




Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de Bachelor Diplôme 2023

Ludivine Défago

*Simulation façade verte : impact sur le
climat du quartier*

-  Professeurs
Klaus Kreher & Jacob Rager
-  Expert
Jérôme Kämpf
-  Date de la remise du rapport
18.08.2023

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2022-23	No TB / Nr. BA ER/2023/51
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiante / Studentin Ludivine Défago Professeur / Dozent Klaus Kreher Jakob Rager	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Jérôme Kämpf, IDIAP Martigny	

Titre / Titel

Simulation façade verte : impact sur le climat du quartier

Description / Beschreibung

La végétalisation de l'enveloppe des bâtiments est une technologie clé pour les développements futurs dans l'aménagement du territoire des villes et des sites. Les bâtiments sont influencés par la végétalisation de l'enveloppe en ce qui concerne de nombreux aspects de la physique du bâtiment. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'évaporation et de l'ombrage des plantes sur la consommation d'énergie des bâtiments.

Objectifs / Ziele

- Une recherche bibliographique doit permettre de trouver, d'analyser et identifier les travaux clés et existants sur le sujet afin de les classer en fonction de leur pertinence.
- Pour la simulation de bâtiments à l'aide de bSol (ou un autre logiciel similaire), les paramètres d'influence (température de surface, température ambiante, facteurs d'ombrage, capacité d'évapotranspiration des plantes et/ou de l'eau) doivent être analysés afin de pouvoir se prononcer sur l'ampleur et le type d'influence sur le bilan énergétique d'un bâtiment et ces émissions en CO₂.
- L'objectif est de pouvoir évaluer la pertinence des facteurs d'influence et de simuler exemplairement différents bâtiments. Il s'agit d'établir une étude de cas d'une situation spécifique sans et avec façade verte et en comparant les résultats de simulations par des indicateurs clés tels que le besoin énergétique et l'émission de gaz à effet de serre.
- Pour la simulation d'un quartier (avec le logiciel CitySim), les paramètres et les données pertinentes doivent être définies en collaboration avec les développeurs du logiciel avec l'objectif d'analyser la situation d'un quartier spécifique avec l'aide de ce logiciel.
- Tous les travaux doivent faire l'objet d'un examen critique et être évalués dans l'esprit d'un ingénieur.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum

Responsable de l'orientation /
Leiter der Vertiefungsrichtung:

¹ Etudiante / Studentin :


Délais / Termine

Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:
15.05.2023Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation:
19 – 20.06.2023Remise du rapport final / Abgabe des
Schlussberichts:
18.08.2023Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten:
25.08.2023 – HEI
28.08.2023 – Monthey
31.08.2023 – VispDéfense orale / Mündliche Verfechtung:
Semaine/Woche 35-36 (01-07.09.2023)

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



Travail de diplôme | édition 2023 |



Filière
*Énergie et techniques
environnementales*

Domaine d'application
Énergies renouvelables

Professeurs responsables

Klaus Kreher
klaus.kreher@hevs.ch
Jakob Rager
jakob.rager@hevs.ch

Simulation façade verte : impact sur le climat du quartier

Diplômant/e Ludivine Défago

Objectif du projet

Étudier l'impact des façades vertes sur le climat d'un quartier et la consommation énergétique des bâtiments par simulations sur CitySim. Comparer les résultats avec/sans façades vertes. Évaluer la cohérence entre simulations et mesures.

Méthodes | Expériences | Résultats

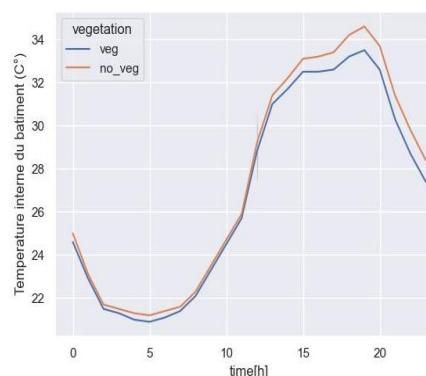
Ce rapport étudie l'effet thermique des façades végétales sur l'amélioration du confort urbain ainsi que l'influence sur le bilan énergétique des bâtiments.

L'étude de cas porte sur un bâtiment situé à la pépinière de Zürich, pour lequel diverses mesures ont été obtenues. Le bâtiment en question ainsi que les bâtiments voisins ont été modélisés en 3D et simulés avec CitySim dans le but d'évaluer les effets des façades végétales.

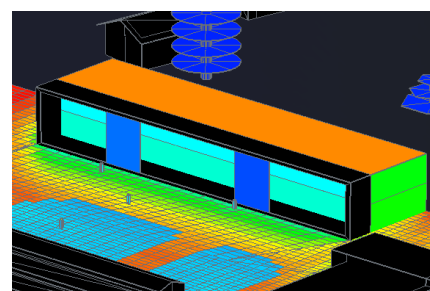
L'analyse des mécanismes d'évapotranspiration et d'ombrage associés aux plantes démontre que les façades vertes réduisent les besoins de refroidissement du bâtiment d'environ 16%.

L'impact sur le microclimat est évalué via la température moyenne rayonnante, l'indice de confort COMFA* et la température de surface du sol. Les résultats indiquent que l'intégration de végétation en façade diminue la sensation de chaleur pour les piétons, réduit la température moyenne rayonnante d'environ 2°C et abaisse la température du sol de 0,17°C.

Les résultats soulignent le potentiel et les limites de la végétalisation verticale des bâtiments en tant que solution durable pour améliorer le confort thermique des bâtiments et du quartier.



Impact de la végétation de façade sur la température intérieure du bâtiment durant le jour le plus chaud de l'année 2020



Simulation 3D du cas d'étude : Températures de surface avec intégration de la végétation en façade.

REMERCIEMENTS

Un grand merci à Andrea Salmi pour ses précieux conseils ainsi que son accompagnement tout au long de ce travail de Bachelor.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Jérôme Kämpf pour son aide inestimable quant à l'utilisation de CitySim ainsi pour son expertise avisée et sa disponibilité.

Je remercie également Jakob Rager pour son soutien dans les premières phases du travail ainsi que Klaus Kreher pour la proposition d'un sujet si intéressant.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Table des figures.....	iv
Table des tableaux.....	v
Glossaire	vi
Intégration de la durabilité.....	1
1 Introduction.....	2
1.1 Contexte et enjeux	2
1.2 Cahier des charges.....	4
1.3 Etat de l'art	4
1.3.1 Enjeux sur la thermique du bâtiment.....	5
1.3.2 Impact sur les îlots de chaleur urbains.....	6
1.3.3 Simulations de l'impact des façades végétalisées.....	7
1.3.4 Application du logiciel CitySim	9
1.3.5 Travaux de Bachelor antérieurs	10
1.4 Méthodologie	12
2 Définition des façades vertes	13
2.1 Historique	13
2.2 Systèmes de verdure verticaux	13
2.2.1 Irrigation	17
2.2.2 Variétés de plantes.....	17
3 Aspects théoriques.....	18
3.1 Bilan thermique d'un bâtiment	18
3.1.1 Impact sur l'isolation du bâtiment	18
3.1.2 Effet d'ombrage.....	21
3.1.3 Évapotranspiration	22
3.1.4 Blocage du vent	26
3.1.5 Synthèse	28
3.2 Ilots de chaleur urbains	29
4 Cas d'étude.....	32
4.1 Description du bâtiment.....	32
4.2 Prises de mesures.....	35
5 Simulations sur CitySim	38
5.1 Méthode de simulation	39

5.1.1	Modélisation et paramètres de la scène	39
5.1.2	Résultats de la modélisation	43
5.1.3	Mesures du confort	44
5.1.4	Scénarios de simulation.....	45
6	Résultats	46
6.1	Thermique du bâtiment	46
6.2	Microclimat du quartier	52
6.3	Prévisions 2050.....	60
7	Application au Campus Energypolis	64
8	Conclusion	67
8.1	Limites de l'étude	68
8.2	Recommandations et perspectives	70
9	Bibliographie.....	71
10	Annexes	75
10.1	Récolte de données	75
10.2	Informations générales sur le bâtiment d'étude	76
10.3	Tags.....	77
10.4	Composition du sol.....	78
10.5	Hypothèses pour les compositions du bâtiment d'étude	79
10.5.1	Façades et toiture.....	79
10.5.2	Sol	81
10.6	Caractéristiques de chauffage pour le bâtiment d'étude	82
10.7	Modélisation des arbres.....	82
10.8	Analyse des fichiers météo pour juillet 2020 et 2050 à Zürich	83
10.9	Energypolis	85
10.9.1	Positionnement des piétons.....	85
10.9.2	COMFA* avant végétalisation des bâtiments	86
10.9.3	MRT avant végétalisation des bâtiments	86
10.9.4	Réduction de l'indice COMFA* grâce à l'ajout de végétation sur les bâtiments	87
10.9.5	Réduction de la MRT grâce à l'ajout de végétation sur les bâtiments.....	88

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Objectif 11 - Villes et communautés durables grâce à la végétalisation de bâtiment.....	1
Figure 2: Jardins suspendus médiévaux	13
Figure 3: A gauche une façade verte, les plantes s'enracinent au sol et grimpent sur la façade et couvrent l'élévation. À droite mur vivant, feuilles pré-végétalisées qui sont fixées à un mur porteur ou à un cadre.....	14
Figure 4: Classification des façades végétalisées	15
Figure 5: Différents systèmes de façades végétalisées, (1) Façade verte directe et enracinée dans le sol ; (2) Façade verte indirecte et enracinée au sol ; (3) Façade verte indirecte avec conteneurs.....	15
Figure 6: Différentes typologies de façades végétalisées. (1) Façade verte indirecte sur treillis ; (2) Façade verte directe avec lierre ; (3) Mur vivant continu ; (4) Mur vivant modulaire.....	16
Figure 7: A gauche, définition et délimitation de l'enveloppe thermique d'un bâtiment (tracée en jaune sur la figure). A droite, composition type d'une façade avec isolation périphérique.....	19
Figure 8: Structure type d'une façade avec mur vivant	20
Figure 9: Le devenir de l'énergie solaire au niveau d'une feuille.....	22
Figure 10: Evolution du Kc en fonction de la croissance de la plante	25
Figure 11: Diagramme de flux de chaleur d'une façade végétalisée	28
Figure 12: Phénomène d'îlot de chaleur urbain.....	29
Figure 13: Problématiques des ICU et facteurs anthropiques	30
Figure 14: Plan d'ensemble de la pépinière de Zürich, Gutstrasse 199, 8047 Zürich-Albisrieden.....	32
Figure 15: Vue sud-ouest du bâtiment (à gauche) et façade nord-ouest (à droite) sans la végétation	33
Figure 16: Façade rideau installée sur la façade nord-ouest du bâtiment de la pépinière de Zürich...	33
Figure 17: Mur vivant installé sur la façade nord-ouest du bâtiment de la pépinière de Zürich.....	34
Figure 18: Façade nord-ouest du bâtiment avec intégration de la végétation.....	34
Figure 19: Pépinière de Zürich, en rouge le bâtiment étudié	35
Figure 20: PET à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)	36
Figure 21: Température de l'air à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)	36
Figure 22: Montage expérimental pour la prise de mesures réalisée sur la façade rideau	37
Figure 23: Schéma de méthodologie de simulation.....	39
Figure 24: Délimitation du périmètre de la zone d'étude autour de la pépinière	40
Figure 25: à gauche, une photo du bâtiment étudié avec ses façades végétales, à droite le bâtiment modélisé sur SketchUp avec en gris la façade rideau et en blanc le mur vivant.	41
Figure 26: Rendu de la modélisation 3D avant simulation importé sur CitySim.....	44
Figure 27: Répartition des températures dans le bâtiment avec et sans végétation pour le jour le plus chaud de l'année 2020	47
Figure 28: Légende pour les températures de surfaces.....	47
Figure 29: Température moyenne annuelle de chaque surface de la scène. À gauche sans la végétation de paroi, à droite avec la végétation de paroi	48
Figure 30: Emission de rayonnement infrarouge nocturne du mur vivant pour les scénarios avec et sans végétation.....	49
Figure 31: Evapotranspiration annuelles des parois végétalisées	49
Figure 32: à gauche la radiation annuelle, à droite l'humidité relative annuelle	50
Figure 33: Points de mesures de MRT à gauche dans la réalité et à droite dans la simulation	52
Figure 34: Comparaison de la MRT mesurée et simulée derrière la façade rideau	53
Figure 35: Comparaison de la MRT mesurée et simulée devant le mur nu	53

Figure 36: MRT pour le 19.07.20	55
Figure 37: Indice COMFA* devant les parois dépourvues de végétation	56
Figure 38: Réduction de l'indice COMFA* grâce à la végétation des parois. P2 = piéton 2 situé à 2m devant le mur vivant, P3 = piéton 3 situé à 2m devant la façade rideau, P4 = piéton 4 situé 10m devant le bâtiment entre les deux façades et P7 = piéton 7 situé à 13m devant le bâtiment aussi entre les deux façades.	57
Figure 39: Amélioration du confort thermique grâce à la végétation du mur vivant pour le 8 juillet 2020.....	58
Figure 40: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant le mur vivant	59
Figure 41: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant la façade rideau.....	59
Figure 42: MRT devant le mur nu pour 2050 comparée à 2020	62
Figure 43: MRT derrière la façade rideau pour 2050 comparée à 2020	62
Figure 44: Campus Energypolis	64
Figure 45: Typologie de façade végétale applicable aux bâtiments du campus Energypolis	64
Figure 46: Evaluation de la charge thermique du Campus	65
Figure 47: Températures moyennes de surface pour le modèle avec végétalisation de façade des bâtiments de la HEI pour le mois de juillet 2020	66
Figure 48: Composition du sol selon (Coccolo, 2017)	78
Figure 49: Arbres modélisés sur le site.....	82
Figure 50: Représentation schématique de la modélisation des arbres sur CitySim à partir de l'index de surface foliaire.....	83

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résumé des albédos de la scène	43
Tableau 2: Confort thermique en fonction de l'indice COMFA* selon (Coccolo, 2017)	45
Tableau 3: Résultats des heures de surchauffe.....	46
Tableau 4: Température moyenne de surface des parois végétales	48
Tableau 5: Consommations d'énergie thermique cumulées annuelles.....	50
Tableau 6: Emissions de CO ₂ liées aux consommations d'énergie thermique.....	51
Tableau 7: Résultats sur la thermique du bâtiment pour 2050 selon les deux scénarios climatiques .	61
Tableau 8: MRT moyenne pour le mois de juillet	63
Tableau 9: Nomenclature spécifique à CitySim pour les Tags dans SketchUp.....	77
Tableau 10: Dimensions des arbres choisis.....	82

GLOSSAIRE

Abréviation	Définition
COMFA*	Comfort Formula
CS	CitySim
ET0	Évapotranspiration de référence
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICU	Îlot de chaleur urbain
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kc	Coefficient de culture
Ks	Coefficient de stress hydrique
LAD	Densité de surface foliaire
LAI	Indice de surface foliaire
MRT	Température moyenne radiante
P2	Piéton 2
P3	Piéton 3
P4	Piéton 4
P7	Piéton 7
PET	Température physiologique équivalente
SRE	Surface de référence énergétique
Ta	Température ambiante
T _{moy}	Température moyenne
T _{int}	Température intérieure
UTCI	Indice universel du climat thermique
XML	eXtensible Markup Language

INTÉGRATION DE LA DURABILITÉ

L'Organisation des Nations Unies a développé dans son « *Programme de développement durable à l'horizon 2030* » les 17 but du développement durable (*THE 17 GOALS | Sustainable Development*, 2015). Ces objectifs ont pour but d'inciter les pays à agir pour la paix et la prospérité de la planète. Dans les actions à mener on retrouve la lutte contre la pauvreté, l'accès à l'éducation et l'amélioration de la santé ainsi que la réduction des inégalités. Ce programme vise à atteindre ces objectifs tout en luttant contre les changements climatiques.

Afin de situer ce travail de Bachelor face aux enjeux décrits par l'ONU, l'étude des façades vertes a été mise en perspective selon chaque objectif du développement durable. Ainsi, les objectifs auxquels l'étude répond sont présentés ci-dessous.

Objectif 7 : Énergie propre et d'un coût abordable. En évaluant les performances énergétiques des bâtiments grâce aux façades vertes, cette étude contribue à promouvoir l'utilisation d'énergies propres et renouvelables réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie fossiles.

Objectif 11 : Villes et communautés durables. L'étude menée dans ce Travail de Bachelor examine les stratégies de végétalisation de façade pour atténuer les îlots de chaleur urbains améliorant ainsi la qualité de vie dans les villes en rendant les espaces urbains plus frais, plus agréables et mieux adaptés au climat.

Objectif 13 : Lutte contre les changements climatiques. En analysant l'effet des façades vertes sur le climat du quartier et en démontrant leur capacité d'améliorer le confort thermique, l'étude contribue à trouver des solutions pour la lutte contre les effets du réchauffement climatique.

Objectif 15 : Vie terrestre. L'introduction de la végétation en milieu urbain, notamment grâce aux façades vertes, favorise la biodiversité, la préservation des écosystèmes et contribue à la création d'environnements plus accueillant pour la faune.

Objectif 17 : Partenariats pour la réalisation des objectifs. De manière générale, étudier l'impact des façades vertes implique une collaboration entre chercheurs, urbanistes, architectes et ingénieurs pour concevoir des solutions durables et innovantes pour les environnements urbains.

En somme, l'étude des façades vertes menée à bien de ce travail de Bachelor s'inscrit dans une démarche de développement durable en cherchant à créer des villes plus résilientes, économes en énergie, respectueuses de l'environnement et offrant une meilleure qualité de vie aux citoyens. Ce travail s'aligne ainsi sur les objectifs de l'ONU visant à promouvoir une croissance économique inclusive et durable tout en préservant l'environnement et en répondant aux défis du changement climatique.



Figure 1: Objectif 11 - Villes et communautés durables grâce à la végétalisation de bâtiment
Source : ONU sdgs.un.org/goals

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ET ENJEUX

Le climat de notre planète est actuellement préoccupant et les enjeux faces aux changement climatiques sont d'autant plus conséquents. Le réchauffement climatique, d'origine anthropique, est majoritairement causé par l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces gaz sont émis en grande quantité par les activités humaines, notamment par l'utilisation massive de carburants fossiles, par l'agriculture intensive ainsi que par la suppression des puits de carbones liés à la déforestation et la dégradation des espaces naturels. Ces gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, l'ozone troposphériques ainsi que bien d'autres piègent la chaleur du soleil dans l'atmosphère provoquant ainsi une hausse des température globales de la planète.

Les conséquences du réchauffements climatiques sont déjà visibles dans de nombreux domaines. Les glaciers fondent sous l'effet des hausses des températures, entraînant une hausse du niveau des mers et mettant ainsi en péril les zones côtières. Les événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes provoquant parfois des dégâts matériels importants, les pluies torrentielles provoquant des inondations et à l'inverses les périodes de sécheresses sont des phénomènes qui deviennent de plus en plus fréquents et de plus en plus intenses. Ces phénomènes météorologiques ont des répercussions non négligeables sur l'agriculture, les ressources en eau et sur la sécurité des populations.

Si on se concentre uniquement sur les villes, celles-ci doivent faire face à de nombreux problèmes liés aux changement climatique et à la hausse des températures globales engendrées par ceux-ci. Les enjeux peuvent être de grande ampleur avec des conséquence désastreuses s'abattant sur un grand nombre d'habitants. En effet, les villes et leur forte densité abritent une part croissante de la population mondiale. Cette concentration de population rend ces zones d'autant plus vulnérables. De plus, les villes d'aujourd'hui sont construites de sorte à maximiser la densité de population en limitant l'étalement urbain afin d'optimiser la proximité des services. En conséquence, ces zones fortement urbanisées sont généralement pauvres en végétation. Ce manque de végétation face à un environnement fortement bitumé à des conséquences tant sur la santé humaine que sur la biodiversité.

Ainsi, l'urbanisation représente un défi majeur face aux changement climatique. L'un des principaux défis est l'augmentation des températures urbaines provoquant des phénomènes d'îlots de chaleur urbain (ICU). Les ICU se produisent lorsque les surfaces minérales emmagasinent et restituent la chaleur plus efficacement que les zones rurales environnantes, ce qui entraîne des températures nettement plus élevées. Ces températures élevées augmentent non seulement l'inconfort thermique pour les habitants des villes, mais elles augmentent également la demande énergétique pour le refroidissement des bâtiments.

En ce qui concerne l'évolution des villes pour le futur et au vu de la croissance démographique constante, on s'attend à une urbanisation grandissante et rapide dans de nombreuses régions du monde. Le nombre d'habitants dans les zones urbaines devrait ainsi continuer à croître avec une augmentation significative de la taille et du nombre de mégapoles (villes de plus de 10 millions d'habitants). Cette urbanisation rapide pose des défis supplémentaires en termes de gestion des ressources, d'infrastructures, de mobilité, de logement et de qualité de vie. Cependant, on observe également une tendance progressive vers des villes plus durables et résilientes. Plusieurs villes

d'Europe, telle que Copenhague, ont déployés de nombreux efforts pour améliorer les secteurs des transports, des bâtiments, du traitement des déchets ainsi que de l'énergie. Ces efforts sont en parties possible grâce l'élaboration de stratégies, de plans climat et d'investissements financiers.

Une des solutions courantes pour rendre les villes plus résilientes face au réchauffement climatique et améliorer le confort des habitants est l'augmentation de la végétation en zone urbaine. Cette solution semble être relativement accessible mais relève tout de même certains enjeux. Selon (Vandersmissen, 2021) : « *Végétaliser un centre urbain relève du défi. La densité croissante des villes est un frein à l'épanouissement des végétaux. C'est pourquoi chaque surface libre est à considérer. Les surfaces horizontales sont évidemment les plus propices à la végétalisation mais sont souvent destinées à d'autres usages* ». On comprend donc que l'enjeu principal est de trouver des zones disponibles à la végétation, d'où l'idée de s'intéresser aux surfaces verticales telles que les façades des bâtiments pour remplir ce rôle. Ces façades bien souvent sous estimées, représentent des surfaces libres et le cumul de celles-ci représente parfois des surfaces plus importantes que les surfaces au sol.

La végétalisation de façade, convoitée depuis déjà plusieurs années, a fait ses preuves. En effet, cela peut avoir un impact bénéfique tant bien sur les consommations énergétiques des bâtiments que sur le climat environnant grâce au pouvoir rafraichissant des plantes. Ces systèmes ont ainsi leur rôle à jouer dans la lutte contre les îlots de chaleur urbain. Réduire les ICU permet d'améliorer le confort des habitants mais également de réduire la demande en climatisation, contribuant ainsi à une utilisation plus durable de l'énergie et une baisse des consommations. La végétalisation de toiture est également une solution pour la végétalisation de bâtiment et possède également des effets bénéfiques sur la thermique du bâtiment végétalisé. Le choix d'étudier uniquement les façades et non les toitures réside dans le but d'observer également l'impact de celles-ci sur le microclimat d'un quartier.

La végétalisation de bâtiment, notamment des façades, possèdent d'autres avantages. Celles-ci ont un impact dans la gestion des eau pluviales en absorbant et filtrant l'eau de pluie. Cela permet ainsi de réduire la charge sur les systèmes de récolte et de traitement des eaux, le tout en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol. Les façades végétales ont également leur rôle à jouer dans la conservation de la biodiversité. En effet, celles-ci créent des habitats pour la faune et la flore favorisant la présence d'insectes et d'oiseaux. Finalement, la végétation permet d'améliorer la qualité de l'air. En effet, les plantes contribuent à la filtration des particules fines, absorbent les gaz nocifs et rejettent de l'oxygène. Finalement, en créant une surface opaque et dense, les façades vertes peuvent contribuer à l'absorption des nuisances sonores de la ville. Ces avantages permettent d'améliorer la qualité de l'environnement urbain et le rendre plus sain.

Ainsi, en combinant les divers bienfaits offerts par les façades végétalisées, cela peut contribuer à rendre les villes plus durables, plus résilientes et plus agréables à vivre. Ces systèmes font partie intégrante des stratégies d'aménagement urbain durable. En fournissant des solutions basées sur la nature et en optant pour le low-tech, ces systèmes trouvent leur place face aux défis du changement climatique en améliorant la qualité de vie des habitants des villes.

1.2 CAHIER DES CHARGES

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des plantes sur la consommation énergétique d'un bâtiment ainsi que sur le climat d'un quartier. Pour ce faire, l'étude remplira les exigences définies dans le cahier des charges ci-dessous :

- Effectuer une recherche bibliographique afin de trouver, analyser et identifier les travaux clés et existants sur le sujet dans le but de les classer en fonction de leur pertinence.
- Effectuer la simulation de bâtiments à l'aide du logiciel CitySim. Les paramètres d'influence tels que la température de surface, la température ambiante, les différents facteurs d'ombrage ainsi que la capacité d'évapotranspiration des plantes doivent être analysés afin de pouvoir se prononcer sur l'ampleur et le type d'influence sur le bilan énergétique d'un bâtiment et ces émissions de CO₂.
- L'objectif est d'évaluer la pertinence des facteurs d'influence et de simuler exemplairement un bâtiment. Il s'agit d'établir une étude de cas d'une situation spécifique avec et sans façade verte en comparant les résultats de simulations par des indicateurs clés tels que le besoin énergétique et l'émission de gaz à effet de serre.
- Effectuer la simulation d'un quartier avec le logiciel CitySim. Les paramètres et les données pertinentes doivent être définies en collaboration avec les développeurs du logiciel avec l'objectif d'analyser la situation d'un quartier spécifique à l'aide de ce logiciel.
- Tous les travaux doivent faire l'objet d'un examen critique et être évalués dans l'esprit d'un ingénieur.

1.3 ETAT DE L'ART

Depuis les années 1970 (Susca et al., 2022), de nombreuses études et recherches se sont concentrées sur les bénéfices résultant de l'intégration de la végétation de façade. Afin de démontrer le nombre d'études réalisées sur le sujet, il suffit de taper les mots clés « green wall » dans Web of Science et c'est plus de 4091 articles publiés entre 2014 et 2019 qui nous sont proposés. Un grand nombre d'études scientifiques publiées se concentrent sur des sujets spécifiques, tels que le traitement des eaux grises, la réduction de la pollution sonore ainsi que les impacts psychophysiques découlant de l'installation de murs végétaux. Parallèlement à cela, certaines recherches se concentrent davantage sur des zones climatiques particulières. Des articles de synthèse examinent les caractéristiques générales et les avantages globaux offerts par les façades végétalisées. D'autres études explorent les répercussions du déploiement de ce type de façade sur la consommation énergétique des bâtiments, la pollution de l'air ainsi que l'impact sur les îlots de chaleur urbains.

Ce chapitre permet de faire l'état de la recherche sur le sujet et recense quelques-uns des articles les plus pertinents pour l'étude réalisée dans ce travail de Bachelor. Comparer et évaluer les nombreuses études menées sur le sujet est un travail complexe. Effectivement, des variations entre les systèmes de construction de façades vertes, le climat régnant sur les sites d'étude et les espèces végétales utilisées définissent des conditions de départ variables pour chaque étude. De plus, il a été constaté en lisant diverses études que les paramètres pris en compte comme l'orientation des façades étudiées, l'épaisseur du feuillage, les techniques de prise de mesures ainsi que les indicateurs observés engendrent des différences notables sur l'interprétation des résultats. Afin de rester au plus proche du cadre de l'étude menée ici, seules les études effectuées sur des façades vertes et des murs vivants dont les objectifs semblent être en concordance avec les objectifs de ce travail seront présentées.

Plusieurs mécanismes d'action sur la thermique du bâtiment ainsi que sur la réduction des îlots de chaleur urbains ont alors pu être mis en évidence. L'effet positif du verdissement de façade sur le climat intérieur et extérieur des bâtiments a donc été largement documenté. Cet état de l'art se divise en plusieurs sous chapitres en fonction des thématiques qui seront étudiées dans ce travail de Bachelor.

1.3.1 Enjeux sur la thermique du bâtiment

Dans une étude menée par (Pérez et al., 2011) les systèmes de verdure verticaux présentent plusieurs avantages en termes de réduction de la température à travers la façade des bâtiments. Ces avantages incluent l'ombrage, l'isolation thermique et le refroidissement par évapotranspiration des plantes. Cette étude s'est concentrée sur l'analyse d'une façade verte à double peau face à un climat méditerranéen continental sec. Les résultats obtenus pour la période printemps-été ont révélé plusieurs constatations significatives. Tout d'abord, les mesures d'éclairement, de facteur d'ombrage et de températures de surface des murs du bâtiment ont confirmé la capacité élevée des systèmes de végétalisation verticaux à intercepter le rayonnement solaire. De plus, les mesures de température et d'humidité relative ont démontré que la façade verte créait un microclimat dans l'espace intermédiaire entre le bâtiment et la végétation, caractérisé par des températures plus basses et une humidité plus élevée. Ces résultats confirment le rôle de pare-vent de la façade végétalisée double peau et mettent en évidence l'effet bénéfique de l'évapotranspiration des plantes.

Dans une autre étude, (Dian et Wan, 1999) ont examiné les effets de la végétalisation des façades sur la température de surface rapportant une diminution de 8°C par rapport aux zones non végétalisées. L'étude a également révélé une diminution maximale de la température pouvant atteindre 16 °C par rapport à la façade non végétalisée. En analysant plus en détail un mur vert orienté ouest et soumis à un rayonnement solaire de 189 W/m², les auteurs ont pu déterminer que parmi cette énergie, les feuilles des végétaux réfléchissent 28 W/m² et en absorbent 133 W/m². Seuls 28 W/m² du rayonnement solaire traversent la couche foliaire. Les résultats ont montré que les flux de chaleur moyens liés à l'évapotranspiration, à la convection thermique et au rayonnement à ondes longues vers la façade du bâtiment représentent respectivement 42 %, 40 % et 18 % de l'énergie transmise. Ces constatations fournissent des informations précieuses sur les mécanismes thermiques impliqués dans les systèmes de façades végétalisées et soulignent l'importance de ces systèmes pour réduire la chaleur et améliorer le confort thermique dans les bâtiments.

Dans une étude menée à la Technische Universität de Berlin réalisée par (Hoelscher et al., 2016), les auteurs ont quantifié les effets du refroidissement par la végétalisation des façades pour le bâtiment et l'environnement urbain en distinguant les effets de l'évapotranspiration et de l'ombrage. Les auteurs ont également analysé l'effet de l'augmentation d'isolation induite par les plantes. Trois façades du bâtiment de l'université ont été végétalisées avec des variétés différentes afin d'en prélever des mesures et de les comparer avec une part de mur nu. Lors d'une chaude journée d'été, la température moyenne de surface du mur a été réduite de 0,1 à 11,3°C (en moyenne 3,3°C) grâce à la végétalisation composée de vigne vierge. Des résultats similaires ont été observés avec du lierre, une réduction de température allant de 0,0 à 12,3°C (en moyenne 3,7°C). En revanche, l'effet de réduction de température était moins prononcé pour de la végétalisation à base de renouée, celle-ci présentait des valeurs allant de -0,8 à 6,6°C (en moyenne 2,4°C). La température du mur intérieur d'une des façades végétalisées atteignait une valeur maximale de 27,5°C, tandis que celle du mur nu était de 28,8°C au maximum.

Une autre étude importante réalisée par (Mazzali et al., 2013) en Italie a démontré des différences encore plus marquées. Les mesures qu'ils ont effectuées sur trois murs vivants ont révélé des écarts

de température allant jusqu'à 20 °C entre les murs végétalisés et les murs non végétalisés. Ces résultats remarquables soulignent l'efficacité des façades vertes dans la régulation thermique des bâtiments.

Dans la revue publiée par (Besir & Cuce, 2018) concernant les façades vertes, les auteurs ont pu observer à travers différentes études menées dans le monde, que selon l'épaisseur du feuillage, la température de surface externe d'une façade végétalisée diminue dans une plage de 3,7 à 11,3°C en moyenne. Ils ont également pu démontrer que la différence de température entre un mur vivant et un mur nu était de l'ordre de 1 à 31,9 °C selon les études. Ces réductions de température de surfaces permettraient de diminuer de 0,4 kWh/°C réduit les besoins d'énergie thermique du bâtiment. Les auteurs de cette revue ont également mis en avant le potentiel de captation du CO₂. En effet, selon eux, un système de végétalisation vertical de 98m² permettrait de capturer 13,41 à 97,03 kg de CO₂ par mètre carré grâce à la photosynthèse. Pour finir les auteurs de cette revue mentionnent que, toujours selon les études effectuées, les systèmes de végétalisation du bâtiment peuvent fournir une économie d'énergie d'environ 215 \$/an selon les conditions régionales et climatiques.

En conclusion, les recherches menées sur les systèmes de végétalisation des façades révèlent les nombreux avantages pour améliorer le confort thermique des bâtiments. Les études ont montré que les façades vertes peuvent réduire de manière significative les températures de surface, avec des écarts allant de 1°C à presque 32°C par rapport aux murs non végétalisés. Grâce à leur capacité à intercepter le rayonnement solaire, à créer un microclimat plus frais, ces systèmes contribuent à la régulation thermique des bâtiments et peuvent offrir des économies d'énergie importantes.

1.3.2 Impact sur les îlots de chaleur urbains

Le réchauffement climatique a entraîné une augmentation du taux de mortalité lié à la chaleur urbaine, soulignant l'importance de trouver des solutions pour réduire les températures dans les villes. Des études récentes se sont penchées sur l'effet de la végétation pour atténuer les températures urbaines et ont fourni des résultats intéressants. Par exemple, à New York, il a été démontré (Susca et al., 2022) qu'une diminution de température d'un demi degré dans les îlots de chaleur urbains permettrait de sauver la vie de 45 personnes par an.

Une étude menée par (Gromke et al., 2015) a examiné l'effet de l'évapotranspiration des plantes en tant que mesure d'atténuation des températures extérieures. Les chercheurs ont effectué des simulations de dynamique des fluides computationnelle dans un canyon de rue situé dans le centre-ville d'Arnhem aux Pays-Bas, lors d'une vague de chaleur. Différentes dispositions de végétalisation ont été évaluées, notamment la plantation d'arbres le long d'un canyon de rue, la végétalisation des façades et des toits, ainsi qu'une combinaison de ces éléments. Les résultats ont montré que les arbres avaient un effet refroidissant plus élevé réduisant la température au niveau des piétons de 0,43 °C à 1,6 °C. La végétalisation des façades a entraîné des changements relativement faibles, avec des réductions moyennes et maximales de 0,04 °C et 0,3 °C, tandis que la végétalisation des toits n'a pas produit de réduction notable de la température à l'intérieur du canyon. Cependant, la combinaison de toutes les mesures de végétalisation a entraîné une réduction moyenne de la température de 0,52 °C et une réduction maximale de 2,0 °C, démontrant ainsi l'intérêt de combiner plusieurs systèmes de végétalisation pour lutter contre les îlots de chaleur en ville.

Dans une revue systématique réalisée par (Susca et al., 2022) les effets des murs végétalisés sur les îlots de chaleur urbains ont été étudiés. Les résultats ont montré que la végétalisation des murs avait peu d'effet sur l'atténuation des températures de l'air ambiant dans la plupart des zones climatiques étudiées, à l'exception des climats chauds et secs ainsi que pour un climat équatorial humide. Une diminution la température de l'air de 0,1 °C a été constatée dans un climat équatorial humide. En

revanche, dans les climats arides, c'est une réduction d'environ 5 °C qui a été observée proche de la végétation. Les résultats de cette revue systématique suggèrent que des installations à grande échelle, telles que la végétalisation maximisée des façades de plusieurs bâtiments adjacents, pourraient permettre une réduction de 8 °C de la température de l'air dans un canyon de rue.

Une autre étude menée par (Wong et al., 2010) en Chine, a examiné l'effet de 8 systèmes différents de végétalisation verticale sur la température extérieure. Les chercheurs ont observé une baisse de la température de l'air allant jusqu'à 3,33 °C à partir d'une distance de 0,15 m d'un système de végétalisation verticale. Ces résultats prometteurs suggèrent que l'utilisation de la végétalisation de façade peut contribuer à rafraîchir la température ambiante dans les espaces urbains denses. De plus, une température ambiante plus basse permet de réduire la demande en climatisation, ce qui se traduit par des économies d'énergie.

En résumé, les études récentes sur l'effet de la végétation pour atténuer les températures urbaines démontrent l'importance de trouver des solutions pour réduire les effets néfastes des îlots de chaleur urbains. Les résultats mettent en évidence le potentiel significatif de la végétalisation des espaces urbains pour améliorer le confort thermique des citoyens et réaliser des économies d'énergie. Les résultats concernant la végétalisation des façades démontrent des réductions de la température de l'air de 0 à 5°C selon les conditions. Ces recherches soulignent l'importance combiner différentes mesures de végétalisation, telle que la plantation d'arbres, la végétalisation de façade et de toiture pour obtenir des résultats plus significatifs.

1.3.3 Simulations de l'impact des façades végétalisées

Un grand nombre d'études se sont penchées sur les performances de refroidissement des façades vertes. Cependant, leur utilisation reste limitée en raison du manque de méthodes de simulation précises et abordables. Les architectes et ingénieurs se retrouvent face à des difficultés pour intégrer la végétalisation de bâtiment aux logiciels de simulation usuels évaluant la consommation énergétique de ceux-ci.

Pour remédier à cette situation, (Zhang et al., 2022) ont développé un modèle de transfert de chaleur dynamique et spécifique aux façades vertes, en se basant sur la loi de Beer-Lambert et l'équation de Penman-Monteith. Ce modèle utilise le programme de simulation énergétique des bâtiments open source EnergyPlus™. Les auteurs de l'étude ont réalisé des simulations dans quatre villes chinoises durant des étés et des hivers chauds. Ils ont analysé les effets d'une façade verte sur la demande de refroidissement d'un bâtiment administratif. Les résultats obtenus ont démontré qu'une façade verte permettait de réduire la demande de refroidissement d'une pièce de l'immeuble de 11,7 % à 18,4 %. En comparaison, l'amélioration de l'isolation des murs n'a entraîné qu'une réduction de la demande de refroidissement de la pièce allant de 0,3 % à 8,4 %. De plus, les pièces équipées à la fois d'une façade végétalisée et de murs bien isolés ont affiché des économies de demande de refroidissement variant de 6,6 % à 15,8 %.

Une étude menée en Allemagne par (Alsaad et al., 2022), examine l'impact du verdissement de façades à grande échelle. Cette étude évalue le potentiel des murs vivants dans l'amélioration du climat de l'environnement urbain. Pour atteindre cet objectif, des simulations numériques à l'aide du logiciel ENVI-met ont été réalisées. Ce logiciel permet de modéliser le microclimat urbain en utilisant des modèles basés sur les principes fondamentaux de la thermodynamique, de la dynamique des fluides ainsi que de la physique atmosphérique. Ces simulations ont été réalisées dans le but d'analyser la répartition de la température ambiante, la température moyenne radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent dans un quartier résidentiel situé à Stuttgart. Pour mener cette étude, deux modèles

distincts ont été développés : l'un intégrant une végétalisation massive des façades et l'autre sans aucune végétation. Le modèle "sans végétalisation" représentait le scénario de référence, reflétant ainsi l'état actuel du site. Quant au modèle "avec végétalisation", des murs vivants ont été ajoutés sur trois côtés des bâtiments, laissant uniquement le mur nord-est sans aucune végétation.

Les résultats obtenus ont pu démontrer l'impact positif du verdissement de façade sur le climat du quartier et un léger effet sur le pâti de maison avoisinant le bloc étudié a pu être observé. L'impact mesuré sur la réduction de température de l'air ambiant entre les bâtiments s'élève à 0,57 °C. En revanche, les murs vivants ont permis de réduire la température de surface des bâtiments de 3,04 °C en moyenne. Les auteurs ont expliqué que ces réductions de températures sont en partie issues de l'évapotranspiration des plantes mais que le mécanisme prépondérant était l'ombrage induit par le feuillage. La réduction de la température des murs extérieurs a permis d'obtenir une réduction de la température des murs intérieurs de l'autre côté et ainsi obtenir une diminution de la température de l'air à l'intérieur des bâtiments de 3,77°C.

Une étude menée par (Shafiee et al., 2020) a été réalisée à Shiraz, en Iran, dans un climat chaud et semi-aride. L'objectif principal de cette recherche était d'examiner l'impact d'un système de mur vivant sur la température de l'air ambiant et son effet sur la réduction des variations de température entre le jour et la nuit. Pour confirmer les résultats, les auteurs ont eu recours à la simulation informatique utilisant le programme ENVI-met. Les résultats de la simulation indiquent que le système de mur vivant peut réduire la température de l'air ambiant jusqu'à 8,7 °C à proximité immédiate du mur. De plus, cela a réduit les fluctuations de température en diminuant les températures maximales et en augmentant les températures minimales de l'air ambiant. Pendant les heures d'ensoleillement, la température a chuté en moyenne de 2,59 °C entre 8h et 18h grâce à l'augmentation d'humidité dans l'air.

Une autre étude menée aux Pays-Bas par (Stec et al., 2005) vise à définir les performances thermiques d'une façade double peau végétalisée en utilisant un modèle de simulation. Cette étude se caractérise par l'utilisation de plantes dans la cavité de la paroi double peau afin de dissiper le rayonnement solaire contre la façade du bâtiment. L'objectif principal était donc de comparer l'effet de différents systèmes d'ombrage sur le comportement de la façade. Le modèle de simulation a été réalisé sur Simulink™ et intègre divers paramètres tels que le rayonnement solaire tombant sur la façade, la température ambiante, la température des parois, les coefficients d'absorption, de convection, de conduction et de rayonnement ainsi que la chaleur latente expulsée par les feuilles grâce à l'évapotranspiration. Concernant les nombreuses équations implémentées dans le modèle de simulation, l'équation de l'évapotranspiration de Penman-Monteith a démontré plus de précision que d'autres méthodes.

L'étude a pu donner lieu aux résultats suivants : en utilisant des plantes dans une façade double peau, plusieurs avantages ont été observés par rapport à l'utilisation de stores. Tout d'abord, la température de surface de la façade était généralement beaucoup plus basse avec des plantes qu'avec des stores. La température des plantes ne dépassait jamais 35°C, tandis que celle des stores pouvait dépasser 55°C. De plus, l'élévation de température des plantes était environ deux fois plus faible que celle des stores pour le même rayonnement solaire et cela grâce aux propriétés rafraichissantes des plantes. Les résultats ont démontré que l'utilisation de plantes dans la paroi a permis de réduire de 20% la puissance nécessaire au refroidissement du bâtiment, ce qui a permis de réduire la consommation d'énergie.

En somme, les diverses études présentées ici ont démontré l'utilisation de divers logiciels tels qu'ENVI-met, EnergyPlus et Simulink pour quantifier le confort extérieur ainsi que de démontrer les effets rafraîchissant des façades. Cependant, ces programmes se distinguent pour l'étude du climat urbain ou pour le calcul énergétique des bâtiments mais ne permettent pas de mettre les deux en corrélation. C'est pourquoi le logiciel CitySim est utilisé dans cette étude.

1.3.4 Application du logiciel CitySim

Le logiciel CitySim est un outil de modélisation et de simulation utilisé dans le domaine de la planification urbaine et de l'analyse énergétique des bâtiments. Il permet de simuler le comportement énergétique et climatique d'un quartier ou d'une ville en prenant en compte divers paramètres, tels que la géométrie urbaine, les caractéristiques des bâtiments et les conditions météorologiques. Grâce à CitySim, il est possible de prédire et d'évaluer le climat d'un quartier ou d'une ville, de comparer l'efficacité de différentes stratégies de conception urbaine et de rénovation énergétique ainsi que d'évaluer différentes mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains. En revanche, aucun article n'existe sur l'impact des façades vertes sur la thermique du bâtiment ou sur la réduction d'îlots de chaleur urbain grâce à la végétalisation de façade. En effet, aucune étude sur le sujet n'a pu être réalisée grâce au logiciel car celui-ci ne permet pas encore de modéliser les façades vertes. En revanche, l'intégration de végétation en toiture est possible.

La thèse de doctorat de (Silvia Coccolo, 2017) a permis de développer de nouveaux modules pour évaluer le confort thermique et ainsi ajouter de nouvelles fonctionnalités à CitySim. En effet, l'objectif de sa thèse était de « *traiter des flux d'énergie dans l'environnement urbain* » en mettant l'accent sur l'amélioration de la demande énergétique des bâtiments et le confort humain en extérieur. Pour atteindre cet objectif, S.Coccolo a cherché à établir un lien entre la biométéorologie et l'architecture. Sa thèse introduit trois nouveaux modules dans le logiciel CitySim Pro. Le premier module se concentre sur l'évaluation du confort humain en extérieur en utilisant divers indices de confort. Le deuxième module vise à comprendre l'environnement radiatif en calculant la température moyenne radiante (MRT). Le troisième module se concentre sur le potentiel de refroidissement de la végétation et évalue l'ombrage et l'évapotranspiration fournis par la verdure. Grâce à ces modules, il devient possible de simuler et de quantifier l'effet de la végétation sur le confort thermique en extérieur. Cela permet d'évaluer comment la présence de végétation peut influencer les températures ressenties par les piétons, en prenant en compte diverses caractéristiques propre à la végétation.

Par la suite, divers travaux ont été réalisés avec ce logiciel pour étudier les îlots de chaleur urbains de manière globale comme il a notamment été le cas dans le travail de (Vonlanthen et al., 2021). Cette étude, réalisée grâce au logiciel CitySim a permis d'analyser les zones fortement sujettes aux îlots de chaleur dans la Ville de Fribourg. Les auteurs ont évalué plusieurs paramètres tels que l'albédo des surfaces ainsi que la végétation urbaine dans le quartier de la Gare à l'horizon 2050 par rapport à un scénario de référence. Une version de végétalisation généralisée des toits a été simulée pour évaluer son potentiel dans le contexte du changement climatique. Ils ont pu observer que l'optimisation de l'albédo et de la végétalisation dans le quartier de la Gare permet de neutraliser les effets du changement climatique jusqu'en 2050. Les surfaces minérales exposées au soleil peuvent atteindre des températures élevées, tandis que les surfaces végétalisées et ombragées restent plus fraîches. Les auteurs de cette étude ont également constaté que les places végétalisées ou avec des éléments d'eau offrent des températures inférieures à la moyenne annuelle, notamment en cas de fortes chaleurs. Ainsi, la végétation peut réduire les températures de surface de plusieurs dizaines de degrés par rapport aux zones minérales de même orientation.

En conclusion, plusieurs travaux ont pu démontrer l'efficacité du logiciel CitySim dans l'étude de la planification urbaine et l'analyse des performances énergétiques des bâtiments. Grâce aux modules développés par (Coccolo, 2017), CitySim permet désormais de simuler et de quantifier l'effet de la végétation sur le confort thermique en extérieur, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour évaluer l'impact des façades vertes. La nouveauté dans ce travail sera l'utilisation de CitySim pour étudier l'impact de la végétalisation de façade sur le climat extérieur mais aussi sur la thermique du bâtiment, ce qui n'a jamais été fait avec ce logiciel.

1.3.5 Travaux de Bachelor antérieurs

Ce travail de Bachelor quantifiant l'impact de la végétation de façade est le quatrième à être réalisé au sein de la Haute Ecole d'Ingénierie HES-SO Valais/Wallis. Afin de mettre en évidence les caractéristiques uniques de chaque travail et de proposer de nouvelles perspectives, les travaux de Bachelor antérieurs ont été résumés et analysés.

1.3.5.1 *Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel*

Le premier travail réalisé sur le sujet a été effectué par (Alexandre Tran Quoc Hung, 2020). Son travail a permis de démontrer l'impact de la végétalisation d'un bâtiment sur le bilan thermique annuel de celui-ci ainsi que sur le confort thermique. Alexandre a démontré les effets bénéfiques de la végétalisation en quantifiant l'évapotranspiration des plantes. Il a également pu mettre en évidence l'impact de l'inertie thermique sur les résultats obtenus grâce à la modélisation d'un bâtiment d'habitat collectif situé à Viège. Après avoir défini les équations permettant de calculer l'évapotranspiration des plantes, soit celle développée par (Turc, 1961), Alexandre a utilisé le logiciel bSol pour évaluer l'impact des plantes en façade sur le bilan thermique du bâtiment. Il explique dans son rapport que l'évapotranspiration permet de réduire la température environnante et impacter la température du mur sur lequel elles poussent. La réduction de la température de l'air induite par l'évapotranspiration qu'il a calculée a été implémentée dans le logiciel bSol en diminuant la température de l'air des fichiers climatiques proportionnellement à la réduction de température calculée.

Les résultats qu'il a obtenus ont pu montrer que dans la situation la plus favorable, une économie d'énergie de 1,1% a pu être réalisée grâce à la végétalisation de façade. Il a également démontré que selon les scénarios de simulation, le bâtiment avec végétation permet un abaissement de température intérieure de 2,5°C.

Plusieurs limites ont été observées concernant les outils utilisés et la méthode appliquée lors de cette étude. En effet, étant donné que le logiciel bSol ne permet pas de modifier la température de surface d'une paroi spécifique, l'impact de la diminution de la température par l'évapotranspiration a été implanté en modifiant les données du fichier climatique. Ce qui a pour conséquence de simuler le bâtiment comme si la totalité de ses parois et sa toiture étaient végétalisées. Ce qui n'est pas représentatif du cas qu'il a étudié ni de la réalité. De plus, cette méthode ne permet pas d'observer l'impact d'autres mécanismes que l'évapotranspiration. L'impact sur l'isolation, l'ombrage et le blocage du vent n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

1.3.5.2 *Case Studie IVECT*

Dans le second travail de Bachelor réalisé par (Tarik Merz, 2021), l'objectif principal était aussi de définir l'impact de la végétalisation sur le bâtiment. Le bilan évaporatif des plantes, son impact sur le confort thermique ainsi que sur la consommation énergétique ont été évalués. Dans ce travail, c'est l'équation de Penman-Monteith qui a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration. Cette équation est plus précise que celle utilisée dans le travail de (Quoc Hung, 2020). En effet, l'équation développée par

(Turc, 1961) effectue de nombreuses simplifications du modèle de calcul et nécessite moins de paramètres d'entrée. Le calcul de l'évapotranspiration via l'équation de Penman-Monteith est relativement complexe, Tarik a ainsi effectué diverses hypothèses, notamment sur certains coefficients de l'équation engendrant quelques imprécisions dans le modèle, ce qui a certainement impacté les résultats de son étude. Dans la suite de son travail, Tarik a modélisé le même bâtiment qu'Alexandre sur bSol en utilisant la même méthode de réduction de la température de l'air. Le travail de Tarik a permis de mettre en évidence un mécanisme intéressant : lors de la végétalisation de façade, il est souvent observé qu'un impact négatif sur la consommation d'énergie lié au chauffage du bâtiment survient en hiver. Effectivement, le feuillage semble empêcher les gains solaires contre les parois et ainsi augmenter les besoins de chauffage. Il a pu démontrer que cet effet pouvait être évité en utilisant des plantes caduques. Pour finir, Tarik a obtenu les résultats suivants : les températures de surface du bâtiment peuvent être abaissées jusqu'à 8,7°C et les températures intérieures jusqu'à 3,4°C. Globalement ce travail est similaire au précédent. La seule différence majeure observée est l'utilisation de l'équation développée par Penman-Monteith à la place de celle développée par (Turc, 1961) pour quantifier l'évapotranspiration. Les problèmes observés dans l'étude de (Quoc Hung, 2020) quant à l'utilisation du logiciel bSol ainsi que ses limites persistent dans ce travail.

1.3.5.3 Etude de simulation énergétique d'un bâtiment avec une enveloppe végétalisée

Le troisième travail a été réalisé par (Niels Rod, 2022). Dans son travail, Niels a quantifié les performances de refroidissement des plantes en étudiant la réduction de température dans le bâtiment et les consommations de climatisation. Son travail s'est basé sur deux paramètres : l'évapotranspiration des plantes ainsi que les mécanismes d'ombrages, notamment des surfaces vitrées. L'impact de la végétalisation selon ces deux paramètres a été observé via la modélisation d'un cas d'étude. En effet, un bâtiment possédant une faible inertie thermique a été simulé grâce au logiciel bSol. Les paramètres d'influence ont été étudiés séparément afin de pouvoir évaluer l'influence de chacun sur les résultats.

Niels a pu obtenir les résultats suivants. Avec une végétalisation de l'ensemble des façades, une réduction des heures de climatisation de 9,8% a été observée, ce qui correspond à une diminution de 11,9% de la consommation énergétique du bâtiment. Il a également observé une baisse moyenne annuelle de la température intérieure de 0,24°C. Dans la suite de son travail, Niels a comparé deux situations. L'une consistait à étudier le bilan thermique du bâtiment en l'état et sans protection solaire. L'autre consistait à simuler les performances énergétiques du même bâtiment mais cette fois-ci en y ajoutant de la végétalisation sur toutes les orientations y compris sur les fenêtres. Cette étude a permis d'obtenir les résultats suivants : la température intérieure du bâtiment a diminué de 1,4°C. Grâce à cela, les heures de climatisation ont pu être diminuées de 63,2% et abaisser la consommation globale d'énergie de 76,1%.

Ayant remarqué lors de son travail que le logiciel bSol comportait certain manquement pour intégrer tous les paramètres liés à son étude, Niels a développé un outil supplémentaire pour étudier la réduction potentielle de climatisation liée à la végétalisation grâce à un algorithme Matlab. En effet, bSol effectue le bilan thermique d'un bâtiment en utilisant comme paramètre la température de l'air extérieur sans prendre en compte la température de surface des parois. L'algorithme utilisé dans bSol a donc été recalculé sur Matlab permettant ainsi d'intégrer plus de paramètres d'influence.

Ce travail a permis d'étudier un mécanisme supplémentaire que dans les autres travaux réalisés précédemment, soit l'ombrage fourni par les plantes. Cependant, il est clair que l'utilisation d'ombrages de fenêtres à base de végétation fixe présente peu d'avantages par rapport aux

protections solaires standards. Les problèmes liés à l'éclairage, à la ventilation, au confort et à l'entretien rendent cette approche peu pratique et inefficace. Il est donc recommandé de privilégier des solutions plus adaptées, telles que les protections solaires standard, qui offrent un meilleur contrôle de l'environnement intérieur tout en favorisant l'efficacité énergétique et le confort des occupants.

1.4 MÉTHODOLOGIE

L'état de l'art précédemment réalisé a conduit à l'élaboration d'une méthodologie appropriée aux objectifs spécifiques de cette recherche. La méthode présentée ci-dessous permettra d'étudier de manière approfondie l'impact des façades végétales conformément aux exigences formulées dans le cahier des charges. Cette étude sera réalisée à l'aide de simulation et sera menée à l'échelle d'un bâtiment ainsi que du quartier environnant, le tout en utilisant le logiciel CitySim.

1. Étude de cas d'une situation spécifique :
 - Réaliser une étude de cas sur la pépinière de Zürich, en prenant en compte des caractéristiques telles que le climat, l'emplacement du bâtiment et la composition du quartier. Le cas d'étude est fourni par le mandataire du travail, il n'y a donc pas de choix possible.
 - a. Récolter toutes les données relatives au site d'étude et qui seront nécessaire à son analyse.
 - b. Modéliser le cas d'étude en 3D afin d'avoir un modèle compatible avec le logiciel CitySim.
2. Simulation du bâtiment avec CitySim :
 - a. Utiliser le logiciel CitySim pour simuler l'impact des façades vertes sur le bâtiment du cas d'étude
 - b. Définir les paramètres d'influence concernant les divers mécanismes d'action des plantes agissant sur la thermique du bâtiment.
 - c. Analyser les résultats des simulations pour évaluer l'impact de ces paramètres sur les consommations énergétiques du bâtiment et les émissions de CO₂ y relatives.
 - d. Comparer les résultats entre les simulations sans façades vertes et avec façades vertes en utilisant les indicateurs clés préalablement définis.
3. Simulation du quartier avec CitySim :
 - a. Collaborer avec les développeurs du logiciel CitySim pour définir les paramètres et les données pertinentes pour la simulation de la pépinière.
 - b. Utiliser le logiciel CitySim pour simuler le quartier en prenant en compte les caractéristiques spécifiques, telles que la densité des bâtiments, l'aménagement du paysage et les compositions.
 - c. Analyser les résultats des simulations et les comparer avec des mesures prise sur site afin d'évaluer le modèle simulé.

2 DÉFINITION DES FAÇADES VERTES

2.1 HISTORIQUE

La végétalisation des bâtiments remonte bien avant l'époque de l'architecture moderne. Environ 10'000 ans avant J.-C., les peuples néolithiques utilisaient déjà des matériaux tels que des mottes de terre, des graminées, de la tourbe et des mousses pour recouvrir leurs maisons dans le but de les isoler thermiquement et d'y assurer une certaine étanchéité.

Au cours de l'histoire, différentes cultures ont adopté des structures végétales verticales dans leur architecture. En Europe par exemple, des jardins suspendus étaient présents dans les monastères médiévaux. Les moines utilisaient des structures verticales en bois ou en pierre pour créer des espaces verts. Ces jardins fournissaient des herbes aromatiques et des plantes médicinales aux occupants.



Figure 2: Jardins suspendus médiévaux
Source : Secretdejardins.fr

Cependant, c'est durant le mouvement moderniste du 20^e siècle que la végétalisation des façades et des toitures a connu un regain d'intérêt. Des architectes tels que Le Corbusier et Frank Lloyd Wright ont exploré l'idée d'intégrer la nature dans l'architecture pour améliorer la qualité de vie des occupants et réduire l'impact environnemental des bâtiments.

Au fil des décennies, la végétalisation des façades et des toitures est devenue une pratique de plus en plus répandue. Les avantages environnementaux et principalement esthétiques de ces approches ont été largement reconnus. Selon (Besir & Cuce, 2018) : « *Les façades végétalisées ont joué un rôle clé dans le développement de l'écologie des villes au début des années 1980. La majorité des travaux pionniers menés sur les toitures végétalisées ont été observés en Allemagne. A cet égard, le premier programme d'envergure a été mis en pratique dès le début du XXe siècle en rééquipant les maisons de surfaces végétalisées. Entre les années 1980 et la fin des années 1990, environ 246'000 m² de végétation verte ont été intégrés aux façades des immeubles situés à Berlin.* »

Aujourd'hui la végétalisation de bâtiment est une solution pour la conception de villes durables. Cette pratique est en majorité appliquée dans un but d'esthétisme et d'harmonie des milieux urbains avec la nature. Cependant ce procédé prend également une autre tournure grâce à de nombreux chercheurs qui étudient l'impact de ces systèmes et mettent en avant les différents bénéfices que cela apporte.

2.2 SYSTÈMES DE VERDURE VERTICAUX

Comme énoncé précédemment, il existe deux systèmes de végétalisation de bâtiment : les toits verts et les façades vertes.

Les toits verts, également appelés toits végétalisés ou toits-jardins, consistent à recouvrir tout ou une partie du toit d'un bâtiment avec des plantes. Les toits verts offrent de nombreux avantages, notamment en terme l'isolation thermique. Ils jouent également un rôle dans la réduction de l'effet

d'îlot de chaleur urbain en limitant l'absorption du rayonnement solaire. Les toitures végétales améliorent aussi la rétention des eaux pluviales ainsi que de la qualité de l'air.

Les façades vertes, également appelées murs végétaux ou murs verts, sont des installations verticales de plantes qui sont fixées aux façades des bâtiments. Les plantes peuvent être cultivées dans des bacs au sol ou dans un système de plantation intégré contre la paroi. Les façades vertes peuvent être installées sur des surfaces verticales de divers matériaux, tels que le béton, le métal ou le verre. Elles offrent des avantages similaires aux toits verts, notamment en termes d'isolation thermique et de réduction de la pollution de l'air en plus de créer un environnement esthétiquement agréable.

La principale différence entre les toits verts et les façades vertes réside dans leur composition et leur emplacement sur le bâtiment. Les deux techniques contribuent à l'intégration de la nature dans les environnements urbains avec toutefois quelques divergences concernant l'impact de celle-ci sur le microclimat autour du bâtiment en question. Les façades vertes sont réputées pour avoir plus d'impact que les toits verts sur le confort thermique au niveau des piétons circulant sur la chaussée.

Dans ce travail il sera question d'étudier uniquement les façades vertes. En effet, comme déjà expliqué dans l'introduction de ce rapport, les façades des bâtiments constituent des surfaces verticales importantes souvent peu utilisées. Contrairement aux toits, qui ont des formes variées et qui peuvent être difficiles d'accès en raison de leur hauteur, les façades offrent une surface plane et accessible pour l'installation de systèmes de végétalisation. Il existe de nombreuses typologies de façades végétales adaptables à différentes architectures.

On distingue généralement deux types de façades végétalisées : les façades vertes et les murs vivants. La principale différence entre les façades vertes et les murs vivants réside dans la disposition des plantes. Les façades vertes utilisent des plantes grimpantes enracinées au sol ou dans des bacs et poussant contre la façade. Certains de ces systèmes utilisent parfois un treillis fixé aux murs sur lesquels les plantes prennent appui pour pousser en hauteur le long du mur. Les murs vivants sont composés de modules de substrat fixés contre la façade ou directement intégrés dans la structure murale. Il s'agit généralement de plantes préalablement cultivées et poussant à l'horizontale.



Figure 3: A gauche une façade verte, les plantes s'enracinent au sol et grimpent sur la façade et couvrent l'élévation. À droite mur vivant, feuilles pré-végétalisées qui sont fixées à un mur porteur ou à un cadre.

Source : (Besir & Cuze, 2018)

Les façades végétalisées peuvent également être classées en différentes sous catégories en fonction de leurs caractéristiques de construction, comme présenté sur la Figure 4.

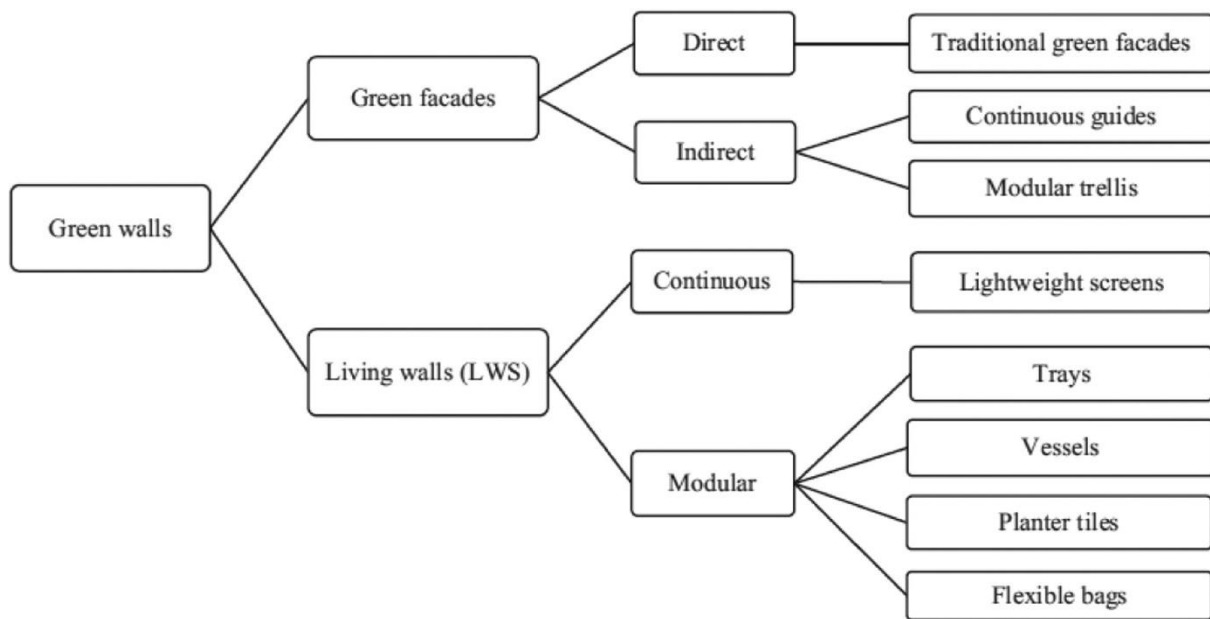


Figure 4: Classification des façades végétalisées
 Source : (Besir & Cuce, 2018)

Selon (Besir & Cuce, 2018), les façades vertes peuvent être classées en deux catégories principales : les façades directe et indirecte. Dans les façades directes on retrouve les façades recouvertes de végétation sans ajout de support, comme on le voit avec le lierre grimpant (1) sur la Figure 5. Dans cette configuration, les plantes utilisent le mur comme support tandis que la culture est enracinée au sol. Dans la catégorie des façades indirectes, on retrouve les façades à double peau ainsi que celles disposant d'un support en treillis comme c'est le cas sur le mur (2) de la Figure 5. Ainsi cette typologie de façade implique que la végétation n'est pas apposée directement contre le mur ce qui permet de créer une cavité d'air plus ou moins importante entre le mur et le couvert végétal.

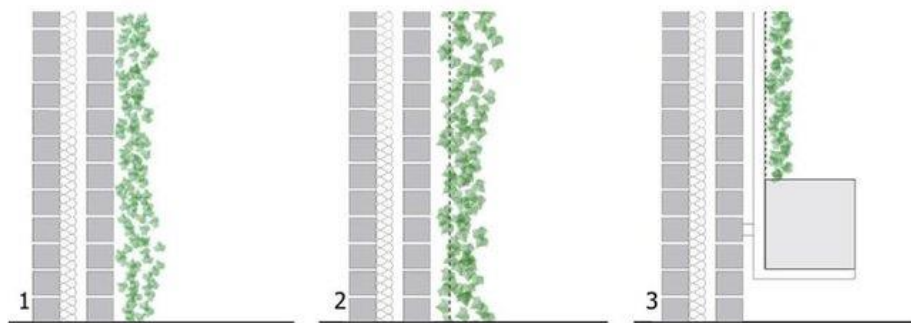


Figure 5: Différents systèmes de façades végétalisées, (1) Façade verte directe et enracinée dans le sol ; (2) Façade verte indirecte et enracinée au sol ; (3) Façade verte indirecte avec conteneurs
 Source : (Małyszko & Laska, 2019)

Les murs vivants peuvent être classés en deux catégories : continu et modulaire. Un mur vivant continu est une structure où les modules de plantation sont apposés sur toute la surface du mur sans interruption. Les modules peuvent être constitués de poches ou de panneaux spéciaux contenant du substrat de culture. Les racines des plantes se développent à travers ces modules créant ainsi une couverture végétale continue et uniforme sur le mur.

Un mur vivant modulaire est constitué de modules distincts qui sont fixés individuellement au mur, créant ainsi des sections de végétation séparées. Chaque module comprend généralement un conteneur de plantation indépendant dans lequel les plantes sont cultivées. Les modules peuvent être préfabriqués ou assemblés sur place, ce qui offre une plus grande flexibilité dans la conception et la mise en œuvre.

L'avantage principal des murs vivants est qu'ils ont la capacité de rapidement recouvrir une surface à végétaliser à l'inverse des façades vertes qui mettent parfois plusieurs années avant que les plantes aient suffisamment poussé pour recouvrir le mur. En revanche, les systèmes de murs vivants sont relativement coûteux et nécessitent du matériel supplémentaire pour réaliser la structure dans laquelle poussent les plantes.



Figure 6: Différentes typologies de façades végétalisées. (1) Façade verte indirecte sur treillis ; (2) Façade verte directe avec lierre ; (3) Mur vivant continu ; (4) Mur vivant modulaire.

Source : www.archzine.fr

En résumé, il existe de nombreuses typologies de façades végétalisées comportant chacune leurs avantages et inconvénients. L'enjeu dans la réalisation de ce type d'infrastructure est donc de choisir le système de verdure vertical le plus adapté à chaque projet et aux objectifs de celui-ci.

La durée de vie des systèmes de verdure verticaux est très variable et dépendent entièrement de leur nécessité d'entretien. Selon (Vandersmissen, 2021), certaines façades directes, composées de lierre, peuvent vivre jusqu'à 100 ans. A contrario, les systèmes poussant en bac peuvent mourir en l'espace de quelques semaines face à une manque d'irrigation et de nutriment.

2.2.1 Irrigation

Les systèmes de murs vivants nécessitent généralement un système d'irrigation plus complexe que les façades vertes. En effet, étant donné que le substrat vertical est apposé à la paroi, le volume de terre est limité et ainsi la capacité de rétention d'eau en est fortement diminuée. De plus, sous l'effet de la gravité, l'eau s'écoule vers le bas et n'est pas répartie de manière homogène dans la façade. Les plantes disposées sur le haut du mur sont d'avantage exposées à la sécheresse que les plantes disposées en bas de façade. L'irrigation est un des inconvénient majeur des façades végétalisées. Pour les façades vertes simplement plantées dans le sol un système d'irrigation n'est pas forcément nécessaire car celle-ci peuvent puiser l'eau contenue dans le terrain. En revanche comme décrit pour les murs vivants ou les façades dont les plantes poussent dans des bacs, un système d'irrigation nécessaire à la survie des plantes. Cette nécessité en fait une solution parfois peu économique ni des plus écologiques. L'irrigation joue donc un rôle important dans l'impact environnemental des façades végétalisées.

Dans son travail de Master (Vandersmissen, 2021) met en avant une solution plus écologique pour minimiser la demande en eau potable des murs vivants : *« La méthode la plus simple est de valoriser l'eau de pluie. Celle-ci peut être récupérée et réutilisée lors de périodes sèches. Si cela est possible, un réservoir d'eau de pluie peut être installé sur la toiture et l'irrigation peut être commandée, manuellement ou automatiquement en fonction des conditions météorologiques ou de la teneur en eau du substrat, à distance via l'ouverture d'une électrovanne. L'eau peut ensuite rejoindre les jardinières par écoulement gravitaire ».*

2.2.2 Variétés de plantes

Les variétés de plantes utilisées dans les façades végétalisées dépendent de plusieurs paramètres. Pour assurer les performances souhaitées, il est nécessaire de choisir des plantes adaptées aux conditions environnementales locales, s'assurer qu'elles supporteront l'exposition au soleil et leur garantir une disponibilité de l'eau suffisante.

Les plantes grimpantes sont les types le plus souvent utilisés pour couvrir les façades. Parmi les variétés couramment utilisées, on trouve la vigne vierge, le lierre, le jasmin étoilé, la clématite et le chèvrefeuille.

D'autres variétés comme les plantes vivaces sont également utilisées, notamment dans la création de murs vivants. On retrouve des plantes telles que la fougère, l'herbe de la pampa, les bégonias, le philodendron et bien d'autres. Les plantes à feuillage persistant sont parfois utilisées pour leur capacité à maintenir un aspect verdoyant toute l'année. En plus de cela, les plantes succulentes sont également utilisées pour leur adaptation aux environnements secs et peuvent être utilisées là où les conditions de croissance sont plus difficiles. Cependant, ce sont généralement les plantes rampantes qui sont le plus couramment utilisées pour couvrir de larges surfaces de façon dense et uniforme.

On constate donc que de nombreuses variétés de plantes conviennent à la réalisation de façades végétalisées. Les choix des plantes varient en fonction du climat local et des préférences en matière d'esthétisme et d'entretien. Il est recommandé de consulter des personnes compétentes en la matière pour choisir les variétés les plus adaptées à chaque projet.

3 ASPECTS THÉORIQUES

3.1 BILAN THERMIQUE D'UN BÂTIMENT

Le bilan thermique d'un bâtiment permet d'évaluer les performances de celui-ci en matière de consommations d'énergie thermique. Ce type d'analyse est essentielle pour déterminer les besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment en calculant les échanges de chaleur qui se produisent entre l'intérieur et l'extérieur de celui-ci. Afin de déterminer ces besoins, plusieurs aspects sont à prendre en compte tels que l'isolation des murs, du toit, des fenêtres et des portes ainsi que l'étanchéité à l'air du bâtiment. Dans les calculs d'un bilan thermique, les apports de chaleur sont également pris en compte. On quantifie ainsi les gains solaires, les apports liés aux occupants et le dégagement de chaleur des appareils électroniques. L'objectif est ainsi de définir les besoins énergétiques pour le conditionnement du bâtiment en quantifiant les pertes et les gains de chaleur durant une période donnée. L'évaluation du bilan thermique permet d'identifier les zones où l'isolation est insuffisante ainsi que les ponts thermiques. Ces vulnérabilités peuvent entraîner une consommation excessive d'énergie pour compenser les pertes de chaleur. Finalement, c'est également grâce à ce type de bilan qu'il est possible d'établir des mesures adaptées pour lutter contre les surchauffes estivales.

Le bilan thermique peut être réalisé à l'aide de simulations informatiques ou de mesures sur site. Les résultats sont utilisés pour dimensionner les installations de chauffage et de refroidissement, effectuer des améliorations sur l'enveloppe thermique et améliorer les performances énergétiques du bâtiment. Ce bilan peut être amélioré grâce à l'identification des points faibles tels que la nécessité d'une meilleure isolation, le traitement des ponts thermiques, le remplacement des fenêtres inefficaces ou l'optimisation des systèmes de chauffage et de refroidissement.

Cette procédure fait partie intégrante du bilan énergétique du bâtiment. Le bilan énergétique prend en compte la totalité des consommations énergétiques tant bien thermiques qu'électriques (éclairage, appareils électrique, ventilation et autre). Le bilan énergétique tient également compte également la production locale d'énergie comme par des panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques.

Dans le cadre de ce travail et en référence aux limites du cas d'étude, nous nous concentrons uniquement sur le bilan thermique. En effet, les consommations et productions électriques ne nous intéressent pas ici. Le but sera uniquement de quantifier l'impact de la végétation de façade sur les consommations d'énergie thermique du bâtiment étudié.

Comme il a été démontré dans le Chapitre 1.3, les façades végétalisées sont réputées pour engendrer des économies d'énergie dans le bâtiment. Ces réductions de consommations d'énergie sont possibles via l'action des plantes sur plusieurs mécanismes tels que l'augmentation de l'isolation, l'effet d'ombrage, l'évapotranspiration et le blocage du vent.

3.1.1 Impact sur l'isolation du bâtiment

L'enveloppe thermique d'un bâtiment caractérise les surfaces délimitant les locaux conditionnés avec l'extérieur ou avec des locaux non chauffés. L'enveloppe thermique joue un rôle clé dans le contrôle des échanges thermiques. Son rôle principal est de fournir une barrière entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment afin de limiter les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été.

L'enveloppe d'un bâtiment est composée de plusieurs éléments comprenant la toiture, les façades, les fenêtres et le plancher. Ces éléments sont eux même composés de plusieurs couches. Dans une

typologie classique on retrouve une ossature, un parement, de l'isolant, un pare-vapeur, une lame d'air et une couche de revêtement de finition.

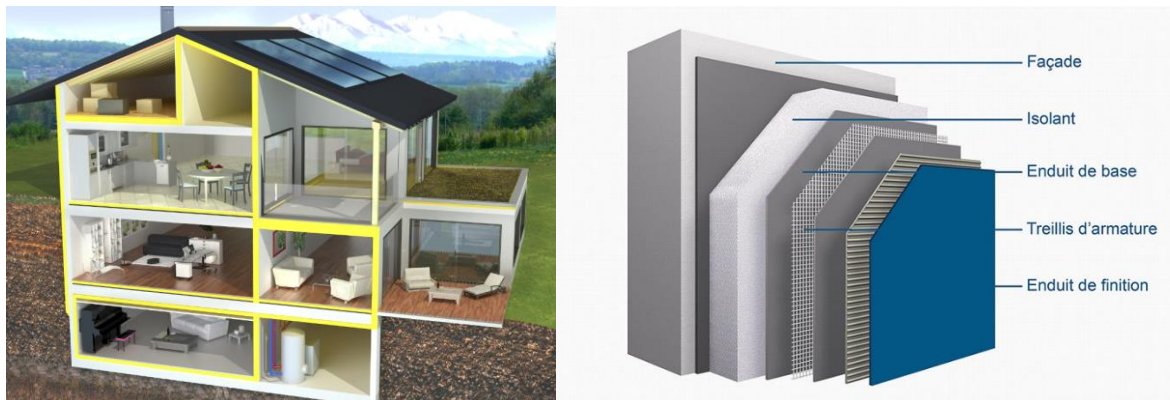


Figure 7: A gauche, définition et délimitation de l'enveloppe thermique d'un bâtiment (tracée en jaune sur la figure). A droite, composition type d'une façade avec isolation périphérique.

Sources : Swisspor.com à gauche et isoreha.fr à droite

Le défi dans la composition de l'enveloppe thermique est d'assurer une isolation suffisante et efficace pour réduire les transferts de chaleur par conduction entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. L'isolation d'une façade dépend des propriétés physiques des matériaux utilisés telle que leur conductivité thermique. Selon (« Conductivité thermique d'un matériau », 2007), la conductivité thermique, également appelée λ (lambda), est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique en 1 seconde, à travers 1m^2 d'un matériau, épais de 1m, lorsque la différence de température entre chaque côté est de 1K.

Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. L'effet isolant d'une façade dépend également de la résistance thermique de celle-ci. La résistance thermique est directement liée à l'épaisseur du matériau ainsi qu'à sa conductivité. Plus la couche d'isolant est épaisse, plus la résistance thermique est élevée.

Un moyen d'augmenter la résistance thermique d'une façade, sans passer par des étapes de rénovation, est simplement l'ajout de végétation contre la partie extérieure de celle-ci. Les plantes présentes sur la façade ainsi que le substrat créent ainsi une couche supplémentaire, comme on le voit sur la Figure 8. L'ensemble du système agit comme une barrière, limitant les transferts de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment.

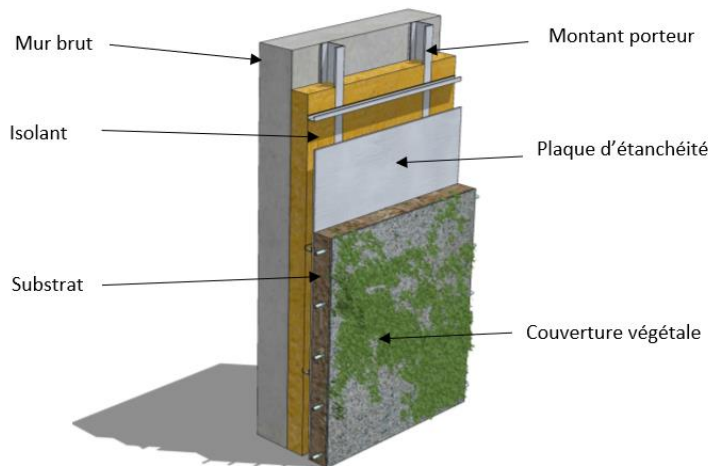


Figure 8: Structure type d'une façade avec mur vivant
 Source : biodiversiteetbati.fr, modifiée par l'auteur

Dans la revue de (Besir & Cuce, 2018), les auteurs expliquent que le flux de chaleur à travers la façade peut être réduit grâce à l'action des plantes sur le transfert de chaleur par conduction.

La conduction se calcul grâce à la loi de Fourier, qui pour un état stationnaire s'exprime comme suit :

$$\dot{Q}_{cond} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{L} = U A (T_1 - T_2) \quad [1]$$

\dot{Q}_{cond} = flux de chaleur lié à la conduction [W]

λ = conductivité thermique du fluide [W/mK]

U = Valeur U [W/m²K]

A = surface [m²]

T_1 = Température intérieure [K]

T_2 = Température extérieure [K]

La valeur U est une mesure de la capacité d'un matériau ou d'une composition à conduire la chaleur. Ce chiffre exprime ainsi la quantité de chaleur qui est transférée à travers un matériau par unité de surface, par unité de temps et par degré Kelvin. Plus la valeur U d'un matériau est basse, plus il est thermiquement isolant. La valeur U d'une paroi se calcul comme suit :

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_i}} \quad [2]$$

U = Valeur U [W/m²K]

R_{tot} = Résistance thermique totale de la paroi [m²K/W]

h_e = coefficient de transfert thermique extérieur = 25 [W/m²K]

d_k = épaisseur du matériau [m]

λ_k = conductivité thermique du matériau [W/mK]

h_i = coefficient de transfert thermique intérieur = 8 [W/m²K]

Grâce aux Equations 1 et 2, on comprend que l'ajout de plantes contre une paroi permet d'augmenter l'épaisseur d'isolation, faisant ainsi augmenter à son tour la résistance thermique totale et diminuant la valeur U de la composition. Un mur vivant est généralement plus performant qu'une façade verte au niveau de la diminution de la valeur U de la paroi. En effet, comme il a été démontré dans les typologies de façade végétales, les murs vivants nécessitent une couche de substrat ainsi que divers matériaux entre la façade et les plantes. (Libessart & Gavory, 2016) ont déterminé de manière expérimentales la conductivité thermique de diverses plantes ainsi que de divers substrats utilisés dans la réalisation de divers types de façades végétales. Ils ont évalué le λ du lierre à $0,239 \text{ W/m}^2\text{K}$ et celui de la vigne vierge à $0,218 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les auteurs ont pu remarquer que la valeur du λ diminue avec l'augmentation de la densité du feuillage. Pour les substrats, les auteurs ont obtenu une valeur de $0,062 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour du terreau universel et $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour de la sphaigne. On constate donc que les façades végétalisées comportant un substrat, comme c'est le cas pour les murs vivants, possèdent de meilleures capacités en termes d'isolation thermique comparées aux façades vertes directes ou indirecte.

En somme, les façades végétales permettent d'augmenter l'isolation de la paroi sur laquelle elles se trouvent et ainsi diminuer les transferts thermiques tant bien en été qu'en hiver. Dans le travail de (Dian et Wan, 1999), les auteurs ont constaté que les systèmes de verdure verticaux réduisaient de 28 % la chaleur transférée à travers les murs par une journée claire et ensoleillée.

3.1.2 Effet d'ombrage

Un autre mécanisme de réduction du flux de chaleur par les plantes est l'effet d'ombrage. L'effet d'ombrage est induit par le blocage des rayons du soleil grâce au feuillage de la façade végétale limitant ainsi le transfert de chaleur par rayonnement. Le transfert de chaleur par rayonnement se produit lorsque la chaleur est transférée sous forme d'ondes électromagnétiques. Ce type de transfert ne nécessite pas de milieu pour se propager. L'énergie thermique est transférée par rayonnement, notamment dans le domaine de l'infrarouge, est absorbée ou émise par la surface des objets. Lorsqu'un objet plus chaud est en présence d'un objet plus froid, il émettra davantage de rayonnement thermique que ce qu'il absorbe, entraînant ainsi un transfert net de chaleur du corps plus chaud vers le corps plus froid. C'est ce qu'il se passe lorsque les rayons du soleil frappent un mur. Le rayonnement solaire, plus chaud que la surface du mur, est absorbé par celui-ci puis, en fonction de ses propriétés, est converti en chaleur.

Les plantes grimpantes ainsi que les structures de support utilisées dans les façades végétales créent une couche d'ombrage entre le mur du bâtiment et la lumière directe du soleil. Cela réduit la quantité de rayonnement solaire qui atteint le mur, ce qui tend à réduire la chaleur absorbée. De plus, les plantes ont une capacité de réflexion du rayonnement solaire plus élevée que les surfaces dures telles que le béton ou le verre. Lorsque les rayons du soleil frappent les plantes, une partie de l'énergie est réfléchi ce qui diminue l'absorption de chaleur par le mur du bâtiment.

Ce phénomène de réductions du flux radiatif par l'effet d'ombrage est directement lié aux caractéristiques d'émissivité, d'absorption et ainsi que de réflexion des plantes. L'émissivité est la capacité d'une surface à émettre de la chaleur par rayonnement thermique. Les plantes ont généralement une émissivité plus élevée que les surfaces dures, ce qui signifie qu'elles sont plus susceptibles d'évacuer la chaleur préalablement absorbée sous forme de rayonnement thermique, réduisant la quantité d'énergie thermique absorbée. De plus, l'énergie absorbée par les feuilles est en partie utilisée par les processus physiologiques de la plante.

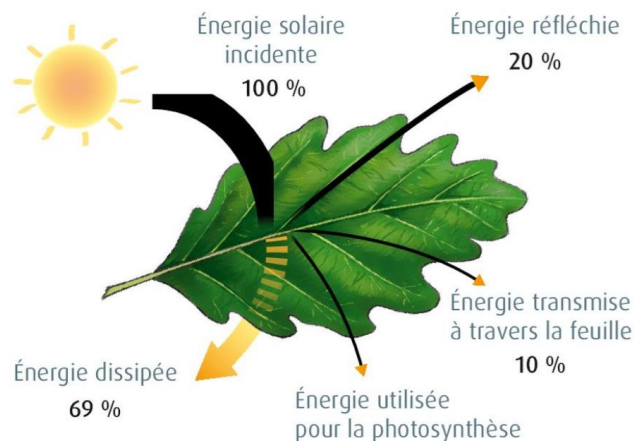


Figure 9: Le devenir de l'énergie solaire au niveau d'une feuille
 Source : Belin Education/Humensis, 2019 Enseignement scientifique 1^{ère}, Amelie Veaux

Selon (Besir & Cuce, 2018), 40 à 80% du rayonnement solaire peut être intercepté grâce à la végétation sur une façade, ce qui permet de grandement limiter la transmission de chaleur à l'intérieur du bâtiment.

L'effet d'ombrage est étroitement lié à la densité du feuillage, caractérisé par la densité de surface foliaire (LAD) et l'indice de surface foliaire (LAI), ainsi qu'au taux de couverture végétale. Les paramètres de LAD et LAI sont utilisés pour caractériser la répartition et la quantité de feuilles dans un couvert végétal. L'indice de surface foliaire représente l'étendue du feuillage par unité de surface, tandis que la densité de surface foliaire permet plutôt de mesurer la répartition spatiale des feuilles. Elle représente le nombre de feuille par unité de surface. Ces deux indices renseignent sur la capacité d'un couvert végétal à créer de l'ombrage. Ainsi, pour une façade verte, plus le LAI et la LAD sont élevés, plus la culture est dense et étendue. Ces caractéristiques permettent ainsi de réduire le rayonnement solaire qui atteint le mur limitant ainsi l'apport de chaleur.

En somme, les capacités d'une parois végétales à limiter la transmission de flux radiatif dépend notamment des caractéristiques physique des plantes tels que leurs coefficients d'absorption, d'émission et de réflexion. La répartition spatiale et la densité du feuillage, caractérisés le LAI et la LAD, jouent un rôle crucial dans l'efficacité du couvert végétal à créer de l'ombre.

3.1.3 Évapotranspiration

L'évapotranspiration est un processus naturel par lequel l'eau est transférée de la surface des plantes à l'atmosphère sous forme de vapeur. Ce phénomène se compose de deux mécanismes combinés : l'évaporation, qui est la conversion de l'eau liquide en vapeur à la surface de la plante et la transpiration qui est la perte d'eau par les stomates.

L'évapotranspiration est un processus vital pour les plantes. Tout d'abord, cela leur permet de réguler leur température interne en dissipant la chaleur par évaporation. Cette capacité de régulation de température est indispensable durant les périodes chaudes où les plantes peuvent être exposées à des températures élevées.

De plus, l'évapotranspiration est essentielle pour le transport des nutriments et de l'eau. L'eau absorbée par les racines est transportée vers les parties supérieures de la plante, telles que les feuilles,

par les vaisseaux conducteurs. Le flux de sève brute, composé à 99% d'eau, permet ainsi de fournir les minéraux nécessaires à la croissance et au fonctionnement des plantes.

L'évaporation et la transpiration des plantes ont pour effet direct d'augmenter l'humidité relative de l'air autour des feuilles, ce qui contribue au maintien de l'humidité dans l'environnement et au rafraîchissement de celui-ci. Le passage de l'eau liquide à gazeuse nécessite une grande quantité d'énergie. Selon (Dufresne, 2000) « *Lorsqu'une gouttelette d'eau en suspension dans l'air s'évapore, elle prend l'énergie à l'air qui l'entoure.* » Cette énergie provient de la chaleur latente du changement de phase, ce qui a pour conséquence d'abaisser la température. Cette quantité d'énergie thermique peut s'exprimer à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = L_v m \quad [4]$$

Q = quantité d'énergie nécessaire au changement de phase [kJ]

L_v = chaleur latente de vaporisation [kJ/kg]

m = masse d'eau à évaporer [kg]

L'un des quatre mécanismes d'action des façades végétales est donc la réduction de la température de l'air proche de la façade grâce l'évapotranspiration des plantes qui la compose. L'air à proximité du feuillage est chargé en humidité et permet ainsi de refroidir la température de la couche d'air par l'évaporation de l'eau. Selon (Besir & Cuce, 2018), les systèmes de verdure verticaux peuvent être considérés comme des climatiseurs passifs grâce à leur consommation énergétique élevée pour l'évapotranspiration. En effet, les auteurs expliquent que les plantes consomment environ 700 kWh d'énergie pour évaporer 1m³ d'eau. Ce chiffre est bien évidemment dépendant de plusieurs facteurs tels que la variété de la plante, sa capacité à évapotranspirer ainsi que des conditions climatiques environnantes.

Afin de quantifier une diminution de température, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau évaporée par la façade végétale. Selon (Allan et al., 1998) l'équation de Penman-Monteith est la méthode de calcul la plus fréquemment utilisée et celle recommandée par la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). Cette équation permet de déterminer l'évapotranspiration potentielle des plantes dans des conditions idéales. L'équation de Penman-Monteith est une variante de l'équation de Penman qui est utilisée pour quantifier l'évaporation de l'eau et de la terre. La méthode de Penman-Monteith prend en compte plusieurs paramètres tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, l'ensoleillement et les caractéristiques de la végétation pour estimer l'évapotranspiration potentielle d'une culture.

Il existe d'autres approches pour quantifier l'évapotranspiration. Dans le travail de Bachelor de (Rod, 2022), l'auteur explique que certains services de météorologie et de climatologie auraient tendance à utiliser des formules empiriques ou avoir recourt à l'équation développée par (Turc, 1961), équation qui a également été utilisée dans le travail de Bachelor de (Quoc Hung, 2020). Lors de ce travail, nous utilisons la formule développée par Penman-Monteith et non une autre car il s'agit de celle qui est implémentée dans le logiciel CitySim.

Afin d'éviter d'avoir à spécifier des paramètres d'évaporation spécifiques pour chaque culture et phase de développement, (Allan et al., 1998) ont introduit le concept d'évapotranspiration de référence à partir de l'équation originale de Penman-Monteith et se décrivant comme suit :

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad [5]$$

ET_0 = évapotranspiration de référence [mm/h]

R_n = rayonnement net [MJ/m²/h], soit la différence entre le rayonnement à ondes longues et à ondes courtes

G = flux de chaleur du sol [MJ/m²/h]

γ = constante psychométrique [kPa/°C]

T = température moyenne de l'air à 2m de hauteur [°C]

u_2 = vitesse du vent mesurée à 2m de hauteur [m/s]

e_s = pression de vapeur saturante [kPa]

e_a = pression de vapeur actuelle [kPa]

Δ = pente de la courbe de vapeur saturante [kPa/°C]

Cette équation quantifie l'évapotranspiration de référence ET_0 . (Calanca & Smith, 2011) expliquent que l' ET_0 est un outil utilisé pour quantifier le potentiel d'évaporation d'un couvert végétal standard en supposant que celui-ci soit suffisamment irrigué. Les valeurs utilisées dans ce calcul et les hypothèses réalisées sont les suivantes (Djikou, 2006):

- Le calcul est effectué pour un gazon bien irrigué et couvrant avec une hauteur de 0,12m, une résistance extérieure de 70 s/m et un albédo de 0,23.
- Le flux de la chaleur dans le sol G ne peut pas être négligé dans le calcul horaire de l' ET_0 .
- Les données météorologiques nécessaires sont les suivantes : température moyenne de l'air, humidité relative moyenne, vitesse moyenne mesurée à 2m de hauteur ainsi que le rayonnement net. Toutes ces mesures doivent être effectuées de manière horaire.

Afin d'obtenir l'évapotranspiration réelle d'une culture il est nécessaire de multiplier la valeur d'évapotranspiration de référence par le coefficient de culture (K_c) et le coefficient de stress hydrique (K_s). Cela donne lieu à l'équation suivante :

$$ET_R = K_c \cdot K_s \cdot ET_0 \quad [6]$$

ET_R = évapotranspiration réelle [mm/h]

K_c = coefficient de culture [-]

K_s = coefficient de stress hydrique [-]

ET_0 = évapotranspiration de référence [mm/h]

Le coefficient de culture indique les besoins en eau d'une culture en fonction de son stade de croissance. Le K_c est généralement exprimé sous forme d'une valeur comprise entre 0 et 1. Une valeur de K_c plus élevée indique que la culture a besoin d'une plus grande quantité d'eau pour évapotranspirer, tandis qu'une valeur plus basse indique des besoins en eau moindres. Ainsi, pour calculer correctement la quantité d'eau évapotranspirée, il est nécessaire d'utiliser un K_c évolutif selon le stade de croissance de la plante.

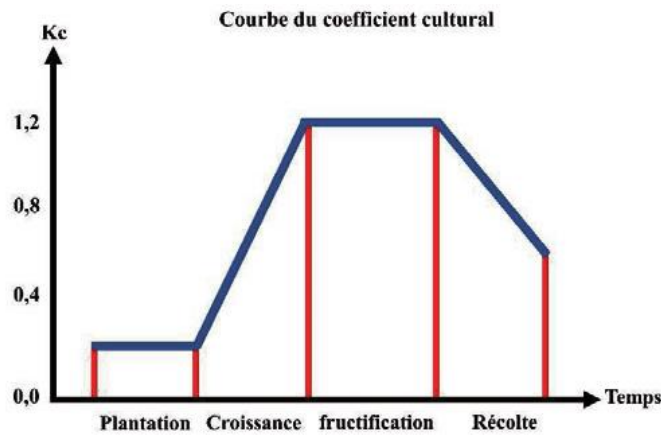


Figure 10: Evolution du Kc en fonction de la croissance de la plante
 Source : (Skhiri, 2019)

Le coefficient de stress hydrique, est une mesure utilisée pour évaluer le niveau de stress subi par une plante ou une culture en raison d'un déficit d'eau. Il indique la réduction de la croissance ou de la productivité de la plante en fonction de la quantité d'eau disponible dans le sol. Ce coefficient est également exprimé sous forme d'une valeur comprise entre 0 et 1. Une valeur de Ks égale à 1 indique que la plante ou la culture dispose de suffisamment d'eau et ne subit aucun stress hydrique, tandis qu'une valeur inférieure à 1 indique un stress hydrique croissant.

Ainsi, pour calculer correctement la quantité d'eau évapotranspirée, il est nécessaire d'utiliser des valeurs de coefficient de culture et de stress hydrique adaptés. Ces facteurs influencent grandement l'évapotranspiration et ainsi les performances de refroidissement des plantes.

3.1.3.1 Paramètres d'influence

La quantité d'eau évapotranspirée par une culture dépend de divers paramètres tels que :

- Le climat : Les conditions météorologiques jouent un rôle crucial dans l'évapotranspiration des plantes. Les principaux facteurs climatiques qui influencent l'évapotranspiration sont la température, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Une température élevée, une faible humidité relative, un vent fort et un rayonnement puissant sont des facteurs qui augmentent le taux d'évapotranspiration d'une culture.
- La variété des plantes : Chaque espèce de plante possède des caractéristiques physiologiques différentes. Leur taille, leur stade de croissance et leur système racinaire sont des facteurs qui influencent leur capacité d'évapotranspiration. Le débit de sève en est un bon indicateur de leur capacité. En effet, ce débit correspond au volume d'eau transporté par les vaisseaux conducteurs de la plante. En général, plus le débit de sève est élevé, plus la plante a la capacité de perdre de l'eau par évaporation. Cela indique une activité métabolique et une transpiration plus importante.
- La disponibilité en eau dans le sol ou le substrat : La quantité d'eau disponible pour la plante influence directement l'évapotranspiration. Un sol sec réduira l'évapotranspiration, tandis qu'un sol bien humidifié favorisera une évapotranspiration plus élevée. Cela se traduit via les coefficients de culture et de stress hydrique. Une irrigation adéquate et bien gérée peut maintenir un niveau d'eau abondant dans le sol, favorisant ainsi une évapotranspiration optimale.

En somme, l'évapotranspiration permet de diminuer la température de l'air proche de la plante et ainsi diminuer la température de surface de la façade végétale. Ce phénomène de réduction de température agit ainsi sur le transfert de chaleur à travers la paroi, notamment au niveau du transfert par conduction. En référence à l'Equation 1 de la loi de Fourier, le terme faisant intervenir la température extérieure dans l'équation se trouve diminué ce qui réduit proportionnellement le transfert de chaleur vers l'intérieur et limite ainsi les besoins de refroidissement du bâtiment. Selon (Hoelscher et al., 2016), les effets de refroidissement des façades végétales sont majoritairement induits par l'ombrage des plantes plutôt que par l'évapotranspiration. En revanche, dans une étude menée par (Cameron et al., 2014), les auteurs ont tout de même démontré une diminution de température de surface de 3°C entre un mur nu et un mur végétal uniquement grâce à l'évapotranspiration.

3.1.4 Blocage du vent

Le dernier mécanisme présenté dans ce chapitre est le blocage du vent. En effet, il a été démontré dans les diverses études citées dans le Chapitre 1.3 que le feuillage des plantes disposées en façade est capable de faire effet pare vent.

Le vent joue un rôle sur les consommations énergétiques des bâtiments. En soufflant de l'air, généralement froid, contre les façades, des différences de pressions se créent. La couche d'air induite le long d'une paroi influe le transfert de chaleur par convection naturelle ou forcée. La convection naturelle est un phénomène qui se produit par des différences de densité dans un fluide. Ces variations de densité sont causées par des différences de température créant ainsi des mouvements du fluide. La convection forcée se produit lorsque le mouvement du fluide en question est induit par un paramètre extérieur, tels que des ventilateurs, des pompes ou un système de climatisation et non par des variations de densité du fluide lui-même. Le vent soufflant contre une façade est généralement considéré comme une forme de convection forcée. En effet, le vent est créé par des forces externes, soit principalement par la pression atmosphérique ainsi que les différences de pression y relatives.

Une façade végétalisée peut limiter la convection contre les parois du bâtiment en agissant sur la réduction du flux d'air grâce au ralentissement du vent dans les feuilles. La vitesse du vent venant frapper les parois du bâtiment joue un rôle essentiel dans les pertes par convection. Cela se démontre grâce aux équations ci-dessous.

Premièrement, la puissance calorifique liée à la convection se calcule via la loi de refroidissement de Newton :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} A (T_{\infty} - T_S) \quad [7]$$

\dot{Q}_{conv} = flux de chaleur convectif [W]

h_{conv} = coefficient de transfert thermique [W/m²K]

A = surface [m²]

T_{∞} = Température du vent [K]

T_S = Température de la surface [K]

Le coefficient de transfert thermique peut s'obtenir à partir du Nombre de Nusselt :

$$N_u = h_{conv} \frac{D}{\lambda} \quad [8]$$

N_u = Nombre de Nusselt [-]

D = diamètre hydraulique [m]

λ = conductivité thermique du fluide [W/mK]

L'Equation 8 est valable uniquement pour des fluides laminaires. Dans le cas de fluides turbulents le Nombre de Nusselt se calcule à l'aide du Nombre de Prandtl et du Nombre de Reynolds qui se définissent comme suit :

$$Pr = \frac{c \eta}{\lambda} \quad [9]$$

Pr = Nombre de Prandtl [-]

c = chaleur spécifique du fluide [J/(kg K)]

η = viscosité du fluide [kg/ms]

λ = conductivité thermique du fluide [W/mK]

$$Re = \frac{D \rho \bar{v}}{\eta} \quad [10]$$

Re = Nombre de Reynolds [-]

ρ = masse volumique [kg/m³]

\bar{v} = vitesse [m/s]

D = diamètre hydraulique [m]

η = viscosité du fluide [kg/ms]

Le Nombre de Nusselt d'un fluide en régime turbulent se calcule comme suit :

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7\sqrt{\frac{f}{8}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}} \quad [11]$$

Nu = Nombre de Nusselt pour en régime turbulent [-]

f = facteur de perte de charge [-]

Re = Nombre de Reynolds [-]

Pr = Nombre de Prandtl [-]

La distinction entre un régime de fluide laminaire ou turbulent dépend de la valeur du Nombre de Reynolds. La limite entre ces deux régimes d'écoulement se situe à une valeur de 2300. En dessous le fluide est considéré comme laminaire, en dessus comme turbulent. Comme il a été démontré dans l'Equation 10 du calcul du nombre de Reynolds, la vitesse est un paramètre influençant la valeur de celui-ci et entraîne ainsi une variation de la valeur du coefficient de transfert thermique. Plus la vitesse du vent est élevée, plus le nombre de Reynolds est grand et plus le coefficient de transfert thermique

est élevé. Une valeur élevée de ce coefficient engendre un flux de chaleur convectif proportionnellement grand.

Grâce aux équations développées ci-dessus, on peut démontrer que la réduction de la vitesse du vent contre les parois d'un bâtiment tend à faire diminuer le flux de chaleur convectif. La vitesse du vent est diminuée grâce à la rugosité de la façade végétale, soit par le feuillage de celle-ci. La diminution des pertes par convection contre les parois du bâtiment peut permettre de réaliser des économies d'énergie.

3.1.5 Synthèse

Pour clôturer ce chapitre, les quatre mécanismes d'action présentés ici ne sont rien d'autres que les quatre types de transferts de chaleur : conduction, rayonnement, changement de phase (évaporation) et convection.

Les performances énergétiques de façades végétales, tant en été qu'en hiver, sont rendues possible par l'action simultanée de ces quatre processus. Leur répartition peut se représenter par la Figure 11 ci-dessous.

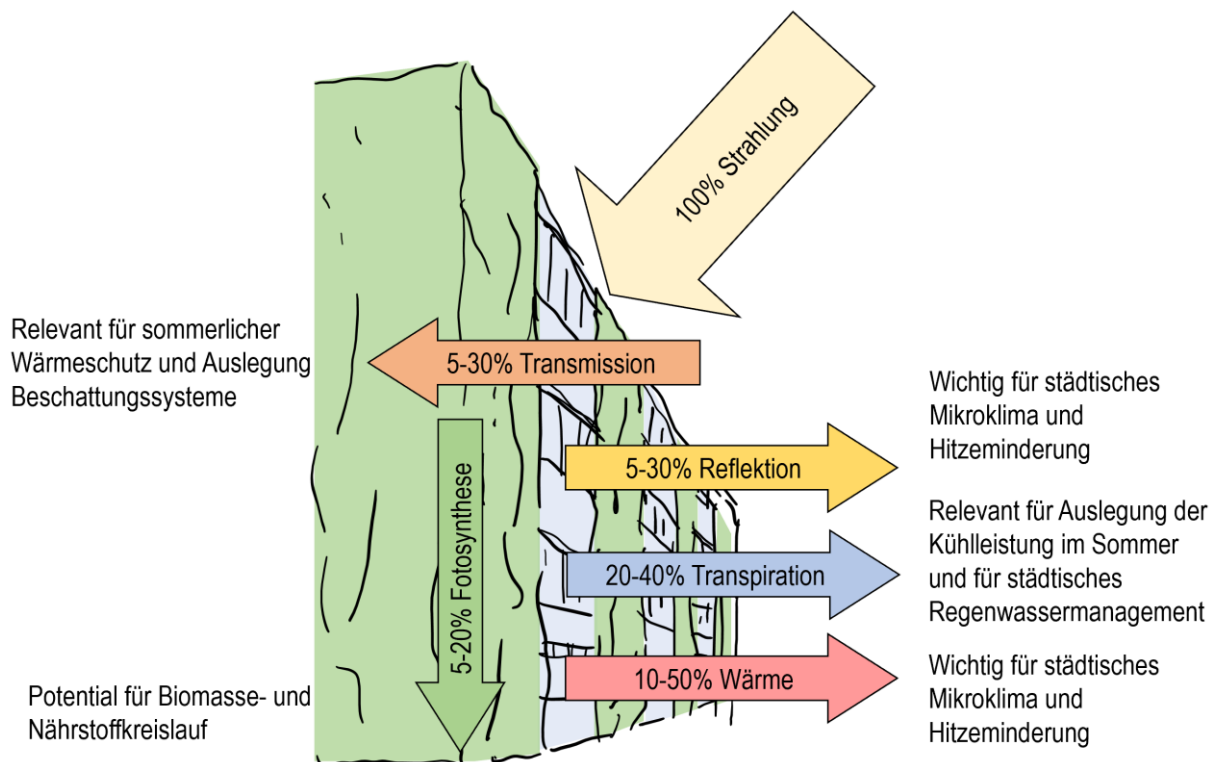


Figure 11: Diagramme de flux de chaleur d'une façade végétalisée
 Source : (Tschander et al., 2021)

Ainsi, la compréhension de l'impact de la végétation sur les mécanismes de transferts de chaleur entre le bâtiment et l'extérieur est essentielle pour optimiser l'efficacité de ces façades et améliorer le confort thermique des habitants. Cependant, ces échanges thermiques ne se limitent pas seulement aux bâtiments individuels, le climat extérieur exerce un impact significatif sur les consommations énergétiques. Dans le prochain chapitre, nous explorerons les caractéristiques des îlots de chaleur urbains et les stratégies possibles pour atténuer leur effet sur l'environnement urbain.

3.2 ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont des zones dans les villes où la température est significativement plus élevée que dans les périphéries campagnardes. Ces phénomènes sont causés par divers facteurs en grande partie liés à l'urbanisation. Premièrement, le grand nombre de surfaces minérales telles que les routes bitumées et les constructions en béton ont une forte tendance à absorber et emmagasiner le rayonnement solaire créant ainsi une accumulation de chaleur. Parallèlement à cela, la réduction des espaces verts, tels que les parcs et les arbres, diminue la capacité de la végétation à fournir de l'ombre et à évaporer l'humidité. Ainsi, ces facteurs caractéristiques des villes contribuent à la création d'îlot de chaleur urbain. Outre les pics de chaleur en journée, une particularité de ces phénomènes est l'atténuation de la baisse des températures la nuit. Effectivement, la chaleur emmagasinée durant la journée est restituée durant la nuit du fait du stockage thermique des matériaux utilisés dans l'environnement urbain.



Figure 12: Phénomène d'îlot de chaleur urbain
 Source : Emeline Gaube / BFMTV.com

Les îlots de chaleur urbains résultent d'une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Les facteurs naturels tels que le climat local, les conditions météorologiques et la topographie ne sont pas les principaux responsables de la formation des ICU, mais ils peuvent influencer leur intensité et leur localisation en interagissant avec les facteurs d'origine humaine. Ces derniers jouent un rôle direct dans l'amplification des ICU.

La problématique réside dans la réflectivité des matériaux utilisés dans la construction et l'agencement architectural des villes, notamment la création de ce que l'on appelle des "canyons de rue". Ces canyons de rue se forment lorsque de hauts bâtiments sont disposés de manière à former des rues étroites. Cette configuration entraîne un blocage du vent naturel et limite la ventilation, contribuant ainsi à l'accumulation de chaleur dans ces zones urbaines.

En plus de provoquer un inconfort thermique, les ICU influencent le climat en faisant baisser les taux d'humidité ce qui a pour répercussions de modifier les régimes de pluie. Outre les dérèglements météorologiques engendré, ces phénomènes posent des problèmes majeurs sur la pollution de l'air et la santé publique. La chaleur exacerbée par les ICU aggrave les effets sur la santé pendant les périodes de canicule. Les températures extrêmes peuvent entraîner des coups de chaleur. Les populations vulnérables, telles que les personnes âgées, les enfants en bas âge et les personnes ayant des problèmes de santé préexistants, sont particulièrement affectées par ces conditions. De plus, les phénomènes d'îlot de chaleur contribuent grandement à l'augmentation des consommations énergétiques, notamment pour le refroidissement. Cette hausse des consommations entraîne ainsi une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et une aggravation du changement climatique.

Le changement climatique qui favorise à son tour les phénomènes d'îlots de chaleur urbain et ainsi de suite, tel qu'observé sur la Figure 13.

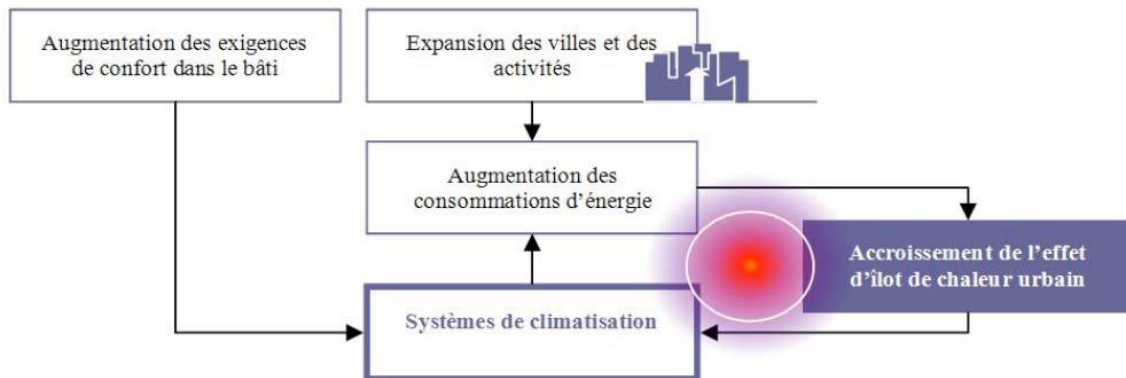


Figure 13: Problématiques des ICU et facteurs anthropiques

Source : OB01_ACT002_FT002 Phenomenes Ilot de Chaleur urbain_V2010 01 22

Ainsi, les températures élevées en ville sont largement problématiques sur plusieurs niveaux. Ces différences de températures entre les zones urbaines et rurales se quantifie de l'ordre de plusieurs degré Celsius. La perception de la chaleur d'un point de vue humain peut être évaluée en examinant divers paramètres tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent ou encore le rayonnement. Ces paramètres permettent ainsi d'évaluer le niveau d'intensité de l'ICU.

En réponse aux problématiques engendrées par les ICU, diverses solutions existent. Certaines sont présentées ci-dessous :

- **Augmenter l'albédo en ville.** Dans un travail publié par (CSD Azur, 2010), les auteurs expliquent que conformément aux lois de Stefan-Boltzmann et de Wien, la couleur d'un matériau de construction influence la proportion d'énergie solaire réfléchi par rapport à celle reçue. Cette caractéristique physique est représentée par l'albédo, quantifiable sur une échelle de 0 à 1. Une faible valeur d'albédo signifie une forte capacité d'absorption du rayonnement, tandis que des valeurs proches de 1 signifient une capacité élevée à réfléchir le rayonnement solaire. Ainsi, les surfaces sombres des villes, comme le goudron et les tuiles des toits, ont une forte tendance à absorber la chaleur en journée puis à la restituer par effusivité la nuit. Une solution pour diminuer la chaleur stockée dans le milieu urbain et d'augmenter l'albédo des villes. Cela peut se faire en utilisant des matériaux de construction réfléchissants ou en optant pour des toits et des façades enduits d'un revêtement clair tel que de la peinture blanche. Toujours selon (CSD Azur, 2010), des études expérimentales ont pu démontrer que l'utilisation de matériaux réfléchissants en toiture permettaient d'économiser 15 à 46% d'énergie de refroidissement pour le bâtiment.
- **Limiter les rejets de chaleurs dans l'air.** Les rejets de chaleur provenant des industries, du trafic routier et des climatiseurs contribuent à l'augmentation des températures en dissipant la chaleur dans l'environnement urbain. L'utilisation de sources d'énergies propres telles que les énergies renouvelables permettent notamment de limiter ces rejets de chaleur. En effet, le solaire photovoltaïque, l'éolien ou encore l'hydroélectricité dégagent nettement moins de chaleur résiduelle face aux combustibles fossiles. Parallèlement à cela, il est nécessaire de limiter les consommations d'énergie en améliorant l'efficacité énergétique des industries, des bâtiments et des transports. Finalement, l'utilisation de refroidissement passif est à privilégier face aux climatiseurs classiques.

- **Augmenter les points d'eau.** Une autre solution pour limiter la hausse des températures en ville est d'augmenter les points d'eau. En effet, la capacité d'évaporation de l'eau permet ainsi de réduire la température de l'air ambiant en le chargeant en humidité. L'augmentation des points d'eau peut se faire par l'installation de bassins, de fontaines ou de plans d'eau. Mettre en place des zones humides artificielles ou des jardins pluviaux, favorisent l'évaporation en contribuant à la rétention de l'eau.
- **Végétaliser les zones urbaines.** Finalement, une solution efficace pour la lutte contre les ICU est d'augmenter le taux de végétation dans les villes. Les espaces verts, tels que les parcs, les jardins et les arbres ont la capacité d'absorber une partie de la chaleur générée par l'environnement urbain. En plus du refroidissement de l'air grâce à l'évapotranspiration, l'ajout d'arbres en ville permet de fournir des zones d'ombre qui protègent les surfaces urbaines de l'exposition au soleil. En bloquant une partie du rayonnement solaire direct, les arbres limitent ainsi l'absorption de la chaleur par les bâtiments et les routes. Finalement, l'augmentation de verdure en ville permet d'augmenter la perméabilité des sols et contribuer à la rétention d'eau.

Une autre manière d'augmenter la végétation en ville autre que par les parcs, les jardins et la plantation d'arbres est la végétalisation de bâtiments, qui permet de limiter le réchauffement localement. La végétation de façades permet d'augmenter localement la verdure et ainsi réduire les températures grâce à divers mécanismes. L'absorption de la chaleur par les plantes pour leur activité métabolique, l'évapotranspiration et la rétention d'eau dans le substrat ainsi que la réflexion du soleil grâce à l'albédo des plantes sont des facteurs qui permettent d'améliorer le confort urbain. Outre ses performances thermiques, La végétation en ville aide à piéger les particules fines et les polluants atmosphériques contribuant ainsi à améliorer la qualité de l'air parfois plus polluée dans les zones de concentration de chaleur qu'ailleurs.

En somme, les îlots de chaleur urbains représentent un défi majeur dans les zones urbaines engendrant des conséquences néfastes sur la santé, l'environnement et le confort des citoyens. Cependant, en prenant des mesures adaptées, il est possible d'atténuer ces effets indésirables. L'augmentation de la végétation en ville, l'utilisation de matériaux réfléchissants, une planification urbaine durable ainsi que des solutions de rafraîchissement passif et de gestion des eaux pluviales, sont toutes des stratégies pour lutter contre les ICU. (Besir & Cuce, 2018) expliquent que « *L'efficacité énergétique des bâtiments peut être améliorée en réduisant considérablement les effets d'îlot de chaleur urbain et vice versa* ». En collaborant à tous les niveaux, citoyens, urbanistes et décideurs peuvent construire un environnement urbain plus résilient et plus durable, améliorant ainsi la qualité de vie pour les générations à venir.

4 CAS D'ÉTUDE

Comme mentionné dans le cahier des charges, un des objectifs de ce travail consiste à étudier la végétalisation de façade d'un bâtiment. Le bâtiment en question se situe dans la pépinière de la Ville de Zürich. Ce bâtiment s'inscrit dans un projet dont l'objectif est de végétaliser plusieurs façades dans le cadre de la réhabilitation des ateliers de la pépinière municipale. Ce bâtiment a déjà été étudié pour sa végétation de façade dans d'autres travaux. En effet, un projet de recherche mené par (Tschander et al., 2021) à la ZHAW (Université des sciences appliquées de Zürich) en collaboration avec Grün Stadt Zürich (Département de la conservation de la nature) est en cours. Ce bâtiment a ainsi été choisi pour le cas d'étude de ce Travail de Bachelor dans le but de réutiliser certaines mesures réalisées par la ZHAW.

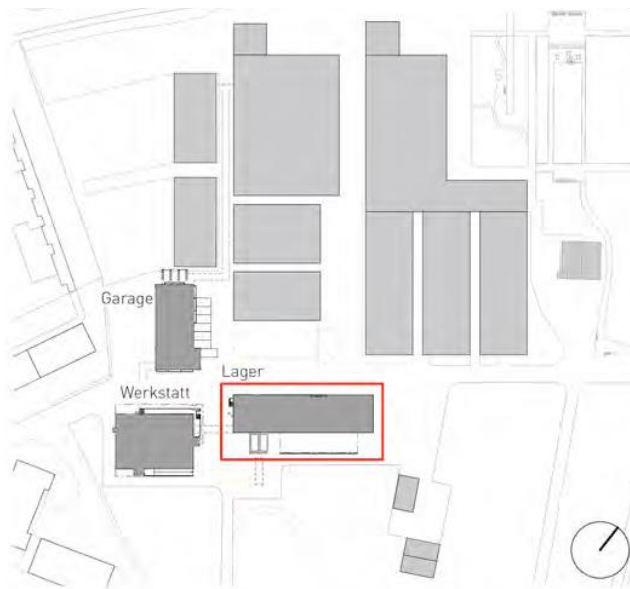


Figure 14: Plan d'ensemble de la pépinière de Zürich, Gutstrasse 199, 8047 Zürich-Albisrieden

Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

4.1 DESCRIPTION DU BÂTIMENT

Le bâtiment en question est l'entrepôt des ateliers construit en 1963. Une partie de la façade nord-ouest du bâtiment a été végétalisée avec deux types de façades vertes : un mur vivant et une façade rideau (aussi appelé façade double peau). Chaque paroi végétale mesure environ 5m de large pour 8m de haut. La mise en place d'une végétation le long de deux parois en béton a été envisagée dans le but d'étudier la résistance des plantes dans le contexte de la végétalisation verticale, ainsi que de mesurer leur influence sur le microclimat environnant. Toutefois, il est important de souligner que ces installations n'ont pas été conçues pour étudier leur impact sur la thermique du bâtiment.

Étant donné que le bâtiment en question est un entrepôt, il n'est pas soumis à une régulation thermique. Il ne possède ni volume clos ni fenêtres. Or, un des objectifs fixés dans le cahier des charges de cette étude consiste à évaluer l'impact des façades végétales sur les besoins thermiques du bâtiment. Afin d'atteindre cet objectif, il sera nécessaire de reconsidérer quelque peu la conception du bâtiment en lui attribuant certaines caractéristiques. En effet, lors des simulations, il sera attribué au modèle du bâtiment une fonction administrative (conformément à la norme SIA 380/1) et des fenêtres y seront ajoutées. Ces hypothèses seront exposées ultérieurement dans le rapport. Le bâtiment, tel qu'il était avant l'ajout de la végétation se présentait comme sur la Figure 15 ci-dessous.



Figure 15: Vue sud-ouest du bâtiment (à gauche) et façade nord-ouest (à droite) sans la végétation
 Source: Photos d'archives Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

Par la suite, une façade rideau ainsi qu'un mur vivant ont été installés. La façade rideau, aussi appelée façade double peau, se compose de plantes grimpantes plantées dans des bacs au rez-de-chaussée et au premier étage. Les bacs permettent d'assurer une certaine rétention d'eau pour les plantes. Un treillis est fixé au niveau de la façade extérieure aux extrémités des parties en béton avec des entretoises. Ce treillis permet aux plantes de pousser en rideau, le résultat se présente sur la Figure 16 ci-dessous.

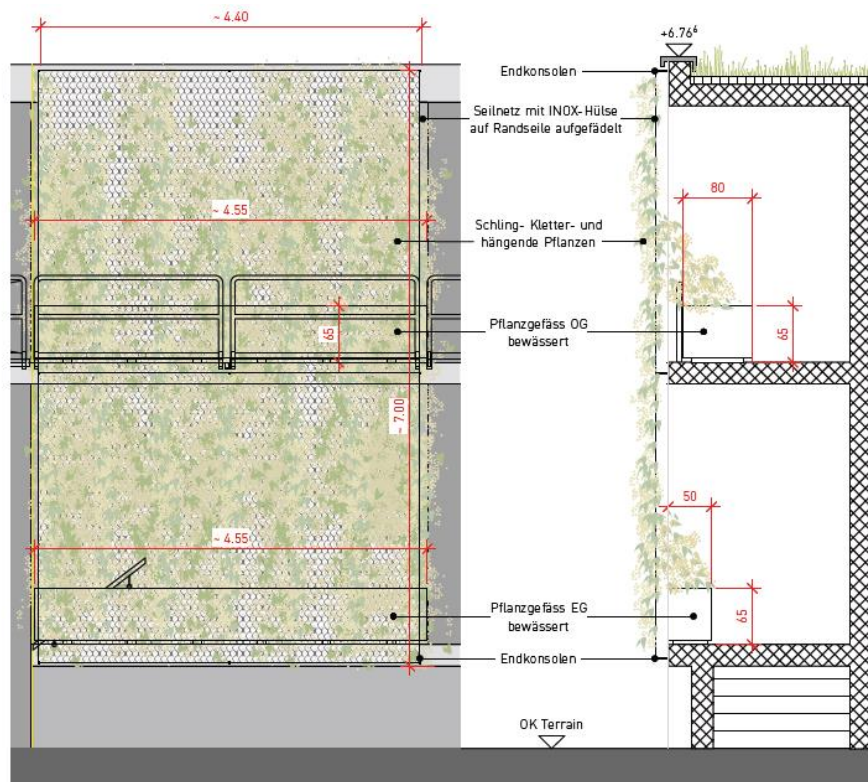


Figure 16: Façade rideau installée sur la façade nord-ouest du bâtiment de la pépinière de Zürich
 Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

Le mur vivant est composé de modules comprenant la structure portante en béton, une couche de substrat ainsi qu'un système d'irrigation. La végétation a été préalablement cultivée puis introduite dans le substrat du mur modulaire afin de poursuivre sa croissance. Le résultat du mur vivant se présente sur la Figure 17 ci-dessous.



Figure 17: Mur vivant installé sur la façade nord-ouest du bâtiment de la pépinière de Zürich
 Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

Concernant les deux parois végétales, aucune information n'est disponible quant à la variété de plantes utilisées. En revanche, on estime que grâce à l'expérience des horticulteurs présents sur place, les plantes les plus adaptées à l'application en façade et aux conditions climatique du site ont été sélectionnées. Une fois la végétation installée, le bâtiment possède le rendu présenté sur la Figure 18 ci-dessous. Seules les parties nommées « Wand 2 » et « Wand 3 » nous intéressent pour cette étude. Le taux de couverture de façade végétale s'élève à environ 20% de la surface de la façade nord-ouest.

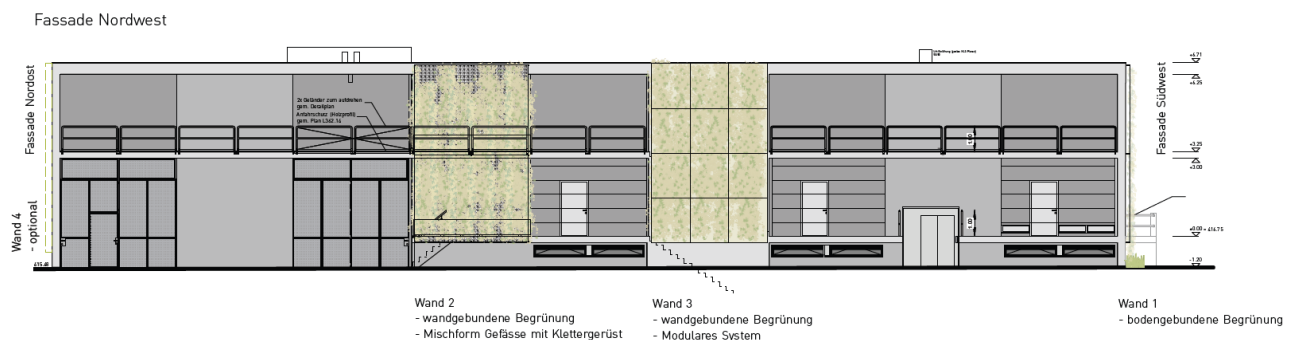


Figure 18: Façade nord-ouest du bâtiment avec intégration de la végétation
 Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

Le bâtiment possède de la végétation sur trois de ses façades, soit sud-ouest, sud-est et nord-ouest ainsi que sur la toiture. Tel que déjà mentionné, seule la végétation de la façade nord-ouest sera étudiée dans ce travail. Comme il a été démontré dans les diverses études présentées dans le Chapitre 1.3, l'orientation de la façade végétale impact les performances de celle-ci. On peut donc penser que le choix d'étudier la végétation sur la façade nord-ouest n'est pas optimal. Or, il n'est pas possible de végétaliser la façade sud du bâtiment car celle-ci est inaccessible. Le choix d'étudier la façade nord-ouest plutôt que sud-ouest ou sud-est est justifié par l'existence de mesures réalisées par la ZHAW sur cette orientation, qui devront être utilisées pour répondre aux objectifs de cette étude.



Figure 19: Pépinière de Zürich, en rouge le bâtiment étudié
Source : Google Maps

Comme on le voit sur la Figure 19, la pépinière est largement entourée de verdure. En revanche, la façade nord-ouest du bâtiment étudié se trouve face à une allée goudronnée avec une forte capacité d'absorption de chaleur. Des mesures de température ont été réalisées durant l'été 2020. Les résultats ont démontré une charge thermique relativement élevée avec des températures perçues avoisinant les 40°C devant la façade en question. On comprend donc l'intérêt d'étudier l'impact de la végétalisation de façade sur ce côté du bâtiment.

4.2 PRISES DE MESURES

Le projet de recherche mené par (Tschander et al., 2021) à la ZHAW a permis de relever une série de mesures sur le bâtiment de la pépinière. Les mesures disponibles ont été réalisées en juillet 2020, soit durant la première phase de ce projet. Dans cette première phase, la ZHAW a relevé des valeurs uniquement pour la façade rideau. Aucune mesure sur le mur vivant n'a été réalisée durant cette phase ni durant ce travail de Bachelor.

Dans un premier temps, les mesures de températures autour du bâtiment ont pu démontrer une charge thermique élevée entourant celui-ci en quantifiant la température physiologique équivalente (PET) ainsi que la température de l'air ambiant. La PET est un indicateur utilisé pour évaluer le confort thermique d'un individu dans un environnement donné. Il est dérivé du bilan énergétique humain et combine à la fois des paramètres climatiques comme la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et d'autres paramètres comme l'habillement et le niveau d'activité. La PET utilise une

température de référence pour estimer le niveau de confort thermique ressenti par un individu dans un environnement spécifique. Cet indice de confort est souvent utilisé car il est plus pratique et moins théorique que d'autres indices de confort thermique plus complexes qui nécessitent un grand nombre de calculs.

La PET est présentée ici car elle a été mesurée par la ZHAW et elle permet ainsi de démontrer un certain inconfort pour les personnes se trouvant proche dans la zone d'étude. La PET calculée autour du bâtiment ainsi que la température de l'air mesurées ont montré des valeurs relativement élevées. En effet, des valeurs de PET atteignant 35°C ainsi qu'une température de l'air proche des 29 °C aux alentours de 14h entre le 17.07.20 et 31.07.20 mettent en évidence une sensation de chaleur élevée pour les personnes présentes sur le site.

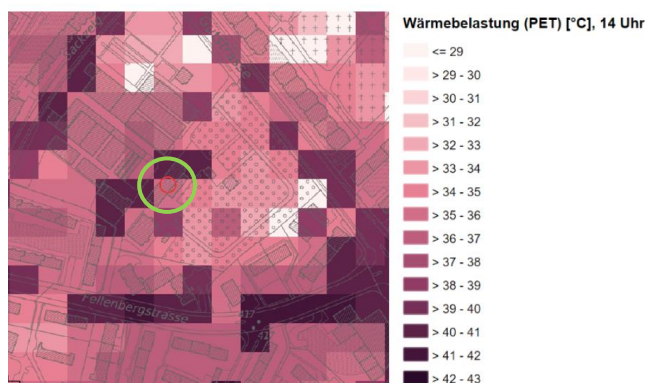


Figure 20: PET à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)
 Source : SIG-ZH

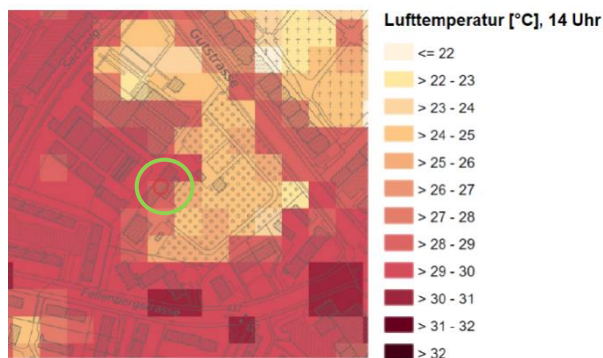


Figure 21: Température de l'air à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)
 Source : SIG-ZH

Afin de déterminer la température physiologique équivalente, les chercheurs de la ZHAW ont mesuré divers paramètres sur site puis on eut recours au logiciel RayMan® pour effectuer le calcul de cet indice de confort. La PET ne sera pas recalculée dans la suite du travail via les simulations. En effet, en raison de son manque de précision la PET n'a pas été implémentée par les développeurs dans le logiciel. Cependant, d'autres indices de confort thermiques pourront être calculés avec CitySim.

Toujours dans le cadre du travail mené par (Tschander et al., 2021), deux stations de mesure ont été implantées le long de la façade rideau orientée nord-ouest. La première station de mesure est située à l'arrière de ladite façade, tandis que la seconde est positionnée à quelques mètres de distance, face à une portion de mur dépourvue de végétation. Pendant la période du 17.07.20 au 31.07.20, divers relevés ont été effectués afin de quantifier l'impact de la végétation de la façade rideau.

La température de l'air et l'humidité relative ont été enregistrées à une hauteur de 1,1m au moyen d'un capteur du fabricant IButton® (hygrochon Temp/Hum Logger) protégé contre les rayonnements.

Pour déterminer la température radiante moyenne (MRT), des sondes de température (Testo 440) ont été installées, également à une hauteur de 1,1m. Les températures mesurées à l'aide du globe ainsi que les températures de l'air ont ensuite été saisies dans la l'Equation 12 issue de la norme ISO 7726 afin d'obtenir la MRT :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot V_a^{0,6}}{\varepsilon \cdot D^{0,4}} \cdot (T_g - T_a) \right]^{0,25} - 273 \quad [12]$$

T_{mrt} = Température moyenne radiante [°C]

T_g = Température du globe [°C]

T_a = Température de l'air [°C]

ε = coefficient d'absorption de la sphère valant 0,95

D = Diamètre hydraulique [m]

V_a = vitesse du vent [m/s]

Les auteurs des mesures expliquent que « *comme les calculs avec les vitesses de vent mesurées peuvent souvent entraîner une distorsion des valeurs T_{mrt} , une vitesse de vent basse et constante de 0,5 m/s est utilisée pour le calcul de la MRT* ».



Figure 22: Montage expérimental pour la prise de mesures réalisée sur la façade rideau
 Source : (Tschander et al., 2021)

5 SIMULATIONS SUR CITYSIM

CitySim est un logiciel de simulation open source développé dans le laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'EPFL afin de modéliser et analyser thermiquement des systèmes urbains. Ce logiciel a par la suite été complété par l'entreprise kaemco. Après plus de 10 ans d'utilisation dans diverses études, CitySim s'est révélé être un outil de simulation en constante évolution.

CitySim permet d'obtenir tant bien des bilans énergétiques pour le bâtiment que des analyses thermiques de l'environnement urbain. Ce logiciel effectue des simulations prenant en considération des paramètres variés tels que les interactions radiantes à ondes courtes et longues, les conditions climatiques ainsi que les propriétés physiques des matériaux composants la scène urbaine. Il permet ainsi de simuler une simple habitation à une ville entière en évaluant les échanges thermiques et radiants entre des objets décomposés en surfaces ainsi que leur environnement.

CitySim nécessite deux inputs pour le fonctionnement de la simulation : les données climatiques liées à la zone géographique ainsi que les caractéristiques géométriques et physique du milieu urbain étudié. Pour les caractéristiques géométriques, l'utilisateur peut modéliser lui-même une scène en trois dimensions via des logiciels adaptés ou importer une carte sous forme de fichier 3D.

Une fois la simulation réalisée, de nombreux résultats peuvent être visualisés via l'interface graphique CitySimPro. Différentes variables de sortie sont disponibles comme les températures de toutes les surfaces de la scène, les besoins en chauffage et en climatisation de chaque bâtiment modélisé, le rayonnement à ondes courtes et à ondes longues ainsi que le potentiel solaire. D'autres paramètres tels que des indices de confort thermique sont calculés lors de la simulation. Les résultats peuvent être calculés pour différentes échelles de temps. Tous les résultats obtenus peuvent être exportés en fichier texte.

Selon ses développeurs, CitySim est rapide comparé à d'autres moteurs de simulation et fiable car testé avec succès dans plusieurs conditions. En plus d'être un logiciel gratuit, il utilise un modèle en trois dimensions qui intègre de manière plus précise l'impact du rayonnement solaire sur un bâtiment ou un quartier. Il permet de calculer la manière dont le soleil se reflète et projette des ombres en considérant les caractéristiques naturelles et la réflectivité des matériaux. De plus, l'utilisation d'un modèle 3D offre la possibilité de mieux intégrer les schémas de circulation de l'air entre les bâtiments.

CitySim est un outil idéal pour la recherche entreprise dans le cadre de ce Travail de Bachelor car il permet de prendre en considération les effets de la végétation sur l'environnement urbain. Parallèlement à cela, ce logiciel offre une approche complète pour étudier le climat du quartier de la pépinière de Zürich et la thermique du bâtiment. Les résultats de simulation offrent ainsi une analyse détaillée de la consommation énergétique des bâtiments ainsi que les conditions climatiques locales. Finalement, CitySim possède dans son solver les ressources nécessaires pour calculer la MRT à n'importe quel point de la scène. Cela sera particulièrement utile pour comparer les mesures de MRT effectuées sur site avec la simulation.

5.1 MÉTHODE DE SIMULATION

Le cœur de cette étude repose sur la réalisation de diverses simulations, pour lesquelles une méthodologie précise a été établie. Cette méthode se représente schématiquement via la Figure 23 ci-dessous.

Les paramètres essentiels à la bonne exécution de la simulation sont configurés en se basant sur les données récoltées, incluant les données climatiques, les compositions des différents éléments ainsi que les caractéristiques physiques de chaque objet. Toutes les données nécessaires à la modélisation de la scène ainsi qu'au paramétrage de celle-ci sont résumées en Annexe 10.

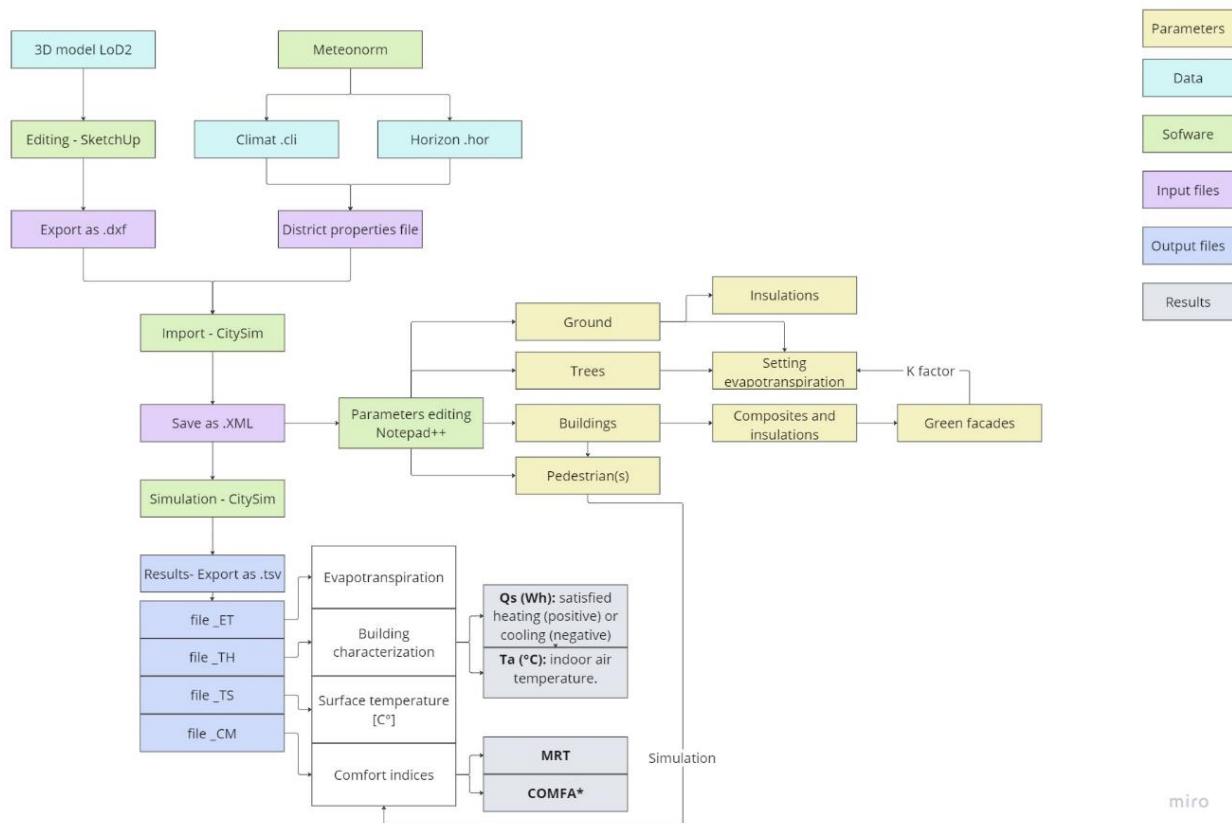


Figure 23: Schéma de méthodologie de simulation

5.1.1 Modélisation et paramètres de la scène

CitySim est un logiciel qui effectue ses calculs à partir des surfaces d'un modèle en trois dimensions. Pour mener à bien les simulations, il était nécessaire de préalablement modéliser le cas d'étude en 3D. Cependant, CitySim ne propose pas de fonctionnalités de dessin intégrées. Par conséquent, le logiciel SketchUp a été utilisé pour modéliser scène, qui a ensuite été importée dans CitySim.

Dans un premier temps, il a été impératif de définir avec précision la zone géographique à prendre en compte dans la modélisation. Une restriction au périmètre de pépinière semble déjà être d'une ampleur considérable. En effet, une étude menée par (Alsaad et al., 2022) a démontré que l'effet de façades végétales sur la réduction de la température de l'air entre les bâtiments est relativement négligeable, voire inexistante. Par conséquent, ce facteur importe peu la délimitation du périmètre. En revanche, pour quantifier correctement le rayonnement atteignant le bâtiment, il est nécessaire de prendre en compte suffisamment de bâtiments autour de celui-ci pour caractériser au mieux les ombres portées. De ce fait, la zone sélectionnée se présente comme sur la Figure 24.



Figure 24: Délimitation du périmètre de la zone d'étude autour de la pépinière
 Source : map.geo.admin.ch

Une fois la zone sélectionnée, la modélisation du cas d'étude a été réalisée à partir d'un modèle 3D de l'enveloppe extérieure et des structures de toit. Le modèle, sous forme de fichier LoD2 basé sur les plans d'étage des bâtiments et complété par photogrammétrie, a pu être téléchargé sur le site internet de la Ville de Zürich puis importé dans SketchUp afin de l'adapter. En effet, le modèle a nécessité quelques améliorations au niveau du bâtiment du cas d'étude. De plus, le modèle importé ne comportait pas de sol ni d'arbres, il a donc été question de les modéliser à la main par la suite.

Une fois l'entièreté du modèle réalisé et adapté, celui-ci a été importé dans CitySim. CitySim est capable ainsi de reconnaître les surfaces de toit, les façades, les surfaces d'ombrage, les routes et la végétation, pour autant que ceux-ci aient été affecté avec le Tag correspondant dans SketchUp. La liste des Tags affecté à la scène est décrite Annexe 10.3.

Toujours en fonction de la zone d'étude sélectionnée, des données météorologiques ont été obtenues grâce au logiciel meteonorm. Afin de réaliser les simulations, CitySim nécessite un fichier climatique comportant la radiation diffuse horizontale, le rayonnement, la température de l'air, la température du sol, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative, les précipitations ainsi que la nébulosité pour chaque heure de l'année. En plus du fichier climatique, il est nécessaire d'obtenir un fichier comportant l'horizon de la zone d'étude.

Pour notre étude, la station météo choisie se situe à 5km du bâtiment étudié. Cette station a été choisie plutôt qu'une autre car elle possédait le plus grand nombre de mesures disponibles.

5.1.1.1 Bâtiment d'étude

En utilisant les photos disponibles de l'entrepôt comme référence, une amélioration de la modélisation a été réalisée, car le bâtiment importé se résumait à un simple parallélépipède rectangle. Ainsi, son architecture a été redessinée manuellement sur SketchUp à partir de la géométrie téléchargée et des photos disponibles pour se rapprocher au maximum de la réalité.

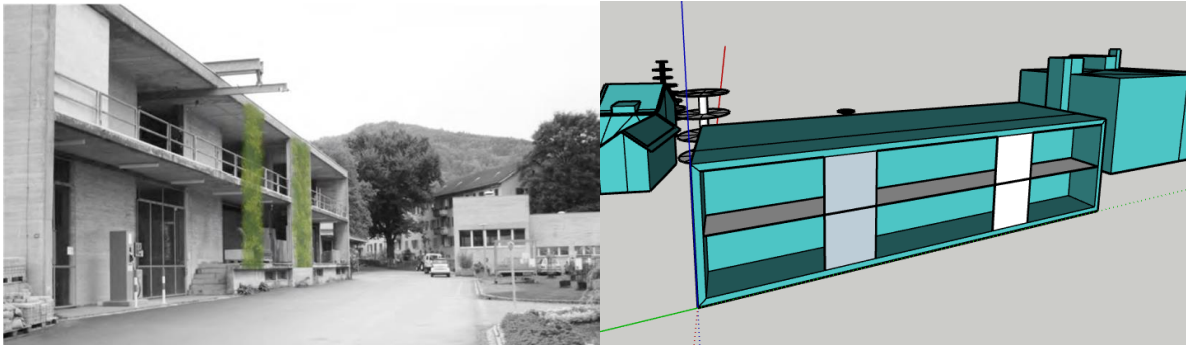


Figure 25: à gauche, une photo du bâtiment étudié avec ses façades végétales, à droite le bâtiment modélisé sur SketchUp avec en gris la façade rideau et en blanc le mur vivant.

Source : (Tschander et al., 2021) à gauche

Dans le cadre de l'évaluation du bilan thermique du bâtiment, il a été impératif de formuler certaines hypothèses quant à sa composition. Étant donné l'absence d'informations sur les caractéristiques précises des façades, de la toiture et du plancher, il a été présumé que ces éléments étaient entièrement constitués de béton avec une isolation intérieure. Cette hypothèse a été réalisée à partir du visuel du bâtiment ainsi que de son année de construction. À cet égard, des compositions standards en béton provenant de Swisspor ont été utilisées pour modéliser les différentes structures du bâtiment, les compositions choisies peuvent être consultées en Annexe 10.5. Il a également été estimé (toujours selon les photos disponibles) que des fenêtres étaient présentes uniquement sur la façade nord-ouest avec un taux de surface vitrée de 50%. Une valeur U de 2,8 ainsi qu'une valeur g de 0,75 ont été attribuées aux vitrages selon les performances pour un bâtiment des années 60 non rénové.

Concernant un aspect un peu plus technique, le taux de renouvellement d'air du bâtiment a été estimé à 0,4. Aucune ventilation mécanique n'est installée. Possédant désormais une affectation fictive de bâtiment administratif, une température consigne minimale de 20°C est requise. Il a donc été question de mettre en place un système de chauffage fictif. Pour cela, une solution simple a été adoptée, à savoir une chaudière à gaz avec un rendement de 0,85. Ce choix est une fois de plus basé sur les installations usuelles des années 60. En ce qui concerne le refroidissement, dans un premier temps aucun système de climatisation n'a été installé afin de pouvoir observer les heures de surchauffe dans le bâtiment. Les heures de surchauffe annuelles correspondent à la durée totale pendant laquelle la température intérieure du bâtiment dépasse les 26°C, conformément à la norme SIA 180. L'objectif est de comparer les heures de surchauffe en présence de la végétation et en l'absence de celle-ci. Dans la suite du travail, un système de refroidissement fictif sera ajouté au bâtiment afin limiter ainsi la température de consigne à une valeur maximale de 26°C et quantifier les consommations énergétiques y relatives.

Pour modéliser les façades vertes il a été nécessaire de créer une structure portante. En effet, pour le mur vivant, on voit sur la Figure 25 que celui-ci est apposé contre une paroi en béton. Pour la façade rideau, aucune paroi ne supporte la végétation mis appart un treillis. Étant trop complexe de modéliser un treillis sur SketchUp, il a été choisi de modéliser la façade verte rideau avec un support en béton de

fine épaisseur. Cette hypothèse conduit à une modélisation de la façade rideau qui s'éloigne quelque peu de la réalité. Il est ainsi possible que la façade, initialement de type rideau, présente des caractéristiques similaires à celles d'un mur végétalisé. Finalement, pour terminer la modélisation des parois végétales il faut leur assigner une typologie de toiture. En effet, dans le logiciel CitySim, seules les toitures sont conçues pour accepter une composition végétale. Par conséquent, il a été nécessaire de considérer les toits comme des surfaces de façade et les parois végétales comme des surfaces de toiture afin de modifier leur composition dans le logiciel et d'y ajouter de la verdure. L'intégration de la végétation en surface s'effectue par la suite en modifiant l'albedo de la surface et en ajustant le coefficient appelé k factor dans les paramètres de CitySim. Le k factor représente la capacité de la plante à évaporer l'eau, (Coccolo, 2017) explique que pour un climat sec le facteur est de 0,1 à 0,2 ce qui équivaut à ajouter des plantes grasses ou autre variétés typiques des climats arides. Pour un climat tempéré, le facteur k est de 0,6 à 0,8, ce qui peut être associé à des plantes qu'on retrouve notamment en Europe. Pour un plan d'eau, le facteur est de 1, cela s'applique par exemple à une fontaine dont on aimerait mesurer les effets de refroidissement sur la température de l'air ambiant via évaporation de l'eau.

Pour les façades végétales présentes ici, il a été attribué une valeur de 0,7 au mur vivant car il est estimé qu'il est composé des plantes qui ont une meilleure tendance à évaporer l'eau. Pour la façade rideau le k factor a été évalué à 0,6 car il ne s'agit pas de la même variété de plantes.

5.1.1.2 Sol

Les surfaces de sol de la scène ont été discrétisées manuellement. Afin d'obtenir un maillage plus précis, il serait nécessaire d'utiliser les coordonnées de swisstopo pour l'ensemble de la zone d'étude. Pour rappel, étant donné que CitySim travaille à partir de surfaces, il est impératif d'éliminer les empreintes des bâtiments dans le sol afin d'éviter les duplications. En d'autres termes, nous avons besoin uniquement du sol entourant les bâtiments, sans prendre en compte la partie située en dessous. Pour ce faire, l'utilisation d'un script Python s'avère utile, permettant de sélectionner uniquement les points désirés à partir des coordonnées géographiques préalablement téléchargées. Une fois les points sélectionnés, il est nécessaire de créer un maillage triangulaire à exporter dans un format compatible avec CitySim. Ce maillage est essentiel pour discrétiser le sol de manière suffisamment fine pour étudier la répartition des températures au sol car chaque surface possède une valeur distincte dans CitySim.

En raison de contraintes de temps, le maillage a été réalisé manuellement plutôt qu'en utilisant Python. Cela affecte peu les résultats dans le cadre de cette étude, cependant les images de rendu sont moins esthétiques. En effet, des surfaces d'environ un mètre carré ont été discrétisées, cependant en raison de la modélisation effectuée par dessin sur SketchUp, les surfaces ne possèdent pas toutes exactement la même aire.

Dans le fichier météo, les différentes températures pour les différentes couches du sol sont indiquées en fonction des données disponibles. Malheureusement, nous ne disposons pas d'informations détaillées sur les différentes couches composant le sol ni sur leurs températures respectives, ainsi nous utilisons la composition décrite dans la thèse de (Coccolo, 2017) disponible en Annexe 10.410.4. De plus, les températures de chaque couche ne sont pas connues. Ainsi, conformément à la norme SIA 180/1, une température du sol constante de 8°C à une profondeur de 1 mètre a été attribuée.

5.1.1.3 Piétons

Afin d'observer l'impact du climat sur le confort thermique, des piétons sont modélisés dans CitySim. Grâce à ces piétons, il est possible d'évaluer la MRT ainsi que divers indices de confort évalués directement d'un point de vue humain.

(Coccolo, 2017) a développé un modèle de piéton dans sa thèse qui se présente comme suit : « *Les piétons sont géométriquement conçus avec Rhinoceros, Autocad ou SketchUp, sous la forme d'un prisme octogonal inscrit dans un cercle de 0,17 m de diamètre ; la hauteur d'un piéton correspond à 1,5 m* ».

Elle explique qu'après cela, les piétons sont importés dans le logiciel CitySim, qui intègre alors leurs caractéristiques physiques de manière similaire à celles des bâtiments. Par exemple, l'albédo de la personne et de ses vêtements est fixé à 0,37, tandis que l'émissivité à ondes longues est établie à 0,95. En considérant une analogie entre le piéton et un bâtiment, la température interne est maintenue constante entre 35 °C et 37 °C. Enfin, le corps humain est modélisé comme étant constitué de quatre couches concentriques, à savoir de la peau, de la graisse, du muscle et de l'eau.

Les piétons sont positionnés dans la scène selon l'emplacement souhaité pour la réalisation de calculs d'indice de confort. Par conséquent, il est requis un nombre de piétons équivalent au nombre de résultats désirés, chaque point de calcul étant associé à un piéton.

5.1.1.4 Albédo des surfaces

Pour terminer d'ajuster la scène de simulation avec les bons paramètres, une valeur d'albédo a été attribuée à chaque surface en fonction de sa composition. Pour tous les bâtiments autour du cas d'étude, un albédo de 0,2 a été choisi conformément à la valeur de base dans CitySim. Ces bâtiments ont uniquement un rôle d'ombrage et de réflexion dans la scène. Concernant le bâtiment du cas d'étude, étant composé de béton, un albédo de 0,2 a été fixé pour toutes ses surfaces. Pour les façades végétales, un albédo de 0,25 a été choisi selon la publication de (Villeneuve & Richard, 2007) et un albédo de 0,3 pour le gazon toujours selon les mêmes auteurs. Pour les surfaces bitumées, c'est une valeur de 0,05 qui a été attribuée selon les chiffres de (Kotak et al., 2015).

Tableau 1: Résumé des albédos de la scène

Surface	Albédo
Ombrage, bâtiments autour du cas d'étude	0.2
Béton ¹	0.2
Façades végétales (mur vivant et façade rideau)	0.25
Gazon	0.3
Asphalte	0.05

5.1.2 Résultats de la modélisation

Une fois que tous les éléments de la scène ont été modélisés, celle-ci acquiert le rendu graphique illustré par la Figure 25 ci-dessous. Il est à présent possible d'enregistrer le modèle au format XML. Ce type de fichier permet ainsi de stocker les données du modèle et contient les paramètres de la scène ainsi que les propriétés des objets simulés. C'est notamment à travers ce code qu'il est possible de modifier le k factor des surfaces végétales pour faire varier le taux d'évaporation des plantes, les compositions du bâtiment, les typologies de sol, l'albédo des surfaces, etc.

¹ radiance-online.org

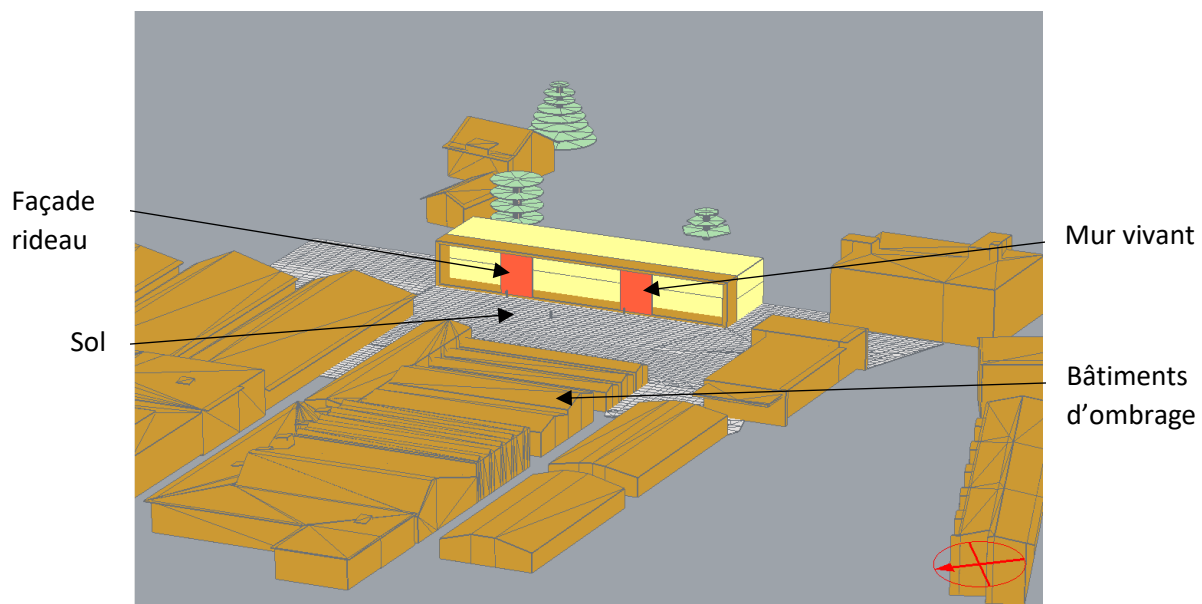


Figure 26: Rendu de la modélisation 3D avant simulation importé sur CitySim

5.1.3 Mesures du confort

Afin d'observer les résultats souhaités, divers facteurs seront calculés et comparés pour divers scénarios de simulation. Pour l'analyse du bilan thermique, les consommations énergétiques ainsi que la température à l'intérieur du bâtiment seront évaluées. Pour d'étudier le microclimat autour du bâtiment et l'impact des façades végétales sur celui-ci, plusieurs indices thermiques peuvent être utilisés. Il existe de nombreux indices pour quantifier le confort thermique prenant en compte des paramètres tels que la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement. Les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont l'indice universel du climat thermique, l'indice de refroidissement éolien, l'indice de température effective, l'indice de stress thermique utilisé pour les climats arides et la température physiologique équivalente. Or, dans ce travail nous étudierons le confort thermique grâce à l'indice COMFA* intégré au solver de CitySim ainsi qu'à la température moyenne radiante et les températures de surfaces.

5.1.3.1 COMFA*

L'indice COMFA* est issu d'un modèle mathématique développé par (Brown et Gillespie, 1995) permettant de décrire les échanges d'énergie entre un humain et son environnement dans un climat tempéré et ainsi quantifier les sensations de chaleur ou de froid pour une personne. Ce modèle a ensuite été adapté par (Coccolo, 2017) dans sa thèse afin d'être validé et implémenté dans le logiciel CitySim. En effet, la révision du modèle a permis d'apporter des améliorations spécifiques pour mieux estimer les échanges de chaleur et d'humidité dans les situations où l'activité physique, les vitesses de vent élevées et les températures chaudes peuvent avoir un impact significatif sur la balance énergétique humaine. Ces améliorations ont permis d'augmenter la précision et la fiabilité du modèle dans ces conditions particulières. L'équation implémentée permettant de calculer cet indice se présente comme suit :

$$B = M_h + R_{RT} - C - E_{s+i} - L_s \quad [13]$$

B = Bilan énergétique COMFA* [W/m²]

M_h = chaleur métabolique dégagée par un humain [W/m²]

R_{RT} = rayonnement absorbé [W/m²]

C = déperditions par convection [W/m^2]

E_{s+i} = pertes de chaleur par évaporation [W/m^2]

L_s = rayonnement à ondes longues émises par une personne [W/m^2]

Une fois tous les paramètres calculés, les résultats peuvent s'interpréter grâce à au Tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2: Confort thermique en fonction de l'indice COMFA* selon (Coccolo, 2017)

Sensation thermique	COMFA * [W/m^2]
Très froid	≤ -201
Froid	-200 à -121
Légèrement froid	-120 à -51
Neutre	-50 à 50
Légèrement chaud	51 à 120
Chaud	121 à 200
Très chaud	≥ 201

5.1.3.2 MRT

La température moyenne radiante est une mesure globale qui prend en compte les échanges thermiques par rayonnement entre un individu ou un objet et son environnement. Elle permet de quantifier les échanges radiatifs et de fournir une indication sur la sensation de chaleur ou de froid perçue par un individu en fonction du rayonnement infrarouge de l'environnement qui l'entoure.

Dans CitySim, l'évaluation de la MRT découle du modèle développé par (Höppe, 1992) et implique le calcul du rayonnement à ondes courtes direct, diffus et réfléchi par l'environnement construit ainsi que le rayonnement à ondes longue. Par la suite, ces valeurs de rayonnement sont multipliées par chaque surface prenant en compte les flux radiants émis dans les différentes directions. Le calcul de la MRT s'exprime comme suit :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\varepsilon_p \sigma}} \quad [14]$$

T_{mrt} = Température moyenne radiante [K]

S_{str} = densité de flux radiant moyen [W/m^2]

ε_p = émissivité du corps humain [-]

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2/K^4$]

5.1.4 Scénarios de simulation

Afin d'obtenir des résultats comparatifs, une version du modèle sans végétation de façade a été simulée puis les simulations ont été effectuées une seconde fois avec l'intégration de la végétation sur les parois. Pour ces deux scénarios, les simulations ont dans un premier temps été réalisées pour l'année 2020. Cette année de référence a été choisie dans le but de comparer les valeurs simulées du mois de juillet avec les mesures effectuées par la ZHAW entre le 17 juillet et le 31 juillet 2020.

Dans un deuxième temps, les deux scénarios ont été repris cette fois-ci avec des données météo pour 2050 selon les scénarios du GIEC afin d'évaluer l'impact des façades végétales face aux changements climatiques.

6 RÉSULTATS

Comme déjà mentionné, le modèle utilisé dans les simulations est limité par rapport au cas réel. Ces limitations peuvent entraîner des divergences significatives entre les résultats obtenus et la réalité. Par conséquent, il est possible que les valeurs absolues ne représentent pas de manière précise la situation réelle. En revanche, les valeurs en termes de différences fournissent une perspective comparative plus significative et permettent de mieux évaluer les variations et les impacts des différentes conditions et paramètres étudiés.

6.1 THERMIQUE DU BÂTIMENT

Conformément au cahier des charges, une étude de l'impact de la végétation en façade sur la thermique du bâtiment a été entreprise permettant ainsi d'évaluer les besoins en chauffage et en climatisation.

Dans un premier temps, une simulation du bâtiment sans les façades végétales a permis d'obtenir un profil de température intérieur annuel. Il a été observé que durant la période estivale, les températures peuvent être très élevées avoisinant parfois même les 35°C.

Afin d'étudier l'impact de la façade rideau ainsi que du mur vivant sur les températures estivales à l'intérieur du bâtiment, les heures de surchauffe ont été quantifiées selon la norme SIA 180.

Tableau 3: Résultats des heures de surchauffe

	Avec façades végétales	Sans façades végétales	Écart absolu	Écart relatif [%]
Surchauffe annuelle [h]	266	282	16	5.76
T_{int} max [°C]	33.5	34.6	1.1	3.18

Conformément aux données présentées dans le Tableau 3, l'ajout de végétation le long des parois entraîne une réduction de 16 heures des périodes de surchauffe tout au long de l'année. Cette réduction s'explique en partie par le fait que CitySim procède à des simulations en considérant les parois végétales comme étant apposées contre la façade du bâtiment et non devant celle-ci. En effet, les calculs sont réalisés en considérant un volume clos, sans prendre en compte l'espace ouvert entre les parois et les façades. Cette subtilité découle de la nécessité de classer les parois verticales comme des toitures afin d'y intégrer la végétation. Cette méthode de simulation rend le modèle simulé plus performant que la réalité car cela permet de prendre en compte l'augmentation d'isolation de la façade, induite par l'ajout des parois végétales, ainsi que la transmission des effets bénéfiques des plantes par conduction. En effet, la végétation diminue localement la température de surface de la partie en béton composant la paroi et diminue, grâce à la conduction thermique, la température à travers la façade du bâtiment. Dans la réalité, on peut facilement supposer que l'espace entre les parois végétales et la façade du bâtiment est trop important pour que les phénomènes de conduction et de convection sur la façade soient influencés par la végétation. Seul l'ombrage jouera un rôle sur la thermique du bâtiment dans ce cas-là, induisant des résultats bien moindres que ceux observés ici.

Ainsi, CitySim ne permet pas d'évaluer l'impact de la végétation sur des surfaces d'ombrage qui ne font pas partie de l'enveloppe thermique, comme c'est le cas dans la réalité en question. Il n'est donc pas possible d'étudier l'impact d'une façade végétale ventilée. Un autre mécanisme qui ne peut pas être étudié ici est le blocage du vent par les feuilles des plantes. Les façades végétales ont été modélisées

comme étant des parois en béton avec un certain coefficient de réflexion et avec une certaine capacité d'évaporation de l'eau pour reproduire les effets des plantes. Le relief de celles-ci n'est donc pas modélisé dans CitySim et le potentiel blocage du vent induit par la rugosité n'est pas représenté.

Si on s'intéresse à la répartition des températures dans le bâtiment, on remarque, grâce à la Figure 27, que l'effet de la végétation sur la réduction de la température intérieure est nettement plus efficace entre 13h et 22h. L'écart maximal se produit à 19h avec une différence de 1,1°C. Cela s'explique par plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement et l'évapotranspiration ainsi qu'à l'inertie du bâtiment. A partir de 13h, la période correspond généralement aux heures les plus chaudes et ensoleillées de la journée, lorsque le rayonnement solaire est le plus intense. La végétation en façade agit comme un bouclier contre le rayonnement solaire direct en absorbant et en réfléchissant une partie de l'énergie solaire avant qu'elle n'atteigne la façade. Ainsi, la végétation limite la quantité de chaleur qui pénètre à l'intérieur du bâtiment, contribuant de ce fait à maintenir une température plus fraîche. Les températures encore élevées autour des 20h sont en partie liées à l'inertie du bâtiment qui agit comme un réservoir thermique emmagasinant la chaleur durant la journée. Cela signifie que même après la diminution rayonnement solaire direct, le bâtiment continue à émettre de la chaleur emmagasinée pendant les heures chaudes.

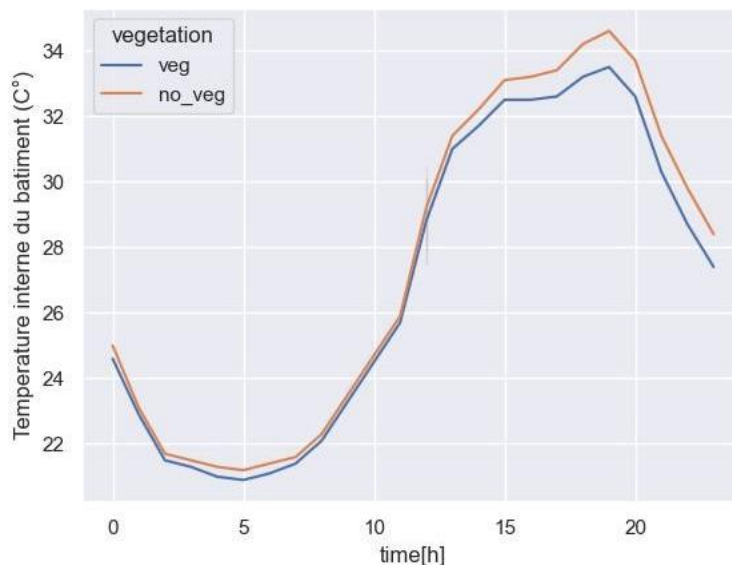


Figure 27: Répartition des températures dans le bâtiment avec et sans végétation pour le jour le plus chaud de l'année 2020

Les diminutions de température à l'intérieur du bâtiment sont rendues possibles grâce aux bénéfices apportés par les plantes sur les transferts de chaleur, notamment grâce à l'albédo des plantes qui est supérieur à celui du béton ainsi qu'à leur capacité d'évapotranspiration. L'un des mécanismes d'action observables dans CitySim est la réduction de la température de surface des façades végétales.

En se référant à la légende ci-contre (Figure 28), on remarque sur la Figure 29 que la végétation permet effectivement de diminuer la température de surface des parois.



Figure 28: Légende pour les températures de surfaces

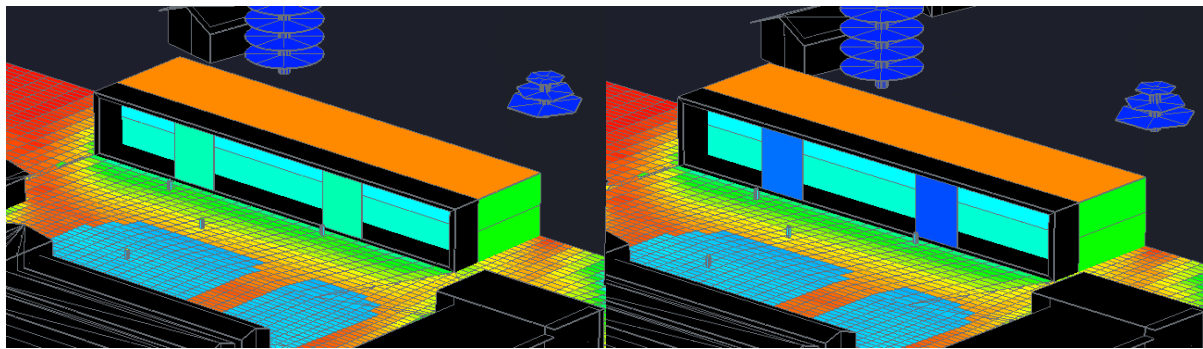


Figure 29: Température moyenne annuelle de chaque surface de la scène. À gauche sans la végétation de paroi, à droite avec la végétation de paroi

En observant les températures moyennes des deux parois végétales présentées dans le Tableau 4, on obtient une diminution d'environ 2°C entre les deux scénarios. Il a même été observé une réduction maximale de 5°C pour la façade rideau et de 6°C pour le mur vivant en été. Pour rappel, (Hoelscher et al., 2016) ont observé, lors d'une chaude journée, que la température de surface d'un mur végétalisé de vigne vierge avait été réduite dans une plage de 0,1 à 11,3°C avec une moyenne de 3,3°C. Les résultats obtenus ici ne sont donc pas aberrants.

On observe également, comme attendu, que le mur vivant possède une capacité de réduction de température de surface légèrement supérieure, soit de 4,5%, à celle de la façade rideau. Cela est dû au facteur k qui est plus élevé dans le cas du mur vivant. Une quantité d'eau évapotranspirée plus élevée permet ainsi une diminution de température proportionnellement plus grande.

Tableau 4: Température moyenne de surface des parois végétales

	Avec végétation	Sans végétation
T_{moy} façade rideau [°C]	11.34	13.47
T_{moy} mur vivant [°C]	11.24	13.47

Ces réductions de température de surfaces peuvent également s'observer via le rayonnement infrarouge émis par les façades, notamment la nuit. Le graphique de la Figure 30 démontre que l'ajout de végétation sur la paroi en béton limite l'absorption par rayonnement. Les simulations ont été réalisées dans les mêmes conditions pour la version avec végétation et la version sans. On remarque sur le graph, que la courbe indiquant l'émission de rayonnement infrarouge de la façade végétale est plus faible que pour la façade sans végétation avec du béton à nu. Ce phénomène prouve que la version végétalisée possède une température de surface plus faible qu'une paroi dépourvue de végétation.

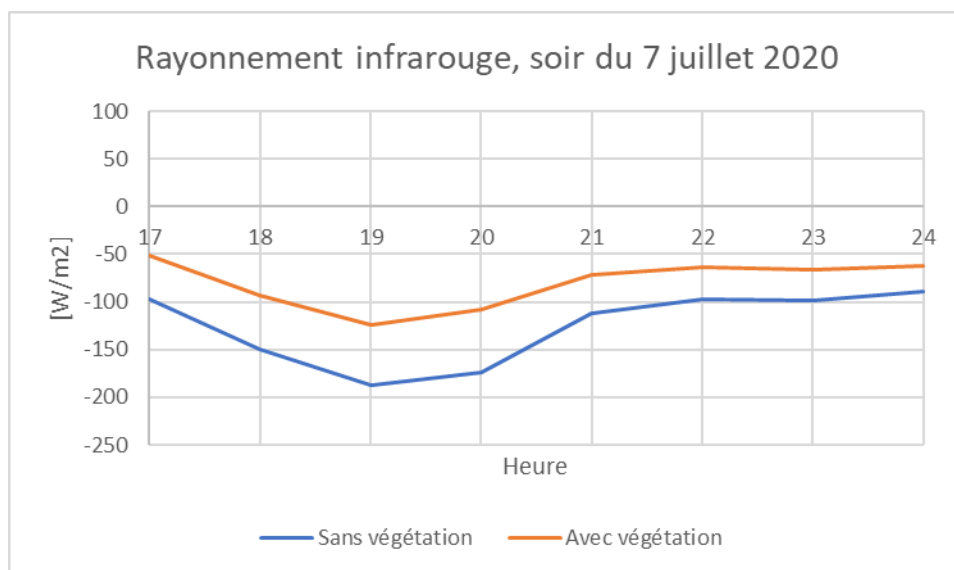


Figure 30: Emission de rayonnement infrarouge nocturne du mur vivant pour les scénarios avec et sans végétation

On sait que la diminution des températures de surface est possible grâce à divers paramètres spécifiques aux plantes tels que l'albédo ainsi que l'évapotranspiration. CitySim ne donne pas d'information à proprement parlé sur la réduction de température issue uniquement de l'évapotranspiration. En revanche, on peut observer l'effet de celle-ci en quantifiant la quantité d'eau évaporée par mètre carré de surface. Manquant de données, il n'a pas été possible de recalculer l'évapotranspiration à partir de mesures effectuées sur site afin de la comparer avec les résultats de simulation. En revanche, on peut observer sur le graphique de la Figure 31, la quantité d'eau évaporée pour les parois végétales.

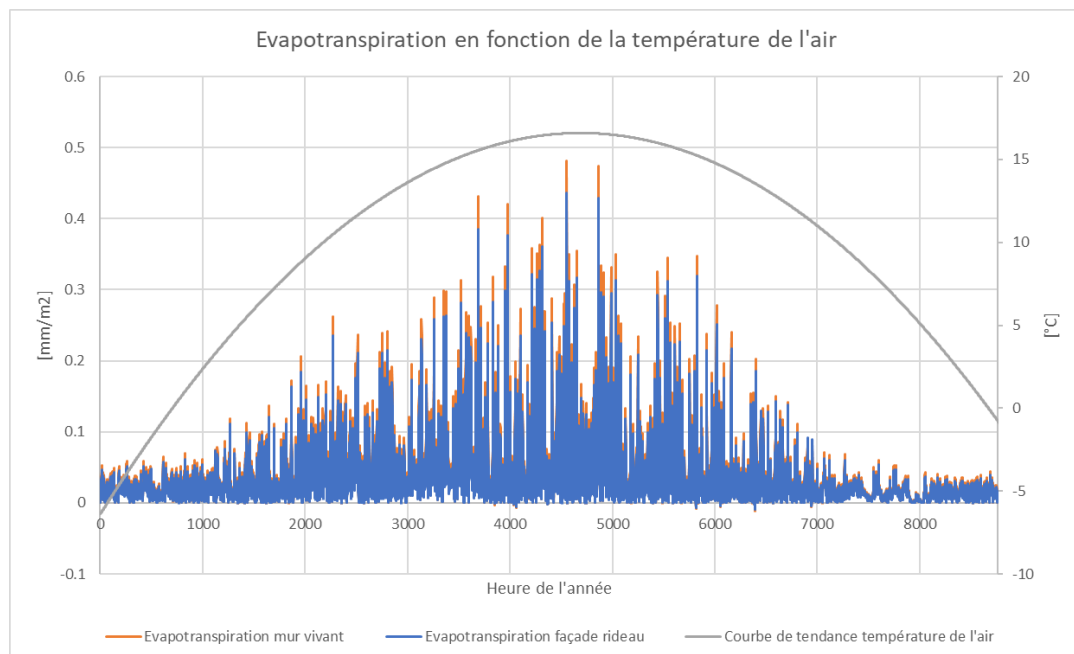


Figure 31: Evapotranspiration annuelles des parois végétalisées

Conformément à la théorie, la quantité d'eau évapotranspirée par la végétation est directement proportionnelle à la température de l'air. Les autres paramètres influençant l'évapotranspiration sont

le rayonnement solaire et la teneur en eau dans l'air. L'analyse des fichiers climatiques de 2020 a pu démontrer que la quantité d'eau évaporée par les parois augmente bel et bien en présence d'un rayonnement plus intense et diminue avec l'humidité relative de l'air.

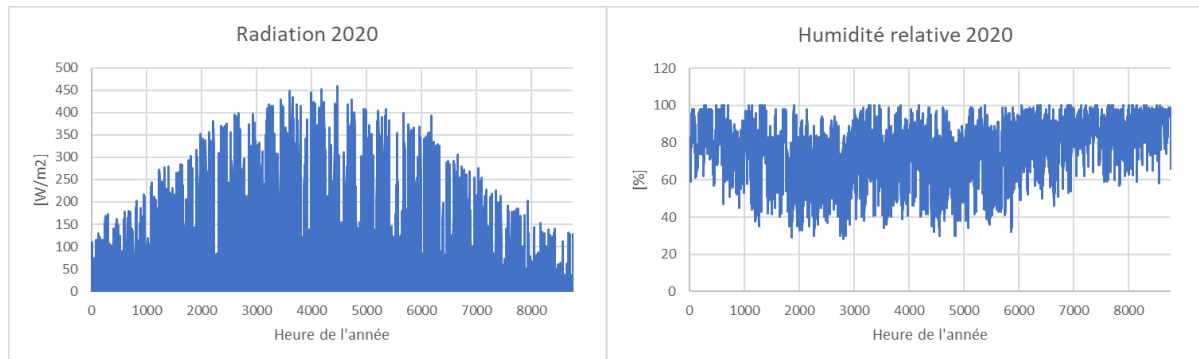


Figure 32: à gauche la radiation annuelle, à droite l'humidité relative annuelle

Toujours selon la norme SIA 180, la limite acceptable des heures de surchauffe (température supérieure à 26°C) est de 100h par année. Grâce aux résultats du Tableau 3, on constate rapidement que le bâtiment étudié n'est pas aux normes, il est donc nécessaire d'y ajouter un système de refroidissement. L'ajout d'une climatisation permet de limiter les températures intérieures du bâtiment entre 20°C et 26°C. Il est désormais possible d'étudier les consommations énergétiques pour maintenir ces températures de consignes ainsi que l'impact de la végétation sur les consommations de chauffage et de climatisation.

Tableau 5: Consommations d'énergie thermique cumulées annuelles

	Avec façades végétales	Sans façades végétales	Écart absolu [kWh]	Écart relatif [%]
Consommation de chauffage [kWh]	150'351.90	147'274.85	3'077.05	2.09
Consommation de climatisation [kWh]	462.87	550.90	88.03	15.98

Le Tableau 5 ci-dessus permet de visualiser les consommations d'énergie thermique pour l'année 2020 avec et sans la végétation des parois. Si on s'intéresse de plus près à la consommation de chauffage, on constate que celle-ci augmente légèrement, soit de 2%, avec l'ajout de végétation. Cette constatation contraste avec les attentes théoriques anticipant l'effet inverse, bien que (Merz, 2021) ait pu observer un phénomène similaire dans son travail. L'augmentation des besoins de chauffage s'explique le comportement physique du béton situé derrière les plantes, ajouté dans le modèle de simulation comme support. En effet, en hiver, sous l'influence de la végétation persistante, le béton a tendance à se refroidir davantage. Au contraire, le béton dépourvu de végétation est exposé directement aux rayons du soleil et peut ainsi emmagasiner la chaleur du soleil plus facilement. Afin de pallier ce problème, une solution envisageable serait de sélectionner des plantes caduques. Dans ce cas, l'effet des façades vertes serait annulé, et les consommations de chauffage resteraient inchangées par rapport aux parois dépourvues de végétation.

Concernant les résultats obtenus pour la consommation de chauffage annuelle, en règle générale en Suisse, la consommation d'énergie de chauffage d'un bâtiment de ce type est d'environ 150 kWh/m²

de surface de référence énergétique² (SRE). La valeur obtenue dans le Tableau 5 est légèrement supérieure, soit 160 kWh/m². Cependant, cette valeur demeure dans la fourchette de valeurs habituelles. De plus, il est cohérent d'observer une légère augmentation par rapport à la norme actuelle, étant donné qu'il s'agit d'un ancien bâtiment en béton doté d'une isolation intérieure.

Si on s'intéresse cette fois-ci à la consommation énergétique liée au refroidissement, l'ajout de végétation sur les parois en béton permet, comme prédit, de diminuer ces consommations. Les conditions d'études présentes ici, soit une orientation nord-ouest ainsi avec taux de couverture végétal de 20%, permettent de diminuer de près de 16% les consommations de climatisation en 2020. Pour rappel, l'étude menée par (Zhang et al., 2022) avait démontré que le système de verdure vertical étudié permettait de réduire la demande de refroidissement d'un bureau de 11,7 % à 18,4 %.

Les résultats présentés ici semblent donc cohérent et démontrent que la végétation de façade peut ainsi jouer un rôle important en termes de refroidissement passif ou semi-passif. Comme il a été démontré dans d'autres études, l'orientation des façades végétales joue un rôle crucial sur les performances de refroidissement de celles-ci. Il serait ainsi intéressant de pouvoir étudier les effets des deux parois végétales étudiées ici sur d'autres orientations du bâtiment.

À la suite de ces résultats, il est possible de calculer la diminution potentielle des émissions de CO₂ liées aux consommations d'énergie thermique grâce à l'ajout de végétation en façade.

Tableau 6: Emissions de CO₂ liées aux consommations d'énergie thermique

	Avec façades végétales	Sans façades végétales	Écart absolu [kg CO ₂ eq]	Écart relatif [%]
Émissions de CO ₂ liées au chauffage [kg CO ₂ eq]	34280.23	33578.67	+701.57	+2.09
Émissions de CO ₂ liées à la climatisation [kg CO ₂ eq]	51.20	60.94	-9.74	-15.98

Les émissions de CO₂ liées au chauffage sont issues de la consommation de gaz pour le fonctionnement de la chaudière. Une valeur de 0,228 kg CO₂ eq/kWh a été utilisée pour le calcul. Cette valeur est issue du document Données des écobilans dans la construction 2009/1:2016 publié par (Confédération Suisse, 2016). Pour les émissions liées à la climatisation, celles-ci sont issues de la consommation électrique du climatiseur. Les données concernant les émissions pour le mix électrique suisse ont pu être trouvées dans la base de données ecoinvent. La valeur de 0,110618 kg CO₂ eq/kWh a été utilisée dans les calculs selon la méthode Impact Woldr+ short term.

Étant donné que les consommations de chauffages sont plus élevées avec végétation que sans, les émissions se voient également augmentées de manière proportionnelle. Pour les émissions liées à la climatisation, celles-ci diminuent également de 16% avec l'ajout de végétation. On constate ainsi que les façades végétales permettent d'engendrer une diminution des émissions de CO₂ principalement en été. Cependant, il serait judicieux de réaliser une analyse de cycle de vie complète afin de déterminer si l'ajout de façades végétales permet de diminuer les émissions de CO₂ globales d'un bâtiment. En effet, il serait intéressant de voir si les émissions réduites par les baisses de consommations d'énergie compensent les émissions liées à conception et à la mise en place de systèmes de verdure verticaux. Il serait également intéressant de prendre en compte dans la balance le CO₂ absorbé par les plantes.

² Source : [Swiss Energy Scope](#)

Pour clore ce chapitre sur l'impact de la végétation de façade sur la thermique du bâtiment, les résultats obtenus à partir de la simulation du modèle sur CitySim ne sont pas pleinement représentatifs de la réalité du cas d'étude. En effet, la manière dont CitySim intègre la végétation de façade ne permet pas de paramétrer avec précision les caractéristiques de densité foliaire (LAD) et d'indice de surface foliaire (LAI). Par conséquent, il est difficile d'étudier l'influence d'une variété spécifique de plante. De plus, il n'est pas possible d'analyser l'impact de l'ombrage sur les résultats en faisant varier la LAD et la LAI. Il serait donc plus judicieux de pouvoir appliquer la même méthode de modélisation que celle appliquée aux arbres dans CitySim (Annexe 10.7) pour représenter les surfaces végétales, ce qui permettrait d'obtenir des simulations plus précises et mieux adaptées à cette étude. Cette approche améliorée offrirait une représentation plus fidèle de l'impact réel de la végétation de façade sur la thermique du bâtiment, contribuant ainsi à une meilleure intégration des paramètres végétaux sur la performance énergétique du bâtiment.

6.2 MICROCLIMAT DU QUARTIER

Selon les spécifications du cahier des charges, une étude de l'impact de la végétalisation de façade sur le climat du quartier a été entreprise permettant ainsi d'évaluer le confort thermique autour du bâtiment.

Dans un premier temps, des simulations ont été réalisées pour déterminer la MRT afin de la comparer avec les mesures de la ZHAW et observer les divergences entre le modèle et la réalité. Dans l'optique d'obtenir des résultats au plus proche de ceux mesurés, les calculs de MRT ont été effectués aux mêmes endroits dans le modèle 3D que lors de la prise de mesure sur site à Zürich. C'est-à-dire derrière la façade rideau et devant le mur nu quelques mètres à côté de la façade végétale dans le but d'observer la MRT face à un mur nu puis proche de la végétation.

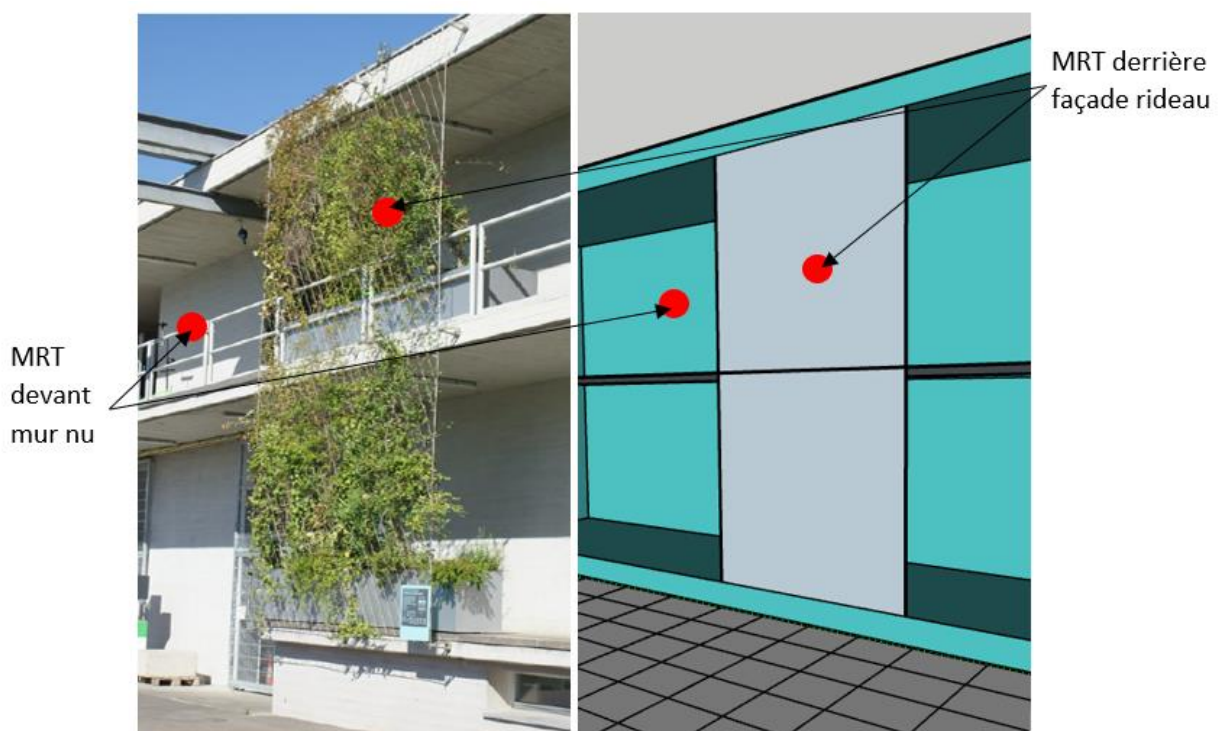


Figure 33: Points de mesures de MRT à gauche dans la réalité et à droite dans la simulation
 Source : à gauche (Tschander et al., 2021), à droite réalisation de l'auteur

Les comparaisons entre les simulations et les mesures ont donné lieu aux résultats présentés sur la Figure 34 et la Figure 35 et 35 ci-dessous.

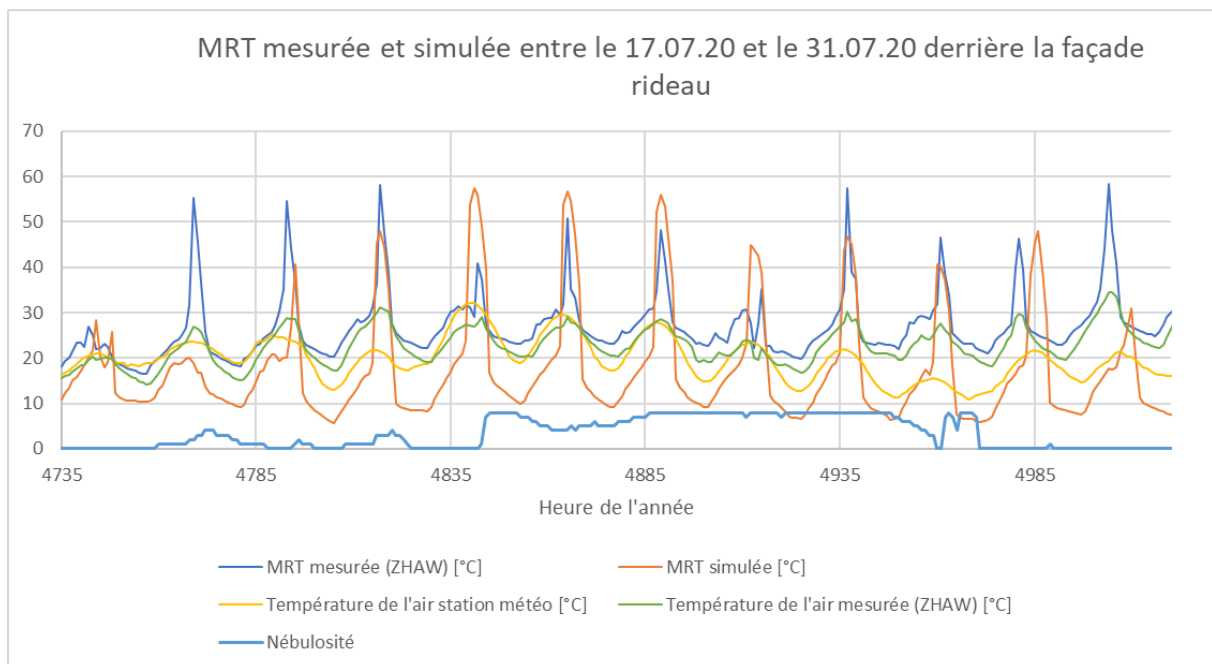


Figure 34: Comparaison de la MRT mesurée et simulée derrière la façade rideau

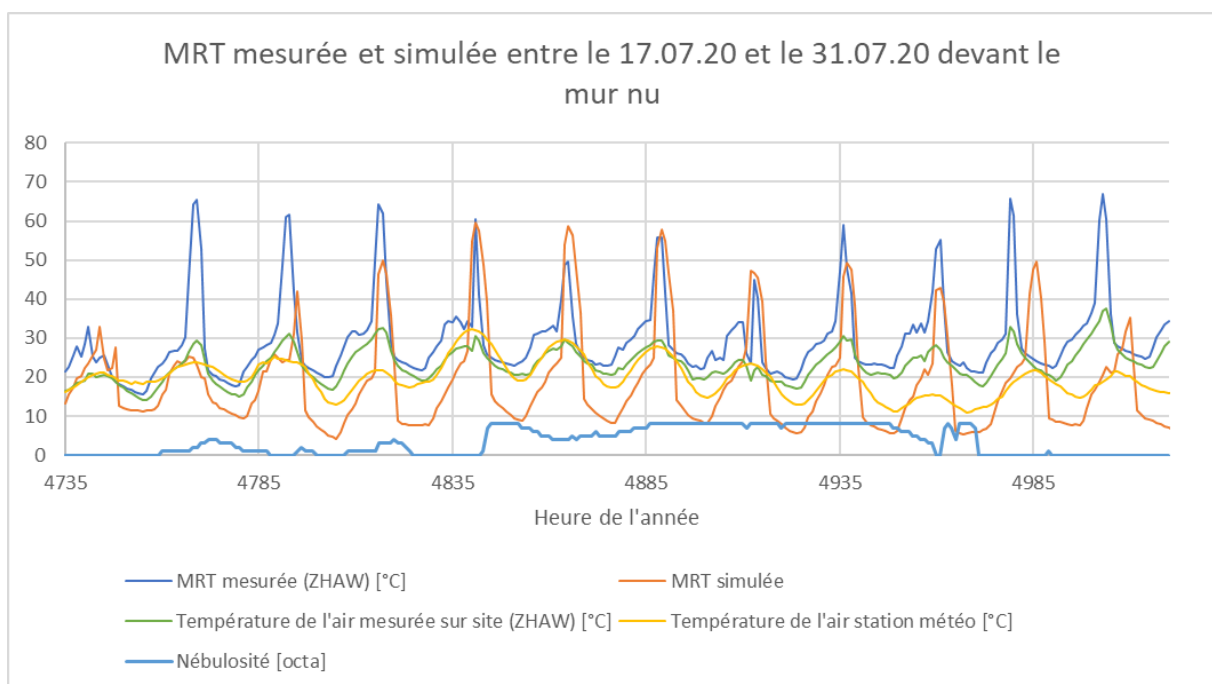


Figure 35: Comparaison de la MRT mesurée et simulée devant le mur nu

Les graphiques des Figures 34 et 35 nous permettent de tirer plusieurs conclusions. Tout d'abord, il est observé qu'au cours de la journée, la température moyenne radiante est sensiblement atténuée grâce à l'influence bénéfique de la végétation de façade. En effet, les relevés démontrent que les valeurs de MRT sont plus élevées devant la surface de mur nu comparativement à celle en arrière-plan de la façade rideau. Les mesures effectuées par la ZHAW démontrent une réduction moyenne de 2,5°C entre

la mesure prise devant le mur nu et celle derrière la façade rideau. Ce résultat souligne l'impact positif de la présence de végétaux sur la régulation thermique, améliorant ainsi le confort.

Une comparaison rigoureuse des valeurs mesurées et des résultats issus des simulations, aussi bien devant le mur nu que derrière la façade rideau, révèle certaines divergences, bien que les courbes de mesure et de simulation suivent une tendance similaire. Afin de déterminer à quel point les valeurs obtenues sont différentes des points de mesure il sera nécessaire d'effectuer une calibration du modèle. En effet, cela permettrait de déterminer si la simulation suit correctement l'évolution des mesures, s'il y a des erreurs de biais ainsi que de quantifier l'écart entre les mesures et la simulation afin de savoir si celle-ci est surestimée ou sous-estimée.

Cependant quelques conclusions peuvent déjà être émises à l'aide des graphiques réalisés. Les pics de température moyenne radiante pendant la journée s'avèrent parfois plus élevés dans les simulations que dans les relevés effectués sur site et inversement. Cette variation peut être attribuée en partie aux données météorologiques utilisées pour les simulations, notamment à la nébulosité et aux températures de l'air. En effet, une nébulosité élevée, soit proche de 8, entraîne généralement une MRT simulée également élevée en journée et plus basse la nuit. Cette relation s'explique par l'intensité accrue du rayonnement solaire en présence d'un ciel dégagé pendant la journée, faisant augmenter la valeur de la MRT, tandis que durant la nuit, le rayonnement infrarouge est émis vers un ciel dégagé sans retour, entraînant une baisse de la valeur de la MRT. Il n'a pas été possible d'obtenir d'information sur la nébulosité du site lors de la prise de mesures, ce qui empêche une comparaison directe avec les données météorologiques du fichier climatique issu de meteonorm.

Par ailleurs, la température de l'air issue du fichier météo utilisé dans les simulations est relativement plus basse que les relevés réalisés à la pépinière de Zürich en juillet 2020. Cette différence explique également que les valeurs de MRT soient par moment nettement inférieures dans les simulations, notamment la nuit. Il est important de souligner que les données météorologiques proviennent d'une station météo située à 5km du site d'étude, alors que les relevés ont été effectués directement près du bâtiment. Cela introduit donc une source de variations entre les deux ensembles de données climatiques. Il aurait également été intéressant de pouvoir comparer le rayonnement issu de meteonorm avec celui régnant sur site, cependant aucune mesure du rayonnement solaire nous a été transmise par la ZHAW. Afin de mieux évaluer l'impact de ces données météo sur le modèle, une analyse de sensibilité devrait être entreprise.

Un autre paramètre influençant la MRT est la vitesse du vent. Les scientifiques de la ZHAW ont opté pour une vitesse de vent fixe lors des calculs. Cependant, dans les simulations, la vitesse du vent n'est pas figée et dépend des informations fournies par le fichier climat. Cette différence dans la méthode de calcul peut également contribuer à l'écart observé entre les résultats mesurés et simulés.

En outre, le calcul de la MRT dans la simulation est légèrement différent de l'Equation 12 utilisée par la ZHAW selon la norme ISO 7726. Dans les mesures, la MRT est définie à partir de divers facteurs tels que la température de l'air, la vitesse du vent ainsi que la température du globe. Le globe mesure la température de rayonnement via une thermistance au centre d'une sphère de couleur noire. Dans CitySim, le calcul de la MRT est basé sur le modèle développé par (Höppe, 1992). Dans le logiciel, c'est le rayonnement solaire direct ainsi l'incidence du rayonnement à ondes courtes et à ondes longues de chaque surface environnante sur le corps qui est calculé, soit en Watt par mètre carré et non en degré Celsius comme le fait le globe. De plus, l'algorithme prend en compte des facteurs supplémentaires tels que l'absorption et l'émissivité du corps humain. Cependant, (Coccolo, 2017) a comparé des

mesures de MRT réalisée selon ISO 7726 avec des simulations issues de CitySim pour un cas d'étude et a obtenu un intervalle de confiance de 95%.

Finalement, un autre facteur explicatif des divergences entre les mesures et les simulations réside dans la conception du modèle 3D, où la façade verte est traitée comme opaque. Or, dans la réalité, cette façade n'est pas totalement opaque, ce qui permet au soleil de pénétrer partiellement à travers le feuillage, alors qu'il est entièrement bloqué dans la simulation. De ce fait, la MRT mesurée est parfois supérieure à celle simulée. La différence d'opacité est due au matériau utilisé pour créer le support de la façade rideau, en l'occurrence le béton, qui possède la propriété bien connue de stocker la chaleur et de la restituer ultérieurement. L'inertie thermique du béton est ainsi responsable du décalage observé dans la courbe de la MRT au cours de la journée. Ce phénomène est notamment observable sur la Figure 36 ci-dessous, où on voit les valeurs mesurées et simulées sur une journée. Les deux courbes suivent la même évolution, ce qui démontre la fiabilité de CitySim dans le calcul de la MRT, cependant la courbe de simulation subit un décalage vers la droite dans l'échelle du temps, ce qui est représentatif de l'inertie du béton.

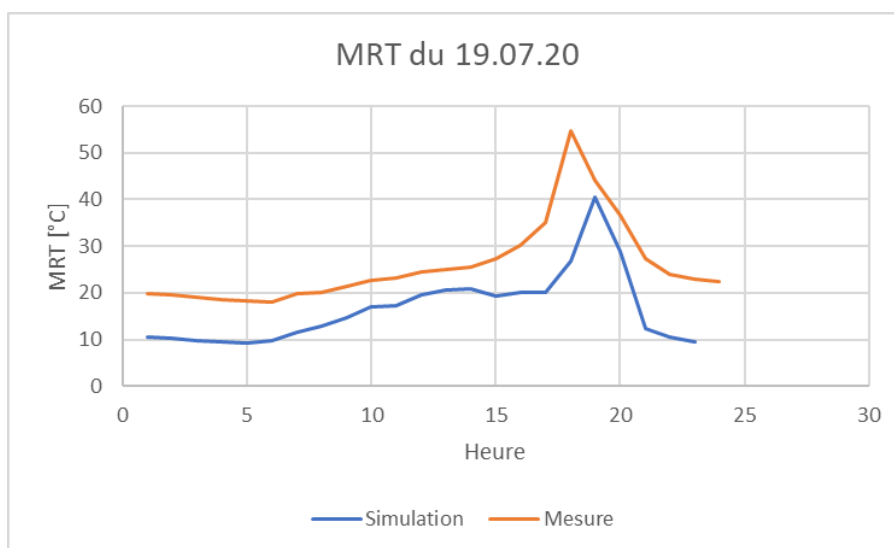


Figure 36: MRT pour le 19.07.20

En somme, les résultats obtenus démontrent l'action de la végétation dans l'atténuation de la MRT pendant la journée, permettant par la suite d'améliorer le confort thermique. Les divergences constatées entre les mesures et les simulations peuvent être expliquées par la prise en compte des données météorologiques, l'opacité de la façade dans le modèle 3D, l'inertie thermique des matériaux utilisés ainsi que dans le calcul même de la MRT. Une approche plus détaillée et une analyse approfondie de ces paramètres pourraient contribuer à une meilleure corrélation entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux issus des simulations.

Après avoir procédé à l'analyse de la MRT, une étude sur le confort thermique pour des piétons situés devant chaque façade végétale, ainsi qu'à quelques mètres de ces dernières, a été entreprise. Il a été décidé de placer un piéton à une distance de 2 mètres devant chaque façade végétale. Cette distance a été choisie dans l'optique de simuler de manière réaliste le passage d'une personne devant le bâtiment. Par la suite, un autre piéton a été positionné à une distance de 10 mètres du bâtiment, entre les deux façades végétales, puis un dernier piéton a été placé à une distance de 13 mètres, afin d'évaluer si les effets sur le confort thermique étaient toujours perceptibles à un tel éloignement.

Sur la Figure 37, on observe l'indice de confort COMFA* devant chaque paroi dépourvue de végétation. On constate que l'indice atteint des valeurs supérieures à 201 W/m² avec un pic à 278 W/m². Pour rappel, les valeurs supérieures à 201 W/m² impliquent des sensations thermiques très chaudes sur le corps humain. On observe ainsi l'intérêt de trouver des solutions pour faire diminuer la valeur de cet indice pour les piétons proche du bâtiment.

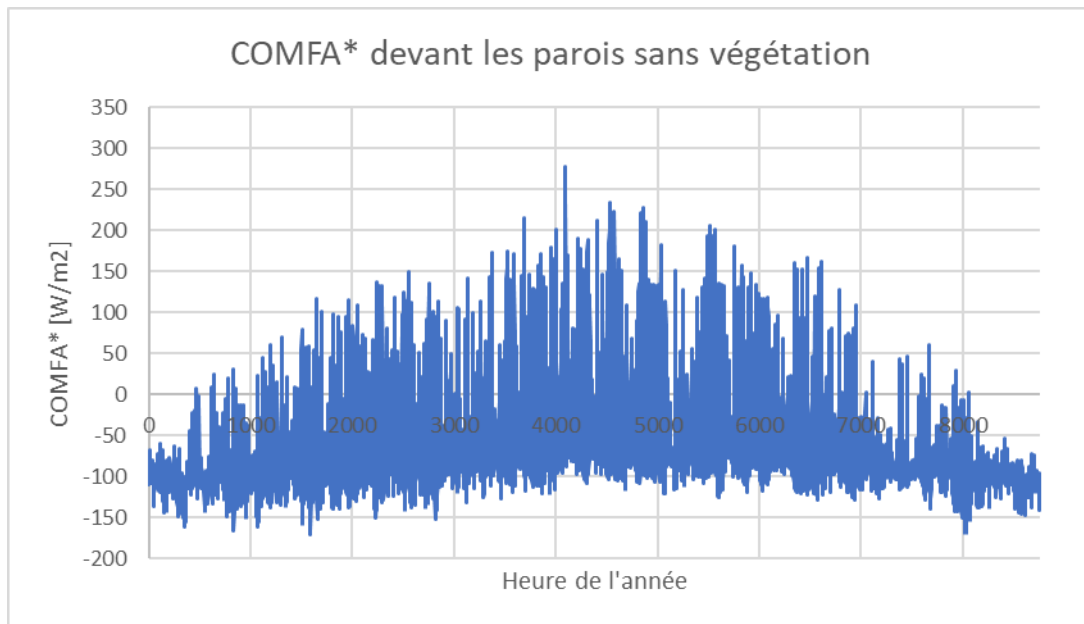


Figure 37: Indice COMFA* devant les parois dépourvues de végétation

À la suite de ce résultat, il est intéressant de pouvoir observer la diminution des valeurs de l'indice de confort grâce à l'ajout de la végétation sur les parois et déterminer si cela permet de passer dans une zone de confort améliorée. Les résultats de la Figure 38 sont uniquement représentés en termes de différences (appelées delta) entre les valeurs de COMFA* avec et sans végétation pour l'année 2020.

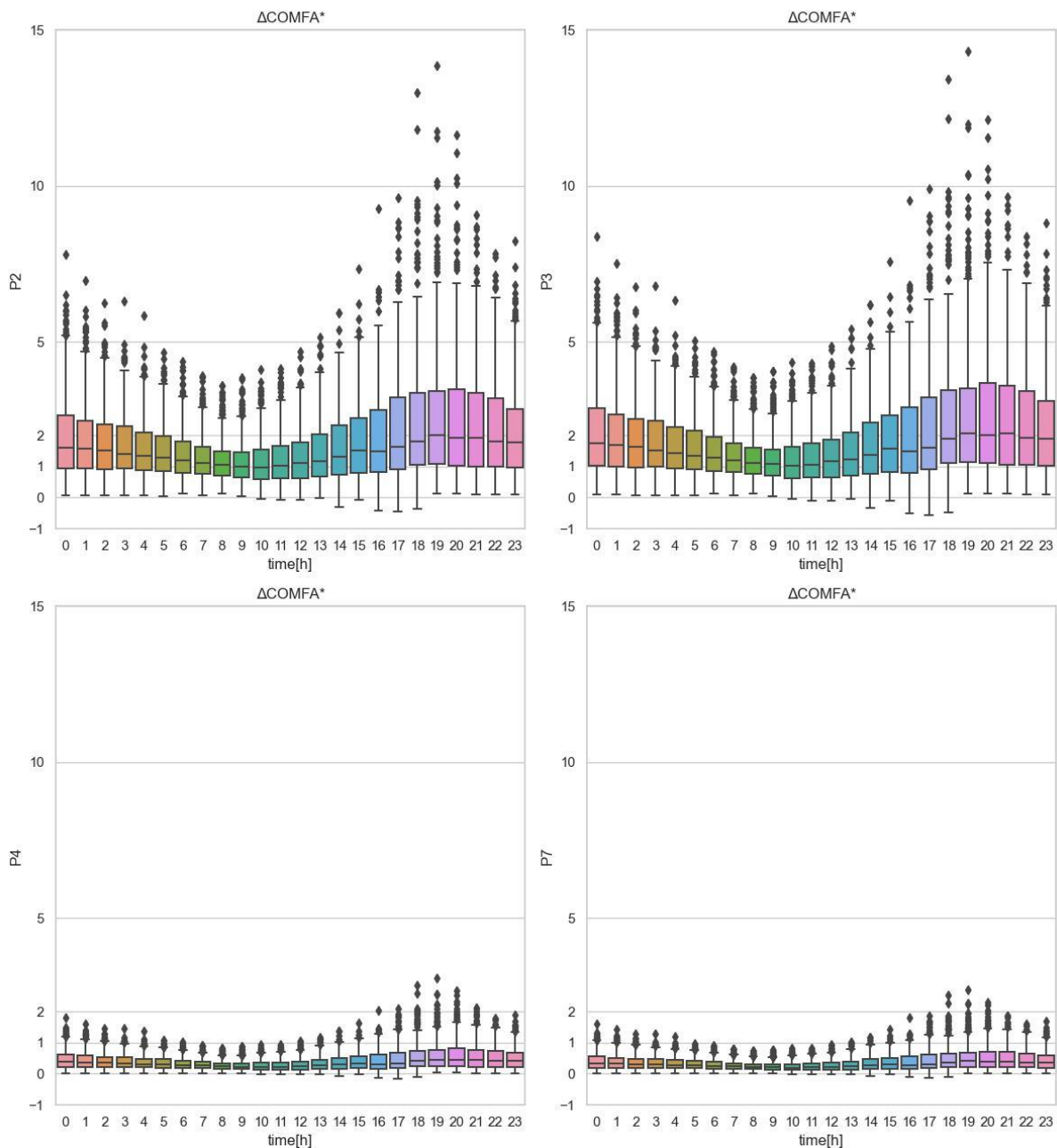


Figure 38: Réduction de l'indice COMFA* grâce à la végétation des parois. P2 = piéton 2 situé à 2m devant le mur vivant, P3 = piéton 3 situé à 2m devant la façade rideau, P4 = piéton 4 situé 10m devant le bâtiment entre les deux façades et P7 = piéton 7 situé à 13m devant le bâtiment aussi entre les deux façades.

Les résultats présentés sur les graphiques de la Figure 38 mettent en évidence la diminution de l'indice de confort thermique COMFA* grâce à l'intégration de la végétation sur les parois du bâtiment. Pour le piéton placé devant la paroi végétale, on observe une réduction moyenne annuelle d'environ 1,8 W/m², avec une réduction maximale atteignant 13,8 W/m². Les informations fournies par le type de graphique utilisé, révèlent que la végétation exerce un effet bénéfique sur le confort de manière dominante entre 14h et 22h, correspondant à la période de charge thermique la plus élevée. Les effets de moindre ampleur se manifestent au petit matin jusqu'à l'après-midi. Ce phénomène est également observé pour le piéton situé devant la façade rideau. La réduction moyenne constatée sur la façade rideau avoisine les 1,9 W/m², avec une valeur maximale de 14,3 W/m². La façade rideau semble ainsi

se révéler plus efficace pour la réduction de l'indice de confort thermique que le mur vivant. Toutefois, en raison de résultats similaires entre les deux types de façade et des limitations dans la méthode de simulation employée, il demeure ardu de trancher sur l'efficacité prédominante d'un type de façade. En ce qui concerne les piétons disposés à une distance de 10 et 13 mètres du bâtiment, l'effet de la végétation sur leur confort thermique est quelque peu négligeable. Les réductions moyennes observées se situent autour de $0,38 \text{ W/m}^2$. Cette diminution est trop faible pour être perceptible sur le corps humain. On peut donc conclure que les piétons sont trop éloignés des façades végétales pour en ressentir des effets bénéfiques sur le confort thermique.

Les graphiques de la Figure 38 permettent de quantifier la réduction possible de l'indice de confort COMFA* et ainsi d'évaluer les performances thermiques de la végétation de façade. Cependant, ces graphiques ne donnent pas d'information sur les sensations de chaleur et les effets ressentis sur le corps humain.

Une réduction de l'indice COMFA* se ressent sur le corps humain uniquement si la diminution est suffisante pour faire passer la valeur de l'indice dans la tranche inférieure (ou supérieure), tel que présenté dans le Tableau 2. Ainsi, pour que l'ajout de la végétation en façade améliore le confort thermique, il faut que cela permette de passer en dessous de la catégorie atteinte sans la végétation. Le graphique de la Figure 39 prouve que la végétation du mur vivant permet d'améliorer le confort, de façon perceptible sur le corps humain. Bien que cela soit ressenti à peine durant quelques heures, on observe une amélioration de la sensation de « très chaud » à « chaud » grâce à l'ajout de la végétation aux alentours de 16h et de 19h pour le jour le 8 juillet 2020, soit pour un jour chaud.

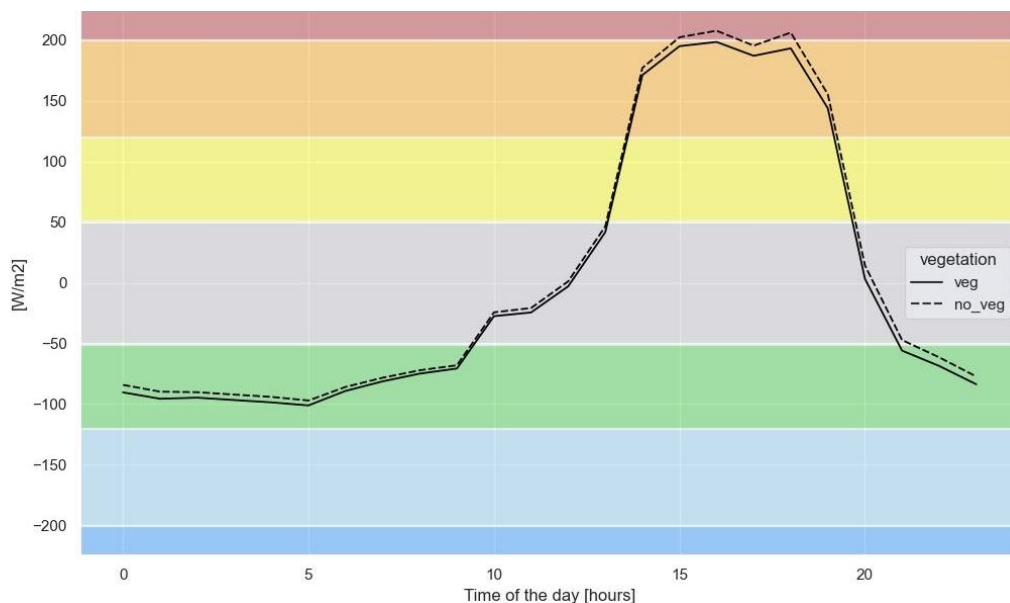


Figure 39: Amélioration du confort thermique grâce à la végétation du mur vivant pour le 8 juillet 2020

Concrètement, les résultats obtenus montrent des réductions relativement modestes. Il est donc difficile de grandement améliorer le confort thermique avec ce type d'installation afin qu'un piéton en ressente les effets directs. On peut envisager d'obtenir de meilleures performances en recouvrant la façade avec un taux de couverture végétale plus élevé ou en végétalisant une autre orientation comme la façade sud par exemple. En effet, il serait intéressant d'évaluer cette orientation pour observer le comportement des façades végétales sous un rayonnement plus intense et voir si cela permet de changer de catégorie de confort de manière plus drastique et plus fréquente.

L'amélioration de l'indice COMFA* grâce à la végétation découle de plusieurs mécanismes. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment l'absorption du rayonnement par les plantes ainsi que la réduction de la température de l'air ambiant grâce au phénomène d'évapotranspiration. Cependant, comme mentionné précédemment, l'observation directe de la température de l'air ambiant dans CitySim demeure impossible. Sachant que le confort thermique d'un piéton est également influencé par la température du sol sur lequel il se trouve, les températures de surface au sol ont été analysées. L'observation des réductions de températures au sol devant les deux parois végétales a également permis d'évaluer une distance limite d'influence.

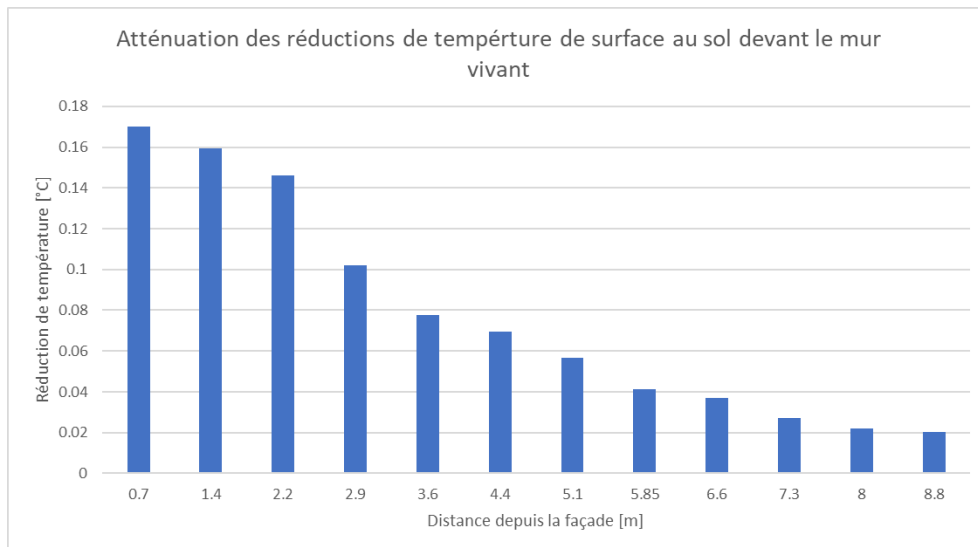


Figure 40: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant le mur vivant

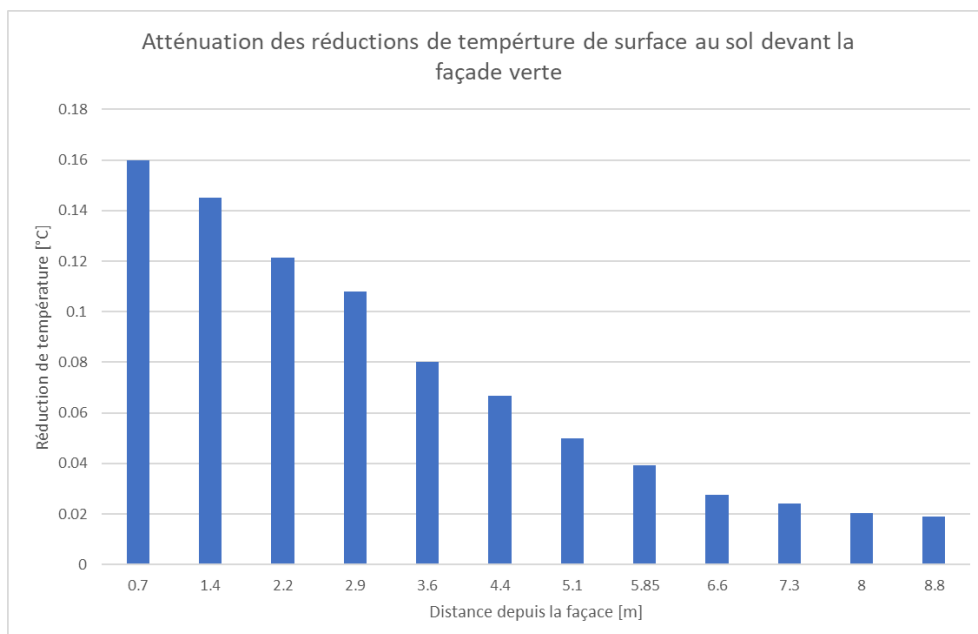


Figure 41: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant la façade rideau

Grâce au graphique de la Figure 40 ainsi que celui de la Figure 41, on discerne des diminutions de température au niveau du sol, dont l'ampleur s'avère relativement modeste, mais conforme à la fourchette attendue. La température à 0,7 mètres devant le mur vivant est diminuée de 0,17 °C en moyenne. Pour la façade verte c'est une réduction de 0,16 °C en moyenne qui est observée à une

distance de 0,7 mètres. Les réductions de température sont perceptibles uniquement proche de la façade grâce à l'ombrage qu'elle procure ainsi qu'à la diminution de la température de l'air entre les feuilles induit par l'évapotranspiration de celles-ci. Les résultats présentés ici laissent penser que le mur vivant possède une meilleure capacité de réduction de température de surface au sol que la façade verte. Cela concorde avec les capacités d'évapotranspiration de chaque paroi. On constate que plus on s'éloigne de la paroi végétalisée, plus les effets sont faibles. À partir d'environ 3 mètres on peut dire que les effets sont négligeables.

L'incidence de la diminution de la température au sol joue un rôle dans l'amélioration du confort thermique urbain. Tout comme il a été observé dans l'analyse de l'indice COMFA*, les effets les plus marquants se manifestent à proximité immédiate des parois végétales. Cette région restreinte constitue un espace privilégié où les bienfaits thermiques induits par la végétation se manifestent avec une plus grande intensité.

6.3 PRÉVISIONS 2050

Afin d'évaluer le comportement de la végétalisation de façade face au changement climatique, les simulations réalisées pour l'année 2020 ont été réalisées à nouveau avec un modèle climatique anticipé pour l'année 2050. Ces simulations ont été rendues possibles par l'utilisation de fichiers météorologiques issus de meteonorm correspondants à l'horizon 2050, élaboré selon des scénarios prévisionnels tenant compte des tendances climatiques. Pour ce faire, deux scénarios issus du quatrième rapport d'évaluation du GIEC ont été sélectionnés, à savoir le scénario IPCC AR4 B1 et le scénario IPCC AR4 A2.

Ces deux scénarios se distinguent par les caractéristiques suivantes :

- Le scénario B1 met l'accent sur un monde plus durable avec une croissance économique continue et une répartition plus équitable des ressources. Il privilégie des politiques de préservation de l'environnement, de l'efficacité énergétique et de protection de la biodiversité. Ce scénario suppose une réduction progressive des émissions de gaz à effet de serre grâce à une adoption accrue de technologies propres et à une transition vers les énergies renouvelables.
- Le scénario A2 envisage une croissance économique rapide et non réglementée, avec une focalisation sur l'expansion des industries et du commerce mondial. Ce scénario suppose une augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre, résultant d'une utilisation intensive des combustibles fossiles et d'une industrialisation rapide dans les pays en développement.

Ces deux scénarios ont été privilégiés plutôt que d'autres car le scénario B1 illustre l'option la plus optimiste quant à l'évolution future du climat, tandis que le scénario A2 incarne l'option la plus préoccupante et défavorable pour le climat à venir.

À la suite du choix des scénarios climatiques, ce sont les effets des façades végétales sur la thermique du bâtiment en 2050 qui ont été étudiés en premier. Cela a donné lieu aux résultats présentés dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7: Résultats sur la thermique du bâtiment pour 2050 selon les deux scénarios climatiques

2050 B1	Avec façades végétales	Sans façades végétales	delta abs	delta [%]
Surchauffe [h]	274	282	-8	-2.84
Conso chauffage [KWh]	150446.94	147570.53	2876.42	1.95
Conso clime [kWh]	497.4	575.17	-77.77	-13.52
Emission CO₂ clime [kg CO₂ Eq]	55.02	63.62	-8.60	-13.52
Emission CO₂ chauffage	34301.90	33646.08	655.82	1.95
2050 A2	Avec façades végétales	Sans façades végétales	delta abs	delta [%]
Surchauffe [h]	389	419	-30	-7.16
Conso chauffage [KWh]	147412.45	144470.42	2942.03	2.04
Conso clime [kWh]	643.67	750.32	-106.65	-14.21
Emission CO₂ clime [kg CO₂ Eq]	71.20	83.00	-11.80	-14.21
Emission CO₂ chauffage	33610.04	32939.25	670.78	2.04

Dans le scénario B1, les heures de surchauffe diminuent de presque 3%, tandis qu'en 2020, cette réduction atteignait quasiment 6% alors que le nombre d'heures de surchauffe est similaire pour la version sans végétation, soit 282h pour les deux années étudiées. Ainsi, il apparaît que les performances des façades végétales ont pu diminuer de 16h les heures de surchauffe en 2020 et de 8h en 2050 pour le scénario B1. Ces résultats s'expliquent par l'analyse des fichiers climatiques pour la période estivale (Annexe 10.8). La température de l'air a été étudiée dans les deux cas et il a été observé que pour le scénario 2050 B1, les températures sont inférieures à celles de 2020. Le rayonnement a également été examiné, révélant une intensité globalement plus élevée en 2020 qu'en 2050 B1. Ainsi, il peut être estimé que les paramètres météorologiques de 2020 sont plus favorables aux mécanismes de refroidissement des façades végétales, permettant d'atteindre de meilleures performances.

En ce qui concerne le scénario A2, les heures de surchauffe sont réduites de plus de 7%. En examinant de plus près les données du fichier climatique 2050 A2, les températures durant la période estivale sont plus élevées qu'en 2020, ce qui explique dans un premier temps un plus grand nombre d'heures de surchauffe (419h sans végétation, contre 282h en 2020). La réduction obtenue (7%) représente la meilleure performance des façades végétales dans cette étude, résultant notamment du rayonnement élevé du fichier climatique 2050 A2, favorisant ainsi la quantité d'eau évaporée par les plantes et donc leur pouvoir rafraichissant. L'évapotranspiration a également été étudiée et a montré des quantités d'eau évaporée supérieures en été 2050 pour le scénario A2 qu'en 2020. Toutefois, les résultats observés ne tiennent pas compte des variétés de plantes utilisées qui ne supporteront peut-être pas les conditions météorologiques de 2050 suivant les tendances climatiques. Les résultats d'évapotranspiration ne tiennent pas non plus compte de l'irrigation variable des plantes en façade qui influe fortement la quantité d'eau évapotranspirée.

Concernant les consommations de chauffage, on constate que l'ordre de grandeur est similaire pour les scénarios B1 et A2 par rapport à 2020, soit une augmentation d'environ 2 % entraînant une augmentation similaire des émissions de CO₂ liées au chauffage. Une tendance similaire est observée pour les consommations de climatisation, réduites d'environ 14 % dans tous les scénarios, entraînant une diminution proportionnelle des émissions de CO₂.

En résumé, il apparaît que la capacité de refroidissement des façades végétales, agissant pour diminuer les heures de surchauffe sont favorisées par un climat plus chaud, tel qu'illustré dans le scénario 2050

A2, confirmant ainsi la théorie énoncée sur les facteurs accentuant l'évapotranspiration. Il serait intéressant, dans cette perspective, de pouvoir étudier chaque mécanisme de refroidissement individuellement en fonction des changements climatiques. En outre, les performances en termes de réduction de consommation de climatisation restent identiques, quelle que soit la tendance climatique. Par conséquent, on peut supposer que les façades végétales conserveront leur utilité en tant que solution passive de refroidissement dans le futur, pour autant qu'elles soient suffisamment irriguées et entretenues. Il convient de rappeler que les performances d'une façade végétale dépendent entièrement de son niveau d'irrigation, bien que ce paramètre ne puisse être étudié avec CitySim et qu'il a été supposé maximal tout au long de cette étude.

À la suite de l'analyse des performances sur la thermique du bâtiment, c'est la MRT qui a été étudiée. Celle-ci a été étudiée pour les deux scénarios 2050 uniquement pour le mois de juillet afin de pouvoir la comparer avec celle obtenue en 2020. Dans un premier temps la MRT a été étudiée par visualisation graphique, ce qui a donné lieu aux résultats présentés sur la Figure 42 et la Figure 43.

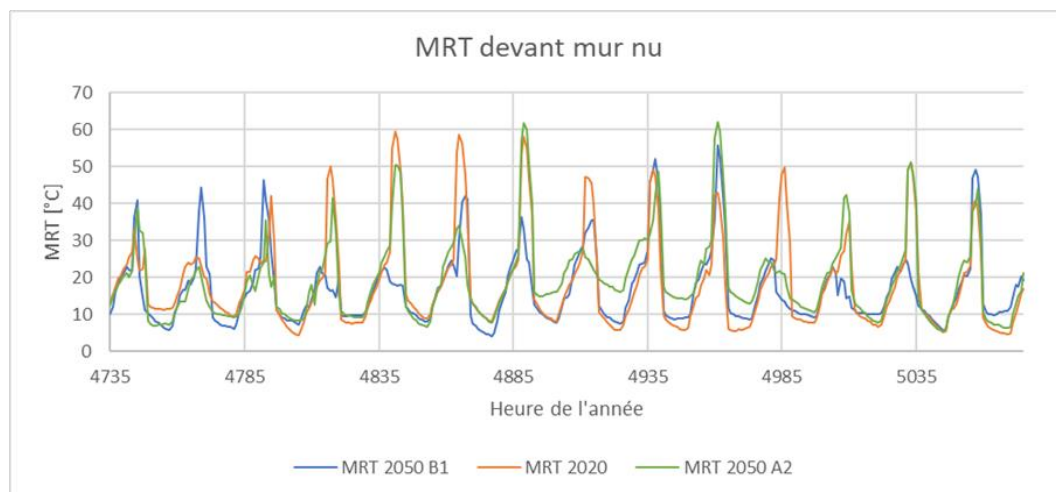


Figure 42: MRT devant le mur nu pour 2050 comparée à 2020

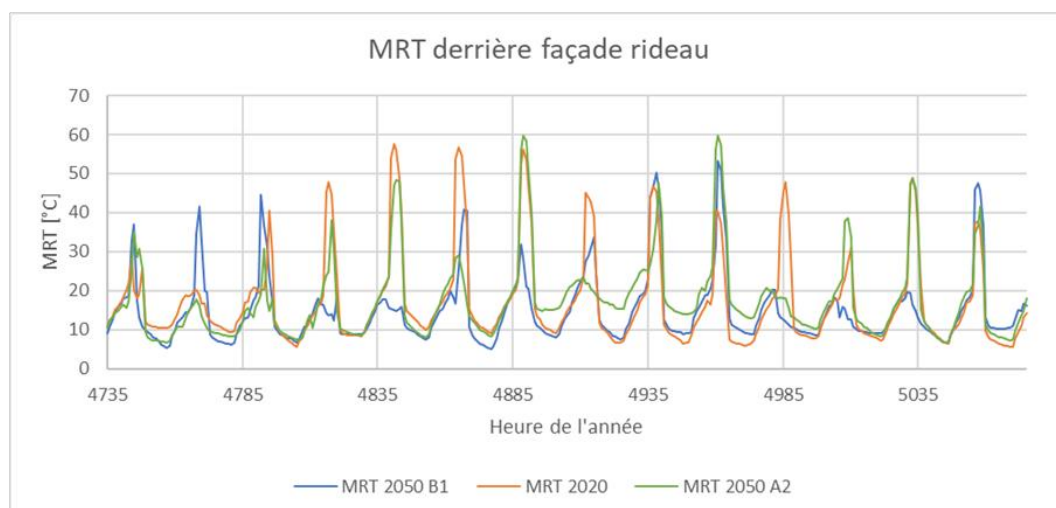


Figure 43: MRT derrière la façade rideau pour 2050 comparée à 2020

Afin de mieux comprendre les différences entre les valeurs pour 2020 (simulation) et 2050, il a également été question d'avoir recours à l'analyse des fichiers météo implémentés dans CitySim. La MRT a été comparée entre 2020 et 2050, devant le mur en béton et derrière la façade rideau, avec la nébulosité de chaque année respective. Pour 2050, les valeurs de MRT, plus basses en journée et plus

élevées la nuit qu'en 2020, s'expliquent par une nébulosité élevée et donc un ciel couvert, ce qui a pour effet de bloquer le rayonnement solaire en journée et maintenir le rayonnement infrarouge la nuit. Tandis qu'en 2020 lorsque les valeurs de MRT sont plus élevées qu'en 2050, la nébulosité est proche de 0 ce qui indique un ciel dégagé et donc un rayonnement intense en journée engendrant une MRT élevée et plus basse la nuit.

De plus, là où la MRT est plus faible en 2050 dans le scénario B1 par rapport à 2020, la température de l'air l'est aussi. En revanche, la température de l'air est relativement plus élevée dans le scénario 2050 A2, surtout au milieu du mois de juillet avec des pics à plus de 30°C comparé à 23°C en 2020. Ceci explique la MRT plus élevée à la même période en 2050 A2 qu'en 2020.

Afin de tirer des conclusions sur l'analyse de la MRT et l'effet de la végétation de façade sur celle-ci, la MRT a également été étudiée en termes de valeurs moyennes sur le mois de juillet.

Tableau 8: MRT moyenne pour le mois de juillet

	Devant mur nu	Derrière façade rideau	Delta
MRT moyenne 2020 [°C]	18.28	17.07	1.21
MRT moyenne 2050 B1 [°C]	16.60	14.81	1.79
MRT moyenne 2020 A2 [°C]	19.15	17.35	1.79

L'analyse des valeurs du Tableau 8 montre que comme attendu, le scénario 2050 B1 permet d'obtenir des valeurs de MRT inférieures à 2020 sur la moyenne mensuelle. En effet, tant bien devant le mur nu que derrière la façade rideau, les valeurs de MRT sont inférieures à celle de 2020. La MRT calculée derrière la façade rideau est réduite de 1.8°C sur la moyenne par rapport à la MRT calculée devant le mur nu. Cela indique que la façade végétalisée (façade rideau) permet bel et bien d'améliorer la MRT.

Pour le scénario A2, les deux configurations (devant le mur nu et derrière la façade rideau) montrent une augmentation de la MRT moyenne par rapport à l'année 2020. Cependant, cette augmentation est plus marquée devant le mur en béton avec une hausse de 0.87 °C, tandis que derrière la façade rideau, la hausse est plus légère avec 0.28 °C. Une fois de plus, la végétation en façade semble avoir un effet positif en atténuant la hausse de température de manière globale.

En comparant les différences (appelé delta dans le Tableau 8) entre les valeurs devant le mur en béton et derrière la façade verte pour les deux scénarios, on constate que les performances thermiques de la façade végétale sont similaires, quelle que soit la tendance climatique. La végétation offre dans les deux cas une réduction d'environ 1.79 °C par rapport au mur nu. Cela suggère que la façade verte conserve sa capacité de rafraîchissement, indépendamment des changements climatiques projetés.

Pour finir, l'indice de confort COMFA* a également été étudié et cela a montré des réductions similaires dans tous les scénarios. Tant bien pour le scénario B1 que A2, les résultats réductions absolues se confondent avec les valeurs de 2020. En revanche, dans le scénario A2, l'impact de la végétation n'est pas suffisant pour que les effets en soient ressentis sur les piétons. On peut donc penser que malgré les changements climatiques futurs, les performances des façades vertes dans l'amélioration de l'indice de confort COMFA* restent constantes. Cependant, il est crucial de noter que compte selon l'évolution du climat, il deviendra impératif de combiner les effets des façades végétalisées avec d'autres solutions. Les avantages offerts par les façades végétales ne seront pas en mesure, à eux seuls, de garantir des résultats suffisants pour que les piétons en ressentent des effets directs.

7 APPLICATION AU CAMPUS ENERGYPOLIS

Un îlot de chaleur bien connus de la HES-SO Valais/Wallis est le Campus Energypolis et ses allées goudronnées. Comme on le voit sur la Figure 44, divers facteurs présents sur ce site favorisent l'inconfort thermique durant la saison estivale. La hauteur imposante des édifices bloque le flux d'air et diminue le rafraîchissement naturel par ventilation. La couleur sombre des constructions absorbe la chaleur et la diffuse durant la nuit. De plus, les vastes surfaces bitumées entourant les bâtiments agissent comme des puits de chaleur, engendrant une sensation de chaleur intense lors de la circulation à pied sur celles-ci. Finalement, le manque de végétation environnante favorise aussi l'inconfort global.

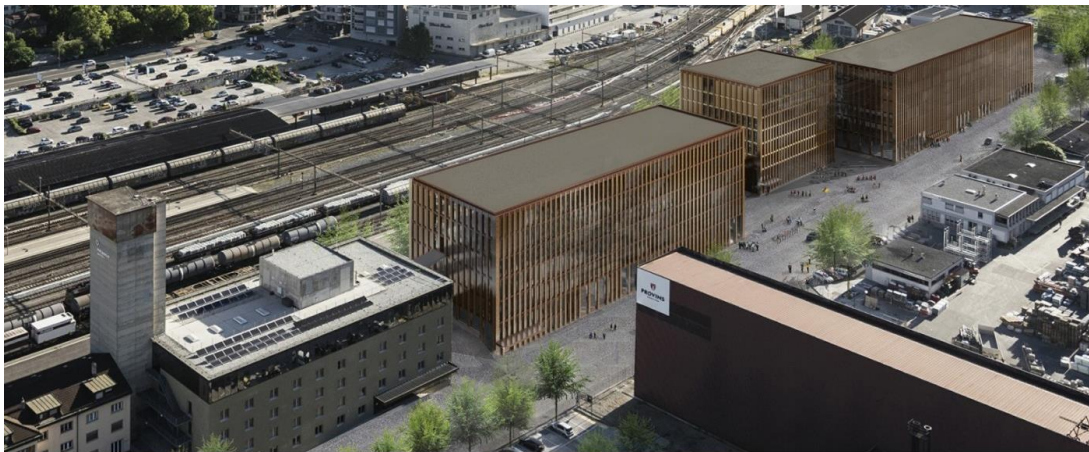


Figure 44: Campus Energypolis
 Source : batimag.ch

Par curiosité et dans le but de peut-être mener une étude plus poussée par la suite, l'impact des façades vertes sur la thermique urbaine du Campus Energypolis ont été brièvement étudiés dans ce travail. Dans un premier temps, le campus tel qu'il était à son inauguration, c'est-à-dire sans aucune mesure pour lutter contre les îlots de chaleur, a été simulé grâce à CitySim afin de quantifier la charge thermique régnant sur le site. Puis, à la suite des résultats obtenus une proposition de végétalisation de façade des trois bâtiments de la HEI a été simulée.

Étant donné l'architecture des bâtiments, une végétalisation telle que présentées sur la Figure 45 a été optée pour modéliser les bâtiments. Un taux de couverture végétale de 50% a été choisi.



Figure 45: Typologie de façade végétale applicable aux bâtiments du campus Energypolis
 Source : (Darmstadt, 2016)

Après avoir déterminé la typologie de façade, le campus a été modélisé en trois dimensions sur le logiciel SketchUp, puis le modèle ainsi créé a été importé dans CitySim pour procéder aux simulations. Conformément à la Figure 46, seul le revêtement en goudron devant les bâtiments a été pris en compte dans la modélisation du sol.

Les simulations ont été effectuées pour l'année 2020. Bien que le Campus ne fût pas entièrement terminé à ce moment-là, la décision a été prise délibérément d'utiliser les données climatiques de cette même année afin de mettre en perspective les résultats obtenus à Sion avec ceux obtenus à Zürich à cette période donnée.

Par conséquent, les aménagements extérieurs actuellement présents sur le campus, tels que les plantes en bacs, les zones de gravier et la peinture bleue au sol, n'ont pas été inclus dans la modélisation.

Afin d'évaluer le confort thermique, deux piétons ont été modélisés et placés sur le Campus. L'un se situe 3 mètres devant le bâtiment 21 et l'autre 6 mètres devant le bâtiment 23.

Une première simulation du Campus sans la végétation de façade a démontré des températures moyennes de surfaces au sol supérieures à 33°C ainsi que des températures moyennes des façades avoisinant les 29°C pour le mois de juillet.

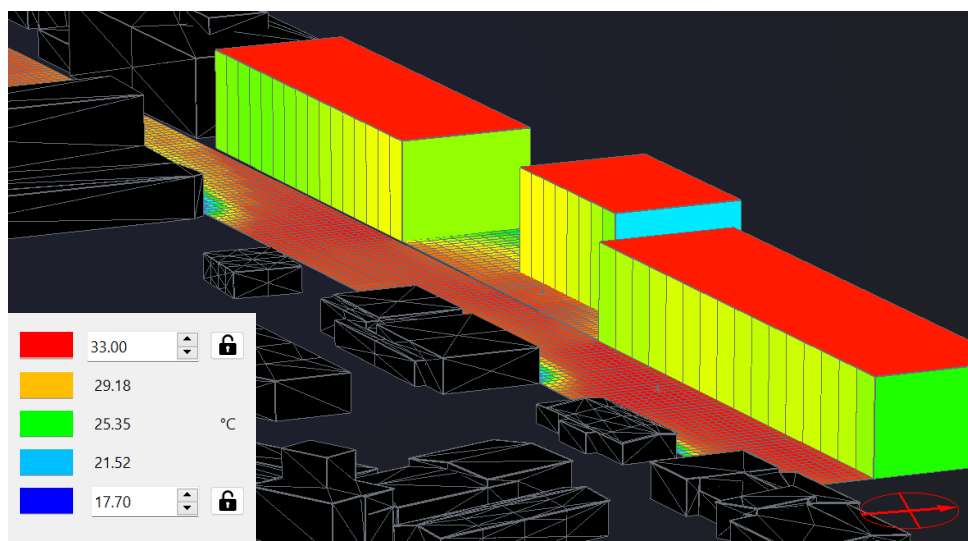


Figure 46: Evaluation de la charge thermique du Campus

L'indice de confort COMFA* a été évalué en l'état pour le piéton se trouvant devant le bâtiment 21. Les résultats ont démontré des valeurs très élevées. Seule deux jours du mois de juillet possèdent des valeurs en dessous de 201 W/m². Douze jours possèdent des valeurs supérieures à 300 W/m². Pour rappel, les valeurs supérieures à 201 W/m² représentent une sensation considérée comme « très chaud ». La MRT a également été simulée et les résultats obtenus montrent des températures moyennes radiantes supérieures à 50°C sauf pour un jour du mois. Il a même été observé des MRT passant la barre des 70°C durant six jours du mois. Les résultats obtenus ici sont nettement supérieurs à ceux obtenus à Zürich. Le détail des résultats obtenus se trouve en Annexes 10.9.2 et 10.9.3. Des valeurs similaires pour l'indice COMFA* et la MRT ont été observées pour le piéton devant le bâtiment 23. Ces résultats démontrent un grand inconfort thermique pour les personnes se trouvant à l'extérieur des bâtiments et un fort intérêt pour trouver des solutions afin de diminuer ces températures.

À la suite des résultats obtenus précédemment, la végétalisation de 50% des façades sud des trois bâtiments de la HEI ont été simulées. Comme on peut l'observer sur la Figure 47, l'ajout de la végétation a engendré une diminution de la température des façades des bâtiments. Celle-ci atteint désormais une valeur moyenne de 19°C pour le mois de juillet, soit une baisse de près de 10°C par rapport à la version sans végétation. Il serait ainsi intéressant d'étudier l'impact de cette réduction de température de façade sur les consommations énergétique des bâtiments.

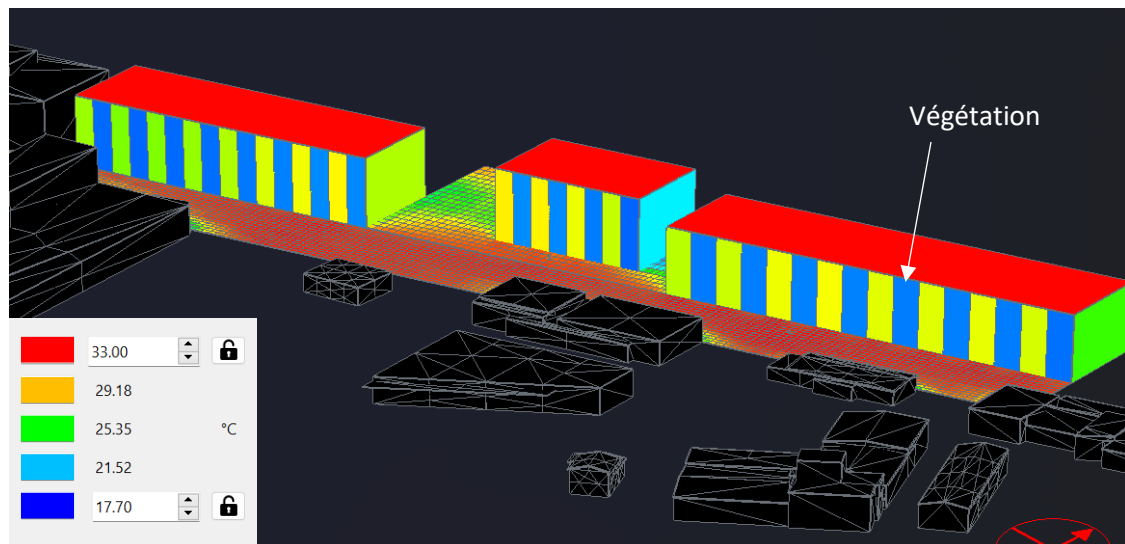


Figure 47: Températures moyennes de surface pour le modèle avec végétalisation de façade des bâtiments de la HEI pour le mois de juillet 2020

Il a également été observé une légère réduction de température au sol devant la façade. Comme déjà mentionné, la température de l'air ne peut pas être observée via CitySim mais il est très probable que celle-ci soit également réduite grâce à l'ajout de la végétation, notamment à proximité immédiate des façades.

L'indice de confort COMFA* a été réduit pour les deux piétons. Pour le piéton devant la bâtiment 21, les valeurs de COMFA* ont pu être réduite jusqu'à 42 W/m² et pour celui devant le bâtiment 23 jusqu'à 32 W/m². Ces diminutions permettent de passer dans une catégorie sensation améliorée à quelques reprises dans le mois.

La MRT a également pu être diminuée grâce à l'ajout de la végétation en façade. Une réduction maximale de 5°C a été observée devant le bâtiment 21, tandis que devant le bâtiment 23 cette diminution maximale a été de l'ordre de 4°C. Les résultats détaillés se trouvent en Annexes 10.9.4 et 10.9.5

En somme, les brèves analyses de la situation réalisées dans ce chapitre ont permis de mettre en exergue la problématique d'îlot de chaleur au sein du Campus Energypolis. Il a pu être rapidement démontré que la végétalisation de façade des trois bâtiments de la HEI permettrait très certainement d'améliorer le confort thermique urbain. L'effet des façades vertes combiné à d'autres technologies tels que l'ajout de platebandes de gazon, la plantation d'arbres, l'utilisation de revêtement au sol avec un albédo élevé et l'addition de point d'eau permettrait d'obtenir des résultats d'autant plus significatifs pour lutter contre la hausse des températures. Une étude plus poussée mériterait d'être réalisée sur le sujet.

8 CONCLUSION

Le but de ce travail était d'étudier l'influence de la végétation de façade sur le microclimat environnant ainsi que sur les consommations énergétiques d'un bâtiment. Pour réaliser cette étude, il a dans un premier temps été question de procéder à un état de l'art. Les recherches bibliographiques menées ont permis d'obtenir des plages de valeurs relatives aux objectifs envisagés dans ce travail de Bachelor. L'aperçu des travaux existant a permis de mettre en évidence les diverses approches utilisées à l'échelle internationale pour l'étude des façades vertes et de leurs divers impacts thermiques. L'ensemble des études convergent vers la mise en évidence d'effets bénéfiques tant bien sur les consommations énergétiques des bâtiments que sur le climat urbain. En effet, la végétalisation de bâtiment est une solution envisagée à plusieurs reprises pour lutter contre la hausse des températures en milieu urbain.

Dans un deuxième temps, l'évaluation des impacts de la végétalisation de façade a été entreprise avec pour cas d'étude l'entrepôt des ateliers de la pépinière de Zürich. Le bâtiment a été étudié grâce au logiciel CitySim afin de déterminer l'impact des plantes sur ses consommations d'énergie thermique. Les simulations réalisées pour l'année 2020 ont démontrés les résultats suivants : avec un taux de couverture végétale d'environ 20% de la façade nord-ouest, les heures de surchauffes ont été réduites de presque 6%. La température intérieure maximale du bâtiment a été diminuée de 1.1 °C avec une réduction moyenne annuelle de 0,04°C. À la suite de cela, il a été observé que la végétation permet de d'abaisser les consommations de climatisation de 16% durant la période estivale, réduisant ainsi de manière équivalente les émissions de CO₂ y relatives. Finalement, il a pu être observé que ces impacts bénéfiques de la végétation sont plus significatifs entre 14h et 22h, soit lorsque la charge thermique est plus marquée.

L'analyse des mécanismes d'évapotranspiration et d'ombrages liés aux plantes démontre que la végétation permet de réduire les températures de surface des parois. En effet, une réduction d'environ 2°C a été observée entre les parois dépourvues de végétation et les parois végétalisées. Il a pu être démontré que la quantité d'eau évapotranspirée par les parois végétales dépendait des conditions météorologiques. De ce fait, l'évapotranspiration est favorisée par la chaleur, un rayonnement élevé et une humidité relative basse. Ce phénomène physique typique des végétaux est également dépendant de la variété de plantes utilisée en façade. De plus, possédant un albédo plus élevé que le béton utilisé en façade, les plantes permettent de réduire l'absorption de chaleur des murs.

Dans la suite du travail, il était question d'évaluer les bienfaits des systèmes de verdure verticaux sur le climat du quartier. Pour ce faire, la température moyenne radiante a été simulée pour la période du 17 juillet 2020 au 31 juillet 2020. Les résultats de simulation obtenus ont pu démontrer que la MRT était en moyenne 1,2°C plus faible derrière la façade rideau que devant la façade en béton. Ces résultats ont ensuite été comparés avec des mesures réalisées par la ZHAW. Les mesures démontrent une réduction moyenne de la MRT de 2,5°C grâce à la végétation.

Les écarts observés entre les résultats issus des simulations et les points de mesure dépendent de divers facteurs, incluant notamment la configuration du modèle 3D et les données météorologiques employées lors des simulations. L'analyse graphique entre la MRT simulée comparativement à celle mesurée montre des courbes qui suivent des tendances similaires. Malgré les variations de valeurs, les résultats de simulation s'accordent de manière cohérente avec les mesures, ce qui atteste de la fiabilité de CitySim pour étudier les effets des façades vertes sur le climat en quantifiant la MRT.

Dans la suite du travail, le confort thermique pour des piétons se situant devant le bâtiment a été évalué. L'ajout de végétation contre les façades a pu mettre en évidence une amélioration sur l'indice de confort COMFA* pour les piétons se tenant à deux mètres des parois. Durant le mois de juillet 2020, l'indice COMFA* a pu être diminué jusqu'à 14 W/m² devant chacune des parois végétales. Ces réductions ont permis d'abaisser la sensation perçue comme « très chaud » à « chaud » ainsi que de « chaud » à « légèrement chaud » durant quelques heures. Concrètement, les résultats obtenus sont relativement modestes, cependant ils démontrent une certaine efficacité des façades vertes dans l'amélioration du confort thermique urbain. Afin d'obtenir des résultats permettant de mieux délimiter les effets perceptibles sur le corps humain, il aurait été judicieux de placer un piéton à quelques centimètres d'une paroi végétale puis de l'éloigner par pas d'une trentaine de centimètres en relevant une mesure de COMFA* à chaque fois. Cette méthode aurait probablement permis d'obtenir des résultats plus conséquents pour les faibles distances. Cependant, cela aurait demandé un temps de simulation allongé et des moyens supplémentaires pour traiter le grand nombre de résultats.

Finalement, la température au sol devant les parois s'est vu être diminuée grâce à l'ajout de plantes en façade. Une réduction de 0,17°C a été mesurée à une distance de 0,7 mètres du bâtiment devant la végétation.

L'observation des températures de surface au sol ainsi que l'évaluation de l'indice COMFA* pour plusieurs piétons situés à différentes distances du bâtiment ont permis de délimiter un rayon d'action des façades vertes de deux mètres maximums, après quoi les effets de la végétation ne plus perceptibles. Ainsi, plus on s'approche des façades vertes, plus les impacts thermiques se manifestent de manière significative.

Au cours de la phase finale de cette étude, les simulations effectuées pour l'année 2020 ont été reproduites en se projetant vers l'horizon 2050. Les résultats obtenus suggèrent que les façades végétales conservent leur capacité de rafraîchissement, indépendamment des changements climatiques projetés. Pour autant que celles-ci disposent d'une irrigation suffisante et de plantes adaptées.

Les résultats expérimentaux de cette étude mettent en évidence les performances des façades vertes en termes de réductions des consommations énergétique du bâtiment. Bien que les résultats obtenus restent modérés, cette étude a permis de démontrer que la végétalisation de bâtiment joue un rôle dans l'amélioration du confort thermique urbain et dans la lutte contre les îlots de chaleur. Ces conclusions suggèrent qu'il est nécessaire de combiner la végétalisation de façade avec d'autres solutions ou d'augmenter le taux de couverture végétale afin d'obtenir de meilleures performances. Comme l'a dit (Coccolo, 2017), la conception architecturale ne doit pas se limiter à un édifice isolé mais englober l'environnement urbain à l'échelle du quartier ou de la ville. Une forte interdépendance réside entre les besoins énergétiques des bâtiments et le bien-être des individus en extérieur. C'est pourquoi les architectes et urbanistes doivent accorder une attention particulière à ces deux aspects lors de la conception des bâtiments et de l'aménagement de l'espace inter-bâtiment.

8.1 LIMITES DE L'ÉTUDE

L'étude réalisée présente plusieurs limites qui peuvent altérer la proximité des résultats avec la réalité. Tout d'abord, le choix du cas d'étude n'est pas idéal pour examiner la végétation de façade et ses effets sur la thermique du bâtiment. Le bâtiment analysé étant un entrepôt dépourvu de système de chauffage, de refroidissement, de volume clôt et de fenêtres, il a fallu apporter d'importantes modifications lors de la modélisation 3D pour qu'il réponde aux objectifs du travail. De plus, les parois

végétalisées du bâtiment ne sont pas directement adossées aux façades, ce qui limite l'interprétation des résultats, car les effets de la végétation s'amenuisent rapidement avec la distance. Heureusement, ce problème a pu être contourné dans la simulation. CitySim considère les parois végétales comme étant collées à la façade, ce qui certes, éloigne les résultats de la réalité mais les rend plus pertinents.

Il aurait été plus judicieux d'étudier un bâtiment conditionné, équipé de fenêtres et habité, avec des façades vertes directement intégrées. Cela aurait permis une meilleure évaluation de l'impact réel de la végétalisation de façade sur le bilan énergétique.

En ce qui concerne la modélisation du cas d'étude, des limites subsistent également. Pour se rapprocher davantage de la réalité, il faudrait améliorer la modélisation des façades vertes. Pour rappel, la façade rideau a été représentée comme une paroi mince en béton avec des plantes en surface, alors qu'en réalité il s'agit d'un simple treillis recouvert de plantes grimpantes. Il serait nécessaire de trouver une autre méthode pour modéliser uniquement un couvert végétal sans support. Pour le mur vivant, il serait intéressant d'inclure une couche de substrat humide entre le béton et les plantes pour rendre le modèle plus réaliste et étudier les effets cumulés des différents composants.

Bien que l'étude des façades vertes via simulations ne soit pas encore tout à fait au point et qu'il n'existe pas de méthodologie exacte, le travail mené ici a permis de démontrer que CitySim semble être un outil bien plus approprié que bSol pour quantifier leurs impacts. La comparaison entre les simulations de la MRT et les mesures a permis de valider la fiabilité du logiciel. L'état de l'art réalisé en début de rapport a permis de mettre en évidence les résultats obtenus dans d'autres études. La concordance des résultats obtenus dans ce travail avec ceux obtenus dans d'autres études à une fois de plus permis de valider la pertinence d'utiliser CitySim pour l'étude des façades vertes.

Cependant, il convient de souligner que CitySim présente néanmoins quelques limites. Si les objectifs ont pu être atteints dans leur totalité grâce à l'usage de ce dernier, quelques améliorations méthodologiques pourraient conduire à l'obtention de résultats encore plus fidèles à la réalité. Le logiciel possède plusieurs points forts, comme la fonctionnalité intégrée à son solveur de quantifier l'évapotranspiration d'un couvert végétal, simplifiant grandement l'utilisation d'équations complexes. De plus, il offre la possibilité d'analyser l'ombrage généré par les plantes, en particulier pour les arbres. En revanche, la manière dont CitySim intègre la végétation en façade ne permet pas de tenir compte des paramètres de LAI et de LAD, ce qui aboutit à des façades considérées comme entièrement opaques. Il convient de rappeler que CitySim ne propose pas explicitement de fonctionnalité de végétalisation de façade. En revanche, la végétalisation de toiture est possible c'est pourquoi les façades ont été végétalisées comme des toitures. Cependant, l'approche utilisée dans la modélisation des arbres serait plus pertinente.

L'augmentation d'isolation induite par la façade végétale a pu être étudiée et a certainement joué un rôle important sur les résultats, en revanche il n'a pas été possible de tenir compte de la rugosité et d'évaluer l'impact des plantes sur la convection. De plus, dans le modèle tel qu'il est configuré, CitySim ne permet pas de simuler la ventilation entre la façade et les parois comme c'est le cas du bâtiment de la pépinière.

Une autre limitation dans la conception de façades vertes avec CitySim est que le logiciel suppose que la végétation bénéficie d'une irrigation optimale en permanence, sans tenir compte des coefficients de culture et de stress hydrique dans les simulations. De même, il ne permet pas de simuler des plantes caduques. Il serait donc pertinent d'ajouter cette dynamique pour observer l'impact du cycle de vie

des plantes sur les résultats. Il serait également intéressant de pouvoir tester les limites de performances des plantes en fonction de leur irrigation.

Enfin, CitySim ne dispose pas de l'option de calcul de la PET. Bien qu'il ait été envisagé d'ajouter les équations nécessaires pour que le logiciel puisse effectuer ce calcul, ce projet a été mis de côté en raison de contraintes de temps et de la difficulté à obtenir les détails exacts de chaque terme du calcul.

8.2 RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

À l'heure actuelle, la technique du bâtiment a largement évolué (OFEN, 2015), conduisant à la construction de bâtiments bien isolés et étanches, limitant ainsi considérablement les transferts thermiques entre l'extérieur et l'intérieur. Ces technologies récentes permettent donc de rendre les bâtiments énergétiquement performants. En conséquence, les bénéfices des façades vertes deviennent pratiquement imperceptibles à l'intérieur des bâtiments neufs. En revanche, l'installation de façades vertes semble toujours pertinente pour des bâtiments anciens, souvent mal isolés, notamment en termes de solution de rénovation low-tech.

Toutefois, il est important de noter que certains bâtiments ne sont toujours pas adaptés aux fortes températures et nécessitent certaines améliorations de leur composition pour faire face à la chaleur estivale. Dans ce contexte, les façades vertes peuvent jouer un rôle essentiel pour protéger ces bâtiments du rayonnement solaire intense.

Par ailleurs, la végétalisation de bâtiment est une solution à prendre en compte dans la lutte contre les îlots de chaleur urbains, tant bien dans le présent que dans le futur. Étant donné les prévisions concernant les changements climatiques, il semble que l'étude des façades vertes trouve davantage de pertinence en se concentrant sur leur contribution au climat urbain plutôt que sur leur influence sur la thermique des bâtiments.

Cependant, il demeure primordial de considérer les obstacles associés aux systèmes de végétalisation verticale, en particulier leur exigence d'un entretien régulier pour assurer un fonctionnement optimal. Leur vulnérabilité face aux aléas climatiques et les résultats parfois peu significatifs sont également des points à prendre en compte. Tous ces paramètres rendent leur intégration dans la législation difficile. À cet égard, il serait peut-être plus efficace de promouvoir la plantation d'arbres dans les jardins des particuliers, d'accroître la taille des parcs, de végétaliser davantage les rues ou d'opter pour un revêtement urbain à fort albédo.

Lors d'un prochain travail, il serait intéressant de comparer diverses solutions en parallèle des façades vertes en ayant recourt à des simulations et des mesures prises sur site ainsi qu'à d'autres outils telle que l'analyse de cycle de vie. Le tout dans le but de définir une ou plusieurs solutions efficaces et durables. L'îlot de chaleur du Campus Energypolis pourrait être un cas d'étude intéressant.

En conclusion, les façades vertes ont leur place dans le contexte de la rénovation des bâtiments anciens et dans l'amélioration du confort urbain, mais nécessitent une gestion attentive et des considérations complémentaires pour en maximiser les avantages environnementaux et énergétiques.

9 BIBLIOGRAPHIE

- Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56).
- Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R., & Voelker, C. (2022). The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, 109021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109021>
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915-939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Calanca, P., & Smith, P. (2011). *L'évapotranspiration de référence et son -application en agrométéorologie*.
- Cameron, R. W. F., Taylor, J. E., & Emmett, M. R. (2014). 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>
- Coccolo, S. (2017). *Bioclimatic Design of Sustainable Campuses using Advanced Optimisation Methods*. EPFL - Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit. Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment. Programme doctoral en énergie.
- Conductivité thermique d'un matériau. (2007, septembre 25). *Energie Plus Le Site*. <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/comportement-des-materiaux4/conductivite-thermique-d-un-materiau/>
- Confédération Suisse. (2016). *Données des écobilans dans la construction 2009/1:2016*. https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/fr/dokumente/Themen%20und%20Trends/Oekobilanzen/Empfehlung_Oekobilanzdaten_Baubereich_DT_FR.pdf.download.pdf/Empfehlung_Oekobilanzdaten_Baubereich_DT_FR.pdf
- CSD Azur. (2010). *Favoriser les formes urbaines et les espaces publics agréables à vivre : Les phénomènes d'îlots de chaleur en milieu urbain dense*. Euroméditerranée.

Darmstadt, T. (2016). *Gutachten Fassadenbegrünung*.

https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/klima/gutachten_fassadenbegruengung.pdf

Dian et Wan. (1999). *COOLING EFFECT OF IVY ON A WALL*.

<https://doi.org/10.1080/089161599269708>

Djikou, S. (2006). *Calcul de l'ETP PENMANMONTEITH à différents pas de temps sur quatre sites du Haut Bassin de l'Ouémé* [Doctorat]. Institut de recherche pour le développement.

Dufresne, J.-L. (2000). La Physique du climat. *Graines de Sciences 2*, 77-10.

Gromke, C., Blocken, B., Janssen, W., Merema, B., van Hooff, T., & Timmermans, H. (2015). 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.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>

Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening : Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>

Höppe, P. (1992). A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors. *Wetter und Leb.* 44, 147-151.

Kotak, Y., Gul, M., Muneer, T., & Ivanova, S. (2015, avril 16). *Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems*.

Libessart, L., & Gavory, S. (2016). *Evaluation des conductivités thermiques des matériaux consistants des murs végétalisés*. <https://docplayer.fr/16695041-Evaluation-des-conductivites-thermiques-des-materiaux-consistants-des-murs-vegetalises.html>

Małyszko, M., & Laska, M. (2019). The use of green walls and the impact on air quality and life standard. *E3S Web of Conferences*, 116, 00096.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600096>

- Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R. M., & Bastianoni, S. (2013). Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment*, 64, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005>
- Merz, T. (2021). *Case Studie IVECT*. HES-SO Valais/Wallis.
- OFEN. (2015). *Isolation thermique et technique du bâtiment – combien et dans quels cas*. <https://pubdb.bfe.admin.ch/fr/publication/download/7697>
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12), 4854-4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>
- Quoc Hung, A. T. (2020). *Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel*. HES-SO Valais/Wallis.
- Rod, N. (2022). *Etude de simulation énergétique d'un bâtiment avec une enveloppe végétalisée*. HES-SO Valais/Wallis.
- Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S.-A., & Khanmohammadi, M.-A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- Skhiri, A. (2019). *Les bases de l'irrigation : Calcul des besoins en eau*.
- Stec, W. J., van Paassen, A. H. C., & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.008>
- Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., & Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use : A climate-informed systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112100>
- THE 17 GOALS | Sustainable Development. (2015). <https://sdgs.un.org/goals>

- Tschander, B., Hertig, T., & Trachsel, E. (2021). *Klimatische Wirkungsmessung von Fassadenbegrünungen. Messungen am Beispiel der verschiedenen Systeme der Stadtgärtnerei Zürich und dem MFO Park*. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annales Agronomiques*, vol. 12, p.13-49.
- Vandersmissen, G. (2021). *Les façades végétalisées : Analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision*.
- Villeneuve, C., & Richard, F. (2007). *Vivre les changements climatiques—Réagir pour l'avenir* (Multi Monde). <https://editionsmultimondes.com/livre/vivre-les-changements-climatiques>
- Vonlanthen, M., Kaempf, J., Di Blasi, A., & Burin des Roziers, D. (2021). *Ilots de chaleur en ville de Fribourg, Identification, anticipation et stratégie d'adaptation et de valorisation*. Ville de Fribourg.
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>
- Zhang, Y., Zhang, L., & Meng, Q. (2022). Dynamic heat transfer model of vertical green façades and its co-simulation with a building energy modelling program in hot-summer/warm-winter zones. *Journal of Building Engineering*, 58, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105008>

10 ANNEXES

10.1 RÉCOLTE DE DONNÉES

Type de mesure	Disponibilité	Fichier	Commentaires
MRT [°C] annuelle	En possession pour 2020	Klimadaten Station KS2.xlsx	
PET [°C] annuelle	En possession pour 2020	Klimadaten Station KS2.xlsx	
Température de l'air [°C] annuelle	En possession pour 2020	Klimadaten Station KS2.xlsx	
Humidité relative [%] annuelle	En possession pour 2020	Klimadaten Station KS2.xlsx	
Vitesse du vent [m/s] annuelle	En possession pour 2020	Klimadaten Station KS2.xlsx	
Débit de sève [ml/h] et [ml/h/m ²]	En possession pour 2020	Mittlere Stündliche Saftflusswerte Stadtgärtnerei Zürich.xlsx	Mesurées du 30.06.20-13.07.20 Pas mesurées sur le mur vivant ni la façade rideau
Rayonnement [W/m ²]	Indisponible		À obtenir, nécessaire pour recalculer l'évapotranspiration
Températures de surfaces mur nu + façade verte	Indisponible		À obtenir
Variété de plantes utilisée en façade	Aucune information		À obtenir
Coefficient Kc [-]	En possession	Selected KC Values and ETo-Calculation Table.msg	Mesuré du 06.21-04-22 Mesuré sur quel mur ?
ET réelle [mm/jour] et [mm/h]	En possession	Selected KC Values and ETo-Calculation Table.msg	Mesuré du 06.21-04-22 Mesuré sur quel mur ?
ETO [mm/jour] et [mm/h]	En possession	Selected KC Values and ETo-Calculation Table.msg	Mesuré du 06.21-04-22 Mesuré sur quel mur ?
Modèle 3D de la pépinière .xml ou .dxf	En possession	3D Dachmodell LoD2	À modifier via SketchUp
Fichier climat	En possession	meteonorm	
Fichier horizon	En possession	meteonorm	

10.2 INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LE BÂTIMENT D'ÉTUDE

Source : Registre fédéral des bâtiments et des logements : [statut du bâtiment](#) (Office fédéral de la statistique OFS)

Informations bâtiment	
Id. fédéral de bâtiment (EGID)	302011443
Abréviation du canton	ZH
N° OFS de la commune	261
Nom de la commune	Zürich
Id. fédéral d'immeuble (EGRID)	CH199978819187
N° de secteur du RF	262
N° d'immeuble	AR5500
Suffixe du n° d'immeuble	-
Type d'immeuble	-
N° officiel de bâtiment	AR01843
Nom du bâtiment	-
Coordonnée E du bâtiment	2680149.55
Coordonnée N du bâtiment	1247658.2
Provenance des coordonnées	Office fédéral de la statistique
Statut du bâtiment	Bâtiment existant
Catégorie de bâtiment	Bâtiment sans usage d'habitation
Classe de bâtiment	Réservoir, silo et entrepôt
Année de construction du bâtiment	1963
Mois de construction du bâtiment	1
Epoque de construction	Période de 1961 à 1970
Année de démolition du bâtiment	-
Surface du bâtiment [m2]	469
Volume du bâtiment [m3]	4145
Volume du bâtiment : norme	Selon norme SIA 416
Volume du bâtiment : indication sur la donnée	Autre
Nombre de niveaux	3
Nombre d'enregistrements "logements"	-
Nombre de pièces d'hab. indép.	-
Abri de protection civile	Non
Surface de référence énergétique	-
Générateur de chaleur pour le chauffage 1	Pas de générateur de chaleur
Source d'énergie / de chaleur pour le chauffage 1	Aucune
Source d'information pour le chauffage 1	Autre
Date de mise à jour pour le chauffage 1	30.05.2020
Générateur de chaleur pour le chauffage 2	Pas de générateur de chaleur

Source d'énergie / de chaleur pour le chauffage 2	Aucune
Source d'information pour le chauffage 2	Autre
Date de mise à jour pour le chauffage 2	19.10.2022
Générateur de chaleur pour l'eau chaude 1	Pas de générateur de chaleur
Source d'énergie / de chaleur pour l'eau chaude 1	Aucune
Source d'information pour l'eau chaude 1	Autre
Date de mise à jour pour l'eau chaude 1	30.05.2020
Générateur de chaleur pour l'eau chaude 2	Pas de générateur de chaleur
Source d'énergie / de chaleur pour l'eau chaude 2	Aucune
Source d'information pour l'eau chaude 2	Autre
Date de mise à jour pour l'eau chaude 2	19.10.2022
Publication des données	19.06.2023

Informations entrée

Id. fédéral d'entrée (EDID)	0
Id. fédéral d'adresse de bâtiment (EGAID)	101729105
N° d'entrée du bâtiment	199
Id. fédéral de rue (ESID)	10177323
Désignation de la rue DE	Gutstrasse
Désignation abrégée de la rue DE	Gutstr.
Référence de l'index DE	Gut
Langue du nom de rue DE	DE
Désignation officielle	Oui
NPA	8047
Chiffre compl. du NPA	-
Localité	Zürich
Coordonnée E de l'entrée	2680150.332
Coordonnée N de l'entrée	1247657.516
Adresse officielle	Oui
État des données	19.06.2023

10.3 TAGS

Tableau 9: Nomenclature spécifique à CitySim pour les Tags dans SketchUp

Surface de référence	Tag
Façade	#FACADE
Toit	#ROOF
Plancher	#FLOOR
Ombrage	#SHADING
Sol	#GROUND
Arbre	#TREE

10.4 COMPOSITION DU SOL

Ground covering, concrete tiles Concrete Tiles/ Concrete/ Gravel/ Sandy soil

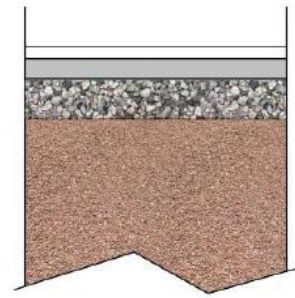


Figure 48: Composition du sol selon (Coccolo, 2017)

La composition du sol se code de la manière suivante dans Nodpad++ :

```
<Composite id="21" name="Asphalt road" category="Ground">
    <Layer Thickness="0.0250000004" Conductivity="0.699999988" Cp="1100"
    Density="2150" NRE="0" GWP="0" UBP="0"/> <!--asphalte-->
    <Layer Thickness="0.0199999996" Conductivity="2" Cp="1051.19995"
    Density="2000" NRE="0" GWP="0" UBP="0"/> <!--gravier-->
    <Layer Thickness="0.100000001" Conductivity="2" Cp="1051.19995"
    Density="2000" NRE="0" GWP="0" UBP="0"/> <!--sable-->
    <Layer Thickness="0.85500002" Conductivity="1.5" Cp="2098.80005"
    Density="1500" NRE="0" GWP="0" UBP="0"/> <!--molasse-->
</Composite>
```

Pour les surfaces de gazon, il est nécessaire d'ajuster le k factor ainsi que l'albédo comme suit :

```
<Ground id="5390" key="GREEN#GROUND" type="21" ShortWaveReflectance="0.3" kFactor="0.7"
detailedSimulation="false">
```

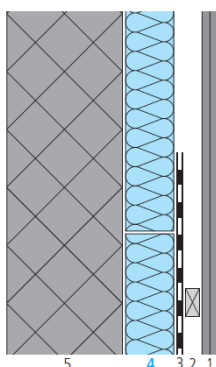
10.5 HYPOTHÈSES POUR LES COMPOSITIONS DU BÂTIMENT D'ÉTUDE

10.5.1 Façades et toiture

316 Support de planification swisspor **Mur extérieur**

Isolation intérieure avec doublage en plaques de plâtre cartonné

swissporLAMBDA Universel 029 sur support en béton armé | Variante: swissporEPS 30



Éléments de construction: détails et caractéristiques

Couches/désignation	Épaisseur mm	Conductivité thermique λ W/(m·K)
1 Plaque de plâtre cartonné 2 x 12,5 mm	25	0,240
2 Lamage/vidé technique	30	—
3 Evtl. pare-vapeur resp. étanchéité à l'air	—	—
4 swissporLAMBDA Universel 029 ¹⁾	var.	0,029 ^{a)}
5 Béton apparent	250	2,300

Variantes

¹⁾ swissporEPS 30 ($\lambda_0 = 0,033$ W/(m·K) ^{a)})

Indication

^{a)} Conductivité thermique faisant foi: www.swisspor.ch, Produits

Caractéristiques de l'élément de construction

Épaisseur de l'isolant thermique mm	swissporLAMBDA Universel 029			swissporEPS 30		
	Coefficient de transmission thermique U W/(m²·K)	Coefficient de transmission thermique dynamique U ₂₄ W/(m²·K)	Capacité thermique C KJ/(m²·K)	Coefficient de transmission thermique U W/(m²·K)	Coefficient de transmission thermique dynamique U ₂₄ W/(m²·K)	Capacité thermique C KJ/(m²·K)
40	0,51	0,16	23	0,57	0,17	24
50	0,44	0,13	23	0,48	0,15	23
60	0,38	0,11	23	0,42	0,13	23
70	0,34	0,11	23	0,37	0,11	23
80	0,30	0,09	23	0,34	0,10	23
100	0,25	0,07	22	0,28	0,08	22
120	0,21	0,06	22	0,24	0,07	22
140	0,19	0,05	22	0,21	0,06	22
160	0,16	0,04	22	0,19	0,05	22

Données physiques

- Résistance thermique superficielle intérieure $R_{si} = 0,13$ (m²·K)/W et extérieure $R_{se} = 0,04$ (m²·K)/W
- Données calculées pour une construction homogène

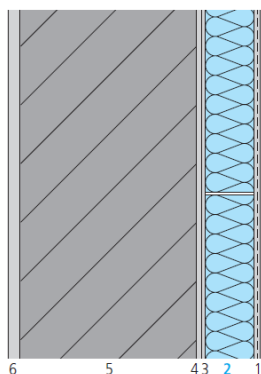
Mesures d'isolation thermique et protection contre l'humidité

- MoPEC: Les exigences cantonales peuvent différer des modèles. Informez-vous directement auprès des différents offices cantonaux de l'énergie.
- Norme SIA: 380/1 «L'énergie thermique dans le bâtiment»
- Minergie: Vous trouverez les données concernant les exigences actuelles sous www.minergie.ch.

Isolation intérieure crépie (rénovations)

swissporXPS Premium Plus 300 GE/SF sur support en maçonnerie |

Variantes: swissporXPS Premium Plus 300 GE resp. swissporXPS 300 GE



Éléments de construction: détails et caractéristiques

Couches/désignation	Épaisseur mm	Conductivité thermique λ W/(m·K)
1 Crépi intérieur armé	10	0,700
2 swissporXPS Premium Plus 300 GE/SF ¹⁾	var.	0,027 ^{a)}
3 Mortier de collage sur toute la surface	4	0,900
4 Crépi intérieur	10	0,700
5 Brique	300	0,370
6 Crépi extérieur	20	0,870

Variantes

¹⁾ swissporXPS Premium Plus 300 GE (λ_D 0,027 W/(m·K) ^{a)}) | swissporXPS 300 GE (λ_D 0,035 W/(m·K) ^{a)})

Indication

^{a)} Conductivité thermique faisant foi: www.swisspor.ch, Produits

Caractéristiques de l'élément de construction

Maçonnerie existante	swissporXPS Premium Plus 300 GE/SF swissporXPS Premium Plus 300 GE				swissporXPS 300 GE			
Coefficient de transmission thermique U	Épaisseur de l'isolant thermique	Coefficient de transmission thermique U	Coefficient de transmission thermique dynamique U ₂₄	Capacité thermique C	Épaisseur de l'isolant thermique	Coefficient de transmission thermique U	Coefficient de transmission thermique dynamique U ₂₄	Capacité thermique C
W/(m²·K)	mm	W/(m²·K)	W/(m²·K)	KJ/(m²·K)	mm	W/(m²·K)	W/(m²·K)	KJ/(m²·K)
0,982	120	0,18	0,01	14	120	0,22	0,02	14
	140	0,16	0,01	14	140	0,20	0,01	14
	160	0,14	0,01	14	160	0,18	0,01	14
	180	0,13	0,01	14	180	0,16	0,01	15
	200	0,12	0,01	15	200	0,15	0,01	15
	220	–	–	–	220	0,14	0,01	15
	240	–	–	–	240	0,13	0,01	15
	260	–	–	–	260	0,12	0,01	15
	280	–	–	–	280	0,11	0,01	15
	300	–	–	–	300	0,10	0,01	15
	320	–	–	–	320	0,10	0,01	15
	340	–	–	–	340	0,09	0,01	15
	360	–	–	–	360	0,09	0,01	15

Données physiques

- Résistance thermique superficielle intérieure R_{si} = 0.13 (m²·K)/W et extérieure R_{se} = 0.04 (m²·K)/W

Mesures d'isolation thermique et protection contre l'humidité

MoPEC: Les exigences cantonales peuvent différer des modèles. Informez-vous directement auprès des différents offices cantonaux de l'énergie.

Norme SIA: 380/1 «L'énergie thermique dans le bâtiment»

Minergie: Vous trouverez les données concernant les exigences actuelles sous www.minergie.ch.

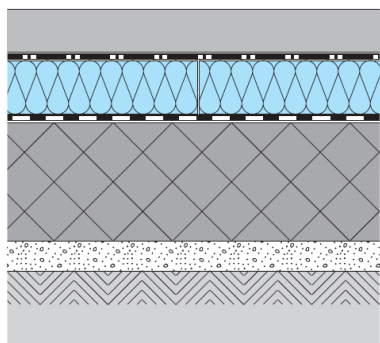
10.5.2 Sol

370 Support de planification swisspor

Plafond et sol

Radier avec isolation intérieure

swissporEPS 150 Sol | Variante: swissporLAMBDA Universel 029



Éléments de construction: détails et caractéristiques

Couches/désignation	Épaisseur mm	Conductivité thermique λ W/(m·K)
1 Chape flottante	70	1,400
2 Couche de séparation et de glissement, feuille PE	0,2	—
3 swissporEPS 150 Sol ¹⁾	var.	0,033 ^{a)}
4 Barrière contre l'humidité, p. ex. swissporBIKUVAP LL EVA	3,5	0,230
5 Béton armé	200	2,300
6 Béton maigre/couche de propreté	50	1,500
7 Terrain		

Variante

¹⁾ swissporLAMBDA Universel 029 ($\lambda_{10} = 0,029$ W/(m·K) ^{a)})

Indication

^{a)} Conductivité thermique faisant foi: www.swisspor.ch, Produits

Caractéristiques de l'élément de construction

Épaisseur de l'isolant thermique mm	swissporEPS 150 Sol			swissporLAMBDA Universel 029		
	Coefficient de transmission thermique U selon SN EN ISO 13370 ¹⁾ W/(m²·K)	Capacité thermique C _{sol} KJ/(m²·K)		Coefficient de transmission thermique U selon SN EN ISO 13370 ¹⁾ W/(m²·K)	Capacité thermique C _{sol} KJ/(m²·K)	
80	0,37	0,21	80	0,33	0,20	80
100	0,30	0,19	80	0,27	0,18	80
120	0,25	0,17	80	0,23	0,16	80
140	0,22	0,16	80	0,20	0,14	80
160	0,19	0,14	80	0,17	0,13	80
180	0,17	0,13	80	0,15	0,12	80
200	0,16	0,12	80	0,14	0,11	80
220	0,14	0,11	80	0,13	0,10	80
240	0,13	0,10	80	0,12	0,10	80
260	0,12	0,10	80	0,11	0,09	80
280	0,11	0,09	80	0,10	0,08	80

¹⁾ Calcul de la valeur U selon SN EN ISO 13370 avec les conditions suivantes: surface au sol 100 m², développement périmétrique 40 m, profondeur de sol sous terrain fini 2,5 m (hauteur de mur dans le terrain), coefficient de conductivité thermique du terrain $\lambda \geq 2,0$ W/(m·K)

Données physiques

- Résistance thermique superficielle intérieure $R_{si} = 0,13$ (m²·K)/W et extérieure $R_{se} = 0,00$ (m²·K)/W
- Sans prendre en considération les éléments de chauffage (chauffage au sol)

Protection contre le bruit

Si il y a des exigences pour le phonique, par ex. la transmission du son indirect dans l'habitat collectif, une couche isolante contre les bruits de choc est à mettre en œuvre (swissporEPS-T, Roll EPS-T).

OPB: Ordonnance sur la protection contre le bruit de la confédération et des cantons

Norme SIA: 181 «Protection contre le bruit dans le bâtiment»

Mesures d'isolation thermique et protection contre l'humidité

MoPEC: Les exigences cantonales peuvent différer des modèles. Informez-vous directement auprès des différents offices cantonaux de l'énergie.

Norme SIA: 180 «Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments», 380/1 «L'énergie thermique dans le bâtiment»

Minergie: Vous trouverez les données concernant les exigences actuelles sous www.minergie.ch.

Indications de planification et de mise en œuvre

- La planification et la mise en œuvre doivent être conformes aux Normes SIA, ainsi qu'aux directives de pose du fabricant swisspor.
- La norme SIA 251 «chapes flottantes à l'intérieur des bâtiments» s'applique au dimensionnement des chapes.

10.6 CARACTÉRISTIQUES DE CHAUFFAGE POUR LE BÂTIMENT D'ÉTUDE



- Données du site
- Assistant enveloppe
- Masque d'horizon
- Calcul de la valeur U
- Paramètres
- Enveloppe du bâtiment
- Besoins de chaleur
- Energie grise
- Eau chaude sanitaire
- Installations techniques
- Justificatif Minergie
- Consommation d'énergie
- Certificat énergétique
- Importer / exporter

Surface de référence énergétique : 938 m²

Nom de la zone :

Catégorie : III Administration Afficher les données

Nombre d'appartements : (seulement pour cat. habitat)

Nombre d'occupants : 47

Capacité thermique : 0.5 Construction lourde (masse accessible)

Emission de chaleur : Radiateurs : 50°C - standard

Régulation : Régulation par pièce de référence (p.ex. séjour)

Ventilation : ventilation naturelle

Rendement récupération ventilation : 0 %

Débit d'air : 1410 m³/h (SIA 2023)

Température intérieure : 20 °C

10.7 MODÉLISATION DES ARBRES

N'ayant pas d'information sur les variétés des trois arbres modélisés, celles-ci ont été estimées à partir de la figure ci-dessous. Ne connaissant pas leur hauteur non plus, j'ai émis les hypothèses suivantes basées sur la hauteur moyenne de chaque variété.

Tableau 10: Dimensions des arbres choisis

Variété d'arbre	Hauteur [m]	Largeur [m]
Arbuste feuillu	3	4
Sapin	16	7 (moy)
Marronnier	15	7



Figure 49: Arbres modélisés sur le site
 Source : Google Earth

Les arbres ont été modélisés selon la méthode développée par (Coccolo, 2017) dans sa thèse. Dans CitySim Pro les arbres sont modélisés « compte tenu de leurs propriétés géométriques (hauteur, diamètre du feuillage et largeur des feuilles) et leurs propriétés physiques (LAI, LAD, émissivité des ondes longues, absorptivité et réflectance des ondes courtes) ».

S.Coccolo présente une approche pour prendre en compte les trois caractéristiques de refroidissement des arbres dans un modèle proposé. Il est basé sur l'influence de la plante sur la sensation thermique à travers le refroidissement radiatif et l'effet d'ombrage. Pour concevoir la plante, l'indice foliaire (LAI) et la densité foliaire (LAD) sont pris en compte, supposant que des valeurs plus élevées de LAI entraînent un effet d'ombrage accru et une réduction du rayonnement des ondes longues. Le modèle de calcul superpose les surfaces de feuillage pour représenter les feuilles, permettant ainsi d'observer directement la variation du rayonnement à ondes longues (lié à la température de surface) et à ondes courtes. Actuellement le modèle est limité aux plantes persistantes, cependant il est possible de d'ajuster manuellement la LAI au fil des saisons et des années afin de représenter la chute des feuilles.

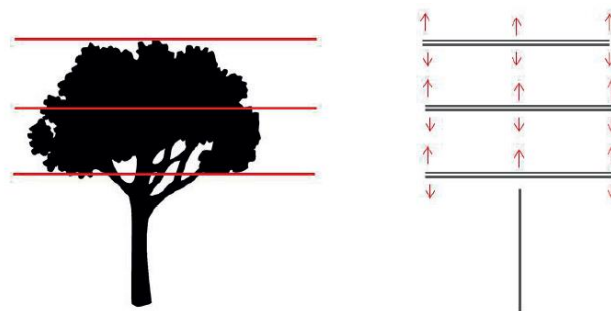
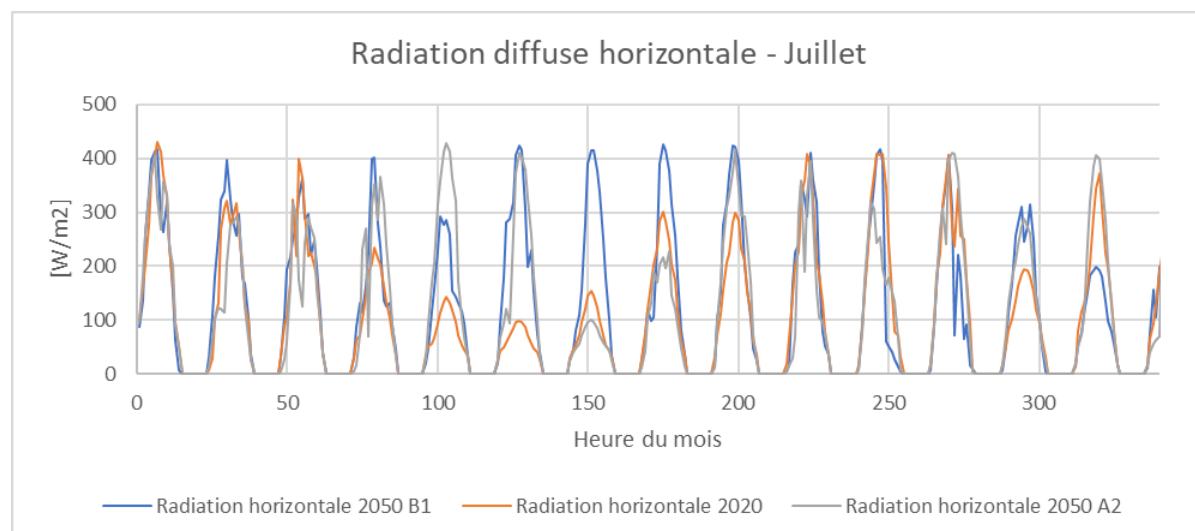
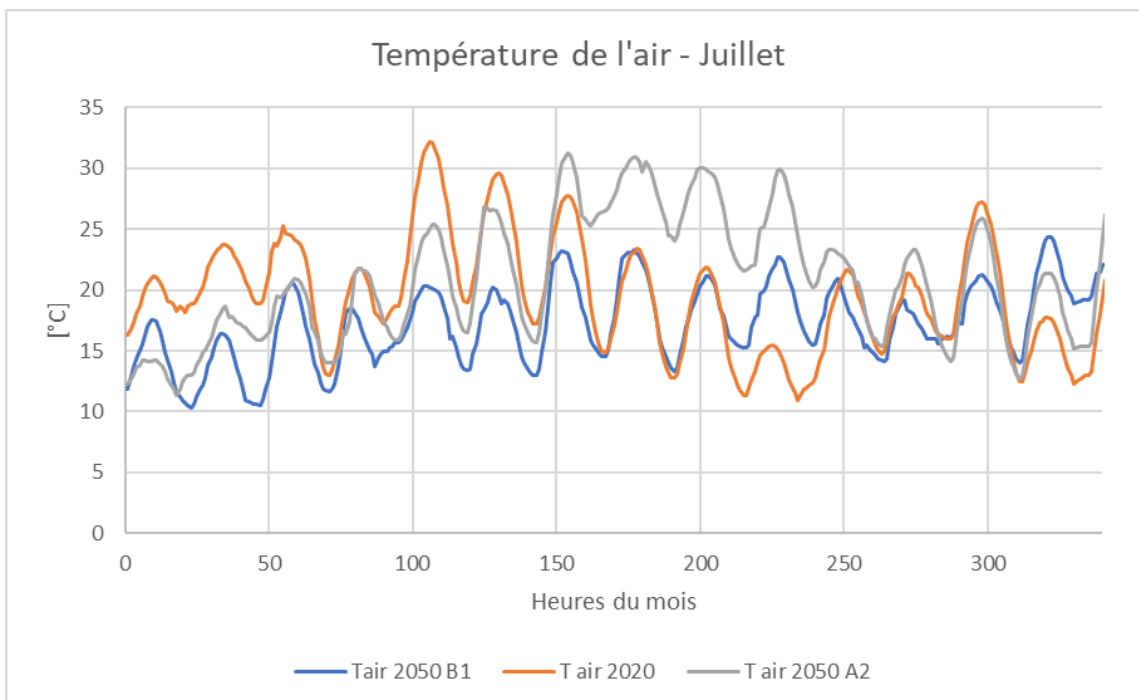
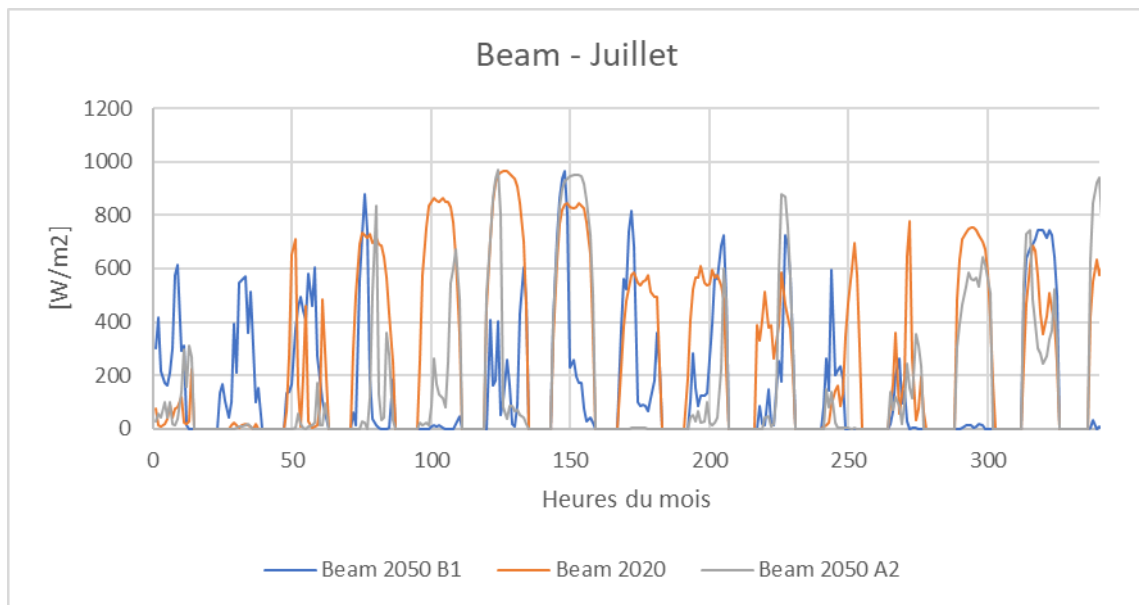


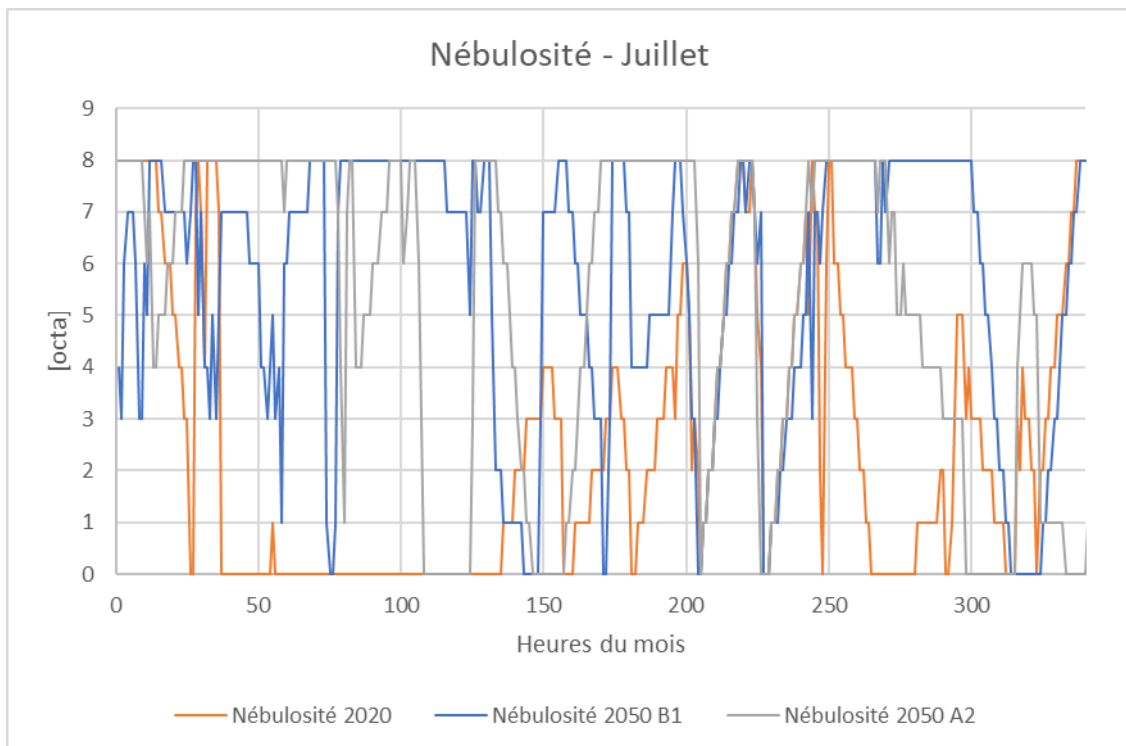
Figure 50: Représentation schématique de la modélisation des arbres sur CitySim à partir de l'index de surface foliaire
 Source : (Coccolo, 2017)

Ne connaissant pas non plus les coefficients de réflexion, transmission et absorption de chaque variété ni les LAI et LAD, ceux-ci sont définis automatiquement par le logiciel CitySim selon la thèse de (Coccolo, 2017). Pas soucis de simplification, l'hypothèse a été faite que tous les arbres modélisés sur la scène possèdent les mêmes propriétés hormis leur taille et leur géométrie. Ces hypothèses peuvent être réalisées car les arbres modélisés sur la scène impactent de manière négligeable les résultats de simulation du cas d'étude.

10.8 ANALYSE DES FICHIERS MÉTÉO POUR JUILLET 2020 ET 2050 À ZÜRICH

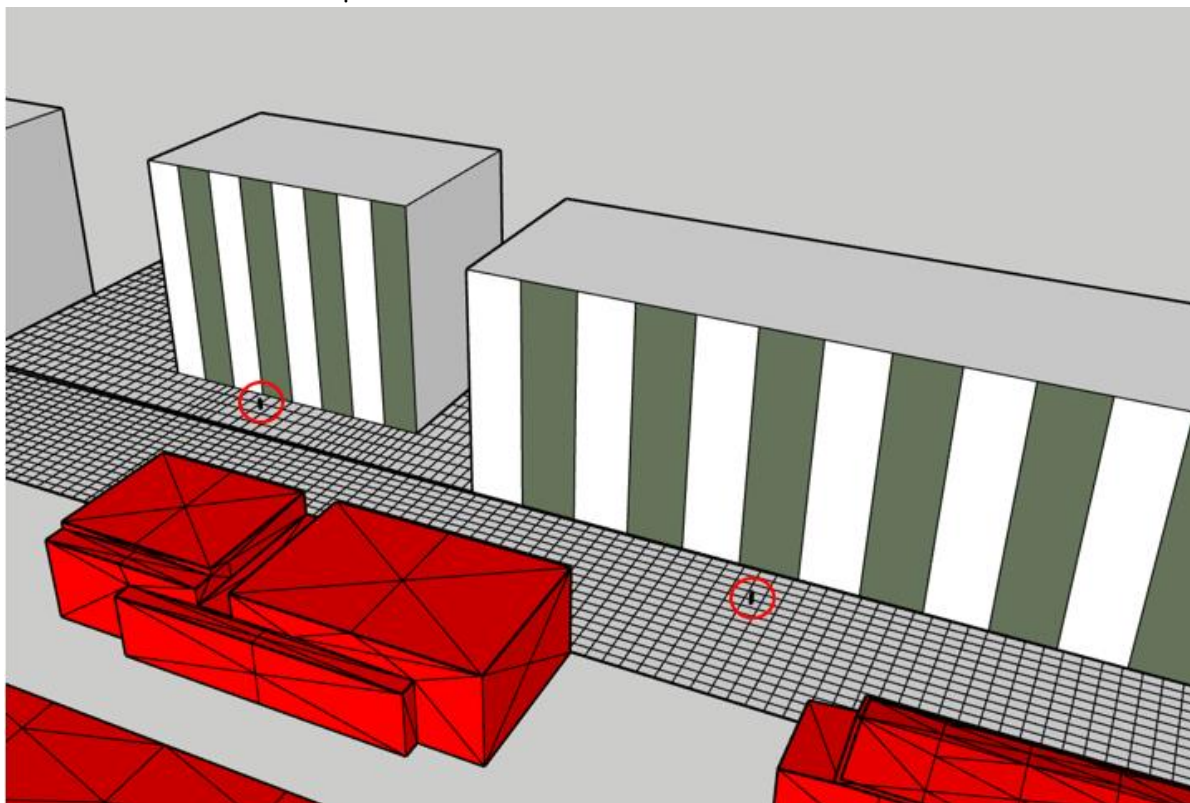




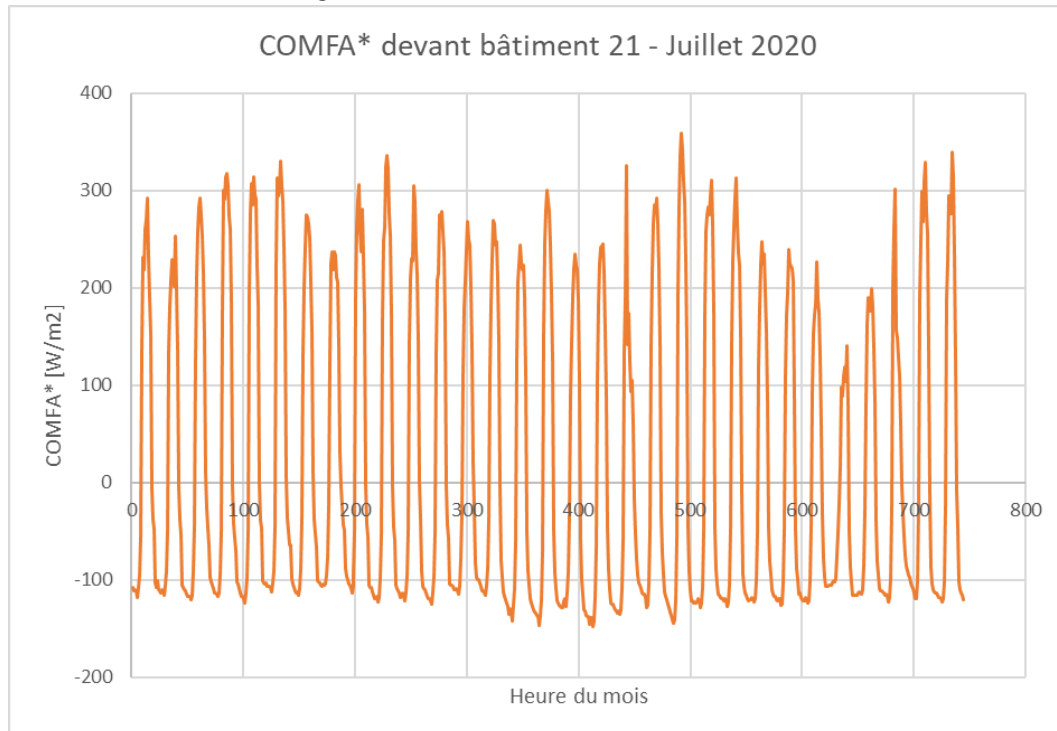


10.9 ENERGYPOLIS

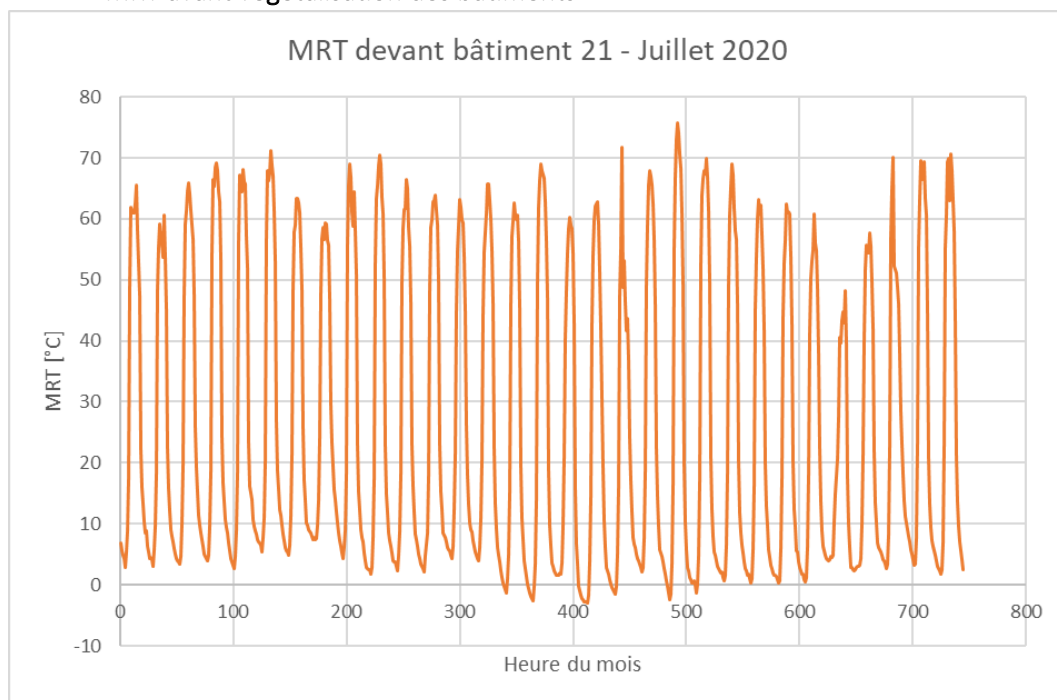
10.9.1 Positionnement des piétons



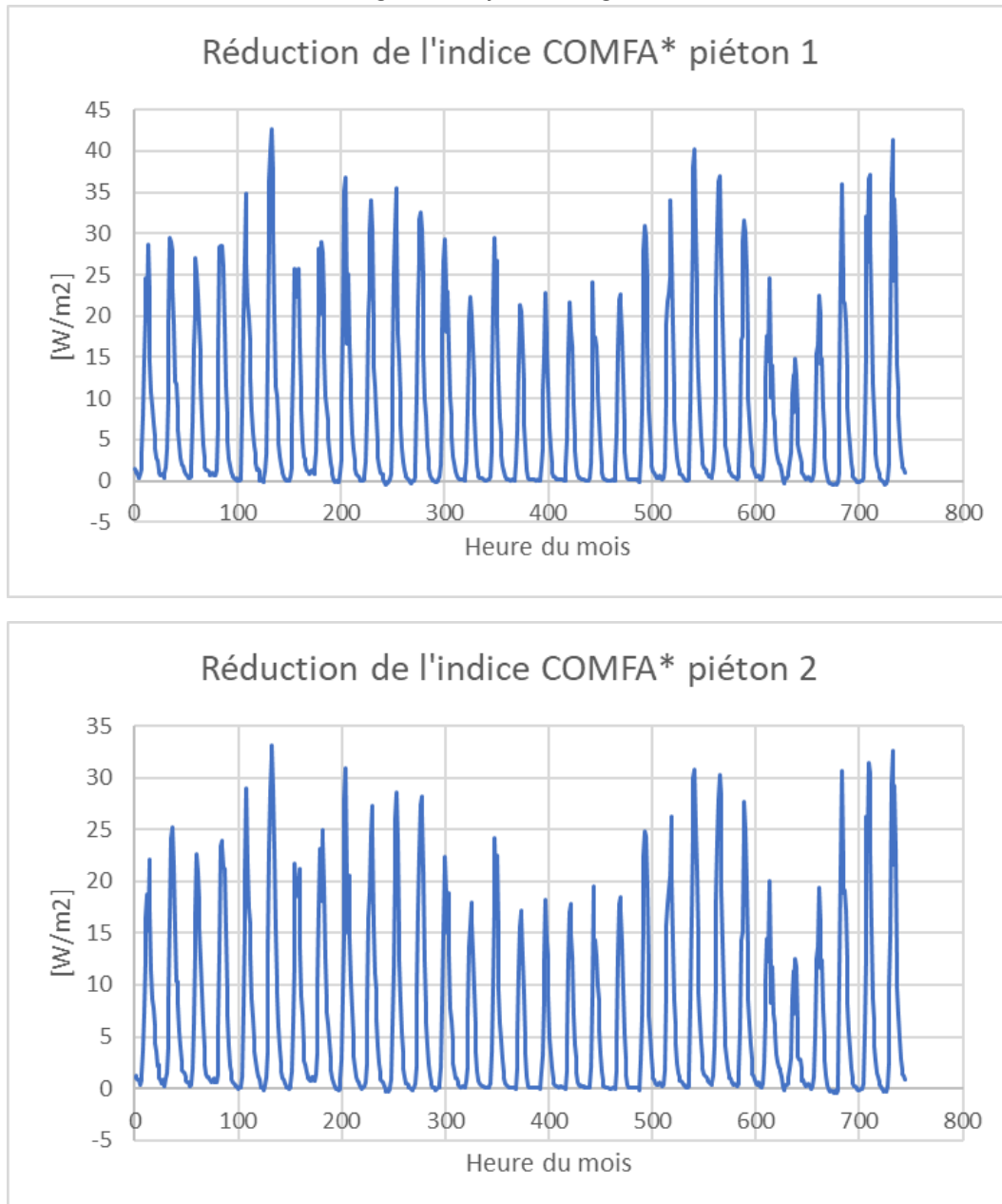
10.9.2 COMFA* avant végétalisation des bâtiments



10.9.3 MRT avant végétalisation des bâtiments



10.9.4 Réduction de l'indice COMFA* grâce à l'ajout de végétation sur les bâtiments



10.9.5 Réduction de la MRT grâce à l'ajout de végétation sur les bâtiments

