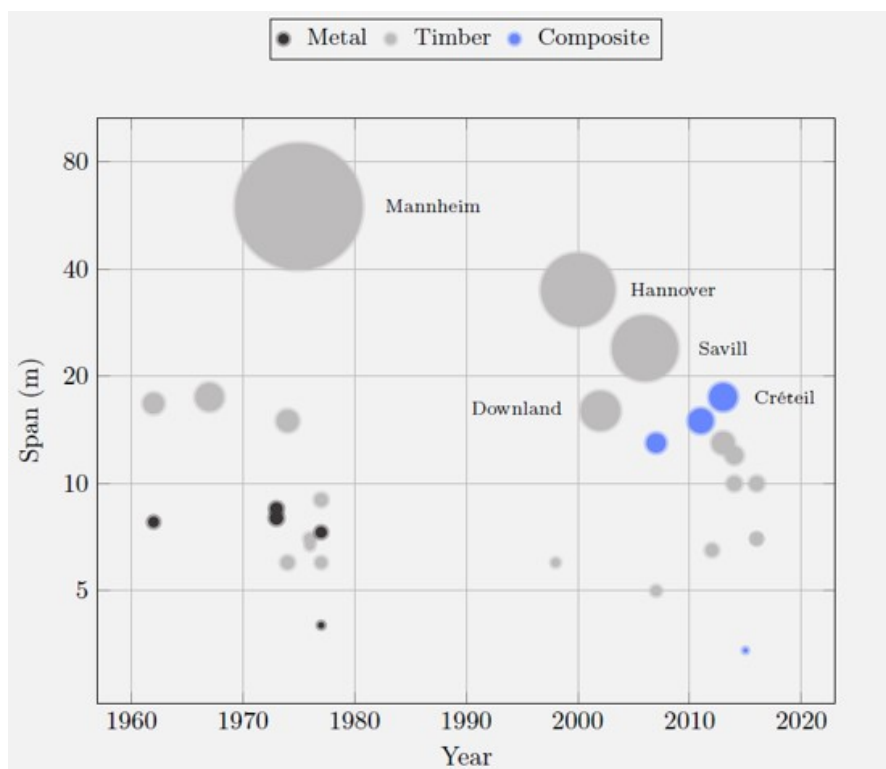


FIGURE 4.14 – Gridshells élastiques construits avant 2016. L'aire du disque représente la surface couverte par le gridshell. (Image : Lionel du Peloux)

4.1.3 Gridshells en matériaux composites

Bien que le bois puisse être considéré comme le matériau de prédilection pour de tels ouvrages, au vu du nombre de projets, des gridshells élastiques ont pu être réalisés avec de l'acier, de l'aluminium, du bambou, du carton et, plus récemment, des composites verre/résine (Du Peloux, 2017). En utilisant les diagrammes de Ashby qui établissent des cartographies des familles de matériaux selon leurs propriétés (Ashby et Cebon, 1993), Douthe *et al.* (2010) ont montré que les matériaux composites – formés d'une matrice organique et de renforts fibrés – étaient des candidats idéaux pour construire des gridshells élastiques. En particulier, les tubes en composites pultrudés ont de meilleures performances que des poutres rectangulaires en bois quand on compare leurs propriétés mécaniques (déformabilité, raideur, fragilité) et les composites à base de fibres de verre (GFRP, pour *Glass Fiber Reinforced Polymers*) se démarquent des composites avec des fibres de carbone (CFRP, pour *Carbon Fiber Reinforced Polymers*) lorsque l'on considère en plus leur coût et leur contenu énergétique. Cette approche est extrêmement intéressante en phase de conception pour discriminer les matériaux de manière systématique et trouver lesquels sont les plus adaptés à un certain type d'application.

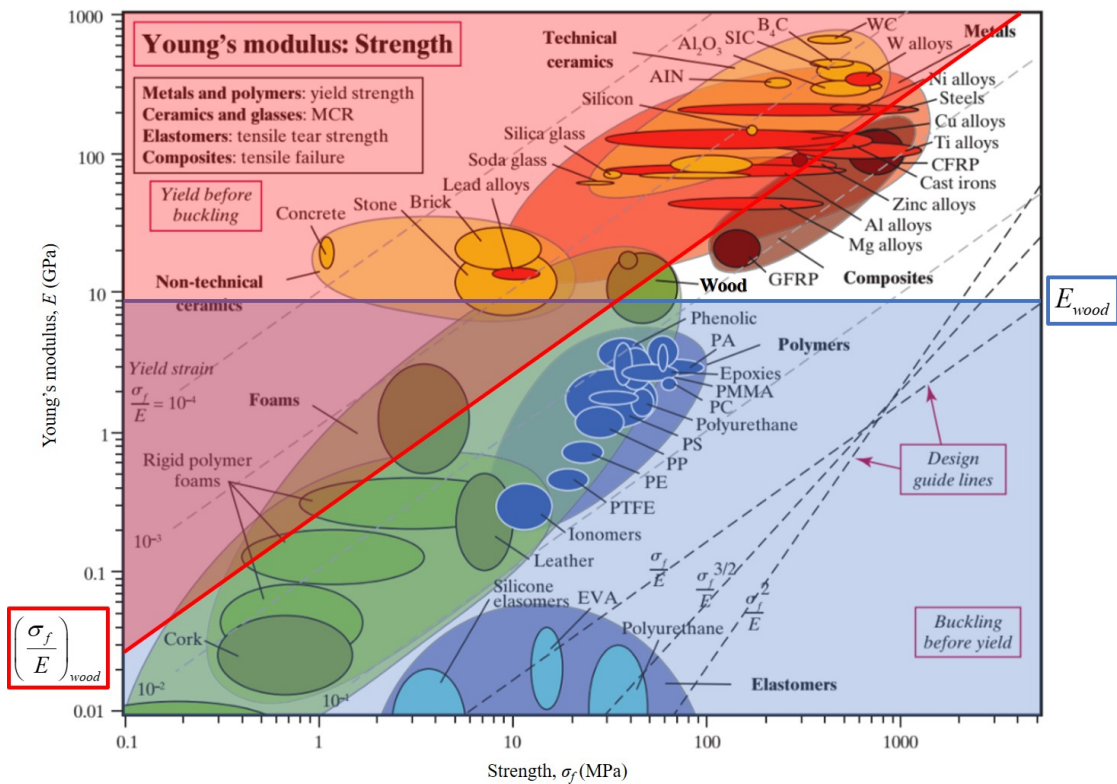


FIGURE 4.15 – Diagramme d'Ashby *Module d'Young/Résistance*. Le ratio σ_f/E caractérise la déformabilité du matériau et E sa raideur. Maximiser le ratio σ_f/E revient à déplacer le plus possible vers la droite une droite de pente 1 sur ce diagramme log-log tandis que maximiser E revient à déplacer le plus possible vers le haut une droite horizontale. Sur cet exemple, le domaine rouge correspond aux matériaux qui présentent de moins bonnes performances que le bois pour le premier critère ; le domaine bleu ceux qui sont moins performants vis-à-vis du second critère. Le domaine restant, en haut à droite, rassemble les matériaux qui sont à la fois plus déformables et plus raides que le bois. On y retrouve les composites et certains alliages métalliques.

Le tout premier gridshell en matériaux composites a ainsi été construit à l'Ecole des Ponts par Cyril Douthe avec des profilés pultrudés tubulaires en fibres de verre (figure 4.16). La pultrusion est un procédé industriel qui permet d'obtenir des barres continues avec des dimensions et des propriétés mécaniques identiques, ce qui est pratique pour construire une structure répétitive contenant un grand nombre d'éléments similaires. Les tubes, d'épaisseur 3,5 mm, ont un diamètre extérieur de 42 mm, ce qui les rend assemblables par des noix d'échafaudage standard peu chères. Ces profilés et ces connexions ont également été utilisés pour contreventer le gridshell avec une troisième direction de barres. La triangulation multiplie la masse de la structure par 1,7 mais augmente sa raideur d'un facteur 10 à 20. La structure finale est de dimensions 8 x 24 m pour près de 4 m de haut et pèse moins d'une tonne – 40% de la masse du gridshell provenant des noix de connexion – ce qui a permis de la mettre en forme sans moyen de levage. Elle a été recouverte d'une membrane polyester enduit PVC trois ans plus tard. Un deuxième prototype a été réalisé de la même façon l'année suivante pour abriter la soufflerie de l'ENPC (figure 4.17). Le gridshell présente cette fois deux ouvertures afin de laisser circuler l'air.



FIGURE 4.16 – Le premier gridshell en matériaux composites à l'ENPC (2006).



FIGURE 4.17 – Deuxième gridshell à l'ENPC (2007).

Le laboratoire Navier a ensuite appliqué ce savoir-faire en conception/réalisation de gridshells en matériaux composites dans le cadre de deux projets de plus grande ampleur, dont on trouvera des descriptions complètes dans les mémoires de thèse de Frédéric Tayeb et Lionel du Peloux. Le premier est l'espace forum de Solidays en 2011 (figure 4.18), d'environ 300 m², où la structure doit pouvoir recevoir du public pendant toute la durée du festival (Baverel *et al.*, 2012). Le second est un lieu de culte provisoire à Créteil (figure 4.19) de 350 m² qui doit non seulement recevoir du public, mais ce pendant

au moins deux ans – le temps que s’achève la rénovation de la cathédrale principale (Du Peloux *et al.*, 2016). Il faut en outre qu’il remplisse les fonctions d’un bâtiment, avec un certain niveau de confort thermique et visuel, afin que les paroissiens puissent venir assister aux offices. Ces deux projets de gridshells en composites ont nécessité des études poussées et des campagnes de tests au laboratoire pour être approuvés par les organismes de contrôle.



FIGURE 4.18 – Le forum du festival Solidays (2011).



FIGURE 4.19 – La cathédrale éphémère de Créteil (2013). (Images : T/E/S/S)

Quelques autres réalisations en composites sont à signaler. En 2013, un gridshell à pas irrégulier a été construit par Elisa Lafuente Hernandez à Berlin avec des tubes en fibres de verre de 20 mm de diamètre et 3 mm d’épaisseur, reliés par des colliers de plomberie (Hernández *et al.*, 2013). Faisant 10 m de diamètre et pesant 200 kg, il a pu être mis en forme à la main (figure 4.20). L’irrégularité du maillage a complexifié le montage car certaines poutres devaient être fléchies pour construire la grille initiale et d’autres ont dû être rajoutées par la suite. Deux autres pavillons ont ensuite été construits par Gregory Quinn avec des joncs en fibres de verre de 15 mm percés et vissés (Quinn, 2019) : un gridshell de 14 m de portée pour une exposition d’architecture à Berlin puis un abri humanitaire de 10 m de portée dans le cadre d’un projet avec les universités de Bath et Cambridge, tous les deux associés à un tissu polyester enduit PVC (figure 4.21). Ces gridshells ont été mis en forme au moyen d’un procédé de montage innovant : un coussin pneumatique. Le second prototype vise également à assurer un certain confort thermique puisqu’il doit accueillir des réfugiés.

Ces exemples montrent que les structures gridshells composites se sont développées grâce à l’impulsion du laboratoire Navier, et que leur dimensionnement a acquis la maturité



FIGURE 4.20 – Le gridshell hémisphérique *Flying Dome* (2013). (Image :Hernández *et al.* (2013))



(a) Pavillon *SheltAir* (2017).

(b) *Healthy Housing for the Displaced* (2018).

FIGURE 4.21 – Deux prototypes en composites montés par gonflage. (Images : Quinn (2019))

suffisante pour obtenir la certification des bureaux de contrôle. Des projets plus aboutis ont pu voir le jour et ont donné lieu à des détails soignés, que ce soit au niveau de l’ancrage, de l’assemblage, du raboutage des barres, des rives, des systèmes de couverture ou encore des méthodes de montage. Nous passons rapidement en revue quelques-unes des technologies existantes dans le paragraphe suivant.

4.1.4 Technologies existantes

Connexions

Le gridshell de Essen, composé de lattes en bois, a pu être assemblé avec de simples tiges filetées. Chaque tige est un axe de rotation local pour deux poutres, qui peuvent tourner autour de lui lors de la mise en forme. En revanche, les translations et la rotation autour de l’axe de la poutre sont proscrites. La suppression de ce dernier degré de liberté peut induire des moments de torsion. Le montage reste néanmoins possible dans tous les cas si le profilé présente une faible raideur en torsion (c’est le cas des sections « ouvertes » en Z et en L utilisées par Choukhov) ou si le gridshell définit une surface telle que la torsion soit faible dans les poutres (voire nulle, si la surface du gridshell est une portion de sphère). Nous reviendrons sur ce dernier point plus tard dans le chapitre.

La connexion a dû être repensée pour des gridshells en bois à double nappe – quelques exemples sont représentés sur la figure 4.22. Cette fois, l’excentricité entre les barres inférieures et supérieures ne peut plus être négligée : lors du passage de la grille plane à la forme tridimensionnelle, les poutres ont des courbures légèrement différentes et doivent

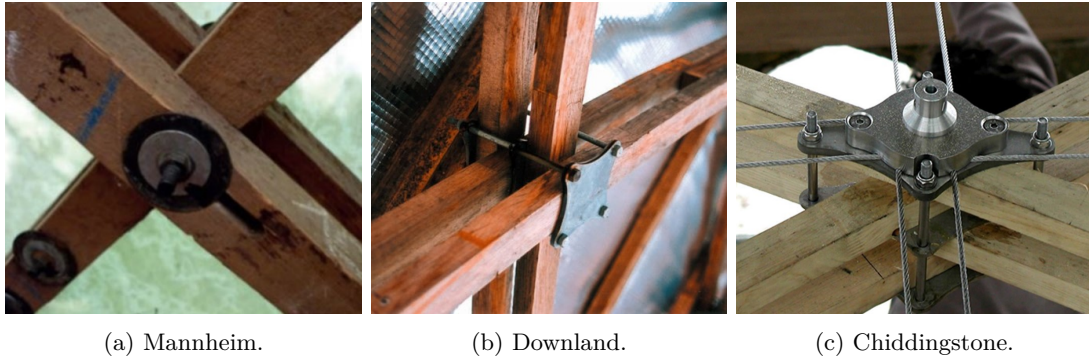


FIGURE 4.22 – Connexions de profilés à section rectangulaire.

pouvoir glisser les unes sur les autres. Cette translation a été réalisée pour la *Multi-halle* de Mannheim avec des trous oblongs, permettant un déplacement limité. Pour le gridshell de Downland, un nouvel assemblage a été breveté, constitué de trois plaques rectangulaires reliées par des boulons. Ceux-ci ne traversent pas le bois et évitent ainsi de fragiliser la section. La plaque centrale possède une petite pique au centre de chaque face qui vient s’incruster dans les deux poutres du milieu et imposer ainsi un axe de rotation. Pour limiter le glissement des poutres inférieures et supérieures, tous les assemblages du plan coupant transversalement le gridshell en deux (correspondant à un plan de symétrie du gridshell) sont réalisés par des boulons traversant les quatre poutres. Comme pour le gridshell de Mannheim, les connexions sont resserrées à la fin du montage pour augmenter le frottement entre les lattes. Cette connexion a été améliorée pour le gridshell de Chiddingstone, où d’autres fonctions ont été intégrées : ici, elle sert également de support aux câbles de contreventement et à la couverture en verre (Naicu *et al.*, 2014).

L’assemblage de tubes ou de joncs présente de nouveaux challenges. La figure 4.23 montre des connexions utilisées pour des gridshells en acier, en bambou et en composites. L’assemblage par rubans du pavillon du Japon est une solution *low-tech* originale et légère mais délicate à certifier et à mettre en œuvre pour une structure non-temporaire. Les gridshells conçus à Navier (ENPC 2006, ENPC 2007, le forum de Solidays et la cathédrale éphémère de Créteil) emploient tous les quatre des noix d’échafaudage standard, peu coûteuses mais très lourdes (environ 1 kg par nœud). L’axe entre les deux noix permet une rotation libre d’une poutre par rapport à l’autre. Le serrage de la noix implique un compromis entre la translation, que l’on désire bloquer, et la rotation du tube sur son axe, que l’on désire libre afin de ne pas le solliciter en torsion. Au cours des réalisations successives, différents matériaux intermédiaires ont été testés pour augmenter le frottement tube/connexion sans augmenter le couple de serrage, ce qui endommagerait le tube (Tayeb, 2015). Le matériau choisi doit avoir des performances assez stables sur la plage de températures auxquelles il est soumis durant son service. Pour le gridshell de Créteil, une couche d’EPDM d’1,5 mm d’épaisseur a été choisie car elle assure un frottement suffisant même lorsqu’elle monte en température. La maîtrise du glissement au niveau des connexions est primordiale pour que le déploiement se déroule correctement, que la géométrie finale soit bien celle qui a été calculée et pour rester dans les tolérances admises par la couverture. Les colliers de plomberie utilisés pour l’assemblage du *Flying Dome* fonctionnent sur le même principe que les noix d’échafaudage. Pour le pavillon *SheltAir*, utilisant des joncs pleins plutôt que des tubes creux, les poutres ont été per-



(a) Berkeley.



(b) Pavillon du Japon.



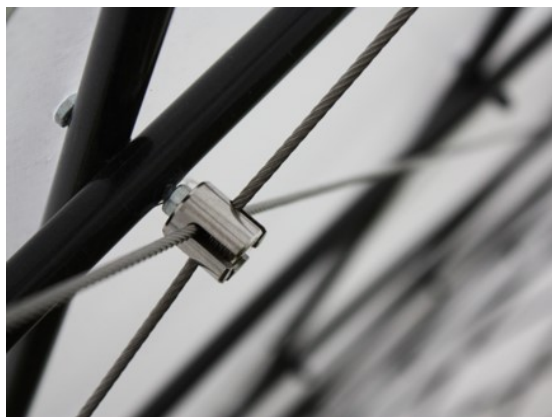
(c) ENPC 2006.



(d) Cathédrale éphémère de Créteil.



(e) *Flying Dome* (image : Hernández *et al.*).



(f) *SheltAir* (image : Gregory Quinn).

FIGURE 4.23 – Connexions de profilés à section circulaire.

cées et vissées – il est possible de serrer les boulons sans risquer d’ovaliser la section. L’axe de rotation du « ciseau » est défini par la vis et les translations sont interdites. Cette solution semble simple, légère et extrêmement économe en matière mais présente deux désavantages, comme nous le verrons plus loin : en empêchant le jonc de tourner librement sur son axe, on peut le soumettre à de la torsion et diminuer sa résistance en flexion ; les trous demandent un temps de préfabrication des poutres conséquent et affaiblissent la section. Un zoom sur l’écrou de la photographie 4.23f laisse d’ailleurs apparaître un début de délaminage. Afin de résoudre ce problème, nous avons développé pour notre prototype une connexion dédiée en plastique moulé qui permet la bonne cinématique. Elle a fait l’objet d’un dépôt de brevet et sera détaillée à la section 4.2.2.

Processus de montage

Quinn et Gengnagel (2014) identifient quatre grands principes de montage des gridshells élastiques – *pull up, push up, ease down, inflate* – illustrés sur la figure 4.24.

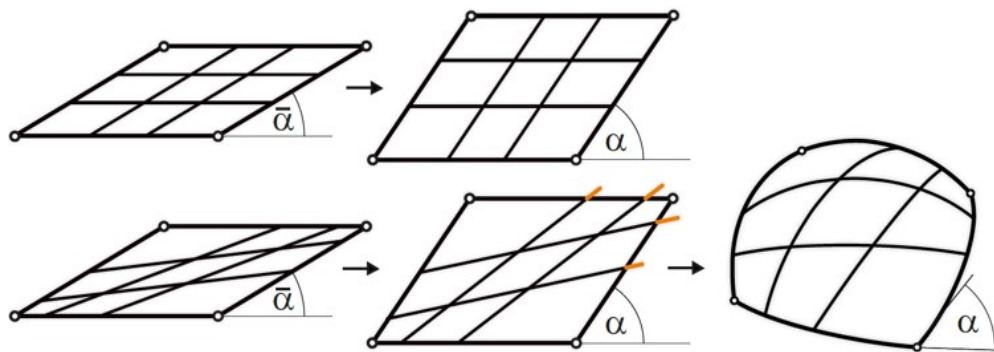


FIGURE 4.24 – Méthodes de montage.

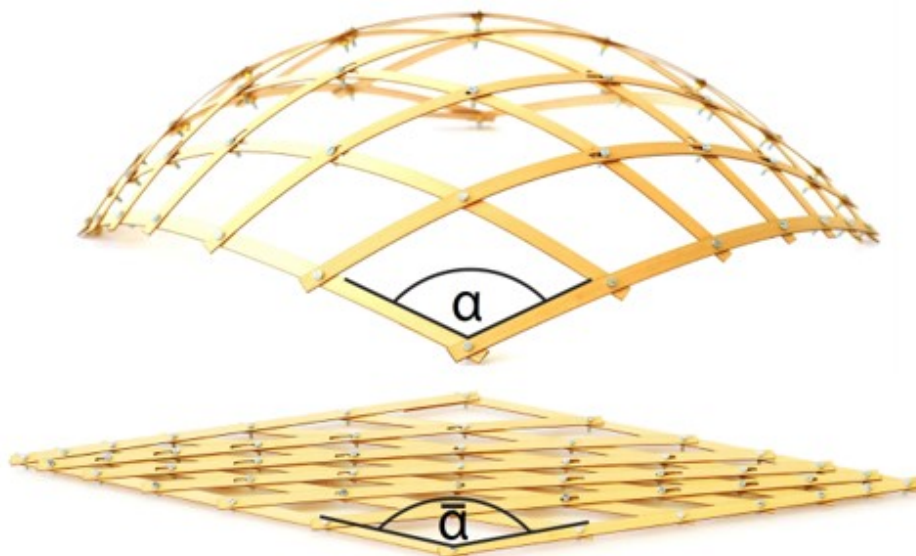
Le levage est effectué en soulevant la grille par des grues – on voit sur l’image cette méthode appliquée au gridshell de Solidays. Le rehaussement s’effectue à partir du sol – au moyen de tours d’échafaudage pour le gridshell de Mannheim ou de simples barres qui servent d’étais pour le premier prototype de l’ENPC (figure 4.24b) – avec une séquence pour monter progressivement toute la grille. L’abaissement se fait lorsque la grille a été construite en hauteur comme c’est le cas pour le gridshell de Downland : les échafaudages sont alors descendus dans certaines zones pour créer des vallées, dessinant peu à peu la forme recherchée (figure 4.24c). On peut voir que cette méthode requiert une quantité impressionnante d’échafaudages et tire parti du poids de la structure – elle semble donc moins pertinente pour des gridshells en composites. Enfin, la mise en forme du gridshell à l’aide d’une membrane pneumatique (figure 4.24d) est la méthode développée par Quinn

et Gengnagel (2014) pour éviter les efforts localisés dans certaines barres qui sont induits par le grutage ou par le poinçonnement de la grille à cause des étais.

A ces processus de montage s'ajoute le fait de contraindre la grille pour la faire flamber, comme on le voit sur la figure 4.24b, où des tirants au sol servent à rapprocher les extrémités des poutres. Cette dernière méthode tire profit de l'élançement des poutres pour les déformer facilement hors-plan. En créant ingénieusement un maillage irrégulier, il est possible de concevoir un mécanisme de déploiement qui exploite la déformation élastique des poutres et les contraintes géométriques imposées par les connexions. Panetta *et al.* (2019) ont ainsi travaillé sur le mécanisme de déploiement de ce qu'ils nomment des *X-shells*. Soriano *et al.* (2019) et Pillwein *et al.* (2020) ont étudié une sous-catégorie de cette classe de structures, les *G-shells*, où la grille est un maillage géodésique de la surface. La figure 4.25 illustre la cinématique de déploiement qui permet d'obtenir une structure spatiale à partir d'un maillage irrégulier. La forme finale est en quelque sorte inscrite, ou programmée, dans le motif de la grille initiale.



(a) En haut : cinématique de déploiement plan d'une grille bidirectionnelle (régulière). En bas : les éléments sont contraints et doivent se déformer hors-plan.



(b) Grille repliée et déployée. Les connexions autorisent le ciseau et des translations partielles.

FIGURE 4.25 – Cinématique de déploiement par flambement des poutres (images : Pillwein *et al.* (2020)).

Contreventements

Le premier moyen utilisé pour rigidifier la grille, à Mannheim, a été de bloquer les nœuds en resserrant les tiges filetées au cours du montage (figure 4.26a). Jugé peu efficace, il a été complété par un contreventement par câbles, tendus en diagonale (figure 4.26b). Ce système est léger mais il nécessite la pose de deux directions de câbles, ceux-ci ne pouvant être sollicités qu'en traction, ainsi qu'une séquence pour les précontraindre. La triangulation au moyen d'une troisième série de barres (figure 4.26c) permet d'éviter ce problème tout en utilisant les mêmes éléments (barres et connexions) pour le contreventement. Douthe *et al.* (2010) montrent que le gain de raideur au vu de la masse ajoutée est considérable. Une autre façon de contreventer la grille de manière très efficace se fait par l'emploi de panneaux rigides, comme sur l'image 4.26d qui montre la couverture du gridshell du *Savill Building*. La dernière proposition vient de Cuvilliers *et al.* (2017) qui utilisent le gridshell en composites comme cintre pour poser un mat de verre et couler une peau en béton fibré, servant à la fois de contreventement et de couverture. Ce prototype de 10 m², *Booby*, est toujours visible à l'ENPC.



(a) Blocage des nœuds.



(b) Contreventement par câbles.



(c) Triangulation.



(d) Panneaux rigides.



(e) Enveloppe collaborante.

FIGURE 4.26 – Rigidification de la grille.

4.1.5 Géométrie et mécanique

La conception d'un gridshell passe par la conception d'un mécanisme. L'un des moyens d'obtenir un mécanisme à un degré de mobilité est de construire une grille sans raideur en cisaillement, qui puisse être pliée et dépliée dans le plan, chaque liaison entre les barres autorisant un mouvement de ciseaux (voir figure 4.27), ou un *mécanisme de pantographe* pour reprendre l'analogie de Soriano *et al.* (2019). La condition cinématique associée est que la grille soit constituée de parallélogrammes (Otto *et al.*, 1974), c'est-à-dire que pour chaque lit de barres, les barres soient parallèles entre elles. Si l'espacement entre les nœuds est constant, la grille est dite régulière : elle est alors constituée de losanges lorsqu'elle est à plat et de losanges gauches une fois déployée dans l'espace, comme sur la figure 4.28 où la grille a préalablement été refermée sur elle-même. Un tel maillage de losanges déformés sur une surface courbe constitue ce que l'on appelle mathématiquement un *réseau de Tchebychev* sur cette surface. L'un des moyens de construire un réseau de Tchebychev sur une surface donnée est d'utiliser la méthode du compas, décrite dans *IL 10 Gitterschalen* (Otto *et al.*, 1974) et illustrée par la figure 4.29 en deux dimensions. Le principe reste le même pour une surface tridimensionnelle mais certains couples de courbes donnent des maillages plus satisfaisants que d'autres. De plus, certaines surfaces ne sont pas maillables par un réseau de Tchebychev (une calotte sphérique plus grande qu'un hémisphère, par exemple). Les conditions d'existence globale de réseaux de Tchebychev sur des surfaces, l'étude de leurs singularités et leur construction ont fait l'objet de la thèse de Yannick Masson il y a quelques années (Masson, 2017).



FIGURE 4.27 – Degré de mobilité dans le plan d'une grille bi-directionnelle.

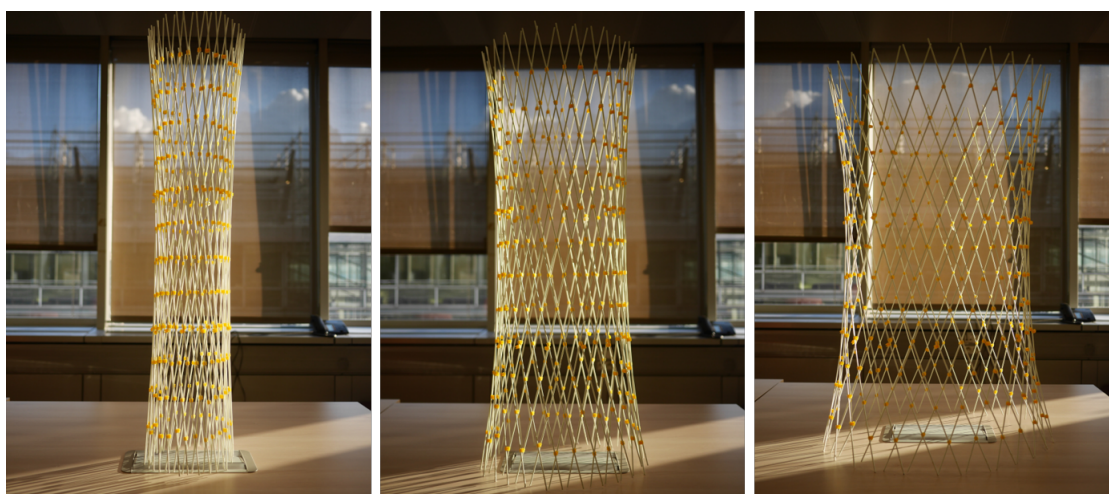


FIGURE 4.28 – Mécanisme global de la grille refermée.

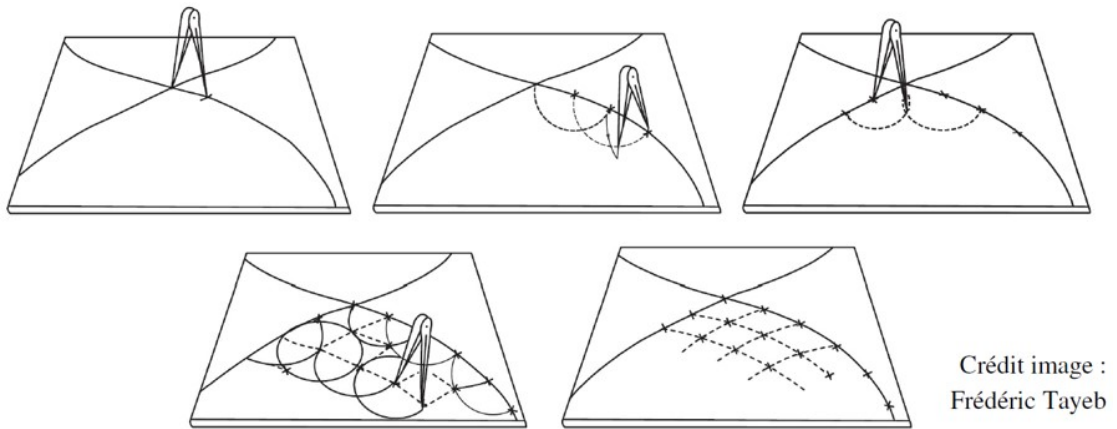


FIGURE 4.29 – Méthode du compas. A partir du point d’intersection de deux courbes sécantes et du pas du maillage, représenté par l’écartement du compas, on peut propager un réseau de parallélogrammes le long des courbes.

Cependant, même si l’on se donne une surface et un réseau de Tchebychev sur celle-ci, rien ne garantit qu’une grille quelconque pourra effectivement être déployée dans cette forme. Jusqu’ici, le maillage a été créé de manière purement géométrique. C’est un ensemble de lignes sans propriétés matérielles, sans considération des lois de la mécanique, alors que la forme de la structure correspond à un état d’équilibre statique du système sous l’action d’efforts extérieurs. C’est la forme permettant de résister aux forces qui lui sont appliquées et de satisfaire un ensemble de contraintes géométriques, compte tenu des caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent. La géométrie de la structure à l’équilibre statique est donc plus ou moins différente de celle du maillage initial généré à l’étape précédente. Si la forme finale du gridshell doit être rigoureusement la même que la forme du maillage initial, le concepteur doit choisir les caractéristiques des éléments, calculer l’état d’équilibre statique de la structure ainsi définie et itérer ce processus jusqu’à ce que la forme obtenue soit identique à la forme initiale. Cette étape, généralement appelée *recherche de forme* (ou *form-finding* en anglais), a pour but d’associer une grille matériellement définie à la forme qu’elle prendra ; elle s’achève lorsque le concepteur sait qu’il a les éléments adéquats pour construire la grille et qu’il est satisfait de la forme de la structure à l’équilibre.

Une méthode numérique appropriée pour déterminer la position à l’équilibre d’un réseau de poutres est celle de la relaxation dynamique, initialement inventée par Day (1965) puis adaptée aux calculs de gridshells (Adriaenssens *et al.*, 1999). En particulier, elle a été largement utilisée au sein du laboratoire Navier – depuis son implémentation sous Scilab par Cyril Douthe sous le nom *AlgoRD* (Douthe, 2007) – dans les travaux de thèse de Lina Bouhaya (2010), Frédéric Tayeb (2015), Lionel Du Peloux (2017) et Romain Boulaud (2020). Nous renvoyons à la thèse de Cyril Douthe pour une présentation détaillée de l’algorithme et à celle de Lina Bouhaya pour un aperçu d’autres méthodes de calcul. Pour faciliter la phase de conception, Lionel du Peloux a développé un plug-in de *Grasshopper* reprenant la méthode de la relaxation dynamique : *Marsupilami* (du Peloux, 2016). C’est cet outil que nous utilisons dans notre travail.

4.2 Corolle : un prototype de gridshell végétalisé et instrumenté

Dans cette partie nous allons décrire le dispositif expérimental qui a été mis au point pour la mesure des flux dus à l'évapotranspiration et à l'ombrage. Le recours à un gridshell s'explique par l'envie d'avoir une structure légère et couvrant une grande surface. La légèreté du dispositif est importante pour pouvoir déceler de faibles variations de masse, qui correspondent à la quantité d'eau évaporée. Nous reviendrons sur ce point dans la section 5.1.1. Quant à l'aire de la surface ombragée au sol, elle doit être suffisamment grande pour trois motifs. Les deux premiers sont d'ordre pratique, d'un point de vue expérimental : pouvoir laisser le capteur de rayonnement solaire au même emplacement, à l'ombre, et éviter de le déplacer au cours de la journée ; faire en sorte que le capteur de rayonnement thermique mesure le rayonnement infrarouge émis par toute une zone à l'ombre (sur le plus grand angle solide possible) et non pas par une petite surface à l'ombre au milieu d'une grande surface au soleil, ce qui compliquerait l'interprétation des résultats. Le troisième est que l'on cherche à se rapprocher des hypothèses décrites dans la section 2.2.1 afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux aux résultats théoriques. Nous commençons par présenter la conception de la structure gridshell, avant d'expliquer la façon dont elle a été dimensionnée et de décrire la construction des prototypes successifs.

4.2.1 Conception du gridshell

Outils de conception : logiciels et maquettes

La conception du gridshell a été réalisée sur le logiciel *Rhinoceros/Grasshopper*¹ pour deux raisons principales :

- la possibilité de créer des modèles paramétriques afin d'explorer différentes possibilités de design de manière conviviale ;
- le fait qu'il serve d'interface entre plusieurs outils (génération et visualisation de la géométrie, méthode numérique de calcul des gridshells, analyse structurale).

Nous avons également construit des maquettes avec des joncs en composites de 3 mm de diamètre et des connexions fabriquées par impression 3D, visibles sur la figure 4.30, pour tester des propositions et valider le concept final.

Le prototype de gridshell définitif, appelé *Corolle*, a été obtenu en itérant trois étapes, détaillées dans les paragraphes suivants :

1. la création d'un réseau de Tchebychev que l'on espère proche de la configuration déformée ;
2. l'attribution de propriétés mécaniques à cette géométrie pour déterminer la forme du gridshell à l'équilibre statique par relaxation dynamique ;
3. l'étude du comportement de la structure pour divers cas de charges.

1. *Rhinoceros 3D* est un logiciel de CAD et son extension *Grasshopper* une plateforme de programmation visuelle permettant de créer des modèles paramétriques et des algorithmes de manière graphique. *Grasshopper* a été utilisé ici pour faire du design paramétrique en ingénierie des structures mais peut aussi servir à d'autres domaines. Par exemple, dans le cas de la conception d'un bâtiment, des modèles d'analyse structurale, de thermique et d'analyse de cycle de vie peuvent être reliés afin de voir comment une modification de la géométrie ou des matériaux affecte les performances de l'ouvrage.

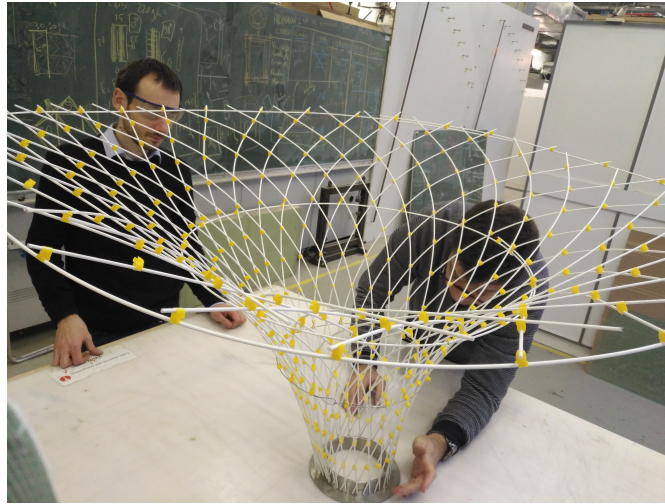
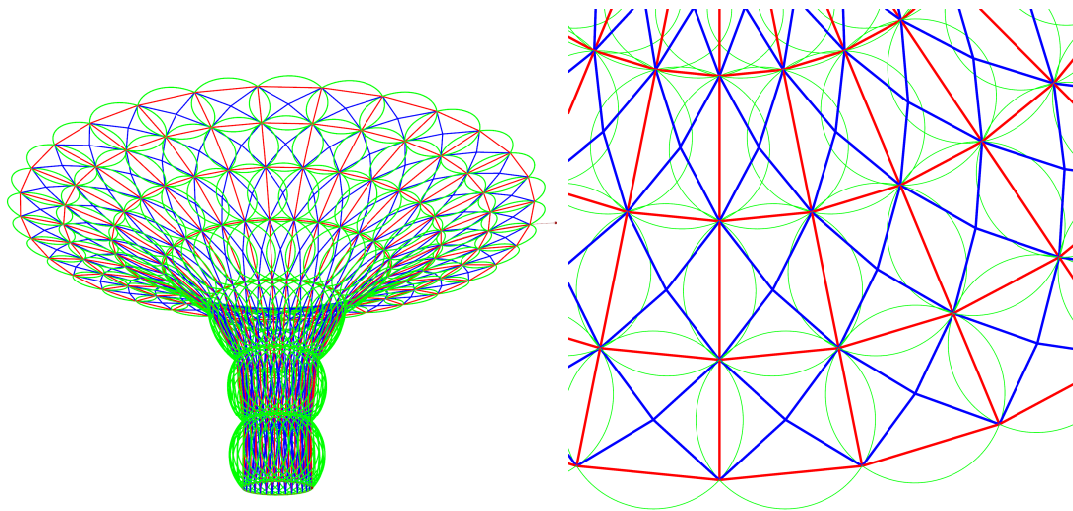


FIGURE 4.30 – Maquette à l'échelle 1/6

Génération d'un maillage isoradial et réseau de Tchebychev associé

Par rapport aux gridshells précédents, le design proposé présente des singularités importantes. Il permet tout d'abord de simplifier la gestion des rives qui reste une contrainte assez forte lors de la fabrication de telles structures, car comportant de nombreuses barres. Ici, on le verra, la grille se referme sur elle-même, ce qui permet une gestion plus aisée des ancrages. Elle est de plus basée sur un maillage isoradial, ce qui lui confère d'autres avantages. Ce type de maillage a été étudié par Douthe *et al.* (2017) et nous l'explicitons très rapidement au moyen de la figure 4.31. Le maillage rouge sur la figure est dit isoradial car il dérive d'un maillage de cercles qui ont tous le même rayon. Chaque quadrilatère rouge est plan puisqu'il est inscrit dans un cercle par construction, ce qui offre une possibilité de contreventement facile et économique, par des panneaux plans, de structures à surface courbe. Une autre propriété du maillage isoradial est que les lignes brisées qui le composent sont une version discrète des lignes de courbure principales de la surface. Le maillage bleu, passant par les nœuds du maillage isoradial et les centres des cercles, est de pas constant, égal au rayon des cercles : c'est donc bien un réseau de Tchebychev. Il est dit discret car composé de segments. Nous renvoyons à l'article de Douthe *et al.* (2017) pour une description détaillée de l'algorithme de génération du maillage de cercles, qui constitue le cœur de la méthode. Il est à noter que, contrairement à la méthode du compas qui vise à ajuster un réseau de Tchebychev sur une surface donnée au préalable, ce procédé génère simultanément le maillage et la surface, ce qui peut être plus intuitif pour le concepteur. En outre, cette approche permet de travailler avec un maillage qui intègre déjà des propriétés géométriques qui peuvent s'avérer utiles.

Les principales étapes de l'obtention de la géométrie du gridshell sont illustrées sur la figure 4.32. On crée d'abord une génératrice dont le mouvement le long d'une courbe guide, appelée directrice, génère une surface dont la géométrie du gridshell sera proche. Dans l'exemple de la figure 4.32a, les deux courbes sont planes et la directrice est fermée. On propage ensuite un maillage de cercles le long de ces deux courbes, déterminé par le choix du nombre de subdivisions de la directrice (le nombre de barres) et le rayon des cercles (le pas du maillage), comme on le voit sur la figure 4.32b. Ce maillage de cercles sert de support à la fois à un maillage isoradial (figure 4.32c) - qui a la particularité de



(a) Vue en perspective.

(b) Vue de dessus (détail).

FIGURE 4.31 – Dualité entre un maillage isoradial (en rouge) et un réseau de Tchebychev (en bleu), construits à partir d'un maillage de cercles (en vert).

définir une surface composée uniquement de quadrilatères plans (figure 4.32d) - et à un réseau de Tchebychev (figure 4.32e). On peut conserver un maillage fin pour les calculs et retirer des barres si l'on souhaite construire un maillage moins dense pour la structure réelle (figure 4.32f). La géométrie de la grille obtenue par ce procédé est représentée sur la figure 4.32g. On peut compléter cette géométrie par des éléments destinés à bloquer la mobilité de la grille une fois qu'elle sera déployée dans cette forme (figure 4.32h).

Relaxation dynamique de la structure

En réalité, rien n'assure pour l'instant que la grille déployée atteindra exactement cette géométrie. Pour déterminer la forme de la structure à l'équilibre statique, il faut conférer au maillage des propriétés matérielles et mécaniques : le module d'élasticité des poutres, ainsi que l'aire de leur section et leur moment quadratique (il n'y en a qu'un ici car nous travaillons avec des poutres à section circulaire). Il faut également définir des contraintes géométriques – les conditions aux appuis et le type de liaison entre les poutres – et les forces extérieures exercées sur le système – a minima le poids propre de la structure, réparti sur les nœuds. La figure 4.33a montre la forme du gridshell à l'équilibre statique si l'on assigne à tous les éléments du maillage (les poutres et les contreventements de la figure 4.32h) les propriétés mécaniques des joncs, résumées à la table 4.1.

		Valeur	Unité
Rayon	r	9	mm
Module d'Young	E	45	GPa
Section pleine	S	2.54	cm ²
Moment quadratique	I	0.515	cm ⁴
Masse linéique		0.5	kg.m ⁻¹

TABLE 4.1 – Caractéristiques physiques des joncs utilisés.

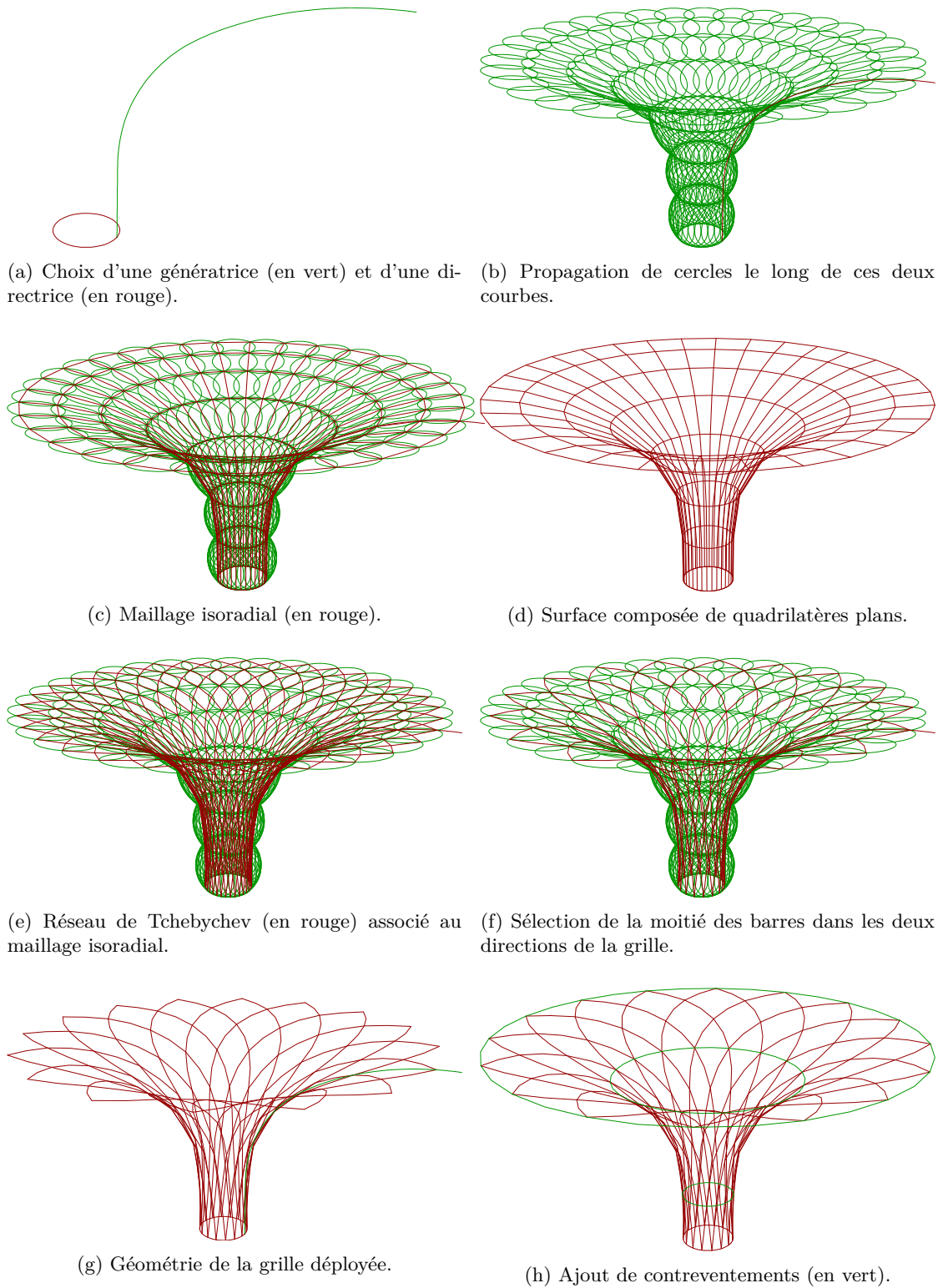
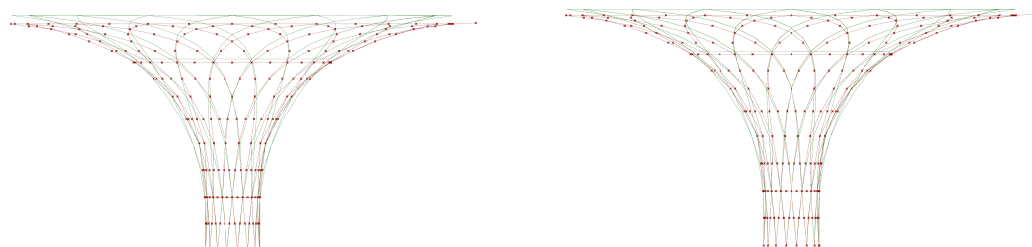


FIGURE 4.32 – Construction d'un réseau de Tchebychev à partir d'une génératrice et d'une directrice fermée.

La figure 4.33b indique que cette forme serait légèrement plus proche de l'idée originale si les joncs étaient dix fois plus lourds. On voit, dans ce cas de figure, que la forme à l'équilibre de ce gridshell est peu sensible à la masse des poutres, ou qu'un chargement uniformément réparti modifie peu la géométrie de la structure au repos.

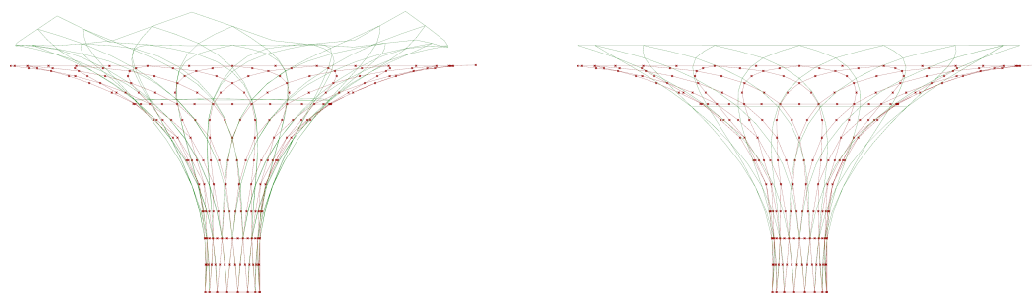


(a) Joncs avec une masse de 0,5 kg par mètre.

(b) Joncs avec une masse de 5 kg par mètre.

FIGURE 4.33 – Géométrie initiale (en rouge) et structure à l'équilibre statique (en vert) pour différents poids propres. La base du gridshell fait un mètre de diamètre.

On peut également étudier les formes prises par la structure lorsque l'on joue avec la raideur des contreventements. La figure 4.34 montre deux exemples obtenus en modifiant les caractéristiques des cerces (les contreventements circulaires, en vert, de la figure 4.32h). Sur la figure 4.34a, le module d'Young de la cerce supérieure, en compression, a été diminué d'un tiers ($E = 30$ GPa) par rapport à la structure représentée sur la figure 4.33a, ce qui cause le flambement de la cerce. Sur la figure 4.34b, on a assigné à la cerce intermédiaire un module d'Young de $E = 0,001$ GPa, lui conférant une raideur quasi-nulle, ce qui laisse la structure prendre une forme plus conique.



(a) Diminution du module d'Young de la cerce supérieure.

(b) Diminution du module d'Young de la cerce intermédiaire.

FIGURE 4.34 – Géométrie initiale (en rouge) et structure à l'équilibre statique (en vert) pour différentes raideurs des contreventements.

L'objectif de cette étape n'est pas simplement d'explorer de nouvelles formes mais aussi de limiter les efforts appliqués aux éléments structurels, afin d'utiliser moins de matériaux ou des matériaux moins performants, en vue de réduire le coût (économique et environnemental) de la structure. Les contraintes dans les poutres, les contreventements et les connexions sont indissociables de la géométrie de la structure et des matériaux utilisés. Pour illustrer le compromis à faire entre la forme de la structure et les contraintes

dans les éléments, on peut reprendre l'exemple de la figure 4.34b : en augmentant la raideur de la cerce intermédiaire, qui joue un rôle de « ceinture », on peut forcer la structure à adopter une forme plus proche de la géométrie souhaitée. Cependant, cela se fait au détriment des efforts dans les poutres, puisqu'on leur impose une courbure plus importante, dans la cerce, et dans les connexions auxquelles la cerce est attachée.

Analyse structurale

Une fois que l'on a déterminé la géométrie de la structure à l'équilibre, il faut également étudier sa réponse à divers cas de charge, pour s'assurer qu'elle pourra résister à tous les efforts auxquels elle sera soumise pendant son utilisation. C'est donc une étape de vérification. Nous réalisons ces calculs avec un autre plug-in de *Grasshopper* : *Karamba3D* (Preisinger et Heimrath, 2014). La figure 4.35 donne un aperçu de trois cas de charge statiques. Le premier correspond à une charge uniformément répartie, qui pourrait être une charge de neige. Le deuxième est une charge ponctuelle qui représente un cas de vandalisme, où quelqu'un escaladerait la structure et s'y suspendrait. Le troisième est un chargement dissymétrique, qui pourrait être causé par le poids des plantes qui pousseraient uniquement d'un côté de la structure.

Dans notre cas, le principal critère dimensionnant est la courbure des joncs en matériaux composites, qui se traduit par une sollicitation des joncs en flexion : en deçà d'un certain rayon de courbure, le moment imposé est trop important, ce qui conduit à une rupture fragile de la section. En effet, pour une poutre en flexion simple, le moment fléchissant M_f est proportionnel à la courbure κ et inversement proportionnel au rayon de courbure R :

$$M_f = \kappa EI = \frac{EI}{R} \quad (4.1)$$

où E est le module d'Young de la poutre et I son moment quadratique, égal à $\pi r^4/4$ pour une section circulaire. EI correspond à la raideur en flexion de la poutre. La contrainte normale à la section – notée σ_{11} – variant linéairement en fonction de la distance à la fibre neutre, elle atteint sa valeur maximale pour les fibres inférieure et supérieure :

$$\sigma_{11} = \frac{M_f}{I} \cdot r \quad (4.2)$$

La contrainte normale dans les fibres extrêmes peut donc s'exprimer en fonction du rayon de courbure :

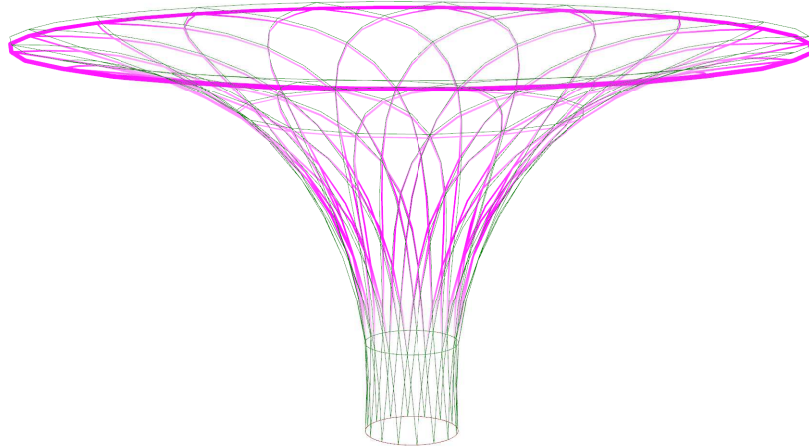
$$\sigma_{11} = \frac{Er}{R} \quad (4.3)$$

Fixer un seuil σ_{max} pour la contrainte normale de la fibre extrême en traction équivaut donc à définir un critère sur le rayon de courbure minimal admissible :

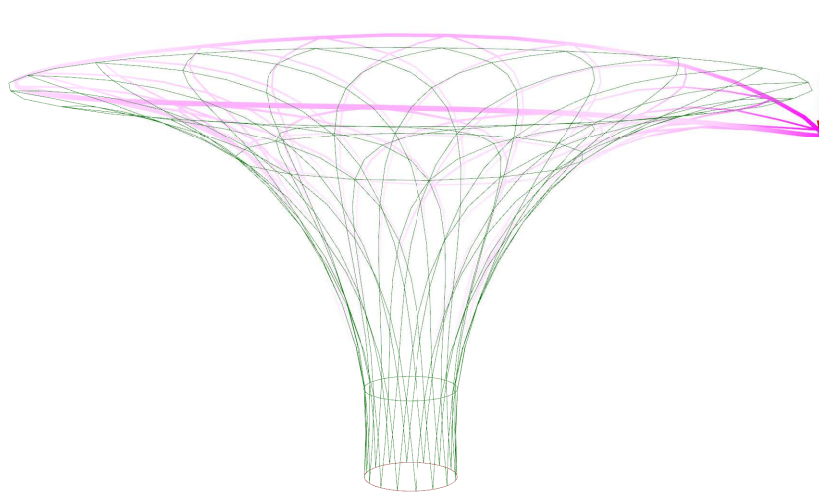
$$\sigma_{11} \leq \sigma_{max} \iff R \geq R_{min} \quad (4.4)$$

avec $R_{min} = \frac{Er}{\sigma_{max}}$.

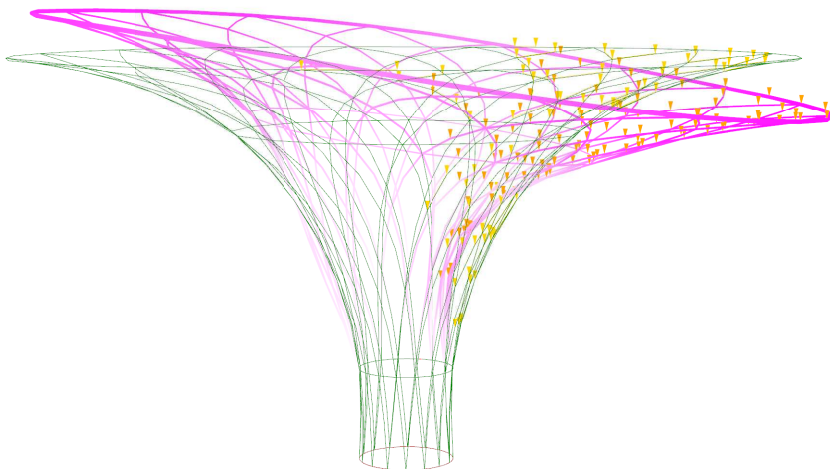
Pour les joncs de 18 mm de diamètre que nous avons, les données du fabricant sont un module d'Young de 45 GPa et une contrainte à la rupture de 700 MPa, ce qui correspond à un rayon de courbure minimal de 58 cm. Les résultats sont résumés au sein du tableau 4.2.



(a) Charge uniformément répartie ($10G = 11 \text{ kN}$).



(b) Charge ponctuelle ($P = 1 \text{ kN}$).



(c) Chargement dissymétrique ($q = 0,4 \text{ kN/m}^2$ sur 23 m^2).

FIGURE 4.35 – Différents cas de charge statiques. Les déformées sont à l'échelle et l'intensité du rose correspond au déplacement par rapport à la géométrie initiale.

	Valeur	Unité
Module d'Young E	45	GPa
Contrainte à la rupture σ_{max}	700	MPa
Rayon de courbure minimal R_{min}	58	cm
Moment fléchissant M_f	400	N.m

TABLE 4.2 – Courbure minimale et moment fléchissant admissibles des joncs calculés à partir des données du fabricant.

Il faut cependant considérer une contrainte admissible inférieure lorsque la durée du chargement est longue (disons une dizaine d'années), ce qui peut causer du fluage et aboutir à une rupture différée des poutres (Kotelnikova-Weiler, 2012). Pour ce type de composites, utilisant des fibres de verre, Kotelnikova-Weiler *et al.* (2013) recommandent de limiter le niveau de contrainte à 35% de la résistance ultime, ce qui donnerait un rayon de courbure minimal de 1.66 m. Le chargement permanent est dû à la mise en forme de la structure (et de manière négligeable à son poids propre et au poids des plantes), donc ce premier critère de courbure peut être vérifié sur la géométrie de la structure à l'équilibre, après la phase de relaxation dynamique. Il peut donc être intégré en amont dans le processus de conception. En revanche, il reste à vérifier que les chargements variables, comme ceux présentés sur la figure 4.35, ne modifient pas trop la géométrie de la structure : il s'agit d'empêcher des déformations qui créeraient, localement, une courbure critique dans une poutre. Là encore, dans le cas des actions à court terme, il est préférable de considérer une contrainte inférieure à 700 MPa pour prendre une marge de sécurité. Pour les chargements de courte durée, une contrainte maximale admissible valant 50% de la contrainte à la rupture a été choisie lors de la conception de la cathédrale éphémère de Créteil (Du Peloux *et al.*, 2016). Un tel coefficient de sécurité donne une valeur limite du rayon de courbure de 1.16 m. Les valeurs des contraintes admissibles utilisées et des résistances de design associées sont récapitulées dans le tableau 4.3.

		Permanent	Variable	Unité
Contrainte maximale de design	$\sigma_{max,d}$	245	350	MPa
Rayon de courbure minimal	$R_{min,d}$	1.66	1.16	m
Moment fléchissant de design	$M_{f,d}$	140	200	N.m

TABLE 4.3 – Contraintes admissibles utilisées et résistances de design associées, selon le type de chargement.

Si la structure ne convient pas, il faut reprendre ces trois étapes – création d'un maillage, calcul de l'état d'équilibre de la structure, analyse structurale. La première étape permet de contrôler la forme générale du gridshell en choisissant une directrice et une génératrice différentes. On peut également jouer sur le nombre de joncs, leur densité et le pas du maillage, qui ont une influence sur la courbure de chaque jonc et sur la raideur de la structure. Lors de la deuxième étape, il est possible de modifier le nombre de contreventements, leur position et leurs caractéristiques mécaniques – jusqu'à obtenir une solution satisfaisante d'un point de vue structurel et pouvoir passer à l'étape de construction.

4.2.2 Construction

Nous décrivons dans cette partie les prototypes successifs que nous avons construits à l'Ecole des Ponts, les différents problèmes rencontrés, les solutions envisagées et les réflexions qui nous ont menés au design final. Nous n'avons utilisé que le type de joncs en matériaux composites que nous avons en stock au laboratoire : des joncs pleins de 18 mm de diamètre, de 12 mètres de long, obtenus par pultrusion, constitués de fibres de verre et de résine polyester.

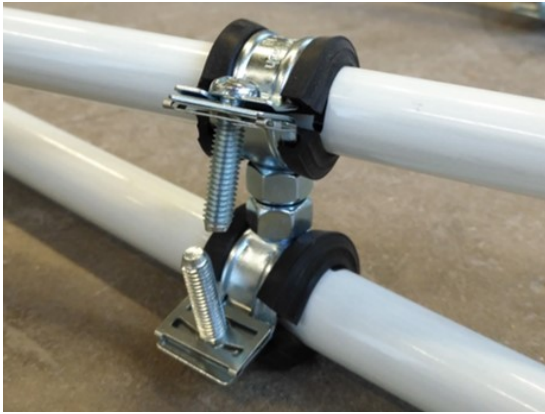
Premier prototype avec des colliers de plomberie

Un premier prototype a été construit lorsque la phase de conception se terminait afin de se confronter à la réalité : ressentir les efforts nécessaires à la manipulation des joncs et à la mise en forme la structure, voir comment se comportaient les connexions et vérifier si la forme et le déploiement étaient conformes au modèle. Des colliers de serrage de plomberie ont été utilisés pour assembler les poutres entre elles. La figure 4.36a montre l'une de ces connexions : chaque collier métallique est recouvert d'une gaine en caoutchouc EPDM et peut se fermer par un système de fixation rapide avec une vis. A la base est soudé un écrou taraudé qui permet de relier deux colliers au moyen d'une petite tige filetée. Ces connexions ressemblent, dans leur fonctionnement, aux noix d'échafaudage employées pour les précédents gridshells en composites conçus à Navier :

- 1) la connexion doit permettre une libre rotation des joncs entre eux (l'axe de la rotation étant ici l'axe de la tige filetée) ;
- 2) la connexion ne doit pas translater mais doit permettre une rotation du jonc sur son axe afin d'éviter de la torsion dans la poutre ;
- 3) un matériau plus mou (ici de l'EPDM) permet d'éviter les concentrations de contrainte susceptibles de se produire par le serrage du collier métallique.

Elles ont été choisies car les noix d'échafaudage sont de taille standard et n'existent pas pour des sections aussi petites. Après avoir marqué les joncs au feutre, les connexions ont été disposées tous les 90 cm pour former une grille régulière (voir figure 4.36b). Nous avons opté pour des joncs de 6 mètres de long (figure 4.36c) pour n'avoir qu'à couper en deux nos joncs initiaux et ne pas avoir de chutes. On place les sept rangées de connexions, y compris sur les poutres aux extrémités, afin de pouvoir refermer la grille en cylindre (figure 4.36d). Ce cylindre est ensuite soulevé d'un côté au moyen d'un pont roulant et placé à la verticale. On effectue le montage de sorte que le gridshell soit à l'envers : une corde relie la base de la structure (le câble mauve sur la figure 4.36e) au pont roulant en passant par un ancrage au sol qui joue un rôle de poulie ; on remonte le pont roulant pour rapprocher la base du sol tout en écartant les extrémités des joncs qui touchent le sol. Enfin, on bloque le mécanisme de déploiement de la grille localement (figure 4.36f) en empêchant les derniers « pétales » de se refermer par une corde que l'on tend entre la dernière et l'avant-dernière rangée de connexions.

Ce processus s'est déroulé assez rapidement car il n'a nécessité qu'une journée à trois personnes. Le marquage des joncs et la pose des 98 connexions a pris une demi-journée. La formation du cylindre a été plus problématique car la grille ne se manipule pas aisément lorsqu'il faut la soulever et connecter les derniers joncs entre eux en l'air et non au sol. La phase de montage a confirmé qu'il fallait peu d'efforts pour donner sa forme à la structure (la force verticale enregistrée par le pont roulant étant de l'ordre de



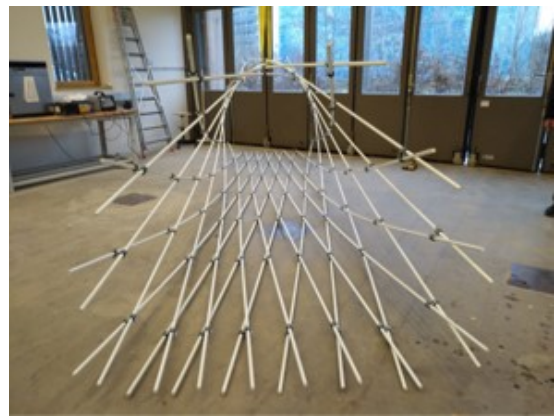
(a) Connexion entre joncs.



(b) Grille régulière de pas 90 cm.



(c) 28 joncs de 6 mètres de long.



(d) Fermeture de la grille.



(e) Déploiement.



(f) Blocage du mécanisme.

FIGURE 4.36 – Construction du premier prototype.

1 kN) et que la cinématique de déploiement était celle escomptée. Cependant, nous nous sommes aperçus que les connexions n'étaient pas appropriées : durant la mise en forme du gridshell, elles se sont déformées et ont glissé le long des joncs, comme le montre la figure 4.37. On a pu relever des glissements de quelques centimètres alors que la structure n'était pas déployée totalement, ainsi que des connexions qui commençaient à s'ouvrir. Nous avons donc tenté un deuxième type d'assemblages.



FIGURE 4.37 – Déformation et glissement des connexions.

Deuxième prototype avec des boulons

Contrairement aux gridshells décrits précédemment qui utilisaient des tubes (creux), celui-ci est fabriqué avec des joncs (sections pleines), ce qui laisse penser que des assemblages par boulons sont envisageables sans trop fragiliser les poutres. Nous avons opté pour des vis inox de diamètre 4 mm qui ont nécessité de percer des trous de 4,2 mm dans le jonc. Pour évaluer la perte de résistance de la section due au perçage, nous avons effectué des tests en flexion de joncs troués à mi-longueur en utilisant la même méthode que Cyril Douthe (2007). Cette méthode tire parti des propriétés géométriques, connues, de l'*elastica d'Euler*, qui est la forme à l'équilibre prise par une poutre bi-articulée une fois qu'elle a flambé. Le protocole expérimental est illustré sur la figure 4.38 : on fléchit un jonc au moyen d'une élingue accrochée à ses extrémités que l'on raccourcit progressivement jusqu'à ce que le jonc rompe. A chaque étape, on augmente l'angle d'attaque α que fait le jonc avec l'horizontale et on note la portée a entre les extrémités du jonc, le déplacement transversal à mi-portée f , et la force F dans l'élingue.

Ces grandeurs permettent de construire plusieurs paramètres adimensionnels qui caractérisent la géométrie de la poutre : f/l , a/l , et F/F_c , où l est la longueur initiale de la poutre et F_c la force critique de flambement ($F_c = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$). Les valeurs mesurées juste avant la rupture servent à déterminer, *in fine*, le moment fléchissant maximal que le jonc percé peut supporter et le rayon de courbure correspondant. Les trois ratios précédents peuvent s'écrire en fonction de l'angle d'attaque :

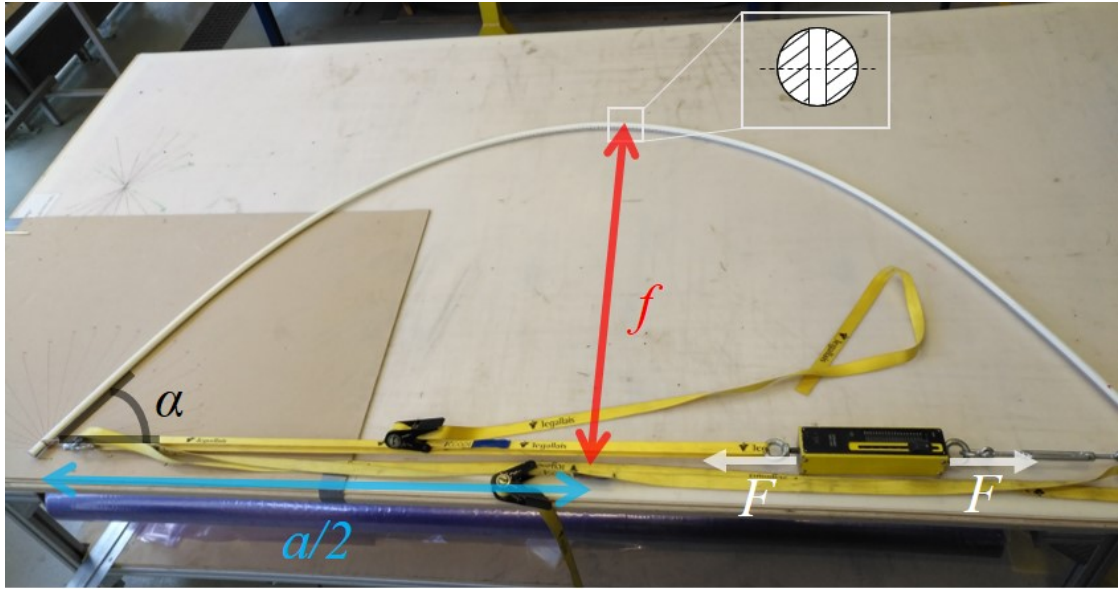


FIGURE 4.38 – Protocole expérimental et grandeurs mesurées. La longueur du jonc est notée l . Le trou est dans le plan de la table, c'est-à-dire perpendiculaire à la fibre neutre de la section.

$$\frac{f}{l} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{K \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (4.5)$$

$$\frac{a}{l} = 2 \frac{E \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)}{K \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)} - 1 \quad (4.6)$$

$$\frac{F}{F_c} = \frac{4K^2 \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)}{\pi^2} \quad (4.7)$$

où K et E sont, respectivement, les intégrales elliptiques (de Legendre) complètes de première et deuxième espèce, que l'on peut estimer numériquement :

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}} \quad (4.8)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi \quad (4.9)$$

Nous renvoyons à l'article de Courbon (1984) ou à la thèse de Cyril Douthe pour la démonstration de ces relations. Le rayon de courbure minimal, obtenu à mi-longueur de la poutre, peut donc également s'exprimer en fonction de α :

$$R = \frac{EI}{Ff} = \frac{l}{4K \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4.10)$$

La figure 4.39 donne les valeurs théoriques de f/l , a/l , F/F_c et R/l pour α variant de 10° à 70° .

La mesure seule de l'angle α à la rupture pourrait suffire à déterminer le rayon de courbure minimal mais, dans la pratique, cet angle n'est pas commode à mesurer. Il

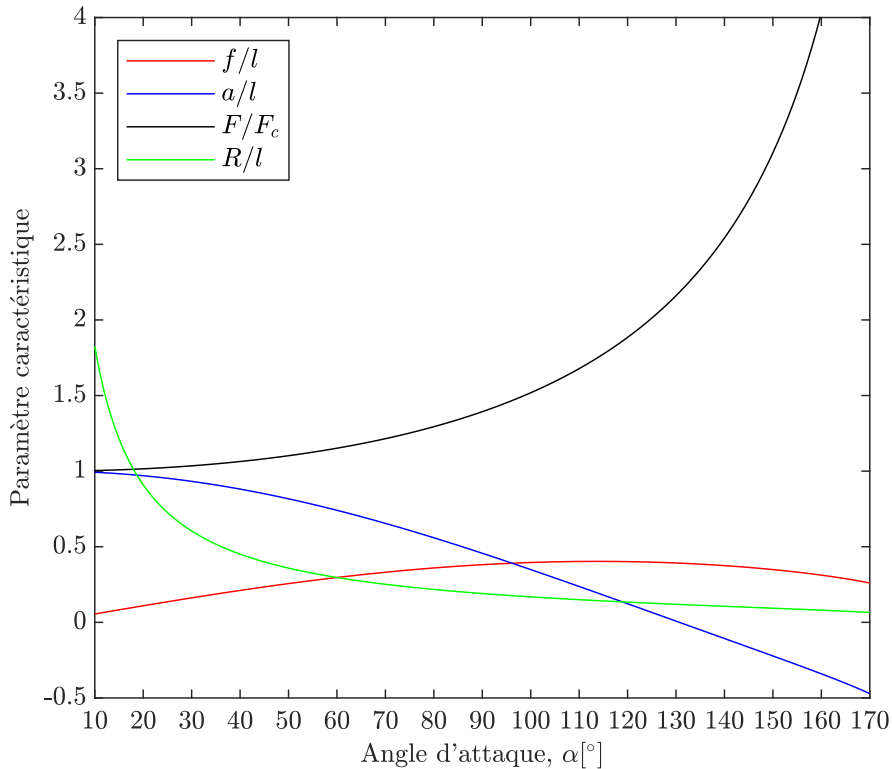


FIGURE 4.39 – Valeurs caractéristiques de l'elastica.

vaut donc mieux caractériser la géométrie par l'un des trois paramètres f/l , a/l ou F/F_c . Afin de savoir lequel de ces ratios il est préférable d'utiliser pour minimiser les erreurs de mesure, on peut commencer par tracer la dérivée de R/l par rapport à chacun d'entre eux, comme sur la figure 4.40. Pour une incertitude Δp sur le paramètre p , l'incertitude sur le rayon de courbure vaut (en supposant que la mesure de la longueur l est exacte) :

$$\Delta R = \frac{\partial \left(\frac{R}{l} \right)}{\partial p} \Delta p l \quad (4.11)$$

On privilégie donc le paramètre pour lequel la valeur de $\frac{\partial \left(\frac{R}{l} \right)}{\partial p}$ est basse. La figure 4.40 montre tout d'abord que la détermination du rayon de courbure est très sensible à une erreur de mesure sur f/l , a/l ou F/F_c pour de petits angles d'attaque, ainsi qu'autour de 115° pour f/l . Elle indique également que chacun des paramètres est, a priori, le plus approprié pour une plage angulaire spécifique : f/l pour un angle d'attaque faible ($\alpha \leq 35^\circ$ environ), a/l pour α compris entre 35° et 90° , et F/F_c pour un angle d'attaque élevé. Cependant, il faut aussi prendre en compte l'incertitude Δp qui varie selon la grandeur mesurée. L'erreur de mesure sur les longueurs (la portée a ou la flèche f) est de l'ordre du millimètre, ce qui donne une incertitude Δp de l'ordre de 10^{-4} pour une poutre de 3 mètres de long, alors que l'erreur sur la tension de l'élingue est grande (environ 1 daN) vu le dynamomètre utilisé, ce qui donne une incertitude beaucoup plus importante : $\Delta p = 0.04$ en considérant une force critique de flambement de 25 daN. En conclusion, pour l'expérience, il est préférable que la rupture du jonc survienne pour un

angle α compris entre 50° et 100° où les ratios a/l et f/l donneront des résultats corrects ($\Delta R \leq 2$ mm, ce qui est largement suffisant). On peut donc choisir la longueur du jonc de sorte que la rupture se produise dans cette plage angulaire.

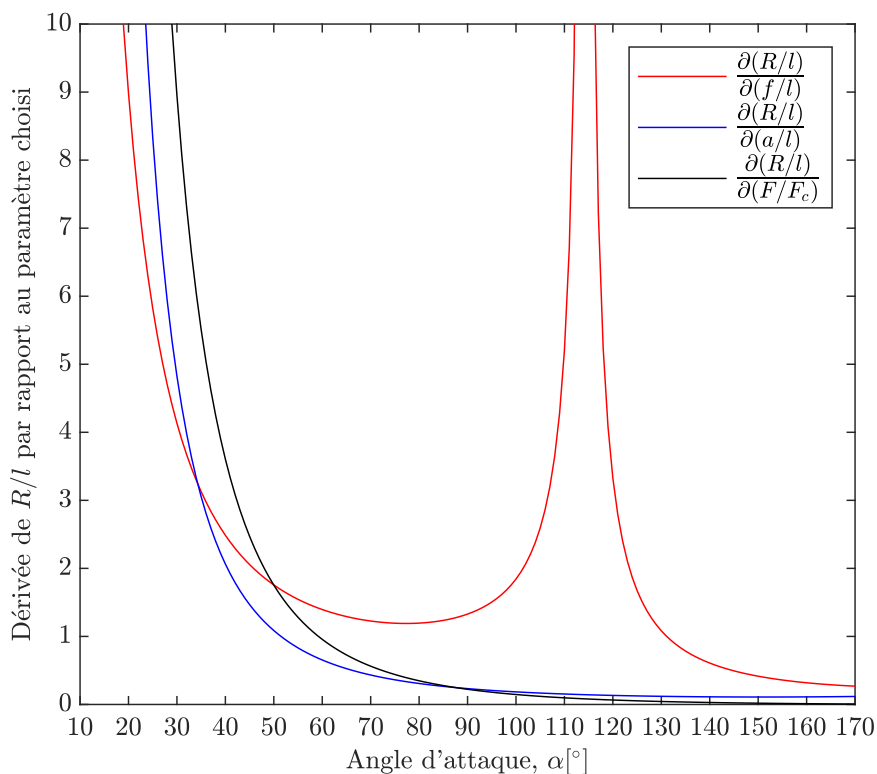


FIGURE 4.40 – Sensibilité de R/l par rapport aux paramètres caractéristiques de l'*elastica*.

La figure 4.41 présente les résultats d'un test pour une poutre de longueur initiale $l = 3000$ mm. Les valeurs de l'angle d'attaque calculé à partir des mesures des paramètres f/l , a/l , et F/F_c sont tracées en fonction de l'angle d'attaque mesuré. En partant d'un angle $\alpha = 20^\circ$, on note les valeurs des paramètres caractéristiques tous les 10° puis on progresse plus lentement à partir de $\alpha = 70^\circ$, stade où l'on commence à entendre des craquements dus à l'endommagement du matériau. Cette courbe permet de vérifier que la géométrie post-flambée du jonc percé est bien une *elastica* et que les ratios mesurés f/l et a/l caractérisent convenablement la géométrie sur cette plage angulaire. La figure 4.42 montre la ruine du jonc, signifiant la fin du test.

Trois tests ont été effectués. Les rayons de courbure obtenus sont tracés en fonction de l'angle d'attaque sur la figure 4.43. Sur cette figure, l'angle α a été déduit de la mesure du paramètre a/l et R est calculé d'après l'équation 4.10. Le premier test a donné un rayon de courbure à la rupture de 61.9 cm. Cependant, vers la fin du test, la section a tourné, de telle sorte que l'axe du trou s'est pratiquement retrouvé dans le plan des fibres neutres donc dans la partie de la section la moins sollicitée en flexion. Pour les deux tests suivants, nous avons donc pris soin d'aligner le trou à mi-longueur et les deux trous percés aux extrémités et avons rigidifié les accroches de l'élingue au jonc afin d'empêcher celui-ci de tourner sur son axe lors de l'expérience. Pour un trou orienté selon l'axe le

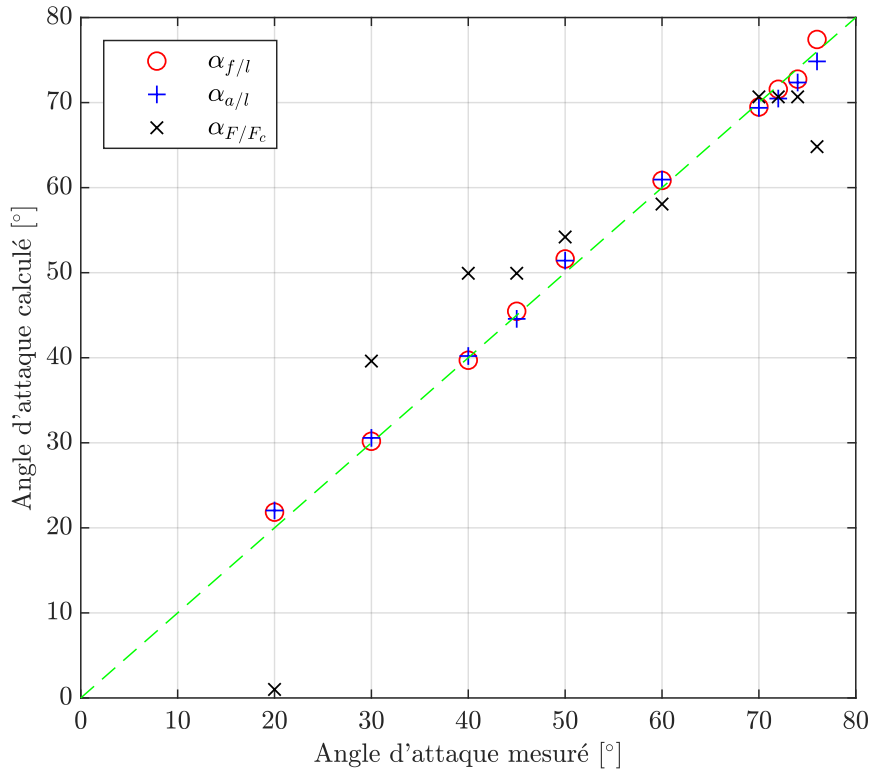
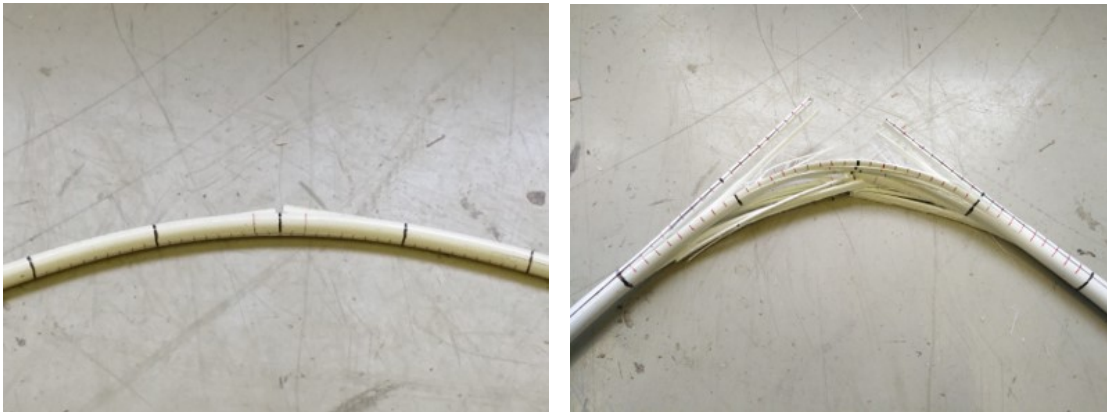


FIGURE 4.41 – Comparaison des angles déduits de la mesure des ratios f/l , a/l , et F/F_c .



(a) Amorce de rupture ($R = 72,9$ cm) : des fissures autour du trou commencent à apparaître et font légèrement ressortir des blocs de fibres.

(b) Après rupture ($R \leq 70,3$ cm) : la section s'est fissurée du côté en traction et du côté en compression sur une vingtaine de centimètres.

FIGURE 4.42 – Rupture fragile du jonc. Les graduations rouges sont placées tous les centimètres.

plus critique, nous avons alors obtenu des rayons de courbure à la rupture de 70.3 cm (avec craquements perceptibles dès $R = 75$ cm) et 75.9 cm. Nous retenons une valeur du rayon de courbure minimal de 76 cm, qui correspond à un moment fléchissant de 300 N.m et à une contrainte effective de 530 MPa. Les caractéristiques du jonc initial (table 4.2) étant un rayon de courbure minimal de 58 cm, un moment fléchissant maximal de 400

		Valeurs	Unités
Rayon de courbure minimal	$R_{min,p}$	76	cm
Contrainte effective	$\sigma_{max,p}$	530	MPa
Moment fléchissant	$M_{f,p}$	300	N.m

TABLE 4.4 – Valeurs retenues pour un jonc percé.

N.m et une contrainte ultime de 700 MPa, on peut considérer que le perçage a réduit la résistance de la section de 25%.

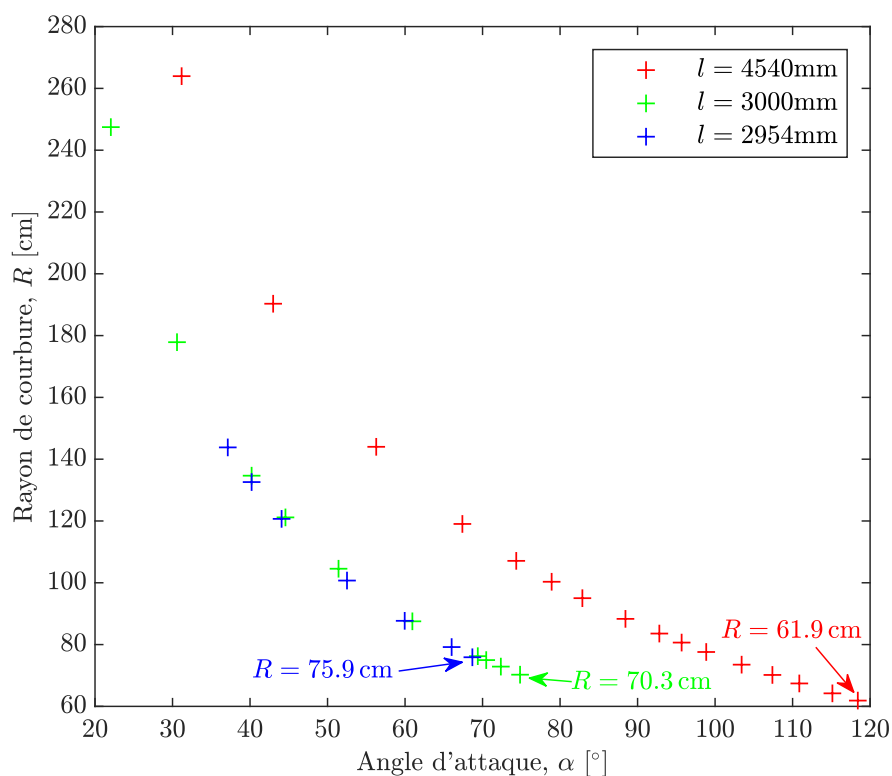


FIGURE 4.43 – Résultats expérimentaux pour trois poutres.

Cette perte de résistance est acceptable mais nous avons alors identifié un problème qui exclut ce type de connexions pour construire le prototype : la torsion géodésique des courbes du réseau de Tchebychev sur la surface du gridshell à l'équilibre (c'est-à-dire dans sa forme finale) est non-nulle. Ceci nous empêche de percer les joncs, de les assembler au sol puis de déployer la structure sans solliciter les joncs en torsion. La figure 4.44 illustre le problème. Prenons un jonc percé, tous les perçages ayant été faits dans le même plan lorsque le jonc était droit – autrement dit, les trous sont alignés lorsque le jonc est au repos, comme une flûte à bec. Quand on place ce jonc suivant la courbe tracée sur la surface, avec le trou à l'origine normal à la surface, les axes des trous prennent naturellement les directions indiquées par le champ de vecteurs verts. Connectons maintenant ce jonc aux autres, en partant de la gauche, de manière à ce que les vis (vecteurs rouges) soient normales à la surface : le trou 0 est bien positionné mais il faut par la suite forcer sur le jonc pour lui appliquer à chaque nœud un moment de

torsion de façon à aligner le champ de vecteurs verts sur le champ de vecteurs rouges. A chaque nœud, la section du jonc doit donc tourner d'un angle θ par rapport à la position naturelle dans laquelle il n'est sollicité qu'en flexion et non en torsion. La torsion locale dans la poutre est proportionnelle à la variation de l'angle θ .

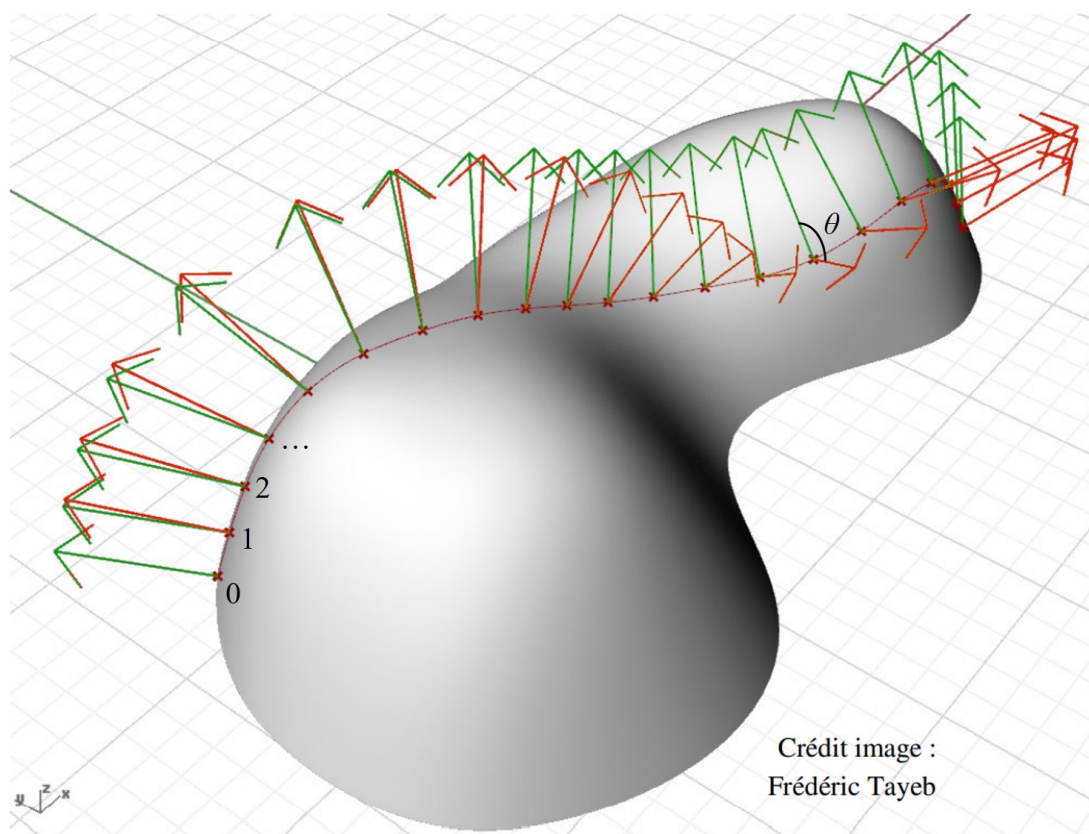


FIGURE 4.44 – Visualisation de la rotation θ à imposer au jonc à chaque nœud, θ étant l'angle entre le vecteur vert et le vecteur rouge. Les vecteurs verts donnent la direction des trous de la poutre lorsqu'elle est libre de tourner sur son axe, ils correspondent à un axe d'un repère sans torsion qui a été propagé le long de la courbe, tel un repère de Bishop (Bishop, 1975). Les vecteurs rouges (vecteur normal du repère de Darboux) indiquent les directions imposées par les connexions, ils correspondent à un repère "attaché à la matière" qui indique la position réelle de la poutre. Les vecteurs vert et rouge coïncident à l'origine.

Si l'on perce tous les trous d'un jonc dans le même plan, comme représenté à la figure 4.45, il n'est donc pas possible de donner à la *Corolle* sa forme sans solliciter les joncs en torsion (et sans endommager les vis). En réalité, nous ne sommes même pas parvenus à fermer une grille composée de quelques joncs tant le moment de torsion à appliquer aux joncs pour assembler les dernières connexions et former le cylindre était difficile à imposer manuellement. Il est faisable de calculer l'angle dont il faudrait tourner le jonc entre deux perçages pour éviter de le solliciter en torsion dans la géométrie finale. Le gridshell dessiné ayant une symétrie de révolution, toutes les poutres sont identiques, ce qui ne nécessite que de calculer six angles (si la poutre compte sept rangées de connexions) pour pouvoir les percer toutes. Cependant, si on procède ainsi, la grille ne peut pas être assemblée à plat puis déformée : il devient nécessaire de « tisser » la structure et de placer chaque poutre une à une dans sa géométrie finale pour la boulonner aux autres, ce qui est fastidieux et fait perdre au gridshell un de ses intérêts constructifs.

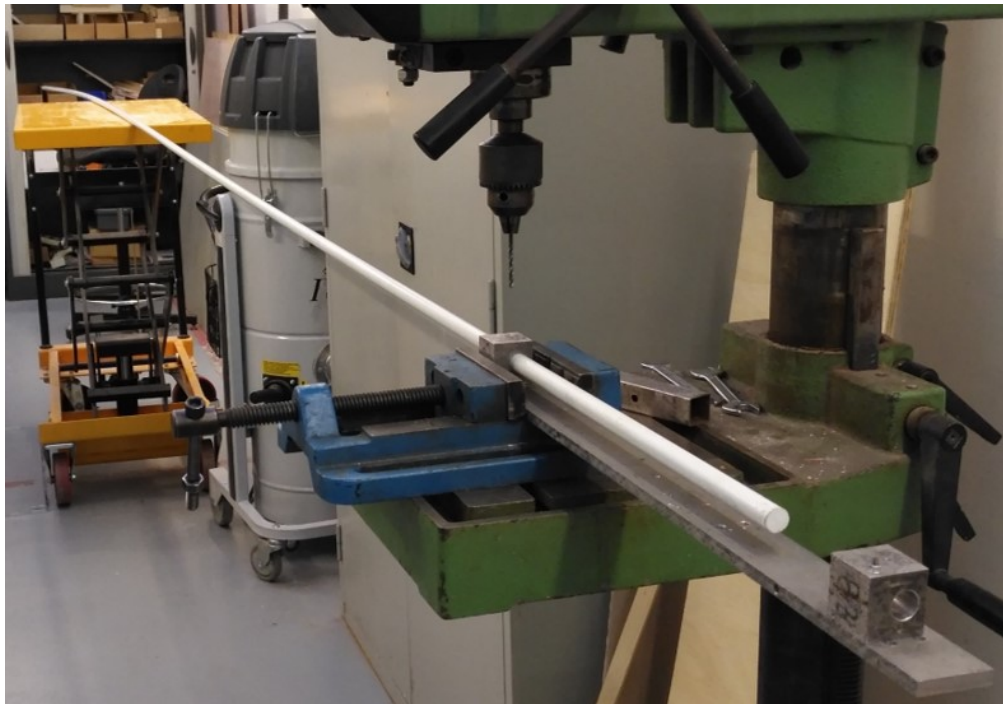


FIGURE 4.45 – Bâti permettant de percer un jonc tous les 90 cm. Une fois que le jonc est percé (au niveau du cube en acier de gauche), on le fait coulisser vers la droite de 90 cm et on le bloque dans le cube de droite par une vis que l'on place dans le trou qui vient d'être percé. Ce dispositif garantit l'alignement des trous et un entraxe constant.

Ce type d'assemblages est possible, néanmoins, lorsque le maillage coïncide avec les lignes de courbure de la surface. Par définition, ces lignes sont tangentes en tout point aux directions principales de la surface, et leur torsion géodésique est nulle. C'est le cas du maillage isoradial illustré sur la figure 4.32d, où les lignes de courbure sont les méridiens et les parallèles. Des stratégies de génération de maillages garantissant cette propriété, tels les maillages circulaires et coniques, sont données dans la thèse de Xavier Tellier (Tellier, 2020). Une deuxième possibilité pour que les vis n'induisent pas de torsion dans les joncs est de construire un gridshell qui a la forme d'une calotte sphérique puisque sur cette surface, toute ligne est ligne de courbure. Une démonstration est donnée dans la thèse de Frédéric Tayeb (Tayeb, 2015) qui prend l'exemple de la couture d'une balle de tennis, pouvant être vue comme une poutre sans torsion plaquée sur la sphère. Enfin, la troisième possibilité est que la torsion dans les joncs soit assez faible pour que le gridshell reste constructible. Ainsi, les pavillons SheltAir et HHfD de la figure 4.21 sont réalisés avec des joncs percés et boulonnés – le détail de la connexion est visible sur la figure 4.23f. Le réseau de Tchebychev matérialisé par les joncs n'est pas constitué des lignes de courbure principales de la surface donc ces lignes n'ont pas une torsion géodésique nulle en tout point. Cependant, la forme du gridshell est plus ou moins proche d'une calotte sphérique donc on peut supposer que la torsion des lignes n'est pas très importante. Un autre détail technique peut aider à réduire la torsion dans les joncs : l'utilisation de manchons – pour joindre bout à bout des tiges plus courtes et créer des poutres « continues » – qui peuvent autoriser une libre rotation du jonc sur son axe à chaque raboutage.

Troisième prototype avec des connexions clippées

Dans l'impossibilité de percer les joncs, nous avons dû nous repencher sur le problème des connexions. Rappelons que la connexion, idéalement, doit laisser libres les deux rotations suivantes :

- celle d'une poutre par rapport à l'autre, dans le plan local tangent à ces deux poutres ;
- celle de chaque poutre sur son axe.

La première condition autorise un mécanisme de pantographe et permet le déploiement de la grille. La deuxième permet de se placer dans les hypothèses d'Adriaenssens *et al.* (1999) (rappelées au paragraphe 3.3.3 de (Douthe, 2007)) – poutres rectilignes de section circulaire soumises uniquement à des efforts ponctuels – et d'assurer que les poutres ne sont pas sollicitées en torsion. Les noix d'échafaudage présentées sur les figures 4.23c et 4.23d avaient l'inconvénient de ne pas respecter totalement la deuxième condition : l'effort de serrage de la noix qui empêchait le glissement de la poutre empêchait aussi en partie la rotation de la poutre autour de son axe neutre. L'assemblage que nous utilisons par la suite permet de découpler les problèmes de translation et de rotation. Les connexions se clippent pour faciliter le montage, et l'entraxe entre les deux lits de barres est réduit au maximum, comme on le voit à la figure 4.46. Les coques, moulées, sont constituées de plastique renforcé de fibres et pèsent environ 90 grammes, soit dix fois moins que les noix d'échafaudage. La connexion est trouée sur une face pour pouvoir accueillir des fixations et rainurée sur le côté pour faire passer un câble de contreventement. Avec Frédéric Tayeb et Jean-François Caron, nous avons co-développé cette connexion avec un partenaire industriel, Araymond, qui l'a brevetée par la suite.



FIGURE 4.46 – Connexion clippée.

4.2.3 Processus de montage

La figure 4.47 montre les principales étapes de construction du gridshell. Une fois la grille assemblée à plat, elle est refermée sur elle-même pour former un cylindre et fixée à la

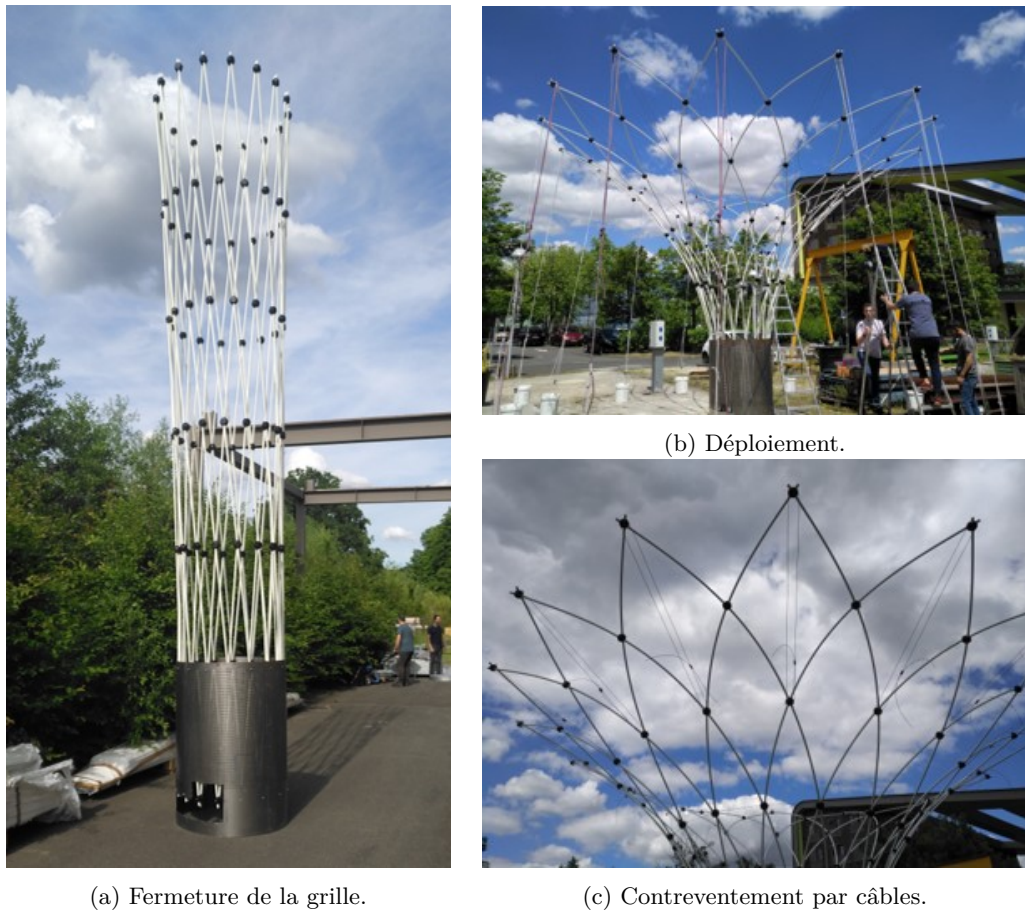


FIGURE 4.47 – Montage de la Corolle.

base à une structure métallique rigide. Elle est ensuite mise en forme à l'aide de cordes, attachées à la dernière rangée de connexions et accrochées à des seaux lestés. Les seaux sont disposés en cercle sur le sol, à la verticale des positions qu'occupent les extrémités des joncs dans la géométrie cible. Les cordes sont raccourcies progressivement jusqu'à ce qu'elles soient verticales et que le gridshell soit dans la géométrie souhaitée. Des câbles en acier de 3 mm de diamètre sont alors mis sous tension dans les derniers quadrangles pour bloquer le mécanisme de déploiement. D'autres câbles de contreventement sont placés afin de raidir la structure puis les cordes ayant servi au montage du gridshell sont retirées.

4.2.4 Pots et végétation

La figure 4.48a montre l'intérieur de la base du prototype expérimental. En partant du bas, un caillebotis solidaire de l'ossature métallique (en bleu) sur laquelle sont vissées les deux premières rangées de connexions du gridshell. Sur le caillebotis est posé un pot de 150L servant de réserve d'eau. Au-dessus, reposant sur l'ossature métallique, se trouve un pot contenant une couche de drainage constituée de pouzzolane, le substrat, une couche de paillage et les plantes grimpantes. Le prototype est posé sur des capteurs de charge qui le pèsent en continu (figure 4.48b).



(a) Fixation du gridshell, réserve d'eau et pot contenant le substrat.



(b) Suivi de la masse du prototype par des capteurs de charge placés sous le caillebotis.

FIGURE 4.48 – Base de la structure.

Cultivar	Nom usuel	Feuillage	Accroche
<i>Actinidia chinensis</i>	Kiwi	Caduc	Volubile
<i>Campsis radicans</i>	Bignone	Caduc	Crampons
<i>Clematis 'Jackmanii'</i>	Clématite de Jackman	Caduc	Volubile
<i>Clematis montana</i>	Clématite des montagnes	Caduc	Volubile
<i>Clematis vitalba</i>	Clématite des haies	Caduc	Volubile
<i>Hedera helix</i>	Lierre	Persistant	Crampons
<i>Humulus lupulus 'Aureus'</i>	Houblon	Caduc	Sarmenteuse
<i>Hydrangea petiolaris</i>	Hortensia grim pant	Caduc	Crampons
<i>Jasminum officinale</i>	Jasmin odorant	Caduc	Sarmenteuse
<i>Lonicera caprifolium</i>	Chèvrefeuille des jardins	Caduc	Volubile
<i>Lonicera japonica</i>	Chevrefeuille du Japon	Semi-persistant	Volubile
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Vigne vierge de Virginie	Caduc	Ventouses
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Vigne vierge à 3 lobes	Caduc	Ventouses
<i>Passiflora caerulea</i>	Passiflore	Persistant	Virilles
<i>Polygonum auberti</i>	Renouée d'Aubert	Caduc	Volubile
<i>Trachelospermum jasminoides</i>	Jasmin étoilé	Persistant	Volubile
<i>Vitis coignetiae</i>	Vigne de Coignet	Caduc	Ventouses

TABLE 4.5 – Une sélection de plantes grimpantes adaptées au climat francilien.

Deux jardiniers – du parc de Passy et de l’Ecole du Breuil – nous ont fourni une liste des plantes grimpances que l’on peut retrouver dans les parcs parisiens (voir table 4.5). Vu la contenance du pot, nous avons opté pour une passiflore et deux jasmins étoilés, en privilégiant des plants jeunes pour qu’ils s’adaptent plus vite à leur milieu. Afin de réduire l’évaporation de l’eau de la réserve et du sol, le pot de la réserve d’eau est recouvert d’un géotextile et celui du substrat de plusieurs centimètres de paillage. Une pompe permet d’amener l’eau de la réserve au substrat.

4.3 Conclusion

Ce chapitre aura permis d’établir la pertinence du gridshell pour développer de grandes surfaces couvrantes adaptées à maximiser l’ombrage d’un tel dispositif, pour une masse de matière structurelle réduite. Le prototype original construit au cours de cette thèse a fait l’objet d’un brevet déposé par l’ENPC (Baverel *et al.*, 2018), dont nous sommes co-auteur. La description détaillée du processus de conception et de réalisation de la Corolle, si elle tend à rendre le dispositif répliquable, aura surtout permis de démontrer le caractère critique de points singuliers de la structure – les connexions principalement – pour la bonne mise en œuvre de tels objets. Les connexions clippées que nous avons contribué à développer sont légères et permettent un montage fiable et extrêmement rapide de gridshells élastiques. Elles offrent la possibilité de construire, avec le même type de joncs, des gridshells de formes variées, et pourraient être adaptées à des joncs de diamètre différent. Ce type de structures végétalisées est actuellement en cours de valorisation par la start-up *Urban Canopee*, qui en a déjà déployé plus d’une centaine².

Un prolongement possible du travail pourrait consister à explorer l’utilisation d’autres matériaux ou d’autres sections (des tubes plutôt que des joncs, par exemple), le choix de l’élément structurel de ce prototype étant principalement lié aux contingences logistiques au moment de cette thèse.

2. <https://urbancanopee.com/realisations/>

Bibliographie

S ADRIAENSSENS, M BARNES et Christopher WILLIAMS : A new analytic and numerical basis for the form-finding and analysis of spline and gridshell structures. *In In : Computing developments in civil and structural engineering, Kumar, B. and Topping, B.(ed.), Edinburgh : Civil-Comp Press, pp. 83-91, pages 83–91. Civil-Comp Press, 1999.*

Richard G ALLEN, Terry A HOWELL, William O PRUITT, Ivan A WALTER et Marvin E JENSEN : Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. ASCE, 1991.

Michael F ASHBY et D CEBON : Materials selection in mechanical design. *Le Journal de Physique IV, 3(C7) :C7–1, 1993.*

Rainer BARTHEL, Matthias BECKH, Andrij KUTNYI et Manfred SCHULLER : Ein meilenstein im schalenbau–suchovs halle für das blechwalzwerk in vyksa. 2009.

Olivier BAVEREL, Jean-François CARON, Frederic TAYEB et Lionel DU PELOUX : Gridshells in composite materials : construction of a 300 m2 forum for the solidays festival in paris. *Structural engineering international, 22(3) :408–414, 2012.*

Olivier BAVEREL, Adélaïde FERAILLE, Frédéric TAYEB, Julien CRAVERO, Ioulia TCHIGUIRINSKAIA, Pierre-Antoine VERSINI, Jean-François CARON et Romain MESNIL : Structure élastique et procédé de mise en place correspondant, décembre 2018. Brevet n° 1853484.

Matthias BECKH et Rainer BARTHEL : The first doubly curved gridshell structure–shukhovs building for the plate rolling workshop in vyksa. *In Third International Congress on Construction History, Brandenburg University of Technology Cottbus, Germany, 20th-24th May 2009, page 1, 2009.*

Matthias BECKH et Meike HOHEISEL : Form und tragverhalten hyperbolischer gittertürme. *Stahlbau, 79(9) :669–681, 2010.*

Richard L BISHOP : There is more than one way to frame a curve. *The American Mathematical Monthly, 82(3) :246–251, 1975.*

Lina BOUHAYA : *Optimisation structurelle des gridshells.* Thèse de doctorat, 2010.

Romain BOULAUD : *Études et modélisations du comportement dun écran de filet pare-blocs à différentes échelles.* Thèse de doctorat, Paris Est, 2020.

- Ryad BOUZOUIDJA, Maeva SABRE, David RAMIER, Patrice CANNAVO et Rémy CLAVÉRIE : 81. green roof set-up analysis : Monitoring and simulation of water and thermal transfer using hydrus-1d. *In 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*. AMS, 2018.
- Jean COURBON : Stabilité de l'équilibre élastique. *Technique de l'ingénieur, C-2040*, pages 1–17, 1984.
- Pierre CUVILLIERS, Cyril DOUTHE, Lionel du PELOUX et Robert Le ROY : Hybrid structural skin : Prototype of a gfrp elastic gridshell braced by a fiber-reinforced concrete envelope. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 58 (1) :65–78, 2017.
- A.S. DAY : An introduction to dynamic relaxation. *The Engineer*, 219 :218–221, 1965.
- Leydy Castellanos DIAZ : *Deploying nature-based solutions in urban areas : thermal performance and urban feasibility across scales*. Thèse de doctorat, École des Ponts ParisTech, 2022.
- Cyril DOUTHE : *Etude de structures élancées précontraintes en matériaux composites, application à la conception des gridshells*. Thèse de doctorat, 2007.
- Cyril DOUTHE, Jean-François CARON et Olivier BAVEREL : Gridshell structures in glass fibre reinforced polymers. *Construction and building materials*, 24(9) :1580–1589, 2010.
- Cyril DOUTHE, Romain MESNIL, Hugo ORTS et Olivier BAVEREL : Isoradial meshes : Covering elastic gridshells with planar facets. *Automation in Construction*, 83 :222–236, 2017.
- Lionel du PELOUX : Dynamic relaxation solver for grasshopper, 2016.
- Lionel DU PELOUX : *Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures. Application to the design of elastic gridshells*. Thèse de doctorat, 2017.
- Lionel DU PELOUX, Frédéric TAYEB, Olivier BAVEREL et Jean-François CARON : Construction of a large composite gridshell structure : a lightweight structure made with pultruded glass fibre reinforced polymer tubes. *Structural Engineering International*, 26(2) :160–167, 2016.
- Rainer GRAEFE, Murat GAPPOEV, Ottmar PERTSCHI et Klaus BACH : *Vladimir G. Šuchov (1853-1939) – die Kunst der sparsamen Konstruktion*. Deutsche Verlags-Anstalt, 1990.
- Edmund HAPPOLD, LIDDELL WI *et al.* : Timber lattice roof for the mannheim bundesgartenschau. 1975.
- Ted HAPPOLD et Ian LIDDELL : Bundesgartenschau, mannheim. *The Arup Journal*, 10 (3) :11–18, September 1975.
- Elisa Lafuente HERNÁNDEZ, Olivier BAVEREL et Christoph GENGNAGEL : On the design and construction of elastic gridshells with irregular meshes. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4) :161–174, 2013.

- Auteur INCONNU : The nijni-novgorod exhibition. *In The Engineer, 19th March 1897*, volume 83, pages 292–293, 1897.
- Natalia KOTELNIKOVA-WEILER : *Optimisation mécanique et énergétique d’enveloppes en matériaux composites pour les bâtiments*. Thèse de doctorat, Paris Est, 2012.
- Natalia KOTELNIKOVA-WEILER, Cyril DOUTHE, E Lafuente HERNANDEZ, Olivier BAVEREL, Christoph GENGNAGEL et Jean-François CARON : Materials for actively-bent structures. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4) :229–240, 2013.
- Ian LIDDELL : Frei otto and the development of gridshells. *Case Studies in Structural Engineering*, 4 :39–49, 2015.
- Yannick MASSON : *Existence and construction of Chebyshev nets and application to gridshells*. Thèse de doctorat, 2017.
- Dragos NAICU, Richard HARRIS et Chris WILLIAMS : Timber gridshells : Design methods and their application to a temporary pavilion. 08 2014.
- Frei OTTO, J HENNICKE et K MATSUSHITA : Il 10 gitterschalen - grid shells. *Institut für Leichte Flächentragwerke, IL*, 10 :340, 1974.
- Julian PANETTA, MINA KONAKOVIĆ-LUKOVIĆ, Florin ISVORANU, Etienne BOULEAU et Mark PAULY : X-shells : A new class of deployable beam structures. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(4) :1–15, 2019.
- Stefan PILLWEIN, Kurt LEIMER, Michael BIRSAK et Przemyslaw MUSIALSKI : On elastic geodesic grids and their planar to spatial deployment. *arXiv preprint arXiv:2007.00201*, 2020.
- Clemens PREISINGER et Moritz HEIMRATH : Karambaa toolkit for parametric structural design. *Structural Engineering International*, 24(2) :217–221, 2014.
- Gregory QUINN : *Pneumatic erection of elastic gridshells : design, simulation & realisation*. Thèse de doctorat, 2019.
- Gregory QUINN et Christoph GENGNAGEL : A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork. *Mobile and Rapidly Assembled Structures IV*, 136 :129, 2014.
- RGANTD : Vladimir grigorievich shukhov. <http://vystavki.rgantd.ru/shuhov/>, 2013.
- Schusev State Museum of Architecture SCHUSEV MA : Shukhov. formula of architecture. https://svyazepoh.ru/images/knigipdf/Book_Shuhov_for_site.pdf, 2019.
- Elena SHUKHOVA : Shukhov, universal genius. <https://zohenko.ru/en/v-g-shuhov-universalnyi-genii-giperboloidy-inzhenera-shuhova-sozdanie.html>, 2019.
- Enrique SORIANO, Ramon SASTRE et Dionis BOIXADER : G-shells : Flat collapsible geodesic mechanisms for gridshells. *In Proceedings of IASS Annual Symposia*, volume 2019, pages 1–8. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2019.

Frédéric TAYEB : *Simulation numérique du comportement mécanique non linéaire de gridshells composés de poutres élancées en matériaux composites et de sections quelconques*. Thèse de doctorat, 2015.

Xavier TELLIER : *Morphogenèse des structures courbes sous contrainte de fabrication*. Thèse de doctorat, 2020.

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

Ce chapitre rassemble les résultats expérimentaux ayant rapport à l'effet de la végétation sur les échanges thermiques en ville. Nous commençons par décrire l'instrumentation mise en place puis analysons les diverses mesures réalisées.

5.1 Instrumentation

L'instrumentation présentée dans cette partie regroupe des appareils ayant permis des mesures en continu pendant plusieurs mois (l'évapotranspiration globale de la structure végétalisée) et des mesures ponctuelles, sur quelques journées (la transpiration des feuilles et les composantes du bilan radiatif).

5.1.1 Mesures de la masse de la Corolle

Objectifs

Le premier objectif est de mesurer en continu le taux d'évaporation de l'eau de la végétation (contenue dans celle-ci et puisée dans le sol), *in situ*, au cours du temps.

Il existe des mesures expérimentales d'évapotranspiration soit à des échelles spatiales plus petites – celle de quelques feuilles dans une chambre climatique (Katerji *et al.*, 2015) ou d'une petite surface de sol (de l'ordre du mètre carré) placée sous une chambre d'évapotranspiration (Bouzouidja *et al.*, 2018; Diaz, 2022) ou sur un lysimètre (Allen *et al.*, 1991) – soit à des échelles plus grandes – celle de la parcelle, où l'étude peut porter aussi bien sur des cultures spécifiques dans des champs (Rana et Katerji, 1996) que sur l'évapotranspiration d'une toiture végétalisée (Diaz, 2022) – mais les observations à l'échelle de l'objet – de l'arbre, par exemple – sont plus rares¹ dans la littérature et peuvent nécessiter une instrumentation extrêmement conséquente, à l'instar du *Whirligig* de Green (1993). Les premières méthodes correspondent à des durées courtes, de l'ordre de la minute, tandis que les secondes aboutissent généralement à une valeur d'évapotranspiration journalière (Rana et Katerji, 2000). Nous essayons ici d'obtenir des mesures à une échelle temporelle intermédiaire (de l'ordre de la dizaine de minutes ou de l'heure), compatible avec la caractérisation du confort thermique en ville.

1. On peut tout de même citer la méthode du flux de sève, utilisée par exemple par Hoelscher *et al.* (2016) sur des plantes grimpantes. D'après Rana et Katerji (2000), cette méthode semble adéquate pour estimer la transpiration journalière d'arbres.

Le deuxième objectif est de mesurer les précipitations interceptées par la Corolle pour faire son bilan hydrique et en déduire le besoin en irrigation durant l'été. Cette donnée est utile à l'inventaire du cycle de vie de la structure végétalisée, dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Choix des capteurs de charge

Nous avons opté pour une mesure directe, par pesée, en posant la structure sur des capteurs de charge. Nous faisons l'hypothèse qu'en été, les variations de la masse de la Corolle sont dues uniquement à des variations de la quantité d'eau qu'elle contient : soit des gains de masse, causés par les précipitations interceptées, soit des pertes de masse, dues à l'évaporation de l'eau au niveau du substrat ou des feuilles. En fait, sur des temps courts, la mesure peut être ponctuellement faussée par un gain ou une perte de matière (par exemple, un oiseau qui se pose ou une feuille qui tombe) et sur des temps longs, par la variation de biomasse. Puisque l'on mesure une force, le signal peut également faire apparaître des fluctuations dues à d'autres phénomènes : la composante verticale du vent sur la structure ou encore les vibrations engendrées par les véhicules (voitures, bus, RER...) passant à proximité. Cependant, le taux d'évaporation, calculé sur plusieurs minutes, est peu sensible à ces effets, comme nous le verrons plus loin.

La quantité d'eau totale évaporée, à l'échelle de l'objet, se décompose en réalité en trois parties : l'évaporation de l'eau contenue dans la réserve (un bac en plastique placé juste sous celui contenant le substrat), l'évaporation de l'eau présente dans le substrat et l'évaporation, au niveau des stomates des feuilles, de l'eau présente dans les plantes. Nous appelons cette dernière composante *transpiration* par la suite ; c'est celle qui nous intéresse le plus car elle est directement reliée au flux de chaleur latente lorsque l'on effectue le bilan énergétique des feuilles. Elle nous permet donc, en fin de compte, d'évaluer le flux de chaleur sensible émis par la végétation.

Ce que nous cherchons à mesurer est une faible variation de masse, de l'ordre de quelques kilogrammes par jour, correspondant aux litres d'eau évaporés. En imaginant qu'en été la végétation transpire 6 litres d'eau en 12 heures, ce qui représente 500 grammes par heure, une résolution du système de mesure de 50 grammes permettrait d'obtenir une valeur toutes les 6 minutes, la résolution étant la plus petite variation de masse perceptible par le système. Plus cet incrément est faible, plus le taux d'évaporation peut être calculé sur de courtes périodes. Or, à prix (du capteur) constant, la résolution du capteur est meilleure (et l'erreur totale plus faible) lorsque sa capacité nominale est faible, c'est-à-dire lorsqu'il est conçu pour résister à des charges peu importantes. Pour des raisons économiques et pour permettre une mesure de l'évaporation sur une courte période, le prototype expérimental doit donc avoir un poids propre réduit.

En phase de conception, le gridshell en composites avait été estimé à 100 kg, la base métallique à 100 kg, les pots et la végétation à 500 kg pour une réserve pleine d'eau et un substrat saturé, soit 700 kg en tout dans le cas le plus critique. Le fait de vouloir mesurer de faibles variations de masse pour une précontrainte élevée pourrait nous orienter vers des capteurs piézoélectriques mais nous avons écarté ces derniers en raison de leur dérive élevée (de l'ordre de 1 N/min), ce qui ne les rend pas appropriés pour des mesures longue durée. Des capteurs à jauges de déformation semblent donc plus adéquats pour notre application, d'autant plus que ceux-ci peuvent atteindre une grande résolution et qu'ils

bénéficient d'une correction en température. Trois capteurs de pesage de capacité 250 kg, travaillant en flexion, ont donc été choisis pour composer une balance². Les capteurs peuvent tolérer une charge temporaire de 375 kg, ce qui leur évite d'être endommagés par les efforts de renversement dus au vent, pouvant conduire occasionnellement à la décharge d'un capteur et la surcharge d'un autre, et résistent à une charge ultime de 500 kg. Les cellules de charge sont des UTILCELL modèle 300 en acier inoxydable scellées hermétiquement avec un indice de protection IP 68, compatible avec une utilisation permanente en extérieur. La division minimum du capteur est de 25 grammes.

Méthode d'acquisition et de stockage en continu

Les trois cellules de charge sont raccordées à un boîtier Alpha-C. Ce boîtier sert à fournir un signal d'entrée aux capteurs, indiquer la valeur mesurée et peut être programmé pour effectuer du contrôle et du filtrage mais cette fonctionnalité n'est pas utilisée ici. Il ne peut pas enregistrer les valeurs mais seulement les afficher. Afin d'automatiser la mesure et suivre la masse du prototype sur une longue période, nous lui avons connecté une sortie RS232 qui lui permet de communiquer avec d'autres instruments, comme un mini-ordinateur tel un Raspberry Pi (figure 5.1). Celui-ci contient un premier script Python qui interroge le boîtier Alpha-C de manière régulière (période d'échantillonnage de 1 seconde), lit la valeur mesurée et l'écrit dans un fichier texte quotidien qu'il sauvegarde. Un second script permet de rapatrier ce fichier du Raspberry vers un ordinateur de travail. Le Raspberry est connecté par Ethernet au réseau de l'Ecole des Ponts, afin de pouvoir éditer les scripts à distance et transférer facilement les données vers un serveur de l'école.

Calibration des capteurs

Nous avons étalonné les cellules de charge dans le laboratoire sur une presse Instron, en augmentant progressivement la charge en compression et en notant la tension de sortie indiquée par le boîtier Alpha-C. La figure 5.2 montre la courbe obtenue avec l'une des cellules de charge. Une régression linéaire permet d'obtenir la relation globale masse-tension pour la balance constituée des trois capteurs :

$$m = 38.1545 U + 5.9348 \quad (5.1)$$

où m est la masse (en kg) sur la balance et U la tension de sortie (en mV) affichée par l'indicateur. L'Alpha-C ayant lui-même une résolution, le plus petit incrément affichable est 0.001mV, ce qui correspond à une résolution minimale de notre système de mesure de 38 grammes d'après la relation 5.1.

2. *A posteriori*, des capteurs travaillant en cisaillement auraient peut-être été préférables : en effet, le cisaillement mesuré dans le corps d'épreuve du capteur est constant quelle que soit la position de la charge au bout du capteur « poutre ». En revanche, la flexion mesurée dans le corps d'épreuve est sensible à la position de la charge : ceci impose de fixer la structure au capteur afin que la charge soit appliquée au même endroit, et cette fixation peut engendrer d'autres problèmes (l'endommagement du capteur par soulèvement ou torsion, la manutention plus compliquée de la structure...). Les capteurs de flexion avaient été choisis pour leur capacité de 250 kg, ce qui permettait avec trois capteurs de s'approcher au plus près de la masse estimée du dispositif expérimental.

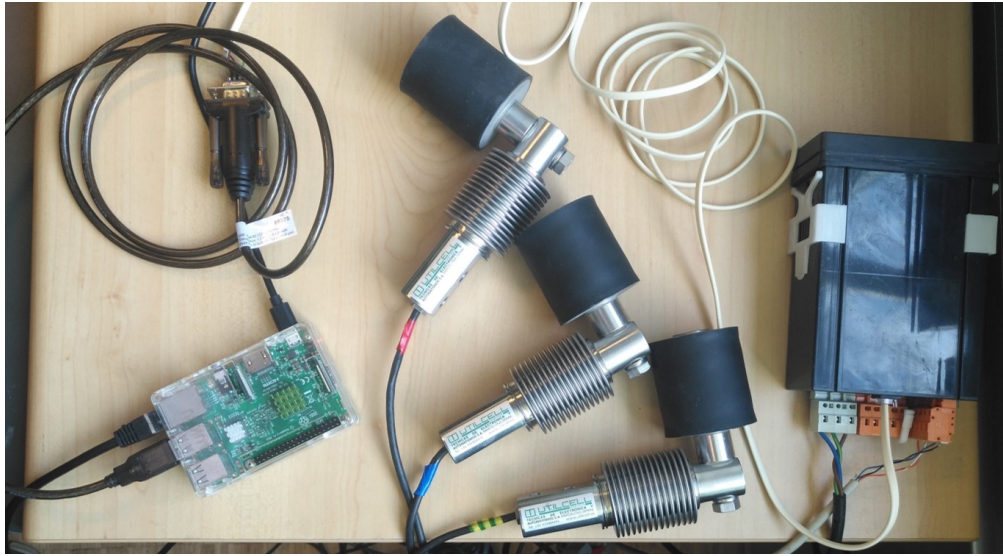


FIGURE 5.1 – Automatisation des mesures. De gauche à droite : Raspberry Pi, capteurs de charge, boîtier d'alimentation Alpha-C.

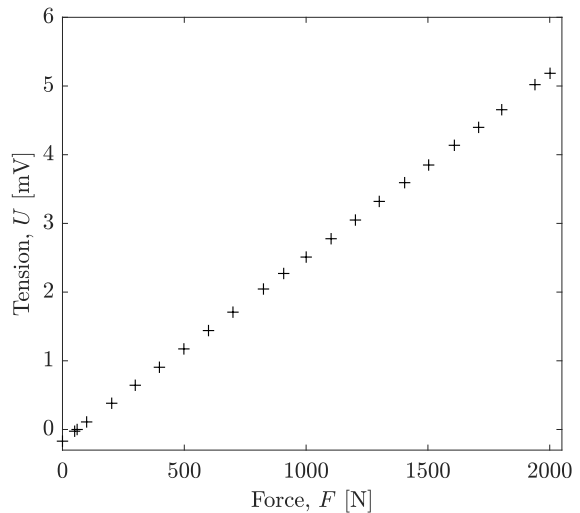


FIGURE 5.2 – Calibration d'une cellule de charge.

5.1.2 Mesures de la transpiration à l'échelle de la feuille

Objectifs

Le système de pesée du prototype décrit à la partie précédente permet d'estimer la masse d'eau totale évaporée mais il est souvent utile, pour le bilan énergétique d'une feuille par exemple, de déterminer un taux d'évaporation surfacique. De plus, ce taux peut varier d'une feuille à l'autre. L'objectif de ces mesures est donc double : évaluer la variabilité du taux d'évaporation au sein du couvert végétal et voir s'il est possible de déduire la surface foliaire totale (la surface cumulée des feuilles) des mesures de ces taux d'évaporation surfacique et de la masse d'eau totale évaporée.

Principe de la pince à photosynthèse

La pince à photosynthèse utilisée est une TPS-2 de PP Systems³ qui permet de mesurer l'assimilation de dioxyde de carbone et la transpiration de plantes. Le principe est le suivant : on pince une feuille avec une petite cuvette hermétique de 2,5 cm², dans laquelle passe un flux d'air dont on maîtrise le débit. Les concentrations en CO₂ et en vapeur d'eau de l'air entrant sont connues et on mesure les propriétés de l'air en sortie de la chambre par un analyseur de gaz à infrarouge. Les différences étant dues aux échanges gazeux qui ont eu lieu au niveau de la feuille dans la chambre, l'appareil permet de mesurer, entre autres, son taux de transpiration. D'autres grandeurs sont mesurées, comme la température de l'air dans la chambre et le rayonnement photosynthétiquement actif (bande de rayonnement utile à la photosynthèse dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 700nm, abrégée en PAR) incident, qui permettent ensuite de calculer la température de la feuille par un bilan énergétique.



FIGURE 5.3 – Exemple de pince à photosynthèse (image : site de PhytoSciences).

5.1.3 Mesures de rayonnement

Objectifs

L'objectif final de ces mesures est d'évaluer l'effet de l'ombrage dû à la végétation sur le confort thermique extérieur. Pour cela, nous comparons le rayonnement incident à deux endroits : au soleil et à l'ombre de la structure. En parallèle, ces mesures permettent d'alimenter les simulations numériques en fournissant des valeurs caractéristiques du site et des propriétés matériaux (rayonnement solaire et atmosphérique, albédo du sol...).

Radiomètres

Nous utilisons deux radiomètres CNR4 de Kipp & Zonen, aussi appelés bilanmètres puisqu'ils permettent d'obtenir le bilan radiatif d'une surface. Chaque CNR4 est constitué

3. Le matériel nous a été prêté par Jean-François Castell et Alain Fortineau de l'UMR ECOSYS/Pôle Ecophysiologie, de l'INRA AgroParisTech à Grignon, qui nous ont également appris à l'utiliser.

de deux pyranomètres montés tête-bêche, l'un face au ciel et l'autre face au sol, et de deux pyrgéomètres placés dans la même configuration (voir figure 5.4). Le bilan radiatif est donc séparé en quatre composantes : les pyranomètres mesurent le rayonnement ascendant ($SW\uparrow$) et descendant ($SW\downarrow$) de courte longueur d'onde (0.3 à 3 μm) correspondant au rayonnement solaire, et les pyrgéomètres le rayonnement ascendant ($LW\uparrow$) et descendant ($LW\downarrow$) de grande longueur d'onde (4.5 à 42 μm) que l'on qualifie, selon les domaines, de rayonnement infrarouge moyen ou de rayonnement infrarouge thermique. Il reste une plage de longueurs d'onde, entre 3 et 4.5 μm , qui n'est pas prise en compte par l'appareil mais celle-ci correspond à une bande de rayonnement en grande partie absorbée par l'atmosphère (cf. section 2.1.2, figure 2.6). Les objets présents sur Terre émettent un rayonnement négligeable dans cette plage de fréquences qui correspond à une température de corps noir entre 640 et 960 K.



FIGURE 5.4 – Radiomètre CNR4 (images : sites de Kipp & Zonen et Campbell Scientific).

Les radiomètres CNR4 comprennent également un capteur de température interne, qui leur permet de corriger les mesures de rayonnement infrarouge des pyrgéomètres en retirant le rayonnement infrarouge émis par le boîtier. Bien que la température indiquée ne soit pas celle que l'on obtiendrait avec une station météorologique, qui fournit la température de l'air sous abri, cette mesure nous donne une indication sur le confort thermique à proximité de la structure, puisque le capteur de température situé près des pyrgéomètres est sensible à la fois aux variations de température de l'air et aux variations du rayonnement absorbé par l'appareil, se rapprochant en cela du thermomètre à globe noir utilisé par Armson *et al.* (2012).

Plan d'instrumentation global

La figure 5.6 résume l'instrumentation utilisée autour de la structure végétalisée. Afin d'estimer l'effet de la végétation sur la température de l'air, il est préférable, comme nous l'avons vu aux chapitres précédents, d'évaluer des flux de chaleur sensible transférés à l'air par la végétation plutôt que de chercher à mesurer une variation de la température de l'air. En effet, en conditions réelles, l'air ambiant constitue presque un thermostat (gros réservoir), dont la température change peu suite à des échanges par convection avec la végétation, ce qui rend les résultats obtenus par mesure directe de la température de l'air peu fiables.

L'instrumentation utilisée permet d'étudier l'effet de la transpiration des feuilles et de



FIGURE 5.5 – Radiomètres CNR4 montés sur trépieds à 1.5 m du sol.

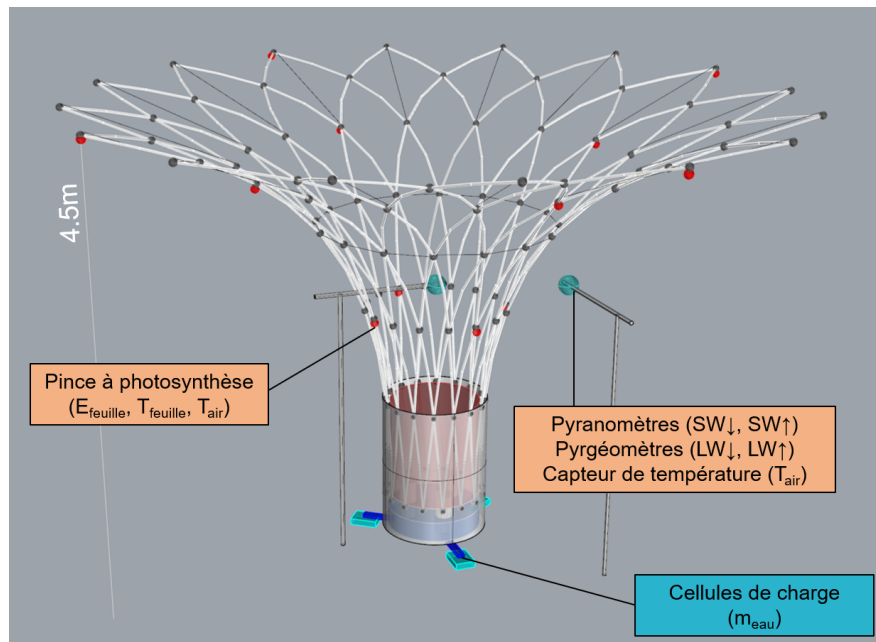


FIGURE 5.6 – Les différents capteurs employés et les grandeurs mesurées. Les cellules de charge ont fourni des mesures continues sur plusieurs mois, les autres appareils ont été utilisés ponctuellement, sur quelques jours. Le capteur de température du radiomètre relève la température de l'air à l'intérieur du boîtier.

l'ombrage du sol sur la réduction du flux de chaleur sensible (les termes 2 et 3 de l'équation 2.85). Elle ne permet pas d'étudier sur de longues durées le flux de chaleur sensible émis par le feuillage, intrinsèque à sa géométrie (terme 1). Des mesures de la température des feuilles par caméra infrarouge avait été envisagée mais n'ont pas pu être réalisées.

5.2 Résultats expérimentaux

5.2.1 Evapotranspiration de la Corolle

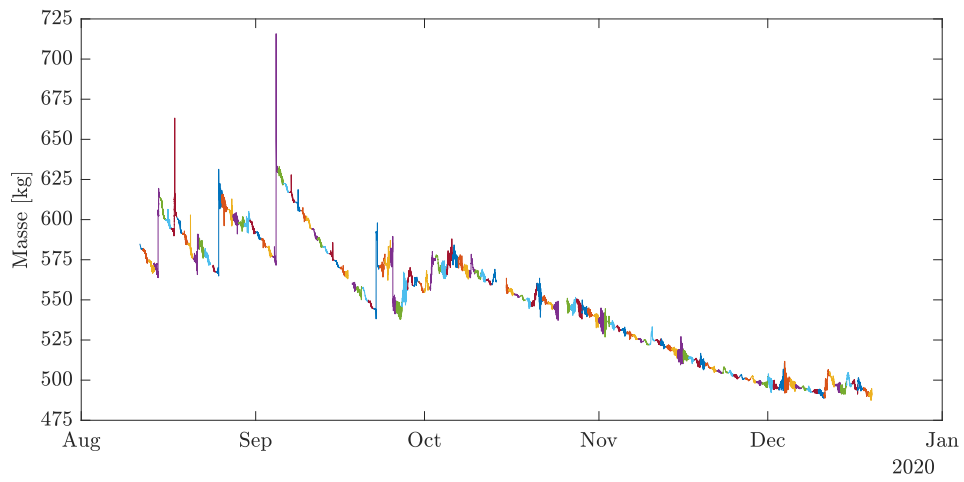
Données brutes

La figure 5.7 présente les courbes brutes de l'évolution de la masse de la Corolle sur différentes périodes. Les gains de masse, au cours de la journée, sont principalement dus aux précipitations (jusqu'à quelques litres par jour) ou à des arrosages directs de la végétation (environ 50 litres, comme les pics en août et début septembre visibles sur la figure 5.7a). Juste après un épisode pluvieux ou un arrosage, les données sont à interpréter avec précaution ; la perte de masse peut être due à de l'évaporation mais également à des gouttes de pluie interceptées par la végétation et la structure qui retombent au sol, ou à la réserve d'eau qui déborde, ce qui fait croire à une évaporation extrêmement rapide et conduit donc à des taux d'évaporation anormalement élevés. De même, en automne, la mesure de l'évaporation de la Corolle est perturbée par la chute des feuilles et des fleurs.

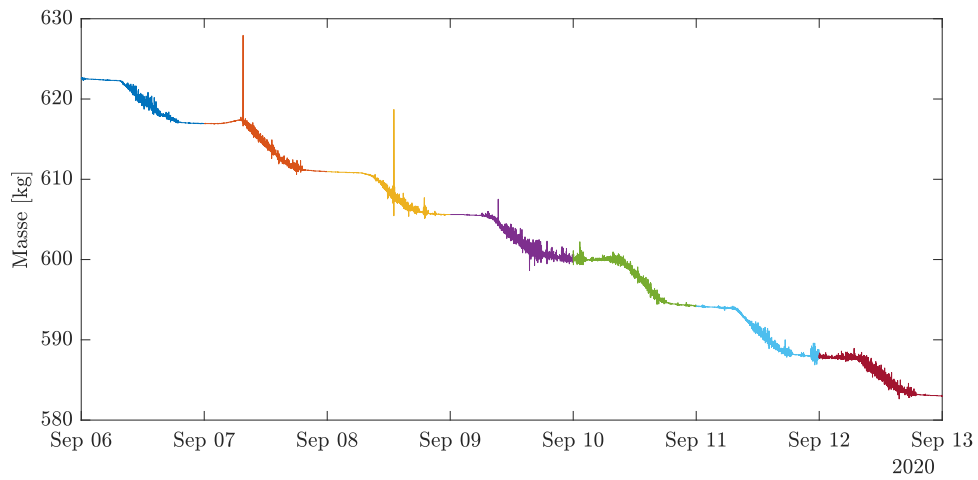
Choix d'une période d'analyse

Pour pouvoir assimiler la dérivée temporelle de la masse de la Corolle à un taux d'évaporation, nous avons choisi d'analyser 17 jours d'affilée sans pluie, entre fin août et mi-septembre 2020, afin que les données soient polluées le moins possible par d'autres phénomènes. Cette période correspond à des jours très ensoleillés et chauds (la valeur journalière maximale relevée par le capteur interne de température des radiomètres est entre 27°C et 43°C sur cette période), avec des valeurs d'évaporation importantes. Sur cette durée, nous supposons que le gain de biomasse est négligeable par rapport à la quantité d'eau évaporée (environ 90 litres).

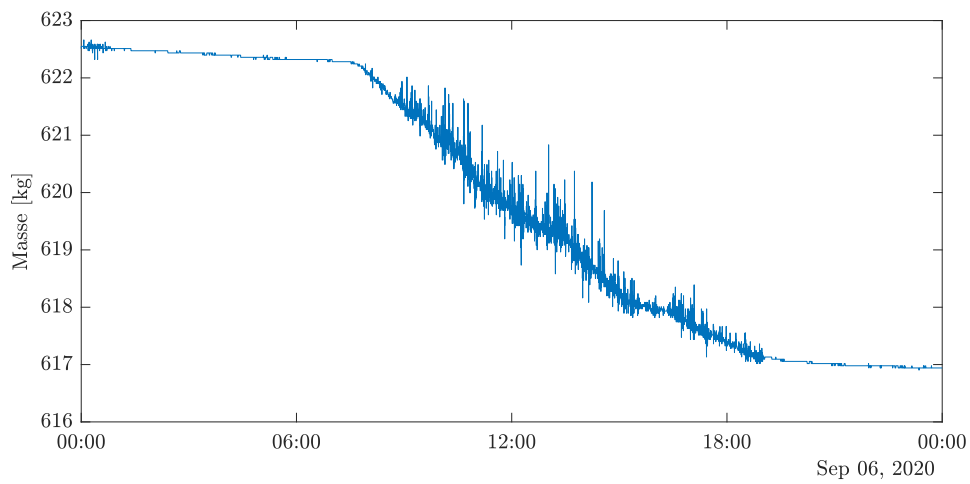
L'évaporation provenant potentiellement de trois sources (l'eau contenue dans la réserve, dans le substrat et dans la végétation), la valeur du taux d'évaporation obtenue par pesée du dispositif expérimental entier est un majorant du taux de transpiration des feuilles. Cependant, nous pensons que l'évaporation mesurée a majoritairement lieu au niveau des feuilles puisque la réserve d'eau est un pot en plastique, recouvert d'un voile, situé à l'intérieur du pot métallique, donc totalement abrité du vent et du soleil, et que le substrat est recouvert de paillage sur une épaisseur de 10cm et qu'il est constamment à l'ombre et protégé du vent. La variation d'énergie disponible entre la nuit (pendant laquelle l'évaporation est quasi-nulle, voir figure 5.7b) et le jour, due à l'advection d'air chaud et au rayonnement solaire, est donc beaucoup plus importante à la surface des feuilles qu'à la surface du substrat et qu'à celle de l'eau de la réserve.



(a) Sur plusieurs mois.



(b) Sur une semaine.



(c) Sur un jour.

FIGURE 5.7 – Suivi de la masse de la Corolle.

Filtrage par un passe-bas

La courbe de la figure 5.7 est bruitée à cause de divers phénomènes (composante verticale des efforts exercés par le vent sur la structure, vibrations dues au passage des voitures, bruit des capteurs). Nous souhaitons donc la lisser avant de calculer sa dérivée temporelle, qui est l'opposée du taux d'évaporation recherché. Pour atténuer les hautes fréquences du signal, nous utilisons comme passe-bas un filtre gaussien. Le signal filtré est la convolution du signal d'entrée et d'une fonction gaussienne F , de la forme :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.2)$$

où σ est l'écart-type, paramètre déterminant la largeur de la gaussienne. Plus σ est petit, plus la courbe en cloche est étroite et plus la fréquence de coupure est haute. L'utilisation de ce filtre revient à effectuer une moyenne pondérée glissante du signal.

Résultats

Évaporation journalière

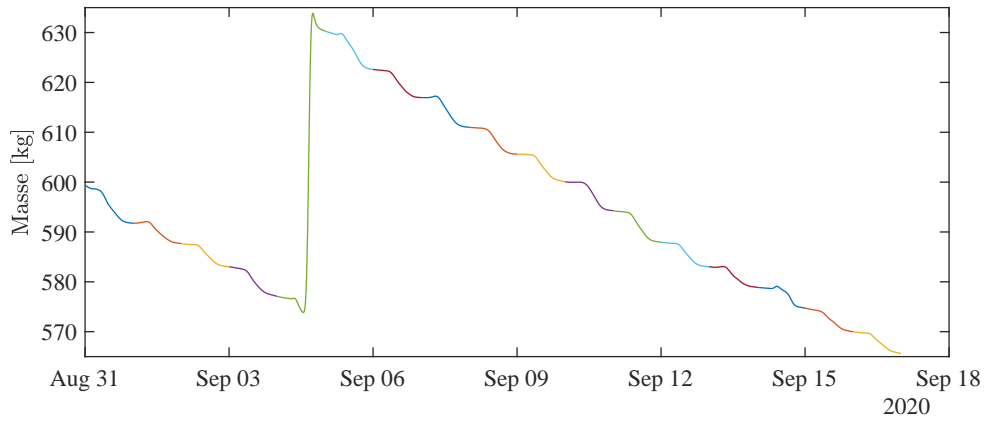
La figure 5.8a montre les résultats filtrés, obtenus pour σ valant une heure. Le taux d'évaporation déduit E_{veg} est représenté sur la figure 5.8b, qui fait apparaître le cycle quotidien de l'évaporation et ses maximums. Le taux d'évaporation est faussé le 4 septembre (remplissage de la réserve d'eau) et le 14 septembre (un radiomètre a été installé et désinstallé plusieurs fois dans le pot, ce qui fait varier la masse de la structure). Les autres journées montrent des variations similaires : le taux d'évaporation est faible pendant la nuit (ou parfois légèrement négatif, probablement du fait de la condensation sur les feuilles) et comporte deux maximums pendant la journée. Sur la période analysée, le taux d'évaporation maximal au cours de la journée est compris entre 0.4 et 0.8 litres par heure. En faisant le cumul de l'évaporation sur toute la journée, on obtient des volumes d'eau évaporés par la végétation entre 4 et 8 litres environ par jour (figure 5.8c).

Évaporation horaire

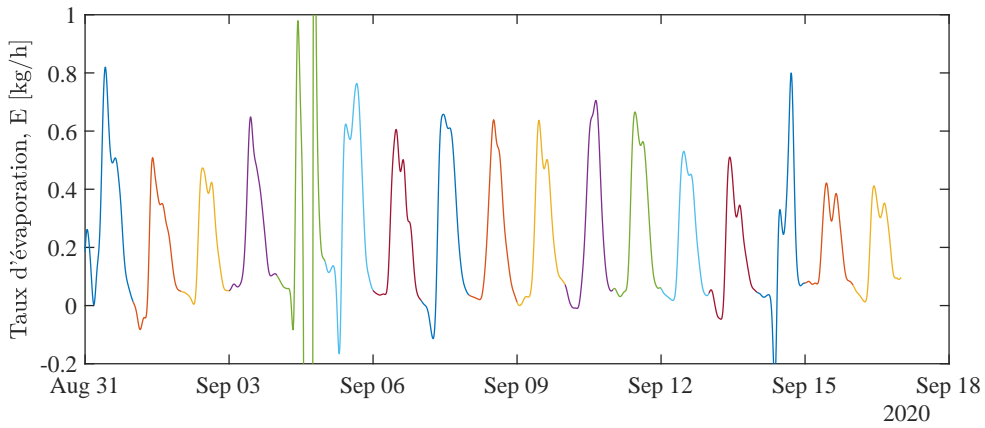
Pour mieux visualiser l'évolution du taux d'évaporation au cours de la journée, les résultats obtenus chaque jour ont été superposés sur la figure 5.9a. L'évaporation a principalement lieu entre 7h et 21h, ce qui correspond à la période d'ensoleillement qui est de 7h07 à 20h34 le 31 août et de 7h30 à 20h01 le 16 septembre. L'évaporation atteint un premier maximum le matin (vers 10h), décroît aux alentours de midi puis atteint un second maximum au courant de l'après-midi (vers 16h). Ce « creux » vers midi peut avoir deux causes. La première est géométrique : la configuration du lieu fait qu'à la mi-journée, la structure et la dalle en béton sont en partie ombragées par des arbres proches du site, il y a donc moins d'énergie disponible pour la vaporisation de l'eau. La deuxième peut provenir de la physiologie du végétal : Gosa *et al.* (2021) ont ainsi identifié sur des plants de tomates une baisse de la conductance stomatale à la mi-journée. Une journée type est représentée sur la figure 5.9, en moyennant l'évaporation mesurée à chaque tranche horaire entre le 31 août et le 16 septembre.

Bilan

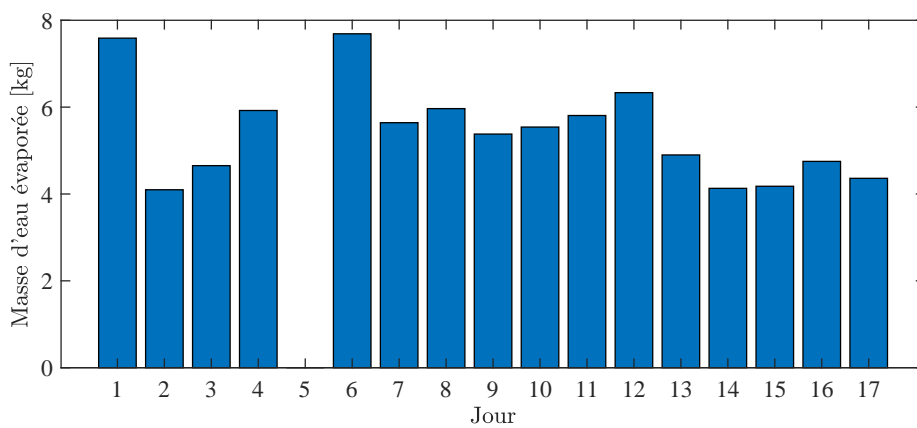
La pesée en continu du prototype permet d'obtenir la masse d'eau évaporée par les plantes au cours du temps et d'en déduire le taux d'évaporation de la végétation. On



(a) Évolution de la masse de la Corolle.

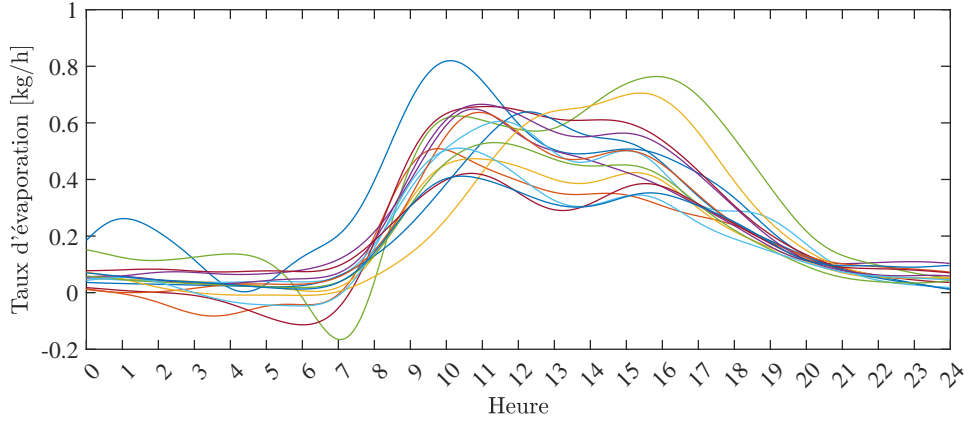


(b) Taux d'évaporation correspondant.

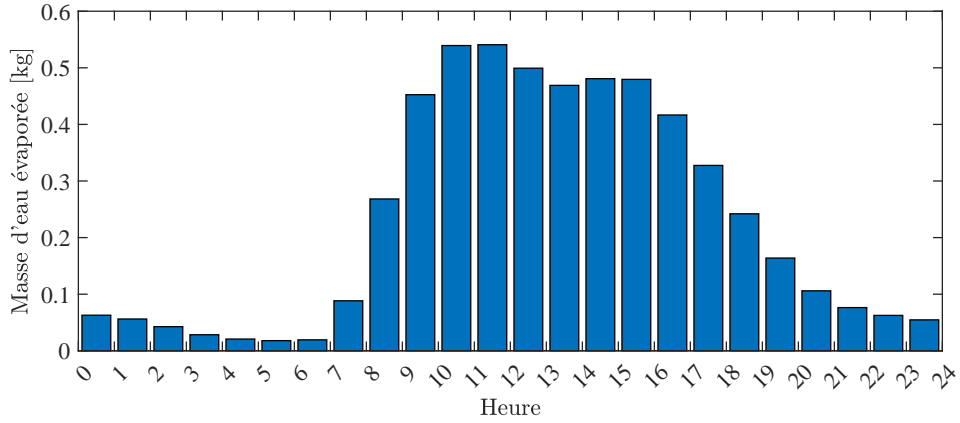


(c) Évaporation cumulée.

FIGURE 5.8 – Lissage du signal sur 17 jours par un filtre gaussien ($\sigma = 3600$ s).



(a) Profils des 17 jours.



(b) Moyenne de l'évaporation horaire.

FIGURE 5.9 – Évolution du taux d'évaporation au cours de la journée.

peut alors quantifier le flux de chaleur latente maximal (lorsque $E_{veg} = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) :

$$\Phi_E = L_v E S_{veg} = L_v E_{veg} = 2.3 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.8}{3600} = 510 \text{ W} \quad (5.3)$$

La réduction du flux de chaleur sensible due à l'évaporation (vue à la section 2.2.2) peut alors être estimée comme suit :

$$\Delta\Phi_{H,evap} = - \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)_f \Phi_E = -0.5 \cdot 510 = -255 \text{ W} \quad (5.4)$$

où le ratio $\frac{h_f}{h_f+h_r}$ a été pris égal à celui des simulations de la section 3.4. Cette valeur indique que dans le cas présent, le rafraîchissement de l'air par évapotranspiration est faible; pour comparaison, la puissance thermique libérée par un humain au repos (sa « chaleur corporelle ») est de l'ordre de 100 W.

5.2.2 Précipitations interceptées

D'une manière similaire, les gains de masse peuvent être comptabilisés afin d'obtenir les précipitations interceptées par la Corolle. Ce travail n'a pas été réalisé ici car nous souhai-

tions simplement connaître l'irrigation complémentaire nécessaire au bon développement des plantes, qui a été de 180 L durant l'été, pour l'ensemble du pot. Les précipitations interceptées par le pot ont tout de même été comparées sur plusieurs journées à d'autres mesures de pluviométrie⁴. Ces dernières ont été réalisées, près du radar à bande X situé sur un toit voisin à 150 m, par le laboratoire HM&Co au moyen de disdromètres (Gires *et al.*, 2018). Le rapport entre le gain en masse de la Corolle (que l'on peut convertir en un volume d'eau récupérée) suite à une averse et la quantité de précipitations mesurée par les disdromètres (une hauteur d'eau en mm, c'est-à-dire la hauteur d'eau que l'on récupérerait dans un bac d'une surface de 1 m²) permet de dire que la structure végétalisée intercepte la pluie sur une surface équivalente à 1.5 m² environ.

5.2.3 Transpiration des feuilles

L'ensemble des mesures obtenues est disponible en annexe D. Les mesures ont été effectuées à la volée sur les feuilles du faux jasmin de la Corolle : chaque mesure correspond à une feuille différente, recevant un rayonnement différent, selon son orientation et sa place dans le feuillage, et transpirant plus ou moins. Les mesures ont eu lieu sur deux journées, le 12 et le 19 octobre 2020, aux alentours de midi.

Le tableau présenté en annexe donne les résultats bruts enregistrés dans la mémoire de l'appareil. Le guide d'utilisation de la pince à photosynthèse TPS-2 distingue les valeurs mesurées (C , Q , CH , T_a , ...) des valeurs calculées à partir de ces mesures (E , T , G , ...). Nous retranscrivons ci-dessous la manière dont l'évaporation et la température de la feuille sont calculées.

Le taux de transpiration E est calculé à partir de la pression de vapeur d'eau entrant (e_{in}) et sortant (e_{out}) de la cuvette. Le débit molaire d'eau entrant dans la cuvette D_{in} (en mol.m⁻².s⁻¹) est :

$$D_{in} = \frac{e_{in}}{P} \cdot W \quad (5.5)$$

où P est la pression atmosphérique et W le débit molaire d'air sec par unité d'aire de feuille, obtenu au moyen d'un débitmètre. Le débit molaire de l'air à la sortie de la cuvette, en raison de l'addition de l'eau transpirée, est $(W + E)$. Par conséquent, le débit molaire d'eau sortant de la cuvette D_{out} est :

$$D_{out} = \frac{e_{out}}{P} \cdot (W + E) \quad (5.6)$$

Mais la différence entre les débits molaires d'entrée et de sortie doit être égale au taux de transpiration, d'où :

$$E = \frac{e_{out}}{P} \cdot (W + E) - \frac{e_{in}}{P} \cdot W \quad (5.7)$$

Par conséquent, le taux de transpiration vaut :

$$E = \frac{e_{out} - e_{in}}{P - e_{out}} \cdot W \quad (5.8)$$

La différence de température entre la feuille et la cuvette est ensuite calculée de la façon suivante⁵ :

4. Les données pour les mois en question sont accessibles à l'adresse : https://hmco.enpc.fr/calendars/Calendars_Pars_Radar_Tower_2/Calendar_Pars_Rad.html

5. On retrouve une expression de la forme $\Delta T = \frac{\phi - L_v E}{h + h_r}$, comme à la section 2.2.2.

$$\Delta T = T_f - T_c = \frac{H - \lambda E}{0.93 M_a C_p / r_b + 4\sigma(T_c + 273)^3} \quad (5.9)$$

où la température de la cuvette T_c est considérée égale à la température de l'air T_a (mesurée par l'appareil et enregistrée en mémoire), H est le rayonnement absorbé par la feuille (calculé mais non fourni), λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (donnée dans la notice d'utilisation), E a été calculé comme précédemment, M_a est la masse molaire de l'air (constante donnée), C_p la chaleur spécifique à pression constante (constante donnée) et r_b la résistance de surface à la vapeur d'eau (mesurée d'après le manuel mais non fournie). La notice indique que H est calculé d'après le flux de photons incident sur la cuvette Q (mesuré), prenant en compte le ratio infrarouge/PAR de la source lumineuse, la transmission à travers la fenêtre de la cuvette et la réflexion/absorption de la feuille, sans rien préciser de ces coefficients... Il aurait été intéressant d'avoir les valeurs du rayonnement absorbé par les feuilles mais on ne peut pas non plus remonter à H d'après l'équation 5.9 car celle-ci comporte une deuxième inconnue (r_b).

Taux de transpiration surfacique

Nous nous contentons donc d'analyser les taux de transpiration surfaciques des feuilles E . Les valeurs des densités de flux de chaleur latente correspondantes⁶ sont données dans la table D.4. Elles sont tracées sur la figure 5.10 en fonction du flux de photons incident à la surface de la feuille, chaque point représentant une mesure à la pince à photosynthèse. Le 12 octobre, les mesures ont été réalisées sur des feuilles à l'ombre et au soleil, tandis que le 19 octobre seulement des feuilles au soleil ont été choisies (la mesure du 19 octobre avec un rayonnement incident faible est due à une ombre portée sur le capteur par une autre feuille lors de la mesure). On n'observe pas de relation évidente entre la densité de flux de chaleur latente et le flux de photons incident, ce qui semble infirmer les relations du type $E = f(\text{SW} \downarrow)$ (modèles d'estimation de l'évapotranspiration en fonction du rayonnement solaire incident, cf. Abtew et Melesse (2012)). Le taux de transpiration surfacique moyen est de $12.3 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (avec un écart-type de 9.3) le 12 octobre et de $14.9 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (avec un écart-type de 9.2) le 19 octobre. Cela correspond à des densités de flux de chaleur latente ϕ_E moyennes de 7.9 W.m^{-2} (écart-type de 5.9) et 9.5 W.m^{-2} (écart-type de 5.9)⁷.

Ces flux de chaleur latente surfaciques ont été mesurés au mois d'octobre, donc à une période où le rayonnement incident sur les feuilles et la température de l'air sont plus faibles qu'en été. Pour se faire une idée de valeurs de ϕ_E qui soient représentatives de l'été, on peut comparer les taux d'évaporation de la végétation, mesurés au moyen des capteurs de charge, en août et en octobre. La figure 5.8b indique un taux d'évaporation, sur l'ensemble de la végétation, qui peut atteindre 800 g.h^{-1} à la fin août. Le 12 octobre, il est deux fois moindre (et la masse totale d'eau évaporée sur la journée est également deux fois plus faible, comme on peut le voir sur la figure 5.11). En supposant que l'aire cumulée des feuilles qui composent le feuillage (la surface foliaire totale) est restée la même entre le 31 août et le 12 octobre, on peut donc estimer que les valeurs de ϕ_E à la surface des feuilles sont deux fois plus importantes en été que celles qui ont été mesurées à la mi-octobre (soit des valeurs moyennes de la densité de flux de chaleur latente entre

6. Dans la table D.4, $\phi_E = L_v E$ avec $L_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$.

7. Pour avoir une comparaison, ces valeurs sont environ 6 fois inférieures à celle utilisée dans la première simulation du cas d'étude 3 (où $\phi_E = 50 \text{ W.m}^{-2}$, voir table 3.7).

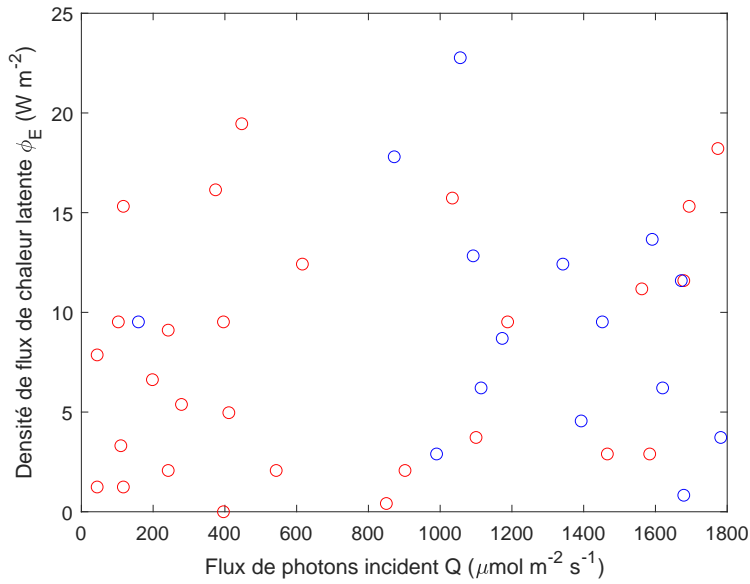


FIGURE 5.10 – Densité de flux de chaleur latente des feuilles en fonction du flux de photons incident. Les points rouges correspondent aux mesures du 12 octobre, les bleus à celles du 19 octobre.

15 et 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en été pour les feuilles du faux jasmin).

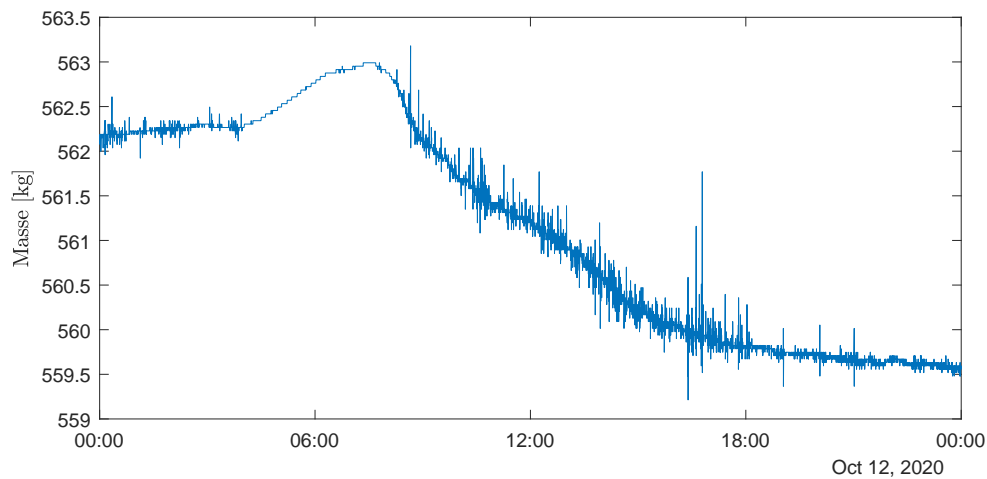


FIGURE 5.11 – Évolution de la masse de la Corolle le 12 octobre. Entre 11h22 et 11h52, le taux d'évaporation vaut : $E_{veg} = 380 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$.

Estimation de la surface foliaire

La comparaison du taux d'évaporation surfacique (mesure avec la pince à photosynthèse) et du taux d'évaporation global pour l'ensemble de la végétation (mesure avec les capteurs de charge), mesurés simultanément, peut également nous permettre de nous faire une idée de la surface foliaire totale sur la Corolle. La densité de flux de chaleur latente

maximale mesurée le 12 octobre est de 19 W.m^{-2} , ce qui correspond à un taux d'évaporation surfacique pour cette feuille : $E_{f,max} = 30 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Le taux d'évaporation global est quant à lui de 380 g.h^{-1} au moment où ont été réalisées les mesures avec la pince à photosynthèse (voir figure 5.11). En supposant que toutes les feuilles transpirent au taux d'évaporation surfacique maximal mesuré, on obtient comme minorant de la surface foliaire totale :

$$S_{veg,min} = \frac{E_{veg}}{E_{f,max}} = \frac{380}{30} = 12,7 \text{ m}^2 \quad (5.10)$$

Le même calcul avec les données du 19 octobre (taux d'évaporation surfacique maximal mesuré à la pince à photosynthèse : $E_{f,max} = 36 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$; taux d'évaporation de la végétation mesuré par les capteurs de charge : $E_{veg} = 420 \text{ g.h}^{-1}$) donne une surface foliaire minimale de 11.7 m^2 . En faisant le calcul avec cette fois-ci le taux d'évaporation surfacique moyen, on obtient résultat une surface foliaire totale de 30 m^2 , qui reste donc du même ordre de grandeur.

5.2.4 Bilan radiatif du sol

Les deux radiomètres ont été utilisés sur deux jours, à la fin de l'été, les 14 et 15 septembre, entre 9h et 18h environ. L'un des objectifs de ces mesures est de pouvoir évaluer, expérimentalement, la réduction du flux de chaleur sensible due à l'ombre, dont on avait tenté de donner une valeur théorique à la section 2.2.1 :

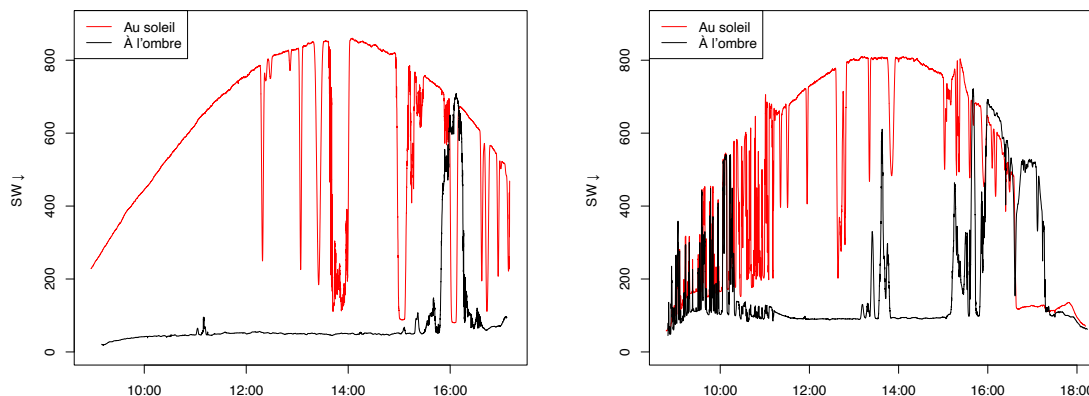
$$\Delta\phi_{H,ombre} = -\frac{h}{\bar{h}} \cdot \Delta A \cdot f \quad (5.11)$$

où ΔA est la différence de rayonnement absorbé entre le sol à l'ombre et celui au soleil. Pour pouvoir comparer les bilans radiatifs des deux sols, les deux radiomètres ont été utilisés simultanément et placés, respectivement, dans l'ombre de la végétation et en plein soleil, 1.5m au-dessus du sol. Le sol est une ancienne dalle d'essai en béton armé.

Rayonnement solaire incident

La figure 5.12 permet déjà d'obtenir les différences de rayonnement solaire incident entre les deux sols. Le 14 septembre, le radiomètre à l'ombre a été placé à quelques centimètres sous la végétation, très près du pot métallique contenant le substrat. C'est la raison pour laquelle il a été totalement protégé des rayons du soleil jusqu'à 16h environ, heure où le soleil au sud-ouest frappait directement sur le capteur. Le lendemain, il a été légèrement déplacé (à 1 m du pot, voir figure 5.5) pour être au-dessus de la zone de la dalle qui était ombragée la majeure partie du temps pendant la journée. Les fluctuations que l'on voit sur la courbe noire de la figure 5.12b sont dues au fait que par moments, le soleil perce jusqu'au capteur à travers la végétation et les joncs en composites de la structure. Il en est de même pour le radiomètre au soleil (courbes rouges – il a également été déplacé de quelques mètres entre les deux jours) : il n'est jamais totalement exposé au soleil car il arrive qu'il y ait, au cours de la journée, une ombre portée sur le capteur (l'ombre d'un jonc ou de la végétation autour du site expérimental).

Lorsque le radiomètre à l'ombre est très proche des plantes (figure 5.12a), on observe que la quasi-totalité du rayonnement solaire est bloquée par la végétation. La différence



(a) 14 septembre. Le capteur à l'ombre est placé directement sous la végétation, à 10 cm du pot. (b) 15 septembre. Le capteur à l'ombre est placé à 1 m du pot.

FIGURE 5.12 – Rayonnement solaire descendant ($SW\downarrow$ en $W.m^{-2}$) mesuré au soleil et à l'ombre de la végétation.

de rayonnement solaire descendant entre les deux radiomètres est maximale peu avant 14h et vaut environ $800 W.m^{-2}$. La végétation n'est pas très fournie mais la section 3.3 a montré que quelques feuilles pouvaient suffire à absorber et réfléchir tout le rayonnement solaire direct descendant avant qu'il ne parvienne au sol.

Lorsque le radiomètre à l'ombre est à 1m du pot, on remarque qu'une partie du rayonnement solaire (environ $100 W.m^{-2}$) lui parvient : il s'agit de rayonnement solaire diffus.

Température interne des radiomètres

La température interne du boîtier est mesurée près des pyrgéomètres afin de retrancher à la mesure du rayonnement infrarouge en un point – provenant de l'atmosphère, du sol, des bâtiments, de la végétation... – le rayonnement infrarouge provenant du boîtier, afin d'augmenter la justesse de la mesure. Le capteur de température est donc soumis à la convection de l'air autour du boîtier ainsi qu'au rayonnement solaire et thermique qui atteint l'appareil. Il donne ainsi une information (partielle...) sur le confort thermique à l'emplacement des deux radiomètres. Leurs températures internes sont tracées sur la figure 5.13 pour la journée du 15 septembre. La différence maximale observée est de 4 K.

Composantes du bilan radiatif à l'ombre

Les composantes du bilan radiatif mesurées par le radiomètre à l'ombre sont tracées sur la figure 5.14. La première journée, lorsque le pyrgéomètre est très proche des feuilles, le rayonnement infrarouge descendant et celui ascendant sont identiques : ils correspondent au rayonnement émis par l'environnement immédiat du pyrgéomètre, c'est-à-dire les feuilles. La deuxième journée, le rayonnement infrarouge ascendant est similaire à celui de la veille. En revanche, le rayonnement infrarouge descendant est inférieur à celui de la veille puisque le pyrgéomètre n'est plus placé directement sous la végétation : le facteur

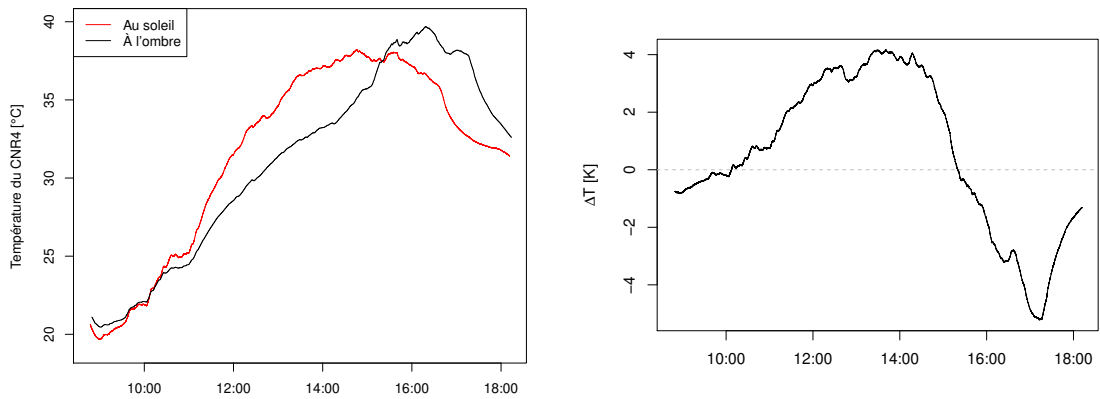
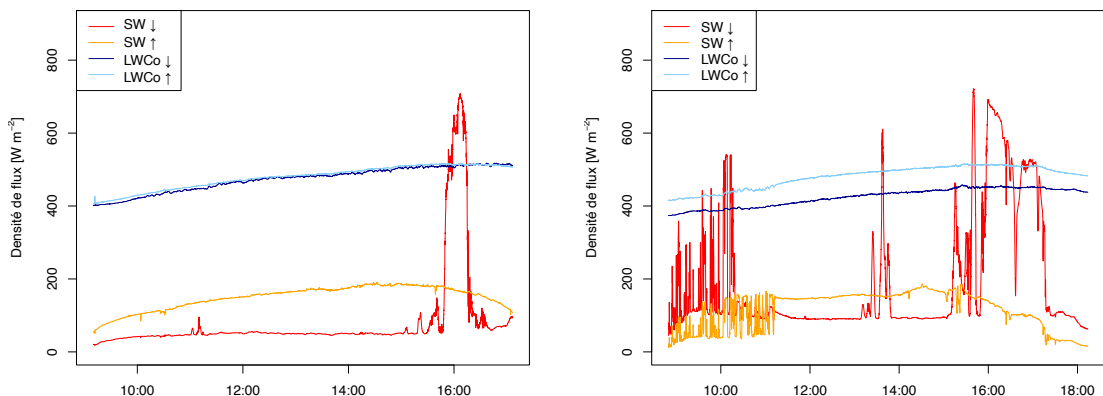


FIGURE 5.13 – Températures des radiomètres le 15 septembre.

de vue du ciel est plus grand. Par conséquent, la proportion de rayonnement infrarouge provenant du ciel (qui a une température plus basse que celle de la végétation) est plus importante.

Les données des pyranomètres indiquent également qu’au cours de la journée, le rayonnement solaire ascendant est parfois supérieur au rayonnement solaire descendant : lorsque l’on fait le bilan énergétique d’un objet en ville (une personne sous un arbre, par exemple), une partie importante de l’énergie reçue par rayonnement peut donc provenir du sol et non du ciel, même lorsque l’on considère le rayonnement solaire, en raison des réflexions sur les surfaces composant la ville. Cet effet est assez marqué, ici, parce que l’ombre au sol créée par la structure végétalisée est peu étendue : le pyranomètre tourné vers le sol « voit » donc, en périphérie, des surfaces ensoleillées.



(a) 14 septembre.

(b) 15 septembre.

FIGURE 5.14 – Composantes du bilan radiatif à l’ombre de la végétation.

Composantes du bilan radiatif au soleil

Les composantes du bilan radiatif mesurées par le radiomètre au soleil sont tracées sur la figure 5.15. La première journée, un problème de branchement d'un câble nous a empêchés d'avoir les mesures des pyr géomètres et du capteur interne de température. Lors de la deuxième journée, on peut voir que le rayonnement infrarouge descendant est légèrement inférieur à celui mesuré à l'ombre (figure 5.14b) car le facteur de vue du ciel est plus grand. En revanche, pour continuer la comparaison avec le radiomètre placé à l'ombre, le rayonnement infrarouge ascendant est un peu plus important au niveau du radiomètre au soleil car le pyranomètre côté sol « voit » des surfaces plus chaudes. Les différences sont peu importantes entre les pyranomètres face au sol qui sont à l'ombre et au soleil car tous deux interceptent du rayonnement provenant à la fois de surfaces à l'ombre et de surfaces au soleil. L'expérience serait donc à reproduire entre un lieu toujours ensoleillé, avec le moins possible de masques solaires (végétation ou bâtiments), et un lieu toujours à l'ombre, avec une surface à l'ombre plus conséquente (et potentiellement plus homogène).

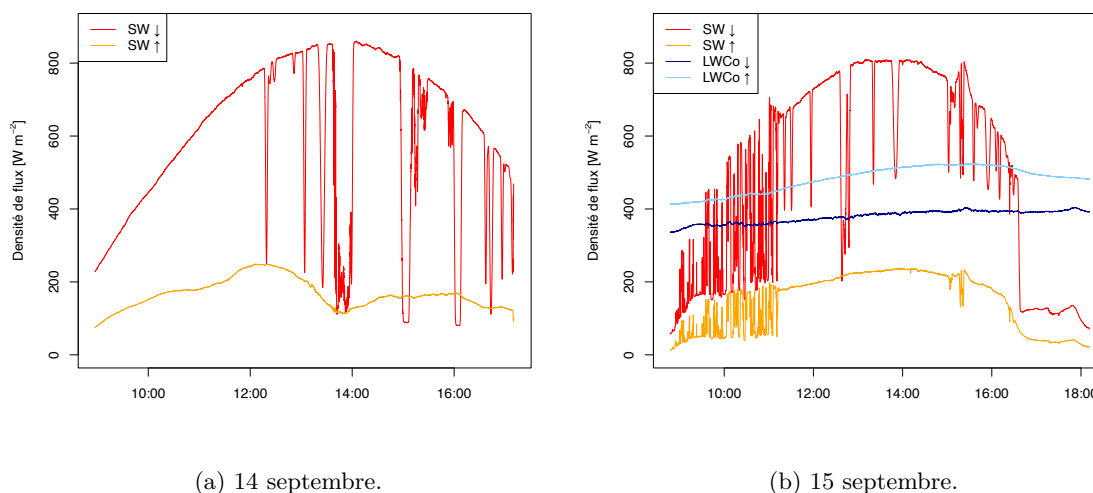


FIGURE 5.15 – Composantes du bilan radiatif au soleil.

Concernant les mesures de rayonnement solaire, les différences visibles (sur les courbes orange et rouges) entre les journées du 14 et du 15 septembre indiquent que le radiomètre au soleil a également été changé de place. Nous avons essayé de le décaler en voyant, le 14 septembre, qu'il était longtemps dans l'ombre avant 14h mais aucun endroit de la dalle n'étant exempt de masques solaires. Les mesures permettent toutefois d'obtenir l'enveloppe du rayonnement solaire descendant et d'alimenter d'éventuelles simulations qui auraient besoin de valeurs de rayonnement solaire et atmosphérique en entrée de modèle. Elles servent également à estimer l'albédo du sol, comme indiqué dans le paragraphe suivant.

Albédo de la dalle

En utilisant les données des pyranomètres au soleil le 15 septembre (figure 5.15b), nous pouvons tracer figure 5.16 le rapport, au cours de la journée, entre le rayonnement solaire

incident et le rayonnement solaire réfléchi par le sol : $\frac{SW_{\uparrow}}{SW_{\downarrow}}$. Cette figure laisse apparaître une valeur constante, proche de 0.3, qui est l'albédo du sol. Les pics sont dus aux masques solaires qui font ponctuellement de l'ombre sur le pyranomètre face au ciel.

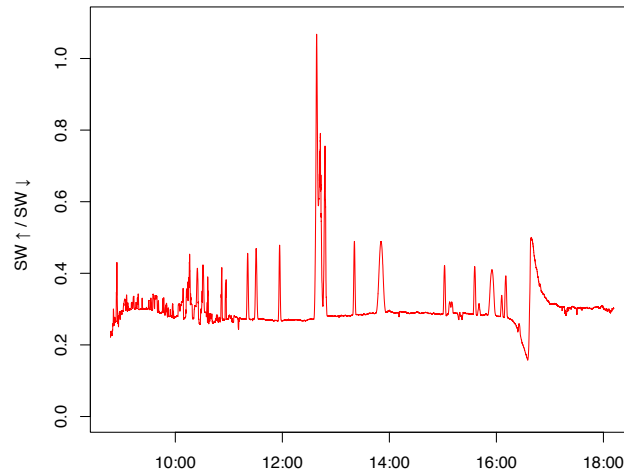


FIGURE 5.16 – Détermination de l'albédo de la dalle en béton.

Bilan

Pour en revenir à la quantification de l'effet de l'ombrage, une estimation simple, sans tenir compte du rayonnement infrarouge, donne comme différence de rayonnement absorbé entre le sol à l'ombre et le sol au soleil :

$$\Delta A = a_s \Delta SW_{dir} = (1 - 0.3) \cdot 700 = 490 \text{ W.m}^{-2} \quad (5.12)$$

ce qui donne une valeur assez proche des 400 W.m^{-2} pris dans l'exemple du chapitre 2 (voir figure 2.12a).

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un dispositif de mesure en continu, longue durée et *in situ* du taux de transpiration des feuilles de plantes grimpantes. Ce taux de transpiration est agrégé sur l'ensemble de la végétation, à l'échelle spatiale d'un objet de type « mobilier urbain ». Comparé à des méthodes plus courantes, qui mesurent l'évaporation à l'échelle de la feuille ou de la parcelle, ce dispositif opère donc à une échelle intermédiaire. Il fonctionne par pesée, ce qui le rend peu coûteux tout en permettant une mesure directe, fiable et avec une très bonne résolution (environ 40 grammes), ce qui donne accès au taux d'évaporation pour des durées inférieures à l'heure. La connaissance de ce taux d'évaporation permet de remonter au flux de chaleur latente (agrégé sur l'ensemble de la végétation) et donc de quantifier expérimentalement la réduction, due à l'évaporation, du flux de chaleur sensible émis vers l'air par le feuillage. Dans le

cas de cette expérience, la réduction mesurée est jugée faible : l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles paraît donc avoir peu d'impact sur la température de l'air.

Des mesures ponctuelles, avec une pince à photosynthèse, ont aidé à évaluer la variabilité du taux d'évaporation surfacique au sein du feuillage du faux jasmin et laissent penser que la transpiration des feuilles et le rayonnement incident sont moins corrélés que ce que notre intuition nous indiquait. Associées aux mesures de pesée, elles nous ont permis d'estimer une valeur moyenne de la densité de flux de chaleur latente des feuilles en été à la mi-journée ($\phi_E = 20 \text{ W/m}^2$) et d'obtenir un ordre de grandeur de la surface foliaire des plantes grimpantes sur le prototype ($S_{veg} \approx 30 \text{ m}^2$).

De plus, nous avons étudié les composantes du bilan radiatif du sol à l'aide de deux radiomètres. Ceux-ci nous ont permis de vérifier qu'un feuillage même peu fourni parvenait à bloquer la quasi-totalité du rayonnement solaire direct, c'est-à-dire être très efficace pour ses qualités d'ombrage, ce que nous avons observé dans les simulations du chapitre 3. Les mesures des capteurs tournés vers le sol indiquent également que le rayonnement ascendant n'est pas négligeable lorsque l'on fait le bilan énergétique d'un objet en milieu urbain. Enfin, notre méthode peut être suivie pour obtenir des données spécifiques (comme l'albédo du sol ou le rayonnement solaire descendant) permettant d'alimenter des simulations et d'utiliser des valeurs représentatives pour les paramètres du modèle de réduction du flux de chaleur sensible dû à l'ombrage du sol que nous avons exposé au chapitre 2.

Bibliographie

Wossenu ABTEW et Assefa MELESSE : *Evaporation and evapotranspiration : measurements and estimations*. Springer Science & Business Media, 2012.

Richard G ALLEN, Terry A HOWELL, William O PRUITT, Ivan A WALTER et Marvin E JENSEN : *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*. ASCE, 1991.

David ARMSON, Pete STRINGER et Roland A ENNOS : The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3) :245–255, 2012.

Ryad BOUZOUIDJA, Maeva SABRE, David RAMIER, Patrice CANNAVO et Rémy CLAVÉRIE : 81. green roof set-up analysis : Monitoring and simulation of water and thermal transfer using hydrus-1d. *In 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*. AMS, 2018.

Leydy Castellanos DIAZ : *Deploying nature-based solutions in urban areas : thermal performance and urban feasibility across scales*. Thèse de doctorat, École des Ponts ParisTech, 2022.

Auguste GIRES, Ioulia TCHIGUIRINSKAIA et Daniel SCHERTZER : Two months of disdrometer data in the paris area. *Earth System Science Data*, 10(2) :941–950, 2018.

Sanbon Chaka GOSA, Amit KOCH, Itamar SHENHAR, Joseph HIRSCHBERG, Dani ZAMIR et Menachem MOSHELION : Predicting tomato field-yield using continuous monitoring of young tomato water status. *bioRxiv*, 2021.

SR GREEN : Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(3-4) :201–221, 1993.

Marie-Therese HOELSCHER, Thomas NEHLS, Britta JÄNICKE et Gerd WESSOLEK : Quantifying cooling effects of facade greening : Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114 :283–290, 2016.

Nader KATERJI, FA DAUDET, Alain CARBONNEAU et Nathalie OLLAT : Étude à l'échelle de la plante entière du fonctionnement hydrique et photosynthétique de la vigne : comparaison des systèmes de conduite traditionnel et en lyre. *VITIS-Journal of Grapevine Research*, 33(4) :197, 2015.

Gianfranco RANA et Nader KATERJI : Evapotranspiration measurement for tall plant canopies : the sweet sorghum case. *Theoretical and applied climatology*, 54(3) :187–200, 1996.

Gianfranco RANA et Nader KATERJI : Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate : a review. *European Journal of agronomy*, 13(2-3) :125–153, 2000.

Chapitre 6

Analyse de cycle de vie de la structure végétalisée

Le recours à la végétation en ville dans des politiques d'aménagement urbain est parfois qualifié de « stratégie sans regrets », dans le sens où la végétation pourrait résoudre un problème spécifique sans en créer d'autres. Elle serait ainsi une solution d'atténuation de la surchauffe urbaine avec des co-bénéfices en ce qui concerne d'autres services écosystémiques. Or, l'installation et l'entretien de la végétation en ville nécessitent des matériaux, des ressources, de l'énergie... ce qui a pour conséquence des impacts sur l'environnement. Nous effectuons dans ce chapitre une analyse de cycle de vie (ACV) de la Corolle végétalisée afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels causés par la réalisation de cet exemple de mobilier urbain. La présentation de la méthode ACV est tirée de l'article de Brochard *et al.* (2021). Nous appliquons ensuite cette méthode au prototype de gridshell construit pour nos besoins expérimentaux, qui a été décrit à la section 4.2.

6.1 La méthode d'analyse du cycle de vie

L'ACV permet de quantifier les dommages que des systèmes techniques peuvent causer sur l'environnement. Son objectif est de fournir des éléments permettant, sur une base environnementale, de faire le choix entre plusieurs solutions techniquement faisables et économiquement acceptables. Elle constitue le socle d'une grande variété de méthodes plus connues du grand public et généralement limitées à un petit nombre de problématiques environnementales ou à une partie du cycle de vie (bilan ou empreinte carbone, étiquetage énergétique, etc.).

On peut retracer quelques faits marquants de son évolution :

- le premier outil d'ACV date de 1988 ;
- la SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), lieu d'échange autour des questions de l'ACV entre professionnels regroupant 6000 membres et institutions, a été créée en 1991 ;
- un format commun de données a vu le jour en 1995 ;
- la méthode ACV a été normalisée en 1998 ;
- elle a été créée pour des produits industriels, son adaptation au secteur de la

construction reste encore du domaine de la recherche.

L'ACV est une méthode normalisée dont le cadre général et les lignes directrices sont fixés par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044. Elle permet d'estimer les flux de matières et d'énergies, ainsi que les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service au cours de son cycle de vie et donc de relier les procédés technologiques et leurs effets sur l'environnement (Jolliet *et al.*, 2017).

Cette méthode repose sur trois principes de base :

- il s'agit d'une analyse fonctionnelle rapportant le calcul des émissions, extractions et impacts associés à une fonction clairement définie ;
- elle est multi-critères, permettant de calculer différents types d'impacts environnementaux (affectant la santé humaine, les écosystèmes, les ressources...);
- elle est multi-étapes, et cherche donc à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie (production, transports, utilisation, maintenance, fin de vie...).

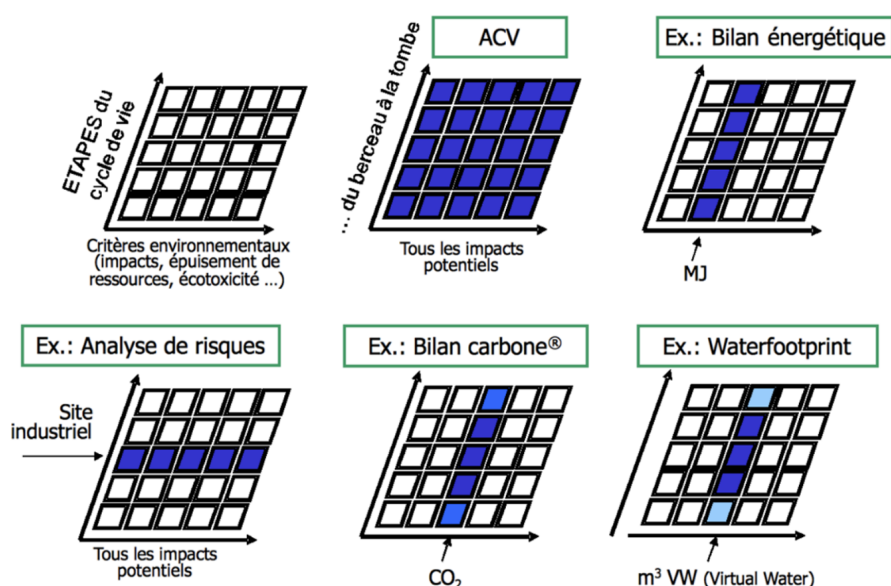


FIGURE 6.1 – L'ACV : une méthode multi-étapes et multicritères (d'après Risch *et al.* (2012)).

Les résultats d'une ACV sont exprimés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie, et ils sont rapportés à une unité fonctionnelle intégrant une durée de vie. L'unité fonctionnelle est donc l'unité de compte à laquelle va se référer l'ACV. Elle doit être définie avec précision et en cohérence avec les objectifs et le champ d'étude car toutes les données d'entrée et de sortie du système ainsi que les flux lui sont affectés. Il faut également garder en mémoire le fait que sa définition se fait en vue d'une analyse comparative. En effet une ACV est destinée à évaluer des scénarios alternatifs d'un point de vue environnemental.

Réaliser une analyse du cycle de vie permet ainsi d'évaluer l'impact environnemental global du système étudié rapporté à l'unité fonctionnelle préalablement définie, en suivant la méthodologie décrite dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. C'est un processus

itératif qui se décompose en quatre phases, décrites sur la figure 6.2 .

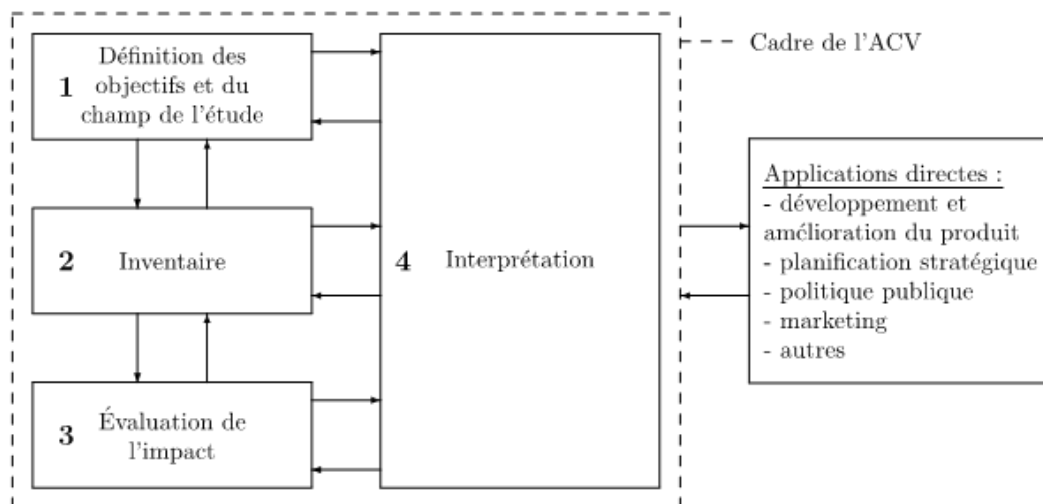


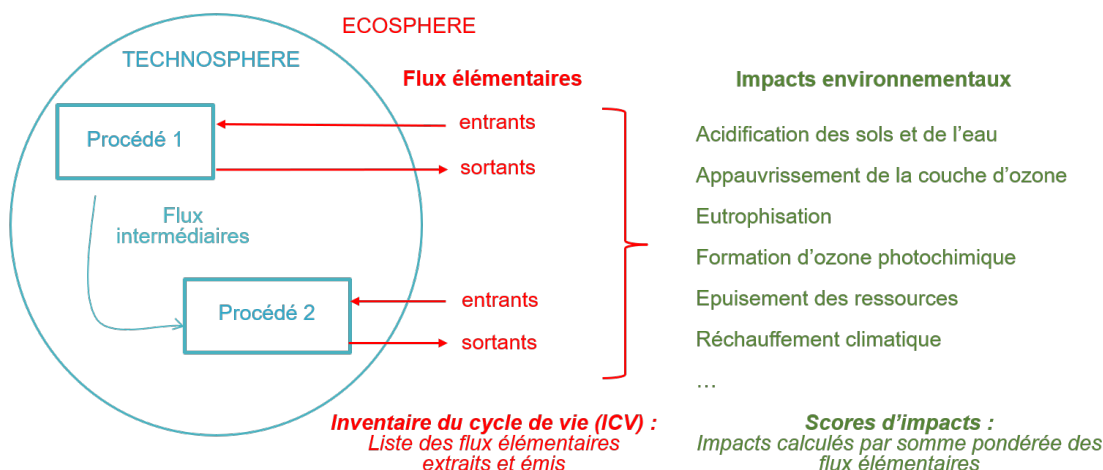
FIGURE 6.2 – Cadre de l'étude de l'ACV d'après la norme ISO 14040.

La première phase de définition des objectifs et du champ de l'étude permet de poser le problème. Cela implique la réponse à un certain nombre de points cruciaux comme la définition de la fonction et des limites du système, ainsi que celle de l'unité fonctionnelle. Le scénario de référence et les scénarios alternatifs sont également définis dans cette phase.

La deuxième phase d'inventaire du cycle de vie correspond au bilan des entrants et des sortants. Il s'agit de la quantification sur l'ensemble du cycle de vie des émissions dans l'eau, l'air et le sol ainsi que des consommations de matières premières renouvelables et non renouvelables extraites de l'environnement. Cette quantification nécessite de collecter un grand nombre de données, tâche qui peut s'avérer chronophage. Le calcul de l'inventaire se fait en lien avec des bases de données, qui fournissent des facteurs d'émission de polluants et d'extraction de ressources pour certains produits, matériaux et procédés industriels. Parmi les bases de données d'inventaire de référence, *ecoinvent* est la plus complète. Elle contient des données d'inventaire sur le cycle de vie relatives à l'approvisionnement en énergie, aux procédés d'extraction des ressources, à l'approvisionnement en matériaux pour divers secteurs d'activité (construction, agriculture, etc.), aux produits chimiques, aux systèmes de traitement de déchets, ou encore aux transports. Développée à l'origine pour la Suisse, *ecoinvent* a actuellement une portée européenne, avec une extension progressive au monde entier. On peut également citer la base de données ELCD (*European reference Life Cycle Database*) développée depuis 2006 par le *Joint Research Center (JRC)* de la Commission européenne, et en accès libre. Elle contient des inventaires du cycle de vie relatifs aux matériaux, à l'énergie, au transport et aux déchets. Collectées spécifiquement pour l'analyse ou provenant de bases de données génériques, les données doivent être cohérentes entre elles afin d'éviter, entre autres, des doubles comptages.

La troisième phase d'évaluation des impacts s'appuie sur l'inventaire des émissions et

des extractions. Elle précise quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux (réchauffement climatique, toxicité humaine, écotoxicité, etc.). Le principe consiste à convertir les flux de substances susceptibles de contribuer à un impact donné en un flux d'une substance de référence propre à la catégorie d'impact¹ (méthode dite « des équivalences ») afin de calculer un score d'impact. Différentes méthodes de calcul des impacts sur le cycle de vie ont été développées par plusieurs équipes de chercheurs et de praticiens (par exemple : CML, ReCiPe, Eco-indicator, EDIP, IMPACT World+, etc.).



Exemple : les procédés émettent comme flux élémentaires une masse m_{CH_4} de méthane et une masse m_{CO_2} de dioxyde de carbone.

Le score d'impact I_{RC} pour l'indicateur « réchauffement climatique » vaut : $I_{\text{RC}} = f_{\text{CH}_4} m_{\text{CH}_4} + f_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2}$

où f_{CH_4} et f_{CO_2} sont les facteurs de caractérisation de la méthode de calcul utilisée.

FIGURE 6.3 – Les flux élémentaires constituant l'inventaire de cycle de vie (ICV) sont convertis en scores d'impact.

La quatrième phase de l'ACV consiste à interpréter les résultats obtenus dans chacune des étapes précédentes, en particulier en évaluant leur robustesse et les incertitudes qui leur sont associées. L'interprétation doit être effectuée régulièrement pour assurer une analyse de qualité, mettre en évidence les points clés et identifier les actions permettant d'améliorer les performances environnementales du système étudié.

6.2 Application de la méthode ACV au prototype

6.2.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'objectif initial de l'étude était de comparer les coûts (environnementaux) et les bénéfices associés à un rafraîchissement de l'air par un certain type de végétation, l'idée étant d'étendre ensuite l'étude à d'autres techniques de rafraîchissement de l'air en ville (par exemple, par l'humidification des chaussées ou l'emploi de peintures réfléchissantes, à fort albédo, sur les sols ainsi que les façades et les toitures des bâtiments) afin de les

1. Par exemple, la substance de référence dans la catégorie d'impact *Changement climatique* est le CO_2 .

comparer entre elles. Par manque de temps, et compte tenu de la difficulté à généraliser l'association d'un type de végétation à un rafraîchissement de l'air quantifié, nous nous concentrons ici sur les impacts environnementaux causés par la construction d'un gridshell végétalisé de type Corolle qui servirait en tant que mobilier urbain. L'analyse de ces impacts peut offrir des pistes de réduction, dans une approche d'éco-conception. Le système étudié est similaire à la structure décrite à la section 4.2 que nous avons réalisée pour des besoins expérimentaux. Nous considérons les trente premières années de la vie de cette structure. L'unité fonctionnelle, décrivant la fonction principale du produit, pourrait donc être : « Ombrager une surface au sol de 45 m² pendant 30 ans ». Les limites de l'étude sont, à l'heure actuelle, l'absence de prise en compte de la fin de vie (de la structure et des végétaux) et le fait qu'elle n'est pas comparative. La comparaison avec d'autres systèmes est une piste de travail futur.

6.2.2 Inventaire du cycle de vie

La structure végétalisée est modélisée avec le logiciel *OpenLCA v.1.11.0*. La base de données *ecoinvent 3.7.2* est utilisée pour l'inventaire du cycle de vie (ICV). Les procédés pris en compte dans le modèle sont représentés sur la figure 6.4.

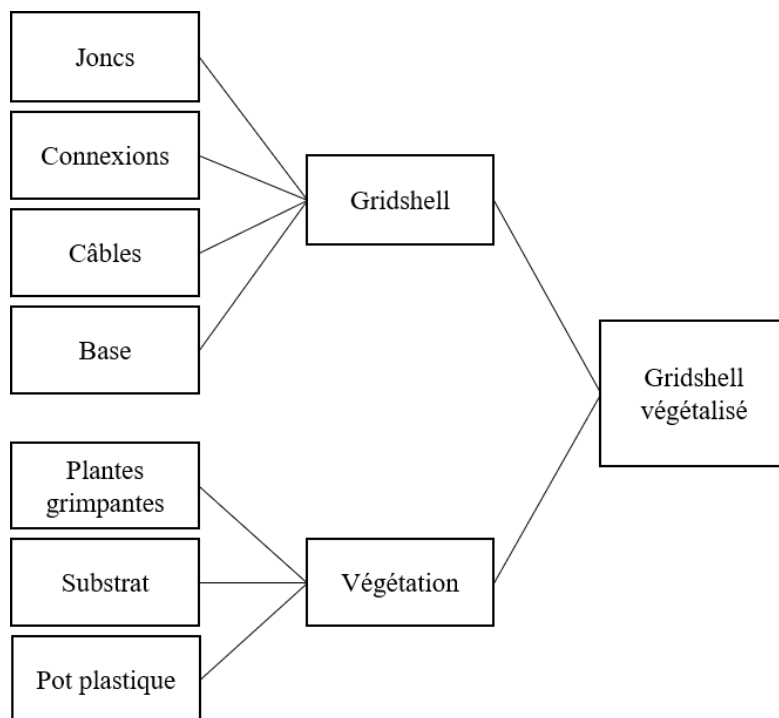


FIGURE 6.4 – Schéma des procédés pris en compte dans l'analyse de cycle de vie du gridshell végétalisé.

Trois étapes sont considérées :

1. la production des matériaux ;
2. puis leur transport du site de production jusqu'au chantier ;
3. et enfin la vie en œuvre de la structure durant 30 ans.

On considère que la mise en œuvre de la structure (il s'agit de la mise en forme du gridshell au moyen de cordes, voir figure 4.47) n'a causé aucun impact. La fin de vie n'est pas prise en compte dans ce modèle. Les trois étapes sont détaillées dans les paragraphes qui suivent pour chacun des composants.

Joncs

1) L'inventaire de cycle de vie pour la production d'éléments composites similaires en résine de polyester renforcé de fibres de verre a déjà été réalisé par Herfray et Feraille (2013). Il considère :

- la consommation d'énergie ;
- la consommation de matière ;
- les types d'emballage et de transport ;
- les déchets liés à la production (tels que les déchets de matières premières) ;
- le traitement des déchets liés à la production.

Il ne tient pas compte de la fin de vie du produit final.

2) On considère que les joncs sont acheminés par camion au moyen du procédé « *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4* » depuis l'usine de production située près de Tours (distance à l'ENPC : 250 km). Ce procédé prend en compte la fabrication, la vie en œuvre et la fin de vie du camion et de la route qui lui permet de rouler, ainsi que le carburant consommé. L'amortissement du véhicule et de l'infrastructure routière, ainsi que les émissions et consommations associées, sont issus de modèles de transport de fret en Europe utilisés par la base de données *ecoinvent*.

3) On considère que deux joncs devront être remplacés en trente ans. La production de 8 kg de joncs et le transport associé par camion sont ainsi pris en compte dans cette étape.

Connexions

1) Les connexions du gridshell sont réalisées en polyamide renforcé de fibres de verre et pèsent 90 grammes chacune. Le processus « *injection moulding* » est utilisé. Le moule qui sert à fabriquer ces connexions est modélisé comme un élément en acier faiblement allié de 100 kg avec un travail des métaux moyenné « *metal working, average for steel product manufacturing* » et 800 km de transport par avion depuis la Chine. Selon le fabricant, un million de connexions peuvent être fabriquées avec ce moule. Ce chiffre est utilisé pour calculer l'amortissement du moule.

2) On considère que les joncs sont acheminés par camion au moyen du procédé « *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4* » depuis l'usine de production située près de Grenoble (distance à l'ENPC : 600 km).

3) On considère le renouvellement de 20 connexions sur les trente années.

Câbles et base en acier

1) Les câbles de contreventement (câbles en acier de 3 mm de diamètre avec serre-câbles) et l'ossature métallique de 100 kg sont modélisés comme des éléments en acier faiblement allié avec un travail du métal moyenné. On prend comme hypothèse, pour ces deux éléments, que l'acier est produit par la filière électrique.

2) On considère que les éléments en acier sont acheminés par camion au moyen du procédé

« *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4* » depuis l'usine de production située près de Metz (distance à l'ENPC : 300 km).

3) Pas de renouvellement de composants.

Gridshell. La fabrication du gridshell nécessite la production de 96 kilogrammes de tiges de GFRP, 112 connexions, 35 mètres de câbles et une ossature métallique en acier à la base.

Plantes grimpantes

1) La production d'une plante grimpante est adaptée du procédé « *tree seedling production, in unheated greenhouse / tree seedling, for planting* ». On a ajouté l'eau d'irrigation correspondant à la production de 100 g de kiwi (procédé « *kiwi production* ») pour tenir compte du fait que les plantes grimpantes achetées n'étaient pas des graines mais déjà des petits plants.

2) On considère que les plantes grimpantes sont acheminés par camion au moyen du procédé « *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4* » depuis une pépinière située près d'Orléans (distance à l'ENPC : 150 km).

3) Dans une première approche, avant d'avoir eu des résultats expérimentaux nous renseignant sur le besoin en eau de la végétation, la consommation d'eau (c'est-à-dire l'irrigation) a été estimée à 200 litres par plante et par an². Nous avons également cherché à estimer le stockage de dioxyde de carbone par la plante durant sa croissance. D'après Gosse *et al.* (1986), la productivité potentielle par plante est estimée à 4 kg de matière sèche par an. En supposant une teneur en carbone de 50%, chaque plante stocke 2 kg de carbone par an, ce qui correspond à 7.3 kg de dioxyde de carbone utilisé pour la photosynthèse. Ainsi, la vie en œuvre de la plante est modélisée dans *OpenLCA* par un procédé qui utilise 200 L d'eau comme intrant par an et stocke 7.3 kg de dioxyde de carbone par an.

Substrat

1) Le substrat est modélisé par 210 L de mousse de tourbière « *peat moss* » et l'utilisation de 1 kg de copeaux de saule « *wood chips and particles, willow* » en surface pour le paillage. Les sacs en plastique entourant ces produits sont modélisés par le procédé « *packaging film, low density polyethylene* ».

2) On considère que le substrat vient également par camion depuis la pépinière située près d'Orléans (distance à l'ENPC : 150 km).

3) On considère un renouvellement complet de tout le substrat en 30 ans.

Pot plastique

1) Le pot en plastique de 2 kg est modélisé au moyen des procédés « *polyethylene, low density, granulate* » et « *injection moulding* ».

On ne prend en compte ni son transport ni son renouvellement.

2. L'irrigation nécessaire a en réalité été de 180 L pour le pot entier durant la première année, comme indiqué dans la section 5.2.2.

Végétation. La végétation comprend la fabrication du pot en plastique, du substrat et de trois plantes.

La durée de vie des plantes est estimée à 30 ans mais la durée de vie de la structure devrait être plus longue sur la base d'études de durabilité réalisées sur des tiges de GFRP (Kotelnikova-Weiler *et al.*, 2013). Par ailleurs, le traitement ou la réutilisation des éléments structuraux sort du cadre de cette étude.

6.2.3 Évaluation des impacts

Nous envisageons le gridshell comme un produit de construction et évaluons donc ses impacts d'après la norme française, utilisée par exemple pour réaliser l'ACV de bâtiments ou d'infrastructures sur le territoire français. La méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie s'appuie ainsi sur la norme NF EN 15804 + A1 (AFNOR, 2014). Les sept catégories d'impact proposées par la norme NF EN 15804 sont considérées :

- Acidification des sols et de l'eau (AP, kg éq. SO₂) ;
- Appauvrissement de la couche d'ozone (ODP, kg éq. CFC 11) ;
- Eutrophisation (EP, kg éq. (PO₄)³⁻) ;
- Formation d'ozone photochimique (POCP, kg éq. éthène) ;
- Réchauffement climatique (GWP, kg éq. CO₂) ;
- Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (ADP – combustibles fossiles, MJ) ;
- Épuisement des ressources abiotiques – éléments (ADP – éléments, kg éq. Sb).

Les impacts potentiels dus au gridshell seul et à la végétation après 30 ans sont donnés dans la table 6.1. Les impacts correspondant aux étapes de production, de transport et de vie en œuvre ont été sommés. Dans cette table, le stockage de dioxyde de carbone par la végétation (-660 kg de CO₂ en 30 ans) n'est pas pris en compte.

Catégorie d'impact	Gridshell	Végétation
Acidification des sols et de l'eau (kg éq. SO ₂)	3, 1	2, 0.10 ⁻¹
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg éq. CFC 11)	7, 3.10 ⁻⁵	8, 4.10 ⁻⁶
Eutrophisation (kg éq. (PO ₄) ³⁻)	5, 0.10 ⁻¹	3, 4.10 ⁻²
Formation d'ozone photochimique (kg éq. éthène)	1, 7.10 ⁻¹	9, 4.10 ⁻³
Réchauffement climatique (kg éq. CO ₂)	7, 9.10 ²	1, 1.10 ²
Épuisement des ressources abiotiques (fossiles) (MJ)	1, 3.10 ⁴	9, 3.10 ²
Épuisement des ressources abiotiques (éléments) (kg éq. Sb)	4, 2.10 ⁻⁸	1, 7.10 ⁻⁹

TABLE 6.1 – Impacts du gridshell et de la végétation pour une durée de vie de 30 ans.

6.2.4 Interprétation des résultats

Les contributions respectives du gridshell et de la végétation sont représentées sur la figure 6.5. Les scores d'impacts considérés sont ceux de la table 6.1. On voit sur la figure que, quelle que soit la catégorie d'impact considérée, le gridshell seul est responsable de plus de 90% de l'impact. Comparée à la construction de la structure, l'installation de la

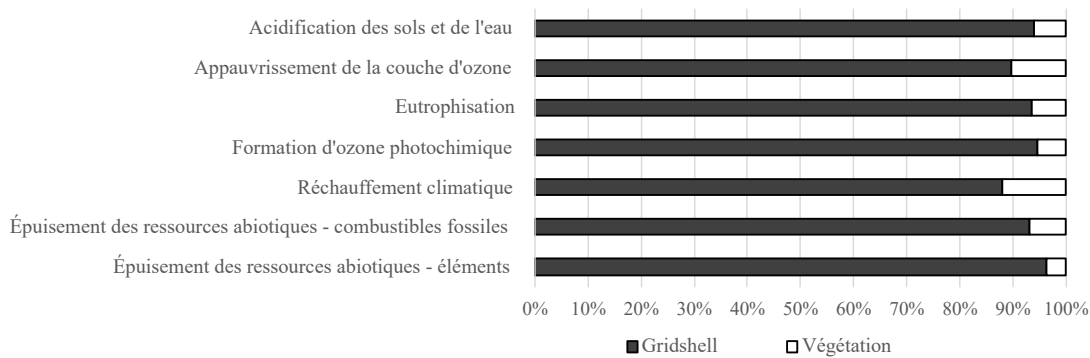


FIGURE 6.5 – Contribution du gridshell et de la végétation aux impacts du système.

végétation semble donc à l'origine d'impacts environnementaux limités.

Afin de savoir quelle étape du cycle de vie du gridshell est la plus impactante, la figure 6.6 dissocie les impacts du gridshell dus aux étapes de production, de transport et de vie en œuvre. La production des matériaux est responsable d'environ 90% des impacts. La part associée au transport des matériaux est faible, bien qu'ils aient été acheminés jusqu'à Champs-sur-Marne depuis Tours, Grenoble et Metz. La vie en œuvre correspond à un renouvellement de composants (c'est-à-dire une fraction des deux étapes précédentes), donc les impacts de cette étape sont dus principalement aux procédés utilisés lors de l'étape de production.

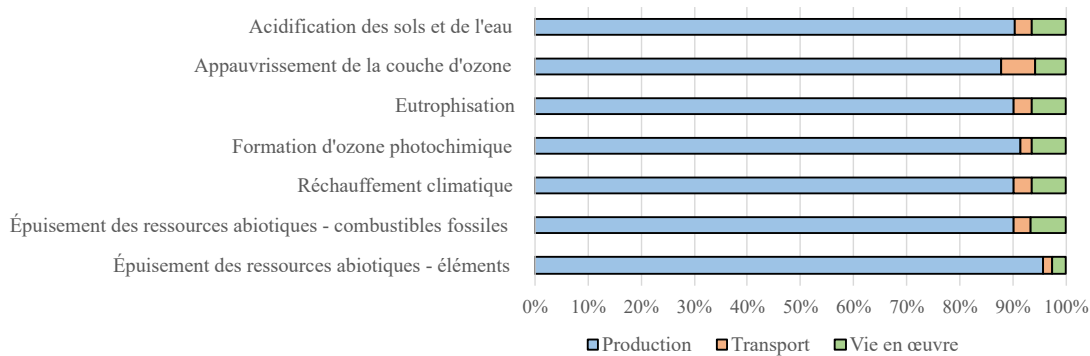


FIGURE 6.6 – Contribution des différentes étapes aux impacts totaux du gridshell.

Dans une logique d'éco-conception, c'est sur cette étape de production du gridshell qu'il faudrait jouer en priorité afin de réduire les impacts environnementaux du produit. Afin de mieux comprendre de quels composants proviennent les impacts, la figure 6.7 montre la contribution des joncs en composites, des connexions, de l'ossature en acier et des câbles aux impacts dus à l'étape de production du gridshell. Le graphique indique que la répartition entre les quatre procédés est similaire pour toutes les catégories d'impact. Les impacts dus à la production des joncs en GFRP représentent environ les deux tiers du total, ce qui suggère que les conceptions futures devraient viser à diminuer la quantité de ce matériau. Pour que le gridshell garde un comportement structurel global similaire, cela pourrait être réalisé avec une grille plus dense de joncs de plus petit diamètre (au

prix d'un plus grand nombre de connexions) ou avec des tubes en GFRP (c'est-à-dire en remplaçant les poutres de section pleine par des poutres de section creuse). Des polymères renforcés de fibres naturelles (NFRP) pourraient également être utilisés pour réduire la quantité de fibres de verre dans la structure. Cependant, cela peut entraîner des problèmes mécaniques à long terme (Kotelnikova-Weiler *et al.*, 2013) et il faut s'assurer que leur production industrielle ne nécessite pas de procédés plus polluants. Cet aspect reste à évaluer.

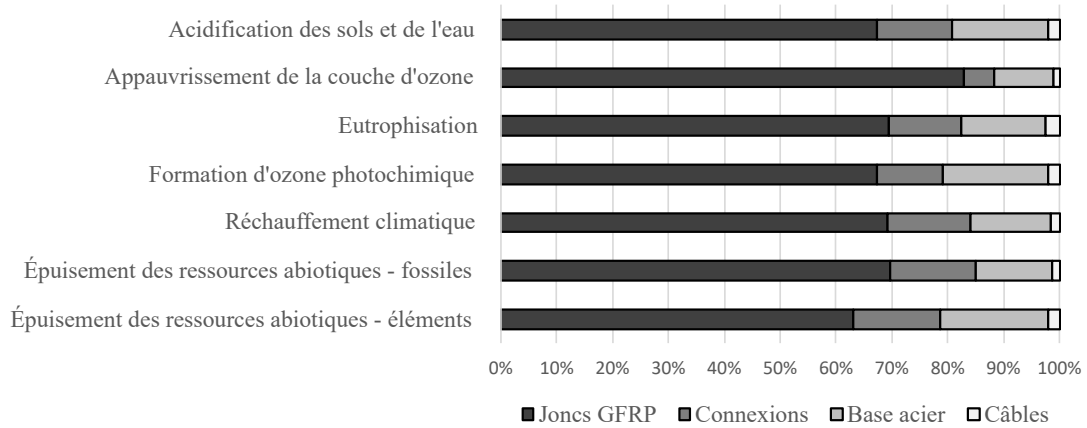


FIGURE 6.7 – Contribution relative de la production de chaque élément aux impacts environnementaux totaux de la production du gridshell.

Pour information, le détail des impacts, par étapes, causés par la végétation, est donné sur la figure 6.8. Cette fois, l'étape de transport contribue fortement aux impacts. Par ailleurs, les procédés relatifs au transport interviennent à nouveau dans l'étape de vie en œuvre lorsque le substrat est renouvelé et ré-acheminé depuis Orléans.

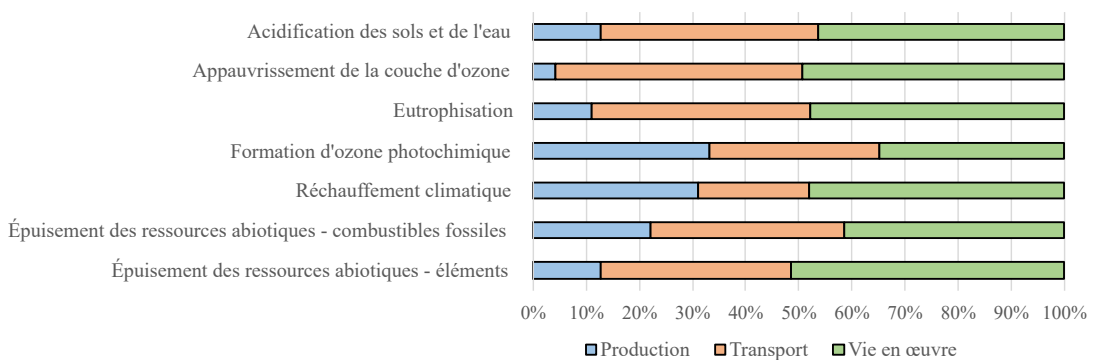


FIGURE 6.8 – Contribution des différentes étapes aux impacts totaux de la végétation.

Sur le graphique 6.8, l'impact total de la végétation (procédés liés au pot en plastique, aux plantes et au substrat) dans la catégorie « Réchauffement climatique » correspond à 110 kg équivalent CO₂ : l'atténuation du pouvoir de réchauffement global dû au stockage de 660 kg de CO₂ (quantité de dioxyde de carbone capté par les plantes lors de leur croissance) n'est pas comptabilisée ici. En effet, nous considérons que ce carbone

est stocké temporairement et sera restitué tôt ou tard³. De plus, ce stockage est relativement faible : au bout de 30 ans, il reste toujours inférieur aux 800 kg équivalent CO₂ (voir table 6.1) dus à la construction du gridshell végétalisé. Avec l'hypothèse de 22 kg de CO₂ stockés par les trois plantes grimpantes par an, il faudrait environ 37 ans de croissance pour que la végétation stocke la quantité de dioxyde de carbone nécessaire à son installation et à la fabrication de la structure qui lui sert de support – le bénéfice du stockage de carbone par la végétation apparaît donc dans ce cas après un laps de temps qui nous semble trop long, comparé à la durée de vie des plantes. À l'inverse, en se fixant un horizon temporel à partir duquel on souhaite que le bénéfice net, en termes de stockage, soit positif, on peut calculer un seuil en kg équivalent CO₂ à ne pas dépasser pour la fabrication de la structure : par exemple, pour que la structure végétalisée commence à stocker plus de CO₂ (par photosynthèse) qu'elle n'en a émis (par sa production, sa maintenance, etc.) à partir de 10 ans (ce qui correspond à un stock de 220 kg de CO₂), il faut concevoir une structure nécessitant moins de 110 kg équivalent CO₂ pour sa production, puisque la végétation (pot, substrat, plantes) est déjà à l'origine de 110 kg équivalent CO₂ (voir table 6.1). Pour donner un ordre de grandeur, d'après la base de données *ecoinvent 3.7*, 110 kg équivalent CO₂ seraient causés par la production de 75 kg d'acier, ce qui est peu pour construire une structure...

6.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode d'analyse du cycle de vie et l'avons appliquée au gridshell végétalisé envisagé comme mobilier urbain. Nous n'avons pas pu comparer différents types d'aménagements, de mobiliers urbains ou de techniques de rafraîchissement de l'air en ville sur la base d'un indice de rafraîchissement quantifié qui ferait partie de l'unité fonctionnelle du système étudié et avons pris le parti d'évaluer les impacts du gridshell végétalisé d'après la méthode de calcul recommandée par la norme française, en considérant ce genre de mobilier urbain comme un produit de construction. Dans une démarche d'éco-conception, nous avons cherché à identifier les étapes du cycle de vie du produit ainsi que ses sous-composants qui sont à l'origine de la majorité des impacts, afin de proposer des leviers de réduction de ces impacts dans le cas d'un développement futur de ce mobilier. Il apparaît que l'étape de production des matériaux est de loin la plus polluante, dans toutes les catégories d'impact prises en compte. La production des joncs en GFRP contribue environ aux deux tiers aux impacts de cette étape. Il pourrait donc être intéressant pour le bilan environnemental du produit de réduire la quantité de ce matériau dans la structure. Cela peut se faire en diminuant le diamètre des joncs, en modifiant la section (par l'utilisation de tubes) ou en changeant la nature des fibres du composite utilisé. Par ailleurs, en ce qui concerne la végétation, on remarque que les procédés liés au transport contribuent de manière importante aux impacts dans toutes les catégories, ce qui est principalement dû au fait que lors de la construction de ce prototype, nous n'avons pas cherché à optimiser la proximité des fournisseurs. Pour ce qui est de l'indicateur « pouvoir de réchauffement global » (caractérisant le réchauffement climatique), nous avons calculé un « retour sur investissement » d'environ 37 ans : c'est la durée de croissance des plantes qui serait nécessaire pour stocker le dioxyde de carbone émis par l'installation de la structure végétalisée.

3. Différents scénarios de fin de vie des végétaux peuvent être envisagés : ils peuvent être brûlés en déchèterie pour servir de combustible au chauffage du quartier, broyés pour servir de paillis, décomposés par compostage, etc. Ces scénarios ne sont pas modélisés ici.

Bibliographie

AFNOR : NF EN 15804+A1 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, avril 2014.

Laurent BROCHARD, Adélaïde FERAILLE et Myriam SAADÉ : L'analyse du cycle de vie, une méthode fonctionnelle, multicritère et comparative d'évaluation des impacts environnementaux. *Transitions : la finance verte*, 2021.

Ghislain GOSSE, Claude VARLET-GRANCHER, Raymond BONHOMME, Michel CHARTIER, Jean-Michel ALLIRAND et Gilles LEMAIRE : Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 (1) :47–56, 1986.

Grégory HERFRAY et Adélaïde FERAILLE : Inventaire de cycle de vie des matériaux composites. *Rapport de la chaire Bouygues Bâtir durable & innover*, 2013.

Olivier JOLLIET, Myriam SAADÉ-SBEIH, Pierre CRETTEZ, Nicole JOLLIET-GAVIN et Shanna SHAKED : *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR Presses polytechniques et universitaires romandes, 2017.

Natalia KOTELNIKOVA-WEILER, Cyril DOUTHE, E Lafuente HERNANDEZ, Olivier BAVEREL, Christoph GENGNAGEL et Jean-François CARON : Materials for actively-bent structures. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4) :229–240, 2013.

Eva RISCH, Philippe ROUX, Catherine BOUTIN et Alain HÉDUIT : L'analyse de cycles de vie des systèmes d'assainissement : un outil complémentaire d'aide à la décision. *Sciences Eau & Territoires*, (9) :p–82, 2012.

Conclusion générale

La surchauffe urbaine apparaît comme un sujet de plus en plus préoccupant, qui prend plus de place dans les politiques d'aménagement de la ville. Elle se manifeste, localement, par des températures très élevées en été dans certains quartiers. La première conséquence est une dégradation du confort thermique pour les habitants. Au-delà d'un certain seuil, l'enjeu n'est pas tant d'assurer le bien-être des citoyens que de préserver leur santé, lors de vagues de chaleur par exemple. Ces phénomènes risquent d'être amplifiés par le changement climatique, que l'on parle d'occurrence, d'intensité, de durée ou d'étendue spatiale. La deuxième conséquence est l'augmentation de l'usage de la climatisation à l'intérieur des bâtiments, ce qui conduit, entre autres, à une hausse de la consommation énergétique de ces derniers, à un recours plus important à des fluides frigorigènes et à une aggravation de la surchauffe urbaine par des rejets d'air chaud vers l'extérieur. En somme, cette deuxième conséquence accentue la surchauffe urbaine et contribue au réchauffement climatique par l'émission de gaz à effet de serre (en fonction des fuites et du traitement en fin de vie des fluides frigorigènes, ainsi que du mix énergétique employé pour faire fonctionner les climatiseurs).

Une stratégie d'atténuation de cette surchauffe consiste à remettre de la végétation en ville. Cette démarche peut prendre plusieurs formes ; on la retrouve sous les dénominations de renaturalisation du milieu urbain, verdissement de la ville, emploi de solutions fondées sur la nature, déploiement de trames vertes et bleues... C'est une option qui séduit par sa multifonctionnalité : la végétation permettrait d'atténuer la surchauffe urbaine dans une démarche de sobriété énergétique et matérielle, et, dans le même temps, rendrait d'autres services écosystémiques ou serait source d'aménités. On peut citer comme exemples de co-bénéfices la préservation de la biodiversité, la rétention des eaux pluviales, l'amélioration de la qualité de l'air ou encore la création d'espaces récréatifs. Ces différentes fonctions ne sont pas toutes correctement quantifiées, ou sont parfois difficilement quantifiables, ce qui nuit à une planification urbaine efficace, des orientations d'aménagement claires et une implantation de la végétation en ville pertinente.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes concentrés sur le rôle joué par la végétation en ville d'un point de vue thermique, dans l'optique de comprendre comment les végétaux pouvaient modérer la surchauffe urbaine.

Principaux résultats

Dans un premier chapitre, nous avons commencé par indiquer pourquoi, aux différents concepts d'*îlots de chaleur*, nous préférons la terminologie de *surchauffe urbaine* et la notion de *confort thermique extérieur*. Cette dernière permet d'intégrer, outre la tempé-

rature de l'air, d'autres variables (rayonnement, humidité de l'air, vitesse du vent) qui jouent sur le ressenti humain et les échanges thermiques que celui-ci entretient avec son environnement. De plus, ces paramètres peuvent être fortement modifiés par la présence de végétation, ce qui rend leur prise en compte intéressante dans notre cas. En effet, la végétation semble pouvoir limiter la surchauffe en agissant principalement sur les échanges radiatifs (par modification de la géométrie de la scène urbaine et modification des propriétés physiques des matériaux composant la ville) et la dissipation d'énergie sous forme latente (par évaporation de l'eau contenue dans les végétaux et le sol) plutôt que sous forme sensible. Nous avons brièvement discuté de la place accordée à la végétation par certaines théories urbanistiques avant de passer en revue les principales études expérimentales et les modèles utilisés pour décrire la contribution de différents types de végétations (arbres, parcs, toitures et façades végétalisées) à l'atténuation de la surchauffe urbaine. Nous avons tiré de ces travaux les conclusions suivantes :

- De nombreuses études (expérimentales et modélisations) se concentrent sur la manière dont la végétation permet de réduire les besoins en climatisation des bâtiments en été mais ne s'intéressent pas à l'effet de la végétation sur la température de l'air à l'extérieur du bâtiment.
- Les mesures expérimentales s'obtiennent principalement par comparaison de valeurs entre deux points (par exemple, la température de l'air relevée par deux thermomètres placés, respectivement, au-dessus d'une toiture végétalisée et d'une toiture classique). La réduction de la température de l'air pouvant être faible, et donc difficile à mesurer, les expérimentateurs ont souvent recours au bilan énergétique du système étudié afin d'analyser la modification des flux thermiques de ce bilan (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, rayonnement, conduction).
- Les modélisations en tuiles et canyons urbains, s'ils permettent d'intégrer ces flux, trouvent leur limite à l'échelle du microclimat par une paramétrisation trop globale des surfaces, et une échelle spatiale trop grande par rapport à celle que nous envisageons.
- Plusieurs études montrent que la présence de végétation permet dans la plupart des cas de réduire localement la température de l'air mais cette réduction semble faible. Ceci nous incite à penser que la végétation est plus à même d'améliorer le confort thermique par réduction du rayonnement incident sur un être humain (réduction du rayonnement direct par ombrage et réduction du rayonnement émis par des parois à la température plus basse) que par réduction de la température de l'air.
- Des études CFD permettent d'obtenir des champs de température aux échelles microclimatiques qui nous intéressent ici mais sont pour l'instant rarement validées et très peu le sont en conditions réelles.

Nous avons cherché dans un second chapitre à étudier, théoriquement, les mécanismes physiques responsables d'un potentiel rafraîchissement par la végétation. Nous avons d'abord présenté une forme classique du bilan énergétique de surface couramment employé en météorologie urbaine, souvent à l'échelle de la ville ou du quartier, puis détaillé les différents modes de transfert thermique apparaissant dans ce bilan. L'adimensionnement de l'équation de la chaleur a permis de faire émerger le nombre de Biot. Celui-ci permet de poser un critère ($Bi < 0.1$) pour identifier un système mince, qu'il est pertinent de considérer de température homogène et donc comme une « surface » lorsque

l'on réalise son bilan énergétique. Le nombre de Biot fait le rapport entre les échanges thermiques se produisant à l'intérieur du système (par conduction) et ceux ayant lieu à l'extérieur du système (par convection et rayonnement). Ainsi, il intervient lors de la résolution du problème thermique de conduction dans le sol lorsqu'une condition aux limites mixte, dite condition de Robin, est utilisée pour définir le forçage convectif et radiatif en surface, où la température de l'air et le flux de rayonnement absorbé sont imposés. Ce terme de rayonnement absorbé est introduit car il nous semble plus pratique à manipuler dans l'équation du bilan énergétique. En effet, contrairement au rayonnement net, il peut être considéré comme un terme de forçage indépendant de la température de surface du système. En s'appuyant sur ces concepts, nous avons tenté de formaliser l'effet de deux phénomènes physiques qui ressortaient de la littérature – celui de l'ombrage du sol par la végétation et l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles – sur la réduction du flux de chaleur sensible transférée à l'air. Des modèles simples ont été proposés pour quantifier cette réduction. A partir de ces résultats, nous avons pu préciser la notion de rafraîchissement en distinguant les conditions dans lesquelles il est absolu (il s'agit d'une réduction de la température de l'air) de celles où il est relatif (il s'agit alors d'un réchauffement moindre de l'air, comparé à une autre situation urbaine). Cette distinction permet d'insister sur le fait que bien souvent, le mot *rafraîchissement*, appliqué à un arbre par exemple, ne fait pas référence à une propriété caractéristique, ou intrinsèque, ou inhérente à l'arbre, et qu'il se définit par rapport à une situation urbaine donnée. Il en découle que le « rafraîchissement » d'un arbre mesuré en un endroit d'une ville n'est pas directement transposable en un autre endroit d'une autre ville. Nous avons également évoqué le fait que ce terme puisse être employé pour parler non pas de température de l'air mais plutôt de confort thermique. Enfin, nous avons examiné le cas d'un arbre sur une place pour évaluer la contribution de l'ombrage et de l'évaporation à un rafraîchissement potentiel. Nous avons alors proposé un modèle analytique décomposant l'impact de l'arbre sur la température de l'air en trois contributions : le flux de chaleur sensible de l'arbre non-évaporant intrinsèque à sa géométrie (déductible du rayonnement absorbé par sa géométrie), la réduction du flux de chaleur sensible des feuilles due à leur transpiration, et la réduction du flux de chaleur sensible du sol due à son ombrage par la végétation. Le poids relatif de ces trois termes permet de déterminer si, pour des conditions environnementales données, l'arbre est en train de réchauffer l'air, de le refroidir de manière relative ou de le refroidir de manière absolue.

Par la suite, nous avons voulu quantifier ces trois contributions. Pour modéliser de façon satisfaisante la première, nous avons cherché un outil numérique adapté. Une revue des outils existants et de leurs caractéristiques nous a conduit, dans un troisième chapitre, à utiliser l'interface HELIOS afin de simuler les échanges radiatifs au sein d'une végétation dont la géométrie en 3D serait représentée explicitement. Un premier cas d'étude, que nous avons qualifié d'élémentaire, composé d'un sol et d'une unique feuille de 1 m^2 , a été l'occasion de prendre en main ce code et de comparer les résultats de la simulation à ceux obtenus par un modèle analytique simplifié (ce qu'on pourrait appeler un modèle de parasol). Pour la feuille par exemple, l'écart en température minimal entre la simulation et le modèle analytique vaut un peu plus d'1 K, ce qui correspond à un écart de la densité de flux de chaleur sensible de 14 W/m^2 – ce qui peut conduire à un écart très important pour une surface foliaire de plusieurs centaines de mètres carrés, typique d'un arbre. Par exemple, pour un arbre ayant une surface foliaire $S_{veg} = 500\text{ m}^2$, l'erreur du flux de chaleur sensible serait égale à 7 kW, ce qui n'est pas négligeable, au vu des résultats des

simulations ultérieures. En considérant que les résultats de la simulation sont corrects, l'erreur est due aux simplifications des échanges radiatifs que nous avons effectuées dans notre modèle. Nous avons ainsi pu voir que les résultats étaient très sensibles à l'inclinaison de notre feuille-parasol. Un deuxième cas d'étude a consisté à analyser le bilan énergétique d'un ensemble de feuilles superposées. Il a permis de montrer que la densité de flux de chaleur sensible émis par une feuille peut varier fortement selon sa position dans le feuillage et qu'assigner une valeur globale au flux de chaleur sensible émis par le feuillage dans notre modèle analytique peut sembler illusoire ou arbitraire car ce flux dépend de la géométrie de la végétation étudiée (à commencer par le nombre de feuilles qui la composent). Ceci motive notre intérêt pour cet outil numérique qui représente la géométrie 3D de l'arbre jusqu'à l'échelle de la feuille. Au passage, nous avons vu que trois feuilles superposées suffisaient à empêcher la quasi-totalité du rayonnement solaire direct d'atteindre le sol. Un troisième cas d'étude a permis d'étudier l'effet d'un arbre (un noyer) au centre d'une place sur la température de l'air, en utilisant la décomposition des flux décrite au chapitre précédent, afin de dissocier le rayonnement absorbé par la géométrie de l'arbre, de la transpiration des feuilles et de l'ombre faite au sol. Dans l'exemple traité, le noyer, d'une surface foliaire d'environ 600 m², rafraîchit l'air comme un climatiseur d'une puissance de 14 kW à condition d'évaporer 45 litres d'eau par heure. Le rafraîchissement (relatif) devient nul en l'absence d'eau, c'est-à-dire que le flux de chaleur sensible évité grâce à l'ombre au sol est égal au flux de chaleur sensible émis par l'arbre (dont les feuilles ont alors une température moyenne supérieure à celle de l'air). Si la valeur du rayonnement solaire incident est augmentée, le rafraîchissement (relatif) total causé par l'arbre diminue.

Dans les simulations réalisées, la valeur du paramètre *résistance stomatale*, pilotant la transpiration des feuilles et le flux de chaleur latente, a été fixée de manière assez arbitraire. Afin d'avoir plus de recul sur la magnitude du flux de chaleur latente, nous avons souhaité effectuer des mesures expérimentales de l'évapotranspiration de végétaux, *in situ* et sur une longue durée. Nous avons privilégié une méthode par pesée qui nous semblait plus fiable mais nécessitait un dispositif de faible masse totale afin de pouvoir déceler de faibles variations de masse d'eau. Nous nous sommes orientés, pour réaliser un dispositif expérimental original léger et couvrant, vers un gridshell élastique en matériaux composites servant de support à des plantes grimpantes. Le quatrième chapitre commence donc, dans une première partie, par retracer un historique des gridshells en décrivant particulièrement deux ouvrages emblématiques : l'aciérie de Vyksa, réalisée par Vladimir Choukhov à la fin du XIX^{ème} siècle, et la *Multihalle* de Mannheim, conçue 75 ans plus tard par Frei Otto. Il se focalise ensuite sur les gridshells élastiques en matériaux composites. Dans une deuxième partie, nous décrivons la conception du gridshell envisagé, qui a nécessité plusieurs études : recherche de forme et géométrie du gridshell élastique (au moyen d'un outil de génération d'un maillage isoradial et d'un algorithme de relaxation dynamique développés au sein de l'équipe MSA du laboratoire Navier), comportement du gridshell sous charges, calcul des efforts dans les connexions, détermination expérimentale de la résistance en flexion de joncs composites percés, conception de connexions appropriées permettant aux joncs de ne pas être sollicités en torsion. Enfin, nous détaillons les prototypes successifs que nous avons construits et les problèmes rencontrés pour chacun d'entre eux, avant d'aboutir au prototype final de Corolle, abritant une réserve d'eau, un pot contenant le substrat et des plantes grimpantes, monté sur des capteurs de charge. Cette typologie a fait l'objet d'un brevet déposé par l'ENPC

(Baverel *et al.* (2018), n° 1853484), dont nous sommes co-auteur.e.s. Ce chapitre établit la pertinence du gridshell pour couvrir de grandes surfaces adaptées à maximiser l'ombrage d'un tel dispositif, pour une masse de matière structurale réduite. La description détaillée du processus de conception et de réalisation de la Corolle, si elle tend à rendre le dispositif répliquable, aura surtout permis de démontrer le caractère critique des connexions pour la bonne mise en œuvre de ces structures. Ce type de structures végétalisées est actuellement en cours de valorisation et continue d'être développé par la start-up *Urban Canopee*, qui a déjà déployé dans plusieurs pays plus d'une centaine de gridshells de type Corolle en tant que mobilier urbain végétalisé⁴.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons cette fois l'ensemble du dispositif de mesure en continu, longue durée et *in situ* du taux de transpiration des feuilles de plantes grimpanes. Ce taux de transpiration est agrégé sur l'ensemble de la végétation, à l'échelle spatiale d'un objet de type « mobilier urbain ». Comparé à des méthodes plus courantes, qui mesurent l'évaporation à l'échelle de la feuille ou de la parcelle, ce dispositif opère donc à une échelle intermédiaire. Il fonctionne par pesée, ce qui le rend peu coûteux tout en permettant une mesure directe, fiable et avec une très bonne résolution (environ 40 grammes), ce qui donne accès au taux d'évaporation pour des durées inférieures à l'heure. La connaissance de ce taux d'évaporation permet de remonter au flux de chaleur latente (agrégé sur l'ensemble de la végétation) et donc de quantifier expérimentalement la réduction, due à l'évaporation, du flux de chaleur sensible émis vers l'air par le feuillage. Dans le cas de cette expérience, la réduction mesurée est jugée faible : l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles paraît donc avoir peu d'impact sur la température de l'air. Des mesures ponctuelles, avec une pince à photosynthèse, ont aidé à évaluer la variabilité du taux d'évaporation surfacique au sein du feuillage du faux jasmin et laissent penser que la transpiration des feuilles et le rayonnement incident sont moins corrélés que ce que notre intuition nous indiquait. Associées aux mesures de pesée, elles nous ont permis d'estimer une valeur moyenne de la densité de flux de chaleur latente des feuilles en été à la mi-journée ($\phi_E = 20 \text{ W/m}^2$) et d'obtenir un ordre de grandeur de la surface foliaire des plantes grimpanes sur le prototype ($S_{veg} \approx 30 \text{ m}^2$). De plus, nous avons étudié les composantes du bilan radiatif du sol à l'aide de deux radiomètres. Ceux-ci nous ont permis de vérifier qu'un feuillage même peu fourni parvenait à bloquer la quasi-totalité du rayonnement solaire direct, c'est-à-dire être très efficace pour ses qualités d'ombrage, ce que nous avons observé dans les simulations du chapitre 3. Les mesures des capteurs tournés vers le sol indiquent également que le rayonnement ascendant n'est pas négligeable lorsque l'on fait le bilan énergétique d'un objet en milieu urbain. Enfin, notre méthode peut être suivie pour obtenir des données spécifiques (comme l'albédo du sol ou le rayonnement solaire descendant) permettant d'alimenter des simulations et d'utiliser des valeurs représentatives pour les paramètres du modèle de réduction du flux de chaleur sensible dû à l'ombrage du sol que nous avons exposé au chapitre 2.

Enfin, nous interrogeons la notion de « stratégie sans regrets », parfois employée pour qualifier le recours à la végétation en ville dans des politiques d'aménagement urbain, qui sous-entend que la végétation pourrait résoudre un problème spécifique sans en créer d'autres. Elle serait ainsi une solution d'atténuation de la surchauffe urbaine avec des co-bénéfices en ce qui concerne d'autres services écosystémiques. Or, l'installation et l'entretien de la végétation en ville nécessitent des procédés industriels qui sont à l'origine

4. <https://urbancanopee.com/realisations/>

d'impacts sur l'environnement. Ainsi, dans le sixième chapitre, une analyse de cycle de vie de la Corolle végétalisée est effectuée afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels causés par la réalisation de cet exemple de mobilier urbain. Nous n'avons pas pu comparer différents types d'aménagements, de mobiliers urbains ou de techniques de rafraîchissement de l'air en ville sur la base d'un indice de rafraîchissement quantifié qui ferait partie de l'unité fonctionnelle du système étudié et avons pris le parti d'évaluer les impacts du gridshell végétalisé d'après la méthode de calcul recommandée par la norme française, en considérant la Corolle comme un produit de construction. Dans une démarche d'éco-conception, nous avons cherché à identifier les étapes du cycle de vie du produit ainsi que les composants qui sont à l'origine de la majorité des impacts, afin de proposer des leviers de réduction de ces impacts. Il apparaît que l'étape de production des matériaux est de loin la plus polluante, pour toutes les catégories d'impact traitées. La production des joncs en GFRP contribue environ aux deux tiers aux impacts de cette étape. Il pourrait donc être intéressant de réduire la quantité de ce matériau dans la structure en diminuant le diamètre des joncs, en modifiant la section (par l'utilisation de tubes) ou en changeant la nature des fibres du composite utilisé. Par ailleurs, en ce qui concerne la végétation, on remarque que les procédés liés au transport contribuent de manière importante aux impacts dans toutes les catégories, ce qui est principalement dû au fait que lors de la construction de ce prototype, nous n'avons pas cherché à optimiser la proximité des fournisseurs. Pour ce qui est de l'indicateur « pouvoir de réchauffement global » (caractérisant le réchauffement climatique), nous avons calculé un « retour sur investissement » d'environ 37 ans : c'est la durée de croissance des plantes nécessaire pour stocker le dioxyde de carbone émis par l'installation de la structure végétalisée. Ceci souligne le fait que pour que l'utilisation de végétation en ville soit qualifiée de « stratégie sans regrets », dans le sens où elle permettrait de résoudre un problème sans en aggraver d'autres, ou sans être à l'origine de pollutions, il faut veiller à utiliser peu de procédés impactants pour son implantation, que ce soit lors de l'étape de production (production de larges pots de fleurs ou de bacs en acier ou en béton, d'une structure support en matériaux composites dans notre cas), lors du transport (distances de transport des plantes et du substrat importantes), de la mise en œuvre (ce qui n'est pas le cas ici mais on peut penser à des engins de chantier pour retirer le bitume du trottoir et creuser un emplacement pour un arbre), de la vie en œuvre (irrigation, amélioration de la fertilité du sol par des engrais) et de la fin de vie (nécessitant à nouveau du transport, une usine dans le cas d'une valorisation énergétique, etc.).

Perspectives

Ce travail s'est principalement intéressé à l'effet de la végétation sur la température de l'air *via* les flux de chaleur sensible transférés à l'air par le sol et la végétation. Une première perspective serait d'étendre cette étude au confort thermique, pour lequel la température de l'air n'est qu'une variable parmi d'autres. L'indice UTCI par exemple (voir annexe A), qui se fonde sur le bilan énergétique d'une personne, semble être un bon candidat pour étudier l'effet de la présence de végétation sur le confort thermique extérieur en ville. En particulier, l'effet de la végétation sur la température moyenne radiante mérite d'être regardé plus en détail.

Concernant l'étude théorique du chapitre 2, un modèle de transpiration de la feuille prenant en variables d'entrée des paramètres environnementaux pourrait être utilisé. Le

modèle 1D de conduction dans le sol pourrait également être amélioré. De plus, nous avons considéré pour le sol des surfaces étant soit à l'ombre, soit au soleil, recevant un flux par rayonnement homogène, alors qu'en réalité, leur exposition peut varier à des fréquences beaucoup plus importantes que celle traitée dans l'exemple. Il pourrait être intéressant d'étudier la manière avec laquelle une végétation arborée modifie (augmente) la fréquence du forçage radiatif sur une surface, diminuant la profondeur de pénétration du signal thermique dans le sol et donc sa capacité de stockage pendant plusieurs jours de forte chaleur. Par ailleurs, nous ne sommes pas parvenus à établir de modèle simple pour le rayonnement absorbé par une végétation (d'où notre recours par la suite à des simulations numériques) ; ce travail reste ouvert.

En ce qui concerne les simulations, nous identifions plusieurs limites aux études que nous avons réalisées avec HELIOS et indiquons des pistes de travail ultérieur :

1) Nos simulations donnent comme résultats des puissances thermiques, évaluées à un instant t . Il serait intéressant d'effectuer des simulations qui représenteraient une journée entière, par exemple, où les paramètres d'entrée seraient des séries temporelles donnant des conditions de rayonnement, de température de l'air, de résistance stomatale, etc. réalistes, afin d'analyser l'effet thermique de l'arbre au cours du temps. Cela permettrait en outre d'étudier le taux d'évaporation de l'arbre au cours de la journée, qui est une donnée peu facile à obtenir expérimentalement, comme nous l'avons vu dans le reste du manuscrit. Baisser numériquement ce taux d'évaporation (ou réaliser un couplage avec un modèle hydrique du sol) permettrait ensuite d'étudier le potentiel de rafraîchissement de l'arbre en cas de vague de chaleur, lorsque l'eau du sol vient à manquer.

2) Toujours dans l'optique de réaliser des simulations journalières, le transfert par conduction dans le sol pourrait être ajouté au modèle numérique, afin d'affiner le terme de réduction de flux de chaleur sensible par ombrage au sol et d'étudier le relargage pendant la nuit de la chaleur stockée pendant le jour.

3) Nos simulations concernent le flux de chaleur sensible émis par les surfaces, donc l'énergie thermique transférée à l'air. D'après ces simulations, cet effet ne semble pas très important : dans les conditions environnementales étudiées, un arbre ne semble pas rafraîchir ou réchauffer beaucoup l'air. En revanche, il est très efficace pour faire de l'ombre, localement : son effet sur le confort thermique extérieur pourrait donc être étudié au moyen de cet outil, en plaçant dans le domaine de petites sphères noires qui représenteraient des thermomètres à globe noir, et dont on pourrait effectuer le bilan énergétique. HELIOS ne permet pas d'obtenir le champ de température de l'air autour de l'arbre mais pourrait ainsi être utilisé pour afficher des valeurs ponctuelles de confort thermique autour de l'arbre, en se servant par exemple de l'indice UTCI.

4) Des cas d'études réels pourraient être simulés (la Corolle, des parcs urbains avec pelouse et végétation arborée, des arbres d'alignement avec les bâtiments autour afin de modéliser le forçage radiatif de la manière la plus réaliste possible), que ce soit pour des études paramétriques sur le confort thermique ou sur le fonctionnement du végétal.

Pour les gridshells, un prolongement possible du travail pourrait consister à explorer l'utilisation d'autres sections, le choix de l'élément structurel de ce prototype étant prin-

cipalement lié aux contingences logistiques au moment de cette thèse. On pourrait ainsi envisager l'emploi de tubes, creux, plutôt que des joncs, afin de gagner en légèreté et surtout de réaliser une importante économie de matière. L'utilisation de matériaux biosourcés, comme le bambou, pourrait également être intéressante. Enfin, les connexions développées permettent, en utilisant le même diamètre de joncs, de réaliser des gridshells de manière fiable et rapide, ce qui ouvre la voie à la construction de variantes et à de nouvelles possibilités formelles.

Pour ce qui est des mesures expérimentales, la connaissance de la variabilité des températures des feuilles au sein du feuillage serait intéressante. Ces températures pourraient par exemple être mesurées par des caméras thermiques. Un système de mesures distribuées de la température de l'air, du rayonnement (ou des valeurs agrégées de ces deux grandeurs par des thermomètres à globe noir, par exemple) et de la vitesse du vent au sein du feuillage d'arbres serait également à développer si le coût des différents instruments n'était pas un obstacle.

Un autre problème à traiter est celui de la géométrie réelle du feuillage. Récupérer cette géométrie permettrait de faire le lien plus facilement entre les simulations et les résultats expérimentaux. Cela permettrait en outre de faire le lien entre des valeurs globales, intégrées sur la surface totale (le taux d'évaporation de la Corolle, par exemple, mesuré par les capteurs de charge) et des valeurs surfaciques (dans le cas évoqué, le taux d'évaporation surfacique, mesuré ponctuellement à la pince à photosynthèse), le rapport entre ces grandeurs étant la surface foliaire totale, dont la mesure reste une vraie gageure.

Enfin, concernant l'analyse de cycle de vie, l'ACV de la Corolle végétalisée avait été réalisée dans l'idée de mettre en perspective les bénéfices de la végétation en matière de réduction de la température de l'air avec les coûts environnementaux liés à son implantation et à son entretien. La thèse a montré que ce rafraîchissement est difficile à évaluer, qu'il est contingent aux conditions environnementales (rayonnement, température de l'air, vent) et à la situation urbaine (par exemple, le gain en matière de flux de chaleur sensible du sol est plus important si l'on ombrage un sol absorbant beaucoup de rayonnement qu'un sol qui en absorbe peu), et qu'il semble relativement faible. Cela n'en fait donc pas un bon candidat pour l'unité fonctionnelle d'une ACV, qui doit être quantifiée. En revanche, un indicateur de confort thermique tel l'UTCI semble plus prometteur. Les impacts environnementaux de différentes stratégies d'atténuation de la surchauffe urbaine (végétation arborée, humidification de la chaussée, peintures réfléchissantes...) pourraient ainsi être comparées à l'aune de cet indicateur, sur la base, par exemple, d'un seuil de confort thermique atteint sur un périmètre donné.

Annexe A

Confort thermique extérieur

Cette annexe présente les graphes réalisés par Christian Kongsgaard qui décrivent l'évolution de l'*Universal Thermal Climate Index* (UTCI), un indice de confort thermique extérieur, lorsque l'on fait varier les quatre paramètres suivants :

- la température de l'air ;
- la température moyenne radiante ;
- l'humidité relative de l'air ;
- la vitesse du vent.

Les graphes représentent des variations de l'UTCI par rapport à une situation de référence. Cette situation de référence fixe les valeurs initiales des paramètres physiques cités ci-dessus de la manière suivante :

- la température moyenne radiante est prise égale à la température de l'air ;
- l'humidité relative de l'air est prise à 50% avec une pression de vapeur d'eau ne pouvant toutefois dépasser 20 hPa ;
- la vitesse du vent est fixée à 0.5 m s^{-1} à 10 m du sol.

Puisque c'est un indice de confort nécessairement lié à un individu, Kongsgaard rappelle les hypothèses réalisées sur le métabolisme (2.3 MET), l'activité physique (marche à 1.1 m s^{-1}) et l'habillement de la personne (dont la valeur est liée à la température de l'air par l'*UTCI clothing-model* de Havenith *et al.* (2012)). Le tracé des graphes est par ailleurs réalisé selon le modèle UTCI-Fiala (Bröde *et al.*, 2012) pour une personne moyenne d'une masse de 73.4 kg et d'une surface de 1.85 m^2 .

Pour tracer ces courbes, nous nous sommes servis de l'approximation polynomiale de l'UTCI disponible par exemple dans la documentation de Ladybug¹. Il s'agit d'un polynôme de degré 6 dont les quatre variables doivent appartenir au domaine de définition suivant :

- la température de l'air doit être comprise entre $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ et $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la température moyenne radiante ne doit pas être inférieure à la température de l'air de plus de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ni l'excéder de plus de $50 \text{ }^\circ\text{C}$;

1. Url : https://www.ladybug.tools/ladybug-comfort/docs/_modules/ladybug_comfort/utci.html

- la vitesse du vent à 10 m du sol doit être comprise entre 0.5 m s^{-1} et 17 m s^{-1} ;
- la pression de vapeur d'eau doit être inférieure à 45 hPa.

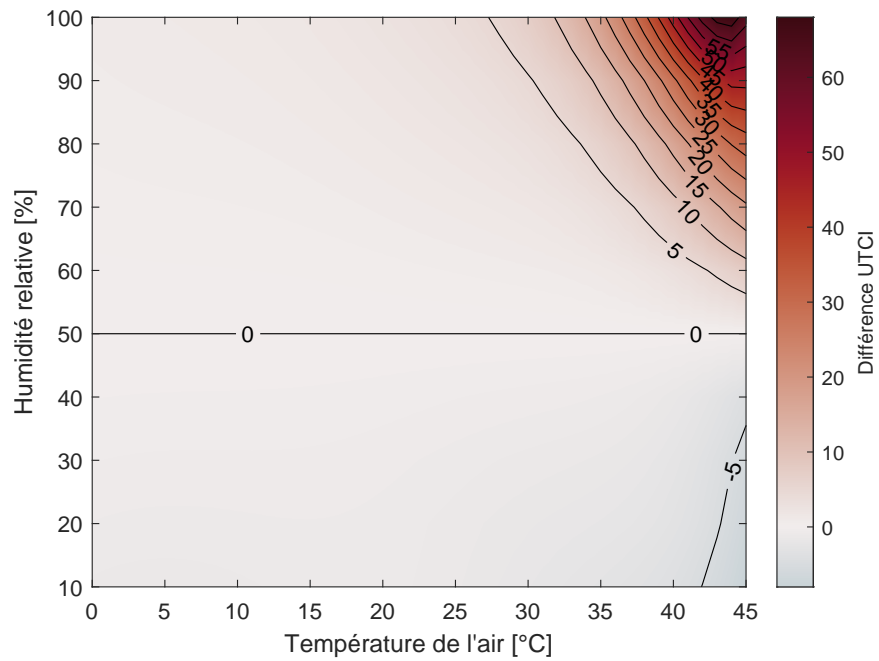


FIGURE A.1 – Effet de l'humidité relative sur l'UTCI.

Ce graphique montre que l'humidité relative de l'air n'a d'influence significative sur l'UTCI que pour des températures d'air élevées. On pourra penser au climat d'une zone tropicale, d'une serre, ou encore d'un hammam.

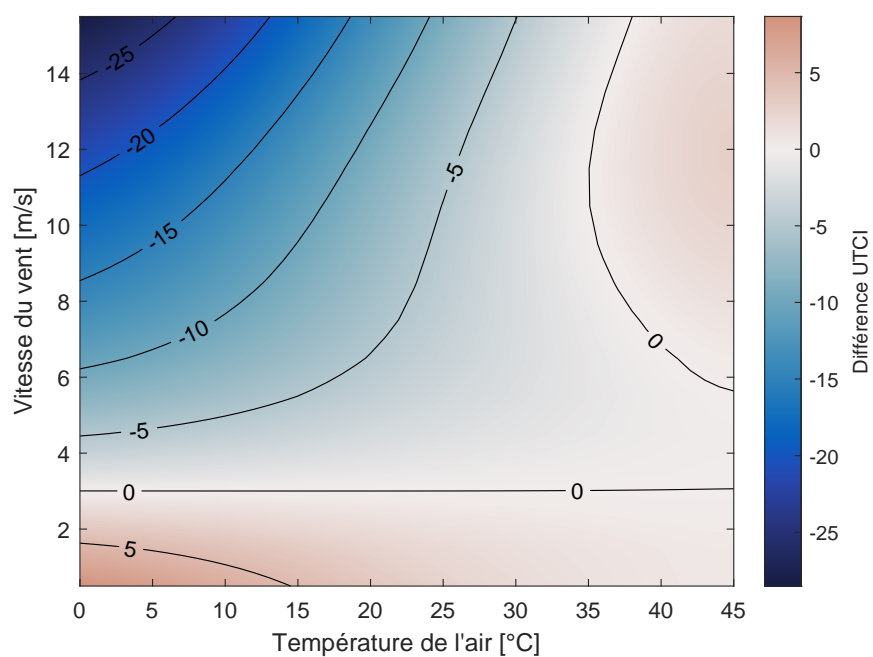


FIGURE A.2 – Effet de la vitesse du vent sur l'UTCI.

A des températures élevées, le graphe nous montre un indice de confort qui varie faiblement avec la vitesse du vent. En revanche, il varie d'autant plus fortement que la température d'air diminue. Ainsi dans un climat tempéré, le vent accentue bien plus le ressenti du froid d'hiver qu'il ne rafraîchit des chaleurs d'été.

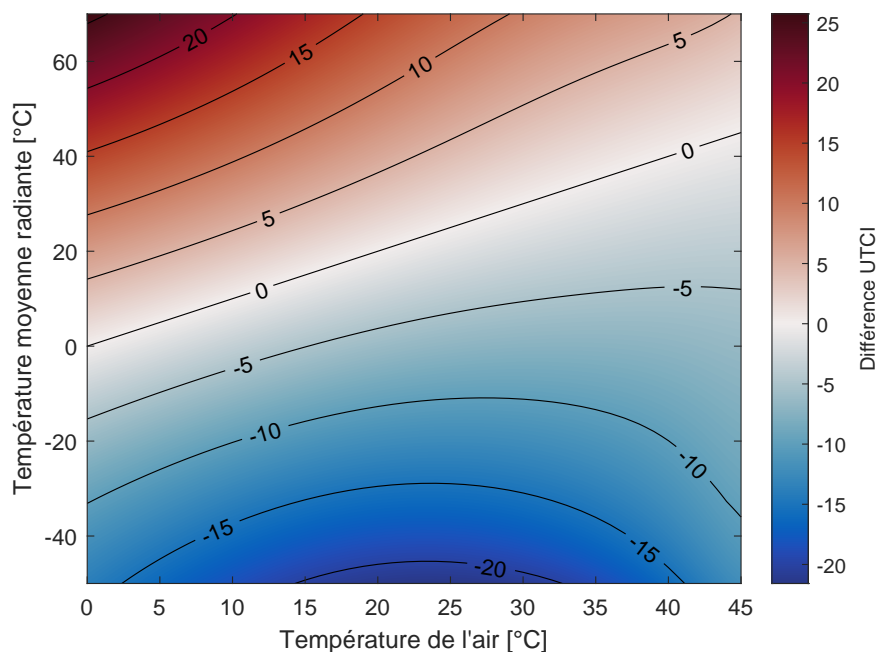


FIGURE A.3 – Effet de la température moyenne radiante sur l'UTCI.

On remarque que l'indice de confort thermique UTCI est autant sensible à la température moyenne radiante qu'à la température de l'air. En pratique, il n'est pas équivalent d'agir sur un paramètre ou l'autre. On peut penser aux dispositifs employés par les restaurants pour assurer le confort des clients installés à leur terrasse lorsqu'il fait froid. Il semble plus pertinent, pour assurer un certain niveau de confort thermique, de privilégier des dispositifs transmettant de l'énergie thermique par rayonnement – d'où l'utilisation des « parasols radiants » infrarouges des terrasses de cafés – que des dispositifs transmettant de l'énergie thermique par convection (des radiateurs convectifs) qui cherchent à augmenter la température de l'ensemble du volume d'air. Ce choix est d'autant plus justifié si la terrasse est ouverte et que l'air peut s'échapper... De même, en été, il peut être plus aisé d'améliorer le confort thermique d'une personne en baissant la quantité de rayonnement qu'elle reçoit (en la plaçant à l'ombre, par exemple) qu'en baissant la température de l'air qui l'entoure.

Annexe B

Résolution de l'équation de la chaleur dans un milieu semi-infini : étude du régime sinusoïdal forcé

On cherche à résoudre l'équation de la chaleur en 1D dans un milieu homogène isotrope semi-infini pour deux types de condition aux limites :

- la température est imposée sur la paroi (condition de Dirichlet ou de première espèce) ;
- une combinaison entre la température et son gradient est imposée sur la paroi (condition dite de Robin, de Fourier, de Newton ou de troisième espèce).

Les coefficients thermodynamiques sont supposés constants et il n'y a pas de terme source. Pour chaque cas, le forçage est donné sous forme d'une oscillation. On s'intéresse à la solution en régime périodique établi, après l'extinction du régime transitoire. La résolution de l'équation dans le cas instationnaire forcé avec une condition de Dirichlet est tirée de Sacadura (2015) et Lagrée (2018) ; elle est ensuite adaptée à la condition aux limites de Robin.

B.1 Condition de Dirichlet

Le système d'équations décrivant l'évolution de la température du solide $T(x, t)$ s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ T(0, t) = T_0 + A_T \cos(\omega t) \\ T(x \rightarrow \infty, t) = T_0 \end{array} \right. \quad (\text{B.1})$$

soit, en posant $\theta = T - T_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \theta(0, t) = A_T \cos(\omega t) \\ \theta(x \rightarrow \infty, t) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{B.2})$$

Cherchons une solution complexe sous la forme $\theta_c = A_T e^{i(\omega t - kx)}$. L'équation de la chaleur devient : $i\omega = -ak^2$, d'où $k = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}(1 - i)$ en prenant $(-i)^{1/2} = \frac{1-i}{\sqrt{2}}$ (si l'on prend $(-i)^{1/2} = -\frac{1-i}{\sqrt{2}}$, alors k a une partie réelle négative et θ diverge pour $x \rightarrow \infty$). La solution s'obtient en prenant la partie réelle de θ_c :

$$\theta(x, t) = A_T e^{-x/\delta} \cos(\omega t - x/\delta) \quad (\text{B.3})$$

et :

$$T(x, t) = T_0 + A_T e^{-x/\delta} \cos(\omega t - x/\delta) \quad (\text{B.4})$$

où $\delta = \sqrt{2a/\omega}$ est l'épaisseur de peau (en m). La réponse du système est périodique, de même période que la sollicitation, mais déphasée. La solution montre qu'il y a un amortissement exponentiel de la température avec la profondeur x et avec la fréquence du signal. Un signal de haute fréquence a donc une profondeur de pénétration dans le milieu plus faible et subit un déphasage plus important.

B.2 Condition de Robin

Le système d'équations décrivant l'évolution de la température du solide $T(x, t)$ s'écrit :

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + hT(0, t) = \phi_0 + A_\phi \cos(\omega t) \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ T(x \rightarrow \infty, t) = \frac{\phi_0}{h} \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

soit, en posant $\theta = T - \frac{\phi_0}{h}$:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} + h\theta(0, t) = A_\phi \cos(\omega t) \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \theta(x \rightarrow \infty, t) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

Cherchons une solution complexe sous la forme $\theta_c = B e^{i(\omega t - kx)}$. La condition de Robin devient : $(h + \lambda ki)B = A_\phi$, d'où $B = \frac{A_\phi}{h + \frac{\lambda}{\delta}(1+i)}$ puisque $k = \frac{1-i}{\delta}$. Par conséquent, en faisant apparaître $Bi = h\delta/\lambda$:

$$B = \frac{A_\phi}{h \left(1 + \frac{1}{Bi} + \frac{1}{Bi}i\right)} = \frac{A_\phi}{h} \frac{1 + \frac{1}{Bi} - \frac{1}{Bi}i}{\left(1 + \frac{1}{Bi}\right)^2 + \frac{1}{Bi^2}} = \frac{A_\phi}{h} \frac{1 + \frac{1}{Bi} - \frac{1}{Bi}i}{1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}} \quad (\text{B.7})$$

La solution s'obtient en prenant la partie réelle de θ_c :

$$\begin{aligned} \theta(x, t) &= \frac{A_\phi}{h \left(1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}\right)} e^{-x/\delta} \left[\left(1 + \frac{1}{Bi}\right) \cos(\omega t - x/\delta) + \frac{1}{Bi} \sin(\omega t - x/\delta) \right] \\ &= \frac{A_\phi}{h \sqrt{1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}}} e^{-x/\delta} \cos(\omega t - x/\delta - \varphi_T) \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

avec $\varphi_T = \arctan\left(\frac{1}{1+Bi}\right)$. Finalement, la température du milieu s'écrit :

$$T(x, t) = \frac{\phi_0}{h} + \frac{A_\phi}{h \sqrt{1 + \frac{2}{Bi} + \frac{2}{Bi^2}}} e^{-x/\delta} \cos(\omega t - x/\delta - \varphi_T) \quad (\text{B.9})$$

On vérifie que lorsque $Bi \rightarrow \infty$, on retrouve la solution pour une condition de Dirichlet au bord.

Annexe C

Propriétés thermiques de feuilles

Jayalakshmy et Philip (2010) ont mesuré les propriétés thermo-physiques de feuilles de diverses essences d'arbres. Les valeurs sont regroupées dans la table C.1.

Les propriétés mesurées sont les suivantes :

- épaisseur e ;
- masse volumique ρ ;
- diffusivité thermique κ ;
- effusivité thermique E ;
- conductivité thermique λ ;
- capacité thermique massique (dite aussi *spécifique*) c .

La diffusivité thermique est la grandeur qui intervient dans l'équation de diffusion de la chaleur (voir section 2.1.6), elle s'exprime sous la forme :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{\lambda}{C} \quad (\text{C.1})$$

L'effusivité thermique caractérise la rapidité avec laquelle un matériau échange de l'énergie thermique, elle vaut :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (\text{C.2})$$

et est utile en thermique du bâtiment ou lorsque l'on étudie la température de contact entre deux matériaux. Comme nous ne nous y intéressons pas ici, elle n'est pas indiquée dans le tableau.

A partir des résultats expérimentaux de Jayalakshmy et Philip (2010), nous avons calculé la capacité thermique volumique C ainsi que la constante de temps τ utilisée dans l'équation 2.67 :

$$\tau = \frac{eC}{2\tilde{h}} \quad (\text{C.3})$$

Pour estimer τ , le coefficient d'échange global \tilde{h} a été fixé ici à $15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, soit une valeur plutôt basse d'après la bibliographie. Les constantes de temps de feuilles en conditions réelles sont donc probablement inférieures à celles indiquées dans le tableau.

Nom commun	Épaisseur e (10^{-3} m)	Densité ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Diffusivité thermique κ (10^{-6} $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Capacité thermique massique c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Capacité thermique volumique C (10^{-6} $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	Constante de temps $\tau = eC/\tilde{h}$ (s)
Jacquier sauvage	0.28	631	0.49	0.5	1637	1.03	10
	<i>0.27</i>	<i>408</i>	<i>0.29</i>	<i>0.33</i>	<i>2868</i>	<i>1.17</i>	<i>11</i>
Jacquier	0.33	650	0.24	0.36	2252	1.46	16
	<i>0.29</i>	<i>450</i>	<i>0.38</i>	<i>0.39</i>	<i>2287</i>	<i>1.03</i>	<i>10</i>
Cannelier	0.2	687	0.19	0.3	2267	1.56	10
	<i>0.2</i>	<i>468</i>	<i>0.16</i>	<i>0.27</i>	<i>3586</i>	<i>1.68</i>	<i>11</i>
Manguier	0.21	879	0.13	0.27	2263	1.99	14
	<i>0.2</i>	<i>747</i>	<i>0.35</i>	<i>0.41</i>	<i>1545</i>	<i>1.15</i>	<i>8</i>
Cocotier	0.32	918	0.42	0.45	1287	1.18	13
	<i>0.32</i>	<i>558</i>	<i>0.58</i>	<i>0.48</i>	<i>1514</i>	<i>0.84</i>	<i>9</i>
Teck	0.2	475	0.4	0.43	2232	1.06	7
	<i>0.2</i>	<i>336</i>	<i>0.12</i>	<i>0.21</i>	<i>5174</i>	<i>1.74</i>	<i>12</i>
Muscadier	0.24	866	0.47	0.49	1255	1.09	9
	<i>0.18</i>	<i>537</i>	<i>0.21</i>	<i>0.31</i>	<i>2724</i>	<i>1.46</i>	<i>9</i>
Moyenne	0.25	615	0.32	0.37	2349	1.32	11
Eau	-	1000	0.14	0.6	4186	4.19	-

TABLE C.1 – Propriétés thermo-physiques des feuilles étudiées par Jayalakashmy et Philip (2010). L'étude prend en compte sept essences d'arbres tropicaux. Pour chaque essence, la première ligne correspond aux valeurs mesurées pour des feuilles fraîches et la deuxième, en italique, pour des feuilles sèches. Les propriétés de l'eau sont données à titre indicatif. Pour estimer τ , le coefficient d'échange global \tilde{h} a été fixé ici à $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Annexe D

Transpiration des feuilles de la Corolle mesurée avec une pince à photosynthèse

Cette annexe regroupe les tableaux de valeurs mesurées en octobre 2020 sur la Corolle installée à Champs-sur-Marne. Les mesures ont été effectuées à la volée à l'aide d'une pince à photosynthèse décrite à la section 5.1.2. Les grandeurs mesurées sont indiquées dans la table D.1.

Symbole	Grandeur mesurée
C	Concentration de CO ₂
Q	Densité de flux de photons incident sur la cuvette
CH	Concentration H ₂ O de référence
T	Température de la feuille
E	Taux de transpiration
G	Conductance stomatale pour la vapeur d'eau
Ta	Température de l'air

TABLE D.1 – Notations des grandeurs mesurées.

Mesure #	Heure	C ppm	Q $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	CH mb	T $^{\circ}\text{C}$	E $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	G $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Ta $^{\circ}\text{C}$
8	11h22	448	110	10.5	14.6	0.08	14	14
9	11h23	569	117	10.5	14.7	0.37	68	14
10	11h25	498	44	10.9	14.7	0.19	36	14
11	11h26	481	44	11.2	14.7	0.03	6	14
12	11h27	450	902	11.4	15	0.05	7	16
13	11h28	439	1774	11.3	14.7	0.44	62	16
14	11h29	442	1562	11.3	14.8	0.27	38	16
15	11h30	441	1188	11	15	0.23	32	16
16	11h31	440	1679	11.2	15.1	0.28	36	17
17	11h32	443	1034	11	14.9	0.38	59	16
18	11h33	441	1694	11	14.8	0.37	50	16
19	11h34	439	396	11.1	14.6	0	1	15
20	11h36	440	411	11	14.3	0.12	22	14
21	11h37	441	1584	11	14.4	0.07	10	16
22	11h38	444	850	11	14.3	0.01	2	15
23	11h39	444	1100	11	14.6	0.09	13	15
24	11h40	449	1466	11.1	14.9	0.07	10	16
25	11h41	452	396	10.9	14.6	0.23	41	15
26	11h42	469	374	11	14.2	0.39	82	14
27	11h43	464	543	11.2	14	0.05	9	14
28	11h45	436	242	11.7	14.2	0.22	53	14
29	11h46	435	279	11.2	13.9	0.13	29	14
30	11h47	434	198	10.9	13.7	0.16	35	13
31	11h48	434	616	11.2	14.1	0.3	60	14
32	11h49	433	447	11.2	14.2	0.47	102	14
33	11h50	438	242	10.8	13.9	0.05	11	14
34	11h51	443	117	10.8	13.8	0.03	7	13
35	11h52	437	103	10.7	13.6	0.23	52	13

TABLE D.2 – Mesures du 12 octobre 2020.

Mesure #	Heure	C ppm	Q $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	CH mb	T $^{\circ}\text{C}$	E $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	G $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Ta $^{\circ}\text{C}$
36	12h21	9999	1782	10.5	16.5	0.09	9	18
37	12h22	420	1679	10.7	16.7	0.02	2	18
38	12h23	419	1452	10.4	16.6	0.23	23	18
39	12h24	419	159	10.4	16.6	0.23	23	18
40	12h25	424	990	10.9	16.4	0.07	8	17
41	12h26	415	1672	10.4	16.4	0.28	27	18
42	12h27	417	1591	10.4	16.4	0.33	33	18
43	12h28	415	1173	10.1	16.3	0.21	22	17
44	12h29	415	1620	10.2	16.4	0.15	14	18
45	12h30	414	1342	10.1	16.3	0.3	30	17
46	12h31	413	1393	10	16.1	0.11	11	17
47	12h32	419	1056	10.1	16.2	0.55	63	17
48	12h33	418	872	10.1	15.9	0.43	52	16
49	12h34	418	1114	10.1	16	0.15	17	17
50	12h35	421	1092	9.7	16	0.31	32	17

TABLE D.3 – Mesures du 19 octobre 2020.

Mesure #	E mmol m ⁻² s ⁻¹	E g m ⁻² h ⁻¹	ϕ_E W m ⁻²
8	0.08	5	3
9	0.37	24	15
10	0.19	12	8
11	0.03	2	1
12	0.05	3	2
13	0.44	29	18
14	0.27	17	11
15	0.23	15	10
16	0.28	18	12
17	0.38	25	16
18	0.37	24	15
19	0.00	0	0
20	0.12	8	5
21	0.07	5	3
22	0.01	0.6	0.4
23	0.09	6	4
24	0.07	5	3
25	0.23	15	10
26	0.39	25	16
27	0.05	3	2
28	0.22	14	9
29	0.13	8	5
30	0.16	10	7
31	0.30	19	12
32	0.47	30	19
33	0.05	3	2
34	0.03	2	1
35	0.23	15	10
36	0.09	6	4
37	0.02	1	1
38	0.23	15	10
39	0.23	15	10
40	0.07	5	3
41	0.28	18	12
42	0.33	21	14
43	0.21	14	9
44	0.15	10	6
45	0.30	19	12
46	0.11	7	5
47	0.55	36	23
48	0.43	28	18
49	0.15	10	6
50	0.31	20	13

TABLE D.4 – Taux d'évaporation surfaciques et densité de flux de chaleur latente correspondante.