



Schlussbericht vom 31.10.2024

Einfluss von Begrünung der Gebäudehülle auf die Energiebilanz und den thermischen Komfort von Gebäuden und Areale

IVECT – Impact de la végétalisation sur le bilan
énergétique et le confort thermique des
bâtiments et quartiers



Quelle: Evelyn Trachsel, Stadtgärtnerei Zürich



Datum: 14.12.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

HES-SO Valais/Wallis / Institut Energie und Umwelt
Rue de l'Industrie 23, CH-1950 Sitten
www.hevs.ch

Subventionsempfänger/innen:

HES-SO Valais/Wallis / Institut Energie und Umwelt
Rue de l'Industrie 23, CH-1950 Sitten
www.hevs.ch

ZHAW Zürich / Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüntalstrasse 14, CH-8820 Wädenswil
www.zhaw.ch

Centre de recherche Crem
Rue Marconi 19, CH-1920 Martigny
www.crem.ch

Autor/in:

Klaus Kreher, HES-SO Valais/Wallis, klaus.kreher@hevs.ch
Evelyn Trachsel, ZHAW, trae@zhaw.ch
Tal Hertig, ZHAW, heti@zhaw.ch
Jakob Rager, HES-SO Valais/Wallis, jakob.rager@hevs.ch
Andrea Salmi, HES-SO Valais/Wallis, andrea.salmi@hevs.ch
Baljeet Taak, HES-SO Valais/Wallis, baljeet.taak@hevs.ch

BFE-Projektbegleitung:

Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI 502160-01 IVECT

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Begrünung von Gebäudehüllen wird allgemein als Low-Tech-Massnahme mit positivem Einfluss auf Wohn- und Umgebungskomfort (Akustik, Luftqualität, Ästhetik, uvm.) bewertet.

Ziel dieses Projekts ist es den Einfluss von Begrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen zu quantifizieren und zur Berechnung von Energiebilanzen in Simulationstools (bSol und CitySim) zu integrieren. Der Fokus wird hierbei auf die Parameter Oberflächentemperaturen und Umgebungstemperaturen der begrünten Gebäudehüllen gesetzt, da diese Parameter durch die spezifischen Pflanzenoberflächen, Abstrahlungs- und Absorptionsverhalten, sowie die Verdunstungsleistung der Pflanzen stark beeinflusst werden.

Im Rahmen des Projektes konnte mittels Simulationen der Einfluss der Fassadenbegrünung auf die Gebäudejahresenergiebilanz für unterschiedliche Gebäudetypen (niedrige, mittlere und hohe thermische Trägheit und hoher, mittlerer und niedriger U-Wert) mittels der Simulationssoftware bSol quantifiziert werden. Es stellte sich heraus, dass der positive Einfluss der Begrünung bei Gebäuden mit geringer thermischer Trägheit und hohem U-Wert am grössten ausfällt. Aufgrund der Verschattungsfunktion der Pflanzen können Überhitzungsstunden stark reduziert werden. Der Einfluss der Verdunstungskühlung der Pflanzen wurde als gering quantifiziert. Im Rahmen des Projekts wurden die Grenzen für die Anwendung der Simulationssoftware verdeutlicht und die pflanzenspezifischen Parameter, die zur Simulation notwendig sind, definiert (Verdunstungsleistung und Blattflächenindex).

Für eine Arealsimulation konnten sowohl die für die Gebäudesimulation erzielten Ergebnisse mittels der Simulationssoftware CitySim durch die Erstellung der Energiebilanz eines Mustergebäudes (an dem auch die Messstrecken für die Pflanzenparameter installiert sind) ermittelt und überprüft werden, als auch der Einfluss der Temperaturentwicklung (durch Abstrahlung und Reflektion) im Areal quantifiziert werden. Die Grenzen der Methodik wurden aufgezeigt und es wurde deutlich, dass vorallem der Einfluss der Konvektionsströmungen im Areal in der Simulation nicht berücksichtigt werden kann, was als zukünftige Forschungsfrage betrachtet werden sollte.

Die für eine Begründung der Gebäudehülle regional geeigneten Pflanzen wurden bestimmt, wobei die Kriterien des Wasser- und Pflegebedarfs und die Nutzbarkeit als punktuelle (individuelle), lineare oder flächige Begrünung im Mittelpunkt standen. Die für die Quantifizierung der Energiebilanz eines Gebäudes, bzw. Areals entscheidenden Indikatoren (Verdunstungsleistung und Blattflächenindex) wurden mittels Messungen bestimmt und ein Pflanzenkatalog (nach spezifischen Kriterien geordnet) als Anwendungshilfe mit Entscheidungskriterien erstellt. Es wurde deutlich, dass vorallem Pflanzen, welche robust, nicht wintergrün mit Blattverlust und geringem Wasserbedarf für die Anwendung als Gebäudehüllenbegrünung besonders geeignet sind. Hierbei gilt, je höher der Blattflächenindex, desto besser ist die Verschattungsleistung.

Im Rahmen des Projektes wurde ebenfalls der Einfluss der Klimaentwicklung und die gesellschaftliche Akzeptanz von Begrünungsmassnahmen eingegangen. Hierbei ist festzuhalten, dass die Klimaentwicklung und die Urbanisierung den Bedarf an Begrünungsmassnahmen erhöhen wird, da in unserem Lebensraum höhere Temperaturen und trockeneres Klima prognostiziert wird, was den Bedarf an Kühlleistung, Verschattung und der Vermeidung von Hitzeinseln erhöhen wird.

Die zur Quantifizierung der Energiebilanz durch Gebäudehüllenbegrünung erforderlichen Parameter und das Vorgehen am Gebäude und im Areal konnten im Projekt definiert und wo erforderlich bestimmt werden. Derzeit kann eine Ermittlung oder die Simulation der Auswirkungen aber nur von geschultem Fachpersonal durchgeführt werden, eine Integration in die übliche Methodik zur Bestimmung von Energiebilanzen mittels Simulationssoftware ist möglich und sollte in weiteren Projekten entwickelt werden.



Résumé

La végétalisation de l'enveloppe des bâtiments est généralement considérée comme une mesure low-tech ayant une influence positive sur le confort de l'habitat et de l'environnement (acoustique, qualité de l'air, esthétique, etc.).

L'objectif de ce projet est de quantifier l'influence de la végétalisation sur l'efficacité énergétique des bâtiments et des sites et de l'intégrer dans des outils de simulation (bSol et CitySim) pour calculer des bilans énergétiques. L'accent est mis sur les paramètres de température de surface et de température ambiante des enveloppes de bâtiments végétalisées, car ces paramètres sont fortement influencés par les surfaces spécifiques des plantes, le comportement de rayonnement et d'absorption, ainsi que la capacité d'évaporation des plantes.

Dans le cadre du projet, des simulations ont permis de quantifier l'influence de la végétalisation des façades sur le bilan énergétique annuel des bâtiments pour différents types de bâtiments (inertie thermique faible, moyenne et élevée et valeur U élevée, moyenne et faible) à l'aide du logiciel de simulation bSol. Il s'est avéré que l'influence positive de la végétalisation était la plus importante pour les bâtiments à faible inertie thermique et à valeur U élevée. En raison de la fonction d'ombrage des plantes, les heures de surchauffe peuvent être fortement réduites. L'influence du refroidissement par évaporation des plantes a été quantifiée comme étant faible. Dans le cadre du projet, les limites d'utilisation du logiciel de simulation ont été clarifiées et les paramètres spécifiques aux plantes nécessaires à la simulation ont été définis (capacité d'évaporation et indice de surface foliaire).

Pour une simulation de site, il a été possible de déterminer et de vérifier les résultats obtenus pour la simulation de bâtiment à l'aide du logiciel de simulation CitySim en établissant le bilan énergétique d'un bâtiment modèle (sur lequel sont également installés les parcours de mesure des paramètres des plantes), mais aussi de quantifier l'influence de l'évolution de la température (par rayonnement et par réflexion) sur le site. Les limites de la méthode ont été mises en évidence et il est apparu clairement que l'influence des courants de convection dans la zone ne pouvait pas être prise en compte dans la simulation, ce qui devrait être considéré comme une question de recherche future.

Les plantes adaptées à la justification de l'enveloppe du bâtiment au niveau régional ont été déterminées, en mettant l'accent sur les critères de besoin en eau et d'entretien et sur l'utilisabilité en tant que végétation ponctuelle (individuelle), linéaire ou surfacique. Les indicateurs décisifs pour la quantification du bilan énergétique d'un bâtiment ou d'une zone (capacité d'évaporation et indice de surface foliaire) ont été déterminés à l'aide de mesures et un catalogue de plantes (classées selon des critères spécifiques) a été établi comme aide à l'application avec des critères de décision. Il est apparu clairement que les plantes robustes, non persistantes en hiver avec une perte de feuilles et un faible besoin en eau sont particulièrement adaptées à l'utilisation comme végétalisation de l'enveloppe du bâtiment. Plus l'indice de surface foliaire est élevé, meilleure est la performance d'ombrage.

Dans le cadre du projet, l'influence de l'évolution du climat et l'acceptation sociale des mesures de végétalisation ont également été abordées. Il convient de noter ici que l'évolution du climat et l'urbanisation augmenteront le besoin de mesures de végétalisation, car on prévoit des températures plus élevées et un climat plus sec dans notre espace de vie, ce qui augmentera le besoin de puissance de refroidissement, d'ombrage et de prévention de la formation d'îlots de chaleur.

Les paramètres nécessaires à la quantification du bilan énergétique par la végétalisation de l'enveloppe du bâtiment et la procédure à suivre sur le bâtiment et sur le site ont pu être définis dans le cadre du projet et déterminés lorsque cela était nécessaire. Cependant, à l'heure actuelle, la détermination ou la simulation des effets ne peut être effectuée que par un personnel spécialisé et formé ; une intégration dans la méthodologie habituelle de détermination des bilans énergétiques au moyen de logiciels de simulation est possible et devrait être développée dans d'autres projets.



Summary

Greening building envelopes is generally considered a low-tech measure that has a positive influence on living and environmental comfort (acoustics, air quality, aesthetics, etc.).

The aim of this project is to quantify the influence of greening on the energy efficiency of buildings and sites and to integrate it into the calculation of energy balances in simulation tools (bSol and CitySim). The focus here is on the surface and ambient temperatures of the greened building envelopes, as these parameters are strongly influenced by the specific plant surfaces, radiation and absorption behaviour, and the evaporation capacity of the plants.

As part of the project, the influence of facade greening on the annual energy balance of different types of buildings (low, medium and high thermal inertia and high, medium and low U-value) was quantified using the bSol simulation software. It was found that the positive influence of greening is greatest for buildings with low thermal inertia and high U-value. Due to the shading effect of the plants, hours of overheating can be greatly reduced. The influence of the evaporative cooling of the plants was quantified as low. Within the scope of the project, the limits for the application of the simulation software were clarified and the plant-specific parameters necessary for the simulation were defined (evaporation rate and leaf area index).

For an area simulation, the results obtained for the building simulation could be determined and verified by means of the simulation software CitySim by creating the energy balance of a model building (in which the measuring sections for the plant parameters are also installed), and the influence of the temperature development (through radiation and reflection) in the area could be quantified. The limits of the methodology were demonstrated and it became clear that, above all, the influence of convection currents in the area cannot be taken into account in the simulation, which should be considered as a future research question.

The plants suitable for the building envelope on a regional basis were determined, with the criteria of water and maintenance requirements and the usability as punctual (individual), linear or two-dimensional greening being the main focus. The indicators (evaporation rate and leaf area index) that are crucial for quantifying the energy balance of a building or area were determined by means of measurements, and a plant catalogue (arranged according to specific criteria) was created as an application aid with decision-making criteria. It became clear that plants that are robust, not wintergreen with leaf loss and have low water requirements are particularly suitable for use as green building envelopes. The higher the leaf area index, the better the shading performance.

The project also looked at the influence of climate change and the social acceptance of greening measures. It should be noted that climate change and urbanisation will increase the need for greening measures, as higher temperatures and drier climates are predicted in our living environment, which will increase the need for cooling, shading and the avoidance of heat island formation.

The parameters required to quantify the energy balance through green building envelopes and the procedure for buildings and sites were defined in the project and determined where necessary. However, at present, the effects can only be determined or simulated by trained specialists. It is possible to integrate this into the usual methodology for determining energy balances using simulation software, and this should be developed in further projects.

Take-home messages

- begrünte Fassaden tragen positiv zur Energiebilanz von Gebäuden bei. Für Mustergebäude im Raum Sion konnten unter Berücksichtigung der Verdunstungsleistung und Verschattung der Pflanzen eine Reduktion der Überhitzungsstunden bei der Simulation mit der Software bSol von bis zu 100% nachgewiesen werden. Je geringer die thermische Trägheit des Gebäudes, desto höher der positive Effekt. Der Anteil der Verdunstungsleistung der Pflanzen ist dabei gering (3-5%).



Für das Simulationstool bSol konnten Algorithmen bestimmt werden, um eine Fassadenbegrünung zur Berechnung der Jahresenergiebilanz zu berücksichtigen und Grenzen aufgezeigt werden.

- die für die Simulation des Einflusses der Gebäudehüllenbegrünung notwendigen Pflanzenparameter (insbesondere Verdunstungsleistung und Blattflächenindex) wurde für regionale Pflanzen ermittelt. Es gilt je höher der Blattflächenindex, desto besser die Verschattung, je grösser die Verdunstungsleistung, desto geringer die Oberflächentemperaturen der Blätter und der Umgebung. Ein Pflanzenkatalog als Entscheidungsgrundlage für begrünte Gebäudehüllen wurde erstellt, der Pflanzen hinsichtlich spezifischer Parameter (Robustheit, Wasserbedarf, Verdunstungsleistung und Blattgrösse) klassifiziert.
- für die Simulation des Einflusses der Fassadenbegrünung in Arealen und Quartieren konnten mittels Berechnung durch die Software CitySim das Vorgehen und die Anwendungsgrenzen bestimmt werden. Es ist festzuhalten, dass die Oberflächentemperaturen und die gefühlten Temperaturen im Areal positiv beeinflusst werden und somit auch hinsichtlich Energiebilanz und Komfort positive Aspekte nachweisbar sind (z.B.: Reduktion der Oberflächentemperatur bis zu 1,4K, PET bis zu 8K).



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	<i>Ausgangslage und Hintergrund</i>	10
1.2	<i>Motivation des Projektes</i>	11
1.3	<i>Projektziele</i>	12
2	Vorgehen und Methode	13
2.1	<i>Übersicht</i>	13
2.1.1	<i>Verlauf und Forschungsfragen</i>	13
2.2	<i>Untersuchungen Pflanzen zur Gebäudehüllenbegrünung</i>	16
2.2.1	<i>Pflanzenkatalog und Begrünungstypen für Fassaden</i>	16
2.2.2	<i>Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen</i>	35
2.2.3	<i>Messung der Oberflächentemperatur und der gefühlten Kühlleistung (PET)</i>	39
2.2.4	<i>Fazit Untersuchungen Pflanzen zur Gebäudehüllenbegrünung</i>	41
2.3	<i>Gebäudeebene</i>	47
2.3.1	<i>Energiebilanz</i>	47
2.3.2	<i>Simulationstool bSol</i>	48
2.3.3	<i>Fallstudien – quantitativen Einfluss einer Begrünung</i>	52
2.3.4	<i>Energiebilanzgleichung von bSol in Matlab®</i>	54
2.4	<i>Arealebene</i>	56
2.4.1	<i>Simulationstool CitySim</i>	56
2.4.2	<i>Aufbau der Simulation</i>	59
3	Ergebnisse und Diskussion	62
3.1	<i>Untersuchung Pflanzen zur Gebäudehüllenbegrünung</i>	62
3.1.1	<i>Pflanzenkatalog und Begrünungstypen für Fassaden</i>	62
3.1.2	<i>Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen</i>	69
3.1.3	<i>Messung der Oberflächentemperatur und der gefühlten Kühlleistung (PET)</i>	72
3.2	<i>Gebäudeebene</i>	75
3.2.1	<i>Einfluss der Verdunstungsleistung</i>	75
3.2.2	<i>Einfluss der Verschattung</i>	76
3.2.3	<i>Einfluss von weiteren Parametern</i>	77
3.2.4	<i>Fallstudie mit der Energiebilanzgleichung von bSol in Matlab</i>	79
3.2.5	<i>Fazit Begrünung und bSol</i>	80
3.3	<i>Arealebene</i>	81
3.3.1	<i>Auswirkungen auf die Energiebilanz der Gebäude im Areal</i>	81
3.3.2	<i>Auswirkungen auf die Umgebung - lokaler Massstab</i>	82
3.3.3	<i>Simulationen für 2050</i>	83
3.3.4	<i>Messungen und Simulation</i>	84
3.3.5	<i>Tageslicht</i>	85
3.3.6	<i>Fazit Begrünung und CitySim</i>	86



3.4	<i>Gesamtenergiebilanz</i>	88
3.5	<i>Bewertung von zusätzlichen Einflussfaktoren</i>	89
3.5.1	Soziale Einflussfaktoren	89
3.5.2	Wirtschaftliche Einflussfaktoren.....	89
3.5.3	Rechtliche Einflussfaktoren	90
3.5.4	Andere Einflussfaktoren	90
3.6	<i>Stakeholder Feedback</i>	90
3.7	<i>Schlussfolgerungen und Fazit</i>	93
4	Ausblick und zukünftige Umsetzung	94
5	Publikationen	94
6	Literaturverzeichnis	95
7	Anhang	98
7.1	<i>Übersicht der Kletterpflanzen mit Einteilung nach den Lebensbereichen der Gehölze</i>	
7.2	<i>Auswertung Lebensräume der Schweiz nach Delarze (2015)</i>	
7.3	<i>Diplomarbeit Tran</i>	
7.4	<i>Diplomarbeit Rod</i>	
7.5	<i>Diplomarbeit Défago</i>	



Abkürzungsverzeichnis

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COMFA	thermischer Komfortindex
EBF	Energiebezugsfläche
ET	Evapotranspiration
ETM	maximale Evapotranspiration
Eto	Referenz Verdunstung oder Evapotranspiration der Referenzpflanzen
ETR	reale Verdunstung
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FFL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau
kc	Pflanzenkoeffizient
ks	Wasserstresskoeffizient
LAD	Blattflächendichte
LAI	Leaf area index, Blattflächenindex
Lf	Largeur de feuille, Blattbreite
MRT	mittlere Strahlungstemperatur
PET	physiologische Äquivalenttemperatur
Qh	Heizwärmebedarf
SIA	schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Tf	Blatttemperatur



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Klimaerwärmung, die hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten verursacht wird, ist auch Thema im letzten Bericht des IPPC (IPCC, 2023). Die massiven Emissionen von Treibhausgasen aufgrund der weit verbreiteten Verwendung fossiler Energien und anderer industrieller Praktiken haben den Treibhauseffekt verstärkt und zu einem signifikanten Anstieg der weltweiten Temperaturen geführt. Dieser Temperaturanstieg hat eine erhebliche Auswirkung insbesondere auf städtische Gebiete.

Die zunehmende Urbanisierung hat Städte zu dicht besiedelten und zu hochdichten Räumen gemacht, die hauptsächlich aus mineralischen Oberflächen, Gebäuden, Straßen und betonierten Flächen bestehen. Diese nicht natürlichen Materialien absorbieren und halten die Wärme zurück, was zu wesentlich höheren Temperaturen im Vergleich zu den umliegenden Gebieten führt.

Neben der Temperaturerhöhung haben städtische Wärmeinseln auch negative Auswirkungen auf die Biodiversität, Luftqualität, Wasserrückhaltung und Lärmbelastung in diesen Umgebungen. Auf Gebäudeebene ist zudem ein starker Energieverbrauch zur Kühlung der Räume zu sehen.

Diese schädlichen Effekte erfordern innovative Lösungen, um diese Auswirkungen zu mildern. Begrünungssysteme haben sich als potenziell wirksame Mittel herauskristallisiert, um diesen Problemen entgegenzuwirken. Diese betreffen sowohl die umliegende Begrünung (Bäume zum Beispiel) als auch die an Gebäude integrierten Systeme wie Dach- oder Fassadenbegrünungen.

Vegetation bringt mehrere Vorteile mit sich. Die Luftqualität wird gesteigert, die Biodiversität gefördert, die Akustik verbessert, das Wassermanagement optimiert (Manso, 2021). Der Schatten, den sie spendet, ermöglicht es die Oberflächentemperatur der Objekte wie zum Beispiel der Strassen und Gebäude zu reduzieren, indem sie die direkte Sonneneinstrahlung vermindert. Zudem wird durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen die unmittelbare umliegende Luft gekühlt (Pérez, 2011). Auf Gebäudeebene kann dies im Sommer zu Energieeinsparungen beitragen. Bei einer Dachbegrünung und einer fassadengebundenen Anlage kann das Substrat als zusätzliche Wärmedämmung dienen, was in manchen Fällen zu einer Reduktion der benötigten Heizenergie im Winter führen kann (Coma, 2017).

Das Energieeinsparungspotenzial ist in der Literatur sehr unterschiedlich. Dies liegt daran, dass unterschiedliche Begrünungssysteme untersucht werden (bodengebundene oder fassadengebundene Fassadenbegrünung, Dachbegrünung, usw.), an unterschiedlichen Gebäudetypen und Gebäudehüllen, mit unterschiedlichen Pflanzenarten in unterschiedlichen klimatischen Zonen. Darüber hinaus variieren die Berechnungsmodelle und/oder Simulationsmodelle. Dies führt dazu, dass Vergleiche nicht immer möglich sind.

Ziel dieses Projekts ist es den Einfluss von Begrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen zu quantifizieren und zur Berechnung von Energiebilanzen in Simulationstools (bSol und CitySim) zu integrieren. Der Fokus wird hierbei auf die Parameter Oberflächentemperaturen und Umgebungstemperaturen der begrünten Gebäudehüllen gesetzt, da diese Parameter durch die spezifischen Pflanzenoberflächen, Abstrahlungs- und Absorptionsverhalten, sowie die Verdunstungsleistung der Pflanzen stark beeinflusst werden. In Abgrenzung zum Projekt «GreenPV» (BFE und HSLU) wurde ausschliesslich der Einfluss der Begrünung berücksichtigt.



1.2 Motivation des Projektes

Ziel dieses Projekts ist es den Einfluss von Fassadenbegrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen zu quantifizieren und zur Berechnung von Energiebilanzen in zwei Simulationstools zu integrieren. Sowohl Gebäudeinterne wie arealspezifische Aspekte werden untersucht.

In Abgrenzung zu anderen national und international laufenden Projekten, zielt das hier formulierte Projekt vor allem auf die Anwendung und Realisierung von Begrünungsmassnahmen, um mittels LOW- oder NO-Tech-Massnahmen einen Mehrwert zu generieren und den Energieverbrauch von Gebäuden und Arealen deutlich zu senken. Mit NO-Tech werden überwiegend die Pflanzen definiert und mit LOW-Tech, die Tatsache, dass die Baukonstruktion den Energieverbrauch beeinflusst und die Gebäudetechnik dabei simpel gehalten wird (Bewässerung). Mit Hilfe eines multidisziplinären Projektteams und einem multidisziplinären Lösungsansatzes sollen zum einen die technischen Auswirkungen quantifiziert werden, um diese dann in die Simulationsmethodik implementieren zu können. Zum anderen sind aber die typologischen, sozialen und reglementarischen Regeln Grundlage für ein Verständnis der Bedürfnisse und somit der sozialen und rechtlichen Akzeptanz der Massnahmen. Wird dies multidisziplinär klassifiziert und aufgezeigt, ergeben sich die massgeblichen Handlungsszenarien, die für die Umsetzung und die effiziente Anwendung dieser Energieeinsparungsmassnahmen notwendig sind. Diese sollen am Ende des Projekts für eine breite Anwendung von einzelnen Begrünungsmassnahmen bis hin zu vollbegrünten Gebäudehüllen führen, die nachhaltig und robust weitreichende Verbesserungen der Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen bringen.



1.3 Projektziele

1. Die Auswirkung von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden aufzeigen.
 - a. Bestehende Messstrecken (Messprofile) mit dem Ziel der Typisierung von Gebäuden auswerten und eigene Messstrecken an Referenzgebäuden bestätigen und absichern.
 - b. Bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung der Jahresenergiebilanz mit spezifischen Aspekten der Begrünungsmassnahmen ergänzen und auswerten.
 - c. Klassifizierung und Typisierung von Begrünungsmassnahmen an Gebäuden.
 - d. Auswirkungen auf Sanierungs-, Gebäude- und Arealplanungen hinsichtlich möglicher Energieeinsparungen quantifizieren und aufzeigen.
2. Die Auswirkungen von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen zur Steigerung der Energieeffizienz von Arealen aufzeigen mit dem Fokus auf Areale, die durch reglementarische Beschränkungen hinsichtlich technischer Installationen betroffen sind.
 - a. Bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung der Jahresenergiebilanz für die Arealplanung ergänzen. Dabei sollen mittels CitySim zusätzliche Einflussparameter berücksichtigt werden, die sich mit der näheren Umgebung eines Gebäudes befassen wie die Interreflektion zwischen mehreren Gebäuden oder der Windprofil, der durch die verschiedenen Hindernisse (Bäume, Gebäude, usw.) beeinflusst wird. Der Inseleffekt steht dabei im Mittelpunkt. Diese Aspekte sind mit klassischen Berechnungen des Energiebedarfs auf Gebäudeebene nicht zu ermitteln.
 - b. Messstrecken, die von der Stadt Zürich beauftragt und ausgewertet wurden integrieren und hinsichtlich der Relevanz für Areale simulieren und auswerten.
3. Klimatische und ortsbezogene Veränderungen und Besonderheiten (Auswirkung des Klimawandels, allgemeine klimatische Bedingungen) zur klassifizieren und typisieren, um arealspezifische Aspekte für eine Energieeffizienzsteigerung berücksichtigen zu können.
4. Analyse der Biodiversität von möglichen Bepflanzungen und begrünten Gebäudehüllen mit dem Ziel die positive Wirkung der Begrünung zu erhöhen und ein bauliches Schadenspotential zu minimieren.
 - a. Vergleich von Wachstums- und Verdunstungseigenschaften von Pflanzen, und bestmögliche Begrünungs- und Bepflanzungsmassnahmen zu bestimmen und zu klassifizieren.
 - b. Bereits erfolgte Messungen der ZHAW und der Stadt Zürich integrieren und auswerten.
 - c. Saftflussmessungen und Verdunstungsleistungsmessungen an diversen Pflanzen durchführen.
 - d. Thermographiemessungen an Gebäuden
5. Studie und Bewertung von sozialen, wirtschaftlichen und rechtlichen Einflussfaktoren, welche die Anwendung von Begrünungen und begrünten Gebäudehüllen als Installation zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen beeinflussen. Ziel ist, diese Faktoren als Entscheidungshilfe klassifizieren und beurteilen zu können und für eine Förderung von Begrünungsmassnahmen zu nutzen.



2 Vorgehen und Methode

2.1 Übersicht

Das Projekt ist in drei Hauptbereiche gegliedert.

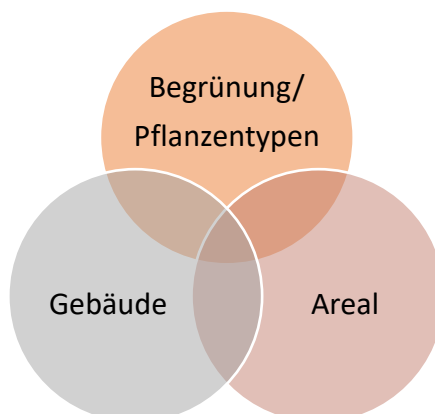


Abbildung 1: Hauptbereiche im Projekt

Das Vorgehen, das in diesem Projekt angewandt wird, beruht auf zwei wesentliche Aspekte: Simulationen an Gebäuden und Areale sowie Messungen an Begrünungsmassnahmen, um die Simulationen zu validieren und zu verfeinern und pflanzenspezifische Merkmale zu untersuchen.

2.1.1 Verlauf und Forschungsfragen

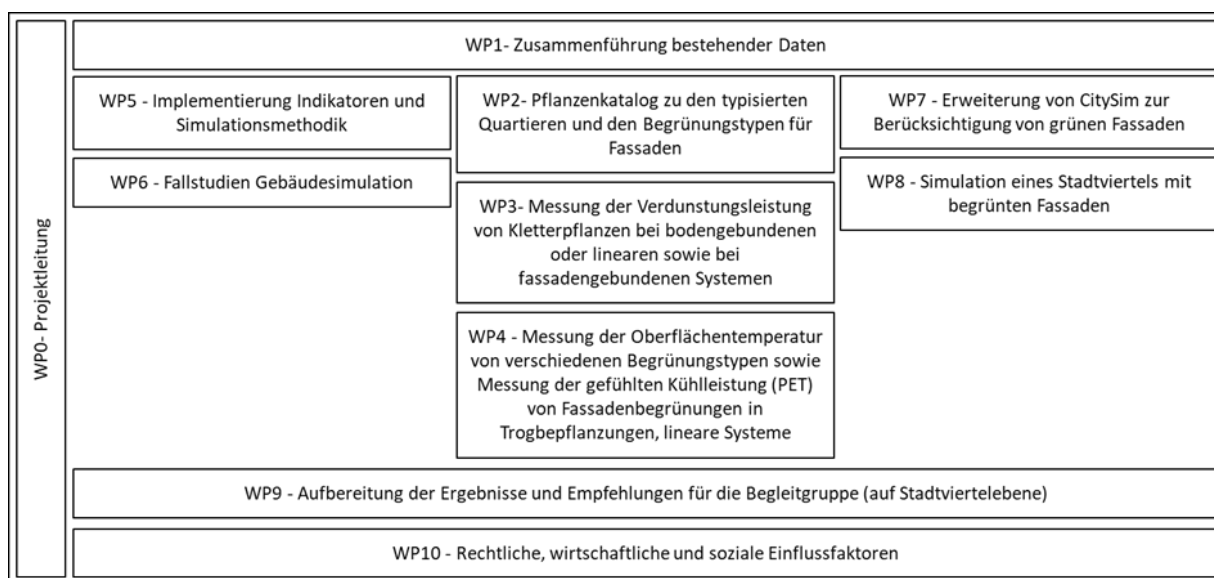


Abbildung 2: Übersicht der im Projekt durchgeführten Arbeiten

In einem ersten Schritt (WP1) wird eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Ziel ist es bestehende Daten zu sichten und aufzuarbeiten. Dabei werden sowohl Resultate aus verschiedenen Arbeiten der Projektpartnern ausgewertet wie auch aus einer Literaturübersicht. Es geht darum zu ermitteln was schon gemacht wurde, unter welchen Bedingungen, mit welchen Daten und mit welchen Resultaten.



Dies soll uns helfen die nötigen Inputparameter für die Simulationen von Begrünung auf Gebäude- und Arealebene zu bestimmen bzw. zu verfeinern. Darüber hinaus dienen diese externen Daten als Vergleichswerte.

Gleichzeitig werden die nötigen Messstrecken definiert (Saftflussmessungen, Temperaturverläufe usw.) basierend auf die nötigen Inputparameter.

Referenzgebäude und Areale müssen zudem definiert werden auf denen die Simulationen durchgeführt werden sollen. Einerseits werden Gebäude/Areale simuliert, auf denen die Messstrecken gemacht werden (um die Simulationen mit den Messungen zu kalibrieren), andererseits werden die Simulationen auf andere Referenzgebäude und Areale erweitert (andere Gebäudetypen, massive vs. Leichte Baukonstruktion, Neu- oder Altbauten, usw.) um den Einfluss der Begrünung auf die Energiebilanz zu ermitteln.

WP2 befasst sich mit der Frage: Welche standortgerechte, langlebige Bepflanzung erbringt, durch einen hohen Deckungsgrad, den gewünschten Klimateffekt?

Dabei werden verschiedene Begrünungstypen ausgesucht (fassadengebundene oder bodengebundene Begrünung, usw.) sowie verschiedene Pflanzenarten. Diese werden in einem ersten Schritt nach unterschiedlichen Kriterien ermittelt wie allgemeine Anwendung, Herkunft oder physiologische Eigenschaften der Pflanzen usw. Die Wahl der Begrünungsart und Pflanzenart hängen auch davon ab, was an welchen Standort existiert. Die Messungen müssen an bestehenden begrünten Gebäudehüllen gemacht werden, da die Begrünung mehr oder weniger ausgeprägt sein soll (nicht in der ersten Wachstumsphase). Anfangs werden deshalb auch nur Fassadenbegrünungen untersucht. Dachbegrünungen werden je nach Möglichkeit dazukommen. Ein Pflanzenkatalog wird dazu erstellt.

In WP3 rückt die Kühlleistung von Pflanzen im Vordergrund. Ist die Kühlleistung durch Verdunstung einzelner Kletterpflanzen, verschiedener Pflanzenarten und Begrünungsmassnahmen quantitativ signifikant?

Dafür werden Saftflussmessungen mittels Lysimeter an einzelnen Kletterpflanzen und an gesamten Fassadenbegrünungen durchgeführt. Dies ermöglicht es die Verdunstungsleistung einer Pflanzenart bzw. einer Fassadenbegrünung zu ermitteln, Vergleiche zwischen verschiedene Arten von Kletterpflanzen zu erstellen und die Kühlleistung zu evaluieren. Dieselben oder ähnliche Datenaufnahmen werden an Fassadengebundenen Systemen erhoben (modulare und flächige Bauweise).

Darüber hinaus soll eine Antwort auf folgende Frage gefunden werden: Welchen quantitativen Einfluss hat die Kühlleistung durch Verdunstung sowie die entstandene Verschattung auf die Temperatur zwischen der Begrünung und der baulichen Substanz, die Oberflächentemperatur einer Fassade sowie das Innenklima? In WP4 wird dafür die Oberflächentemperatur von Fassadenbegrünungen mittels Wärmebildkamera ermittelt, um auch einen bildnerischen Überblick über die Kühlleistung zu erhalten. Zudem wird die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungswärme (PET-Messungen) kontinuierlich erhoben, um die Kühlleistung hinter der Begrünung aufzuzeigen.

Diese Messungen dienen dazu die Simulationen zu verfeinern bzw. zu kalibrieren da sie einige der Inputparameter der Simulationen darstellen.

In WP 5, das gleichzeitig zu den WPs 2-4 durchgeführt werden kann, geht es darum das für das Projekt verwendete Simulationstool (auf Gebäudeebene) zu erweitern damit es die Aspekte der Begrünung miteinbezieht.

Die Fragestellung lautet: Inwiefern können die Inputparameter einer Begrünung im Simulationstool bSol implementiert werden, welche Simulationsmethodik sollte festgelegt werden, um eine Begrünung auf Gebäudeebene am treuesten wiederzugeben und welche Indikatoren sind am besten geeignet, um die Resultate der Simulationen zu veranschaulichen?

Zweites Ziel dieses WPs ist zu eruieren, ob zusätzliche Indikatoren nötig sind, um die Gebäudesimulationen in Hinblick auf die Jahresenergiebilanz miteinander zu vergleichen oder um die



darauffolgende Areal simulationen mittels CitySim zu vervollständigen. Um dies zu beurteilen, werden die nötigen Input- und Outputparameter der zwei Simulationstools verglichen und falls nötig erweitert.

WP6 befasst sich mit den Fragen: Welchen quantitativen Einfluss haben die Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Gebäudes? Können die Begrünungsmassnahmen nach Effizienz klassifiziert werden und falls ja, welche Begrünungsmassnahmen weisen bei welchen Gebäudetypen eine höhere Effizienz auf?

In diesem WP werden Gebäudesimulationen an den definierten Referenzgebäuden durchgeführt. Diese beruhen auf der festgelegten Methodik und den gewählten Input- und Outputparameter (WP1).

An jedem Gebäudetyp werden Simulationen mit und ohne Begrünung durchgeführt, um den Einfluss der Begrünung zu berechnen. Die Inputparameter, die für die Begrünung relevant sind, können und sollen mittels der Messungen (WP2-4) verfeinert werden (Kühlleistung oder Verschattung einer bestimmten Pflanzenart bei einer bestimmten Begrünungsart usw.). Nachdem alle Simulationen durchgeführt wurden, können die Begrünungsmassnahmen nach deren Effizienz an verschiedene Gebäudearten klassifiziert und typisiert werden, dies ist das eigentliche Ziel des WPs 6.

Wie bei WP5 für die Gebäudeebene, geht es in WP7 darum die Erweiterung des Simulationstools CitySim für die Integration der Aspekte der Begrünung auf Areal Ebene in Angriff zu nehmen. Inwiefern können die Inputparameter einer Begrünung im Simulationstool CitySim implementiert werden, welche Simulationsmethodik sollte festgelegt werden, um eine Begrünung auf Areal Ebene am treuesten wiederzugeben und welche Indikatoren sind am besten geeignet, um die Resultate der Simulationen zu veranschaulichen? Hier sind zum Beispiel Albedo und Interreflektion zwischen den Oberflächen der näheren Umgebung (begrünt oder nicht begrünt) wichtige Parameter, die neu in CitySim integriert werden müssen. Der Wärmeinseleffekt ist hierbei auch ein wichtiger Parameter.

Nachdem die Aspekte der Begrünung auch in diesem Tool integriert wurden, kann auch auf eine weitere Forschungsfrage geantwortet werden: Welchen Einfluss haben Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Areals, das Energieeinsparungspotential sowie den Wärmeinseleffekt? Dafür werden in WP8 Simulationen auf Areal Ebene erstellt (Areal ohne begrüntes Gebäude, Areal mit nur einem einzigen begrüntem Gebäude, mit mehreren begrüntem Gebäuden, mit unterschiedlichen Begrünungsmassnahmen auf den verschiedenen Gebäuden usw.). Der Einfluss zwischen den Gebäuden ist hier der Mehrwert.

Die Resultate werden dann zusammengefasst, diskutiert und präsentiert (WP9).

Letztendlich basierend auf den Resultaten, kann auf die letzte Forschungsfrage geantwortet werden: Welche Gründe können gegen und für eine Begrünung bestimmt werden (speziell in Hinsicht auf die Jahresenergiebilanz, Komfort, usw.)? Welche Begleitmassnahmen sind notwendig, um zu einer hohen Akzeptanz von Begrünungsmassnahmen zu führen? Wie können diese Massnahmen in den bestehenden Beurteilungskriterien integriert werden?

Dabei sollten nicht nur energetische Aspekte in Betracht gezogen werden, sondern auch soziale und wirtschaftliche Aspekte.

In den folgenden Abschnitten werden die angewandten Methoden, je nach Bereich/Ebene genauer beschrieben.



2.2 Pflanzen für die Gebäudehüllenbegrünung

2.2.1 Pflanzenkatalog und Begrünungstypen für Fassaden

Für die Untersuchungen bzgl. geeigneter Pflanzen zur Gebäudebegrünung hinsichtlich der Ermittlung von Einflussparametern und zur Kategorisierung wurden Messstrecken an unterschiedlichen regionalen Pflanzenarten durchgeführt.

Das Messgebiet liegt in Zürich und umfasst das Gelände der Stadtgärtnerei. Im folgenden Kapitel wird dieses Gebiet näher beschrieben, da beim Werkgebäude Klimamessungen der WP3 und WP4 durchgeführt wurden. Außerdem werden verschiedene Arten der Fassadenbegrünung erläutert und die Analyse sowie Bewertung der Pflanzen für den Katalog beschrieben.

Analyse Quartier Stadtgärtnerei Zürich

Die Stadtgärtnerei liegt in Zürich-Albisrieden und ist für Besucher ganzjährig geöffnet. Neben der Parkpflege ist die Stadtgärtnerei für die Floristikabteilung sowie An- und Aufzucht von Pflanzen zuständig. Zudem nimmt die Bildung einen hohen Stellenwert ein. Grün Stadt Zürich fördert hier das Verständnis für Natur und nachhaltige Entwicklungen in diversen Ausstellungen und Angeboten (www.stadt-zuerich.ch). Im Rahmen der Ausstellung «Grün am Bau» wurden vier verschiedene Typen von Fassadenbegrünungen am Lagergebäude der Stadtgärtnerei erstellt (Abbildung 3 & Abbildung 4 & Abbildung 5):

1. Flächige, fassadengebundene Begrünung (System 1)
2. Trog gebundene Fassadenbegrünung (System 2)
3. Modulare, fassadengebundene Begrünung (System 3)
4. Bodengebundene Begrünung mit schlingenden Kletterpflanzen (System 4)

Die Wirkungsmessungen wurden an den Systeme 1, 2 und 4 durchgeführt.

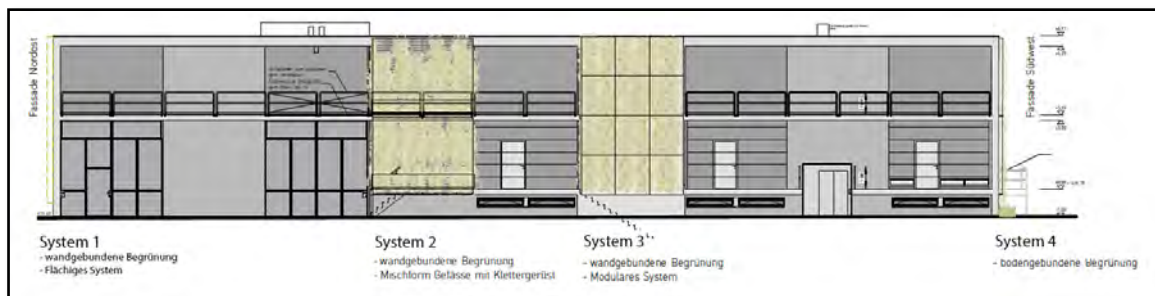


Abbildung 3: Lage der beispielhaften Fassadenbegrünungen bei der Stadtgärtnerei Zürich. Quelle: Raderschallpartner AG, Erstelldatum: 22.09.16, Plan-Nr. 1065-S-4-4 1065.



Abbildung 4: Stadtgärtnerei Zürich mit Lagergebäude (gelb eingerahmt). Quelle: maps.google.ch



Abbildung 5: Ausrichtungen der untersuchten Fassadenbegrünungen am Lagergebäude in der Stadtgärtnerei Zürich. Quelle: GIS-ZH, Orthofoto 2019, verändert durch E. Trachsel

Obwohl die Stadtgärtnerei von einem Park mit kühlender Vegetation umgeben ist, kann die Lage des Lagergebäudes als vergleichbar mit der Klimasituation eines versiegelten, urbanen Quartiers bezeichnet werden. Die nachfolgenden Karten zeigen, dass die Wärmebelastung während der Sommermonate sehr hoch ist. Die modellierte, gefühlte Temperatur (PET) ist bis auf die Nordseite des Gebäudes mit ca. 40°C sehr hoch (siehe Abbildung 7). Ebenso ist die effektiv gemessene Lufttemperatur bei ca. 29°C im oberen Bereich. Die Wirkung der Fassadenbegrünungen ist daher umso bedeutender und kann auch auf andere urbane Situationen übertragen werden.

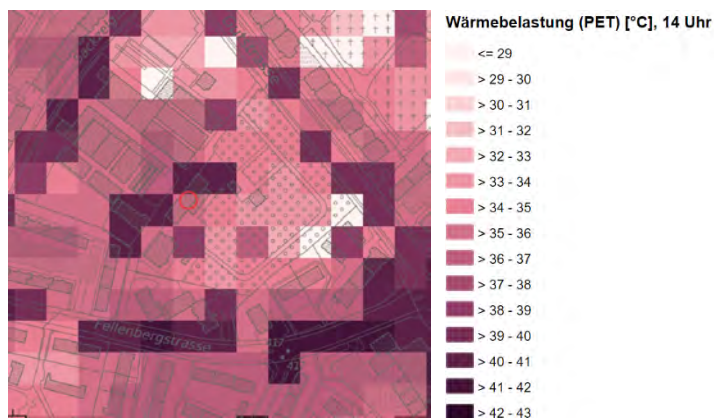


Abbildung 6: Wärmebelastung PET um 14 Uhr beim Lagergebäude (roter Kreis) in der Stadtgärtnerei Zürich. Quelle: GIS-ZH.

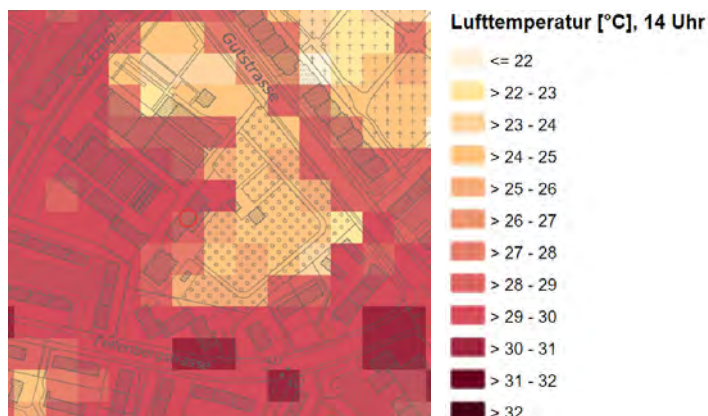


Abbildung 7: Lufttemperatur, um 14 Uhr beim Lagergebäude in der Stadtgärtnerei Zürich im roten Kreis. Quelle: GIS-ZH.

Analyse der Begrünungstypen der Fassaden

Die klimatische Wirkung einer Fassadenbegrünung hängt auch mit ihrem Begrünungstyp zusammen. Diese werden nach der *FLL-Richtlinie Fassadenbegrünung (2018)* wie in Abbildung 8 und Abbildung 9 eingeteilt. Im Rahmen des Projekts wurden die bodengebundene Begrünung sowie die wandgebundene Fassadenbegrünung in Regalbauweise (Tröge) und in flächiger Bauweise (siehe WP 3 und 4) klimatechnisch genauer untersucht.

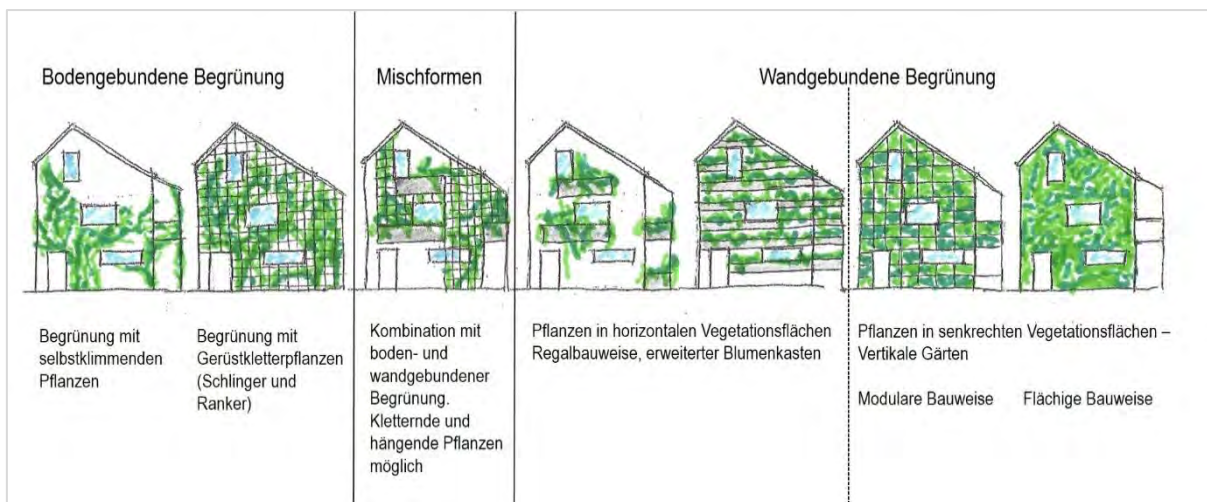


Abbildung 8: Einteilung der Begrünungstypen nach FLL 2018. (Grafik: Emanuel Geissmann)

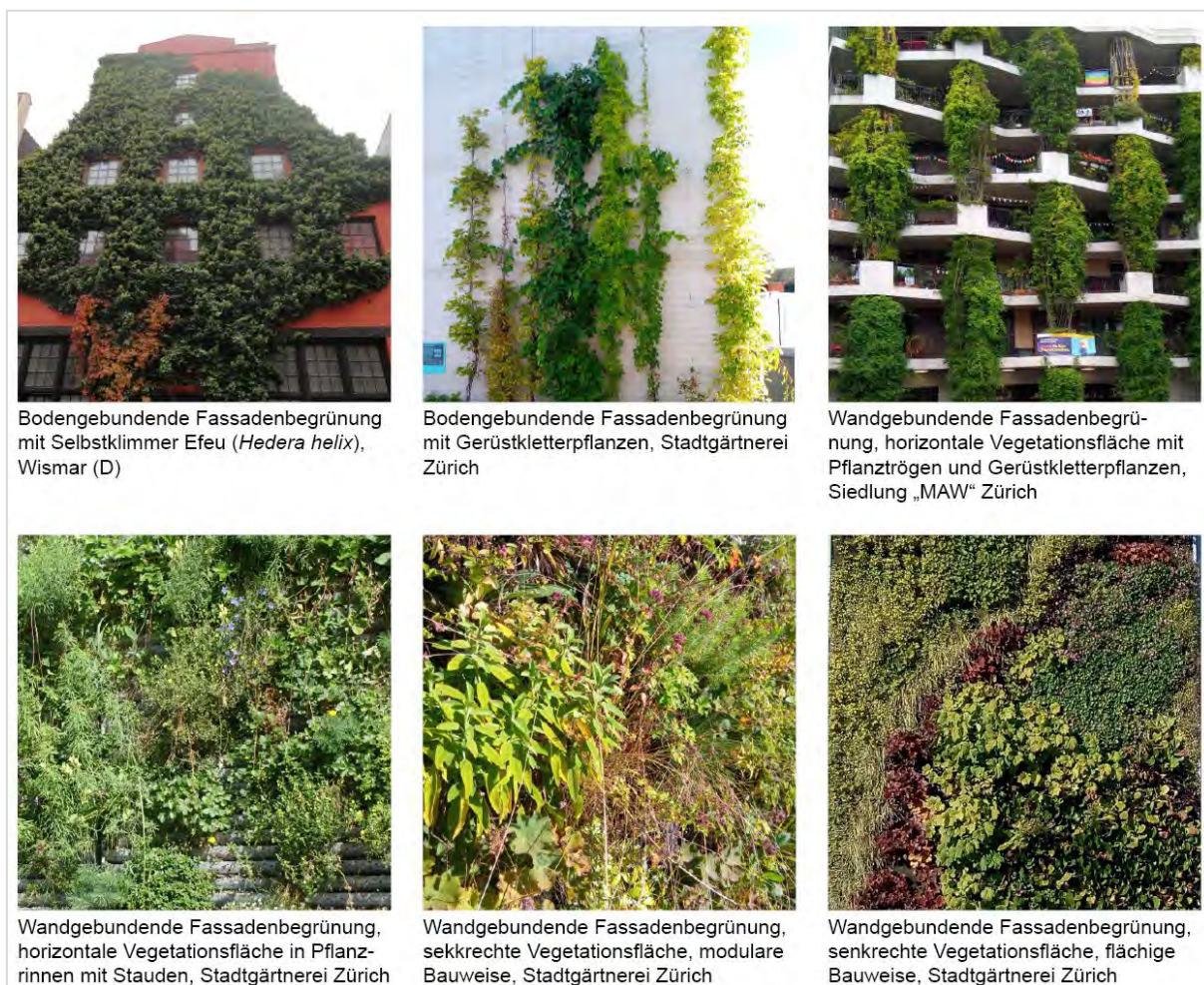


Abbildung 9: Beispiele der boden- und wandgebundenen Fassadenbegrünungen. (Fotos E. Trachsel)



In der Tabelle 1 werden die verschiedenen Begrünungstypen betreffend ihre Vor- und Nachteile und der mikroklimatischen Wirkung verglichen. Die Wirkung auf das Mikroklima wird auf Grund von Erfahrungswerten der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung angenommen und müssten mittels konkreter Messungen noch bestätigt werden. Auf die verschiedenen positiven Wirkungen von Fassadenbegrünungen wird weiter in Kapitel 2.2.2.1 eingegangen.

Wie aktuelle Messungen zeigen, ist die positive mikroklimatische Wirkung am effektivsten, wenn die Pflanzenwahl auf Exposition, Substrat und Nährstoffe sowie Wasserzufuhr abgestimmt und so die optimale Entwicklung der Pflanzen gefördert wird (Hertig & Trachsel 2021).

Tabelle 1: Vergleich der Begrünungssysteme für Fassaden. In Anlehnung an Köhler 2012, ergänzt durch E. Trachsel.

	Bodengebundene Begrünung		Lineare – Bauweise Regalbauweise		Moulare Bauweise	Flächige Bauweise
	Selbstklimmer	Gerüstkletterpflanzen	Grosse Kübel, Gabionen	Kübel klein, Kästen		
Gestaltung / Bepflanzung	Haftwurzelschleicher, Haftscheibenranker	Schlinger, Ranker, Spreizklimmer, Spalierbäume	Stauden, Kleingehölze, bedingt auch Kletterpflanzen	Stauden, Halbsträucher und Kleingehölze, Moose	Stauden, gut flächendeckende Stauden mit Rhizom- und Ausläuferbildung, Halbsträucher	v.a. Epiphyten und bodendeckende Stauden, bedingt horstig wachsende Arten
Substrate	Gewachsener Boden oder Substrate, je nach Standort überlaufbar (Beispiel Baumgrubensubstrat)	Gewachsener Boden oder Substrate, je nach Standort überlaufbar (Beispiel Baumgrubensubstrat)	Strukturstabil, mit mind. 60% mineralischem Anteil. Gut wasserführend.	Strukturstabil, mit mind. 60% mineralischem Anteil. Gut wasserführend	Strukturstabil, mineralischer Anteil über 60%, auch erdlose Substrate wie Steinwolle	Erdlose Bauweise (Geovliese)
Bewässerung	Bei genügend Wurzelraum (1m ³ pro Pflanze) und natürlichem Niederschlagseintrag keine Bewässerung notwendig	Bei genügend Wurzelraum (1m ³ pro Pflanze) und natürlichem Niederschlagseintrag keine Bewässerung notwendig	Abhängig von den Pflanzenarten, meist 1-mal täglich	Je nach Kastengrösse ein bis 2-mal täglich	Mehrmals täglich empfehlenswert	Kleine Mengen, jedoch stündlich
Vorteile	Kostengünstig, einfach zu installieren	Mit genügend Abstand beinahe alle Fassadentypen begrünbar, saisonale Verschattung	Rel. Grosses Bodenvolumen, Vorteil für klimatische Überbrückung	Austauschbarkeit einzelner Abschnitte	Module können je nach Bauweise ausgetauscht werden	Leicht, frei formbar, variable Oberflächenmodellierungen
Nachteile	Nur an intakten, fugen- und rissfreien Fassaden umsetzbar Begrenzt in Höhenwachstum	Begrenzt in Höhenwachstum	Schwer, statische Zwischenstufen einplanen	Schnelle Aufheizung der Gefässe möglich – Isolierung mitplanen	Theoretische Austauschbarkeit ist oft eingeschränkt	Pflanzenwurzeln sind besonders stark den Temperaturschwankungen ausgesetzt
Mikroklimatische Wirkung	Wintergrüne Arten haben eine dämmende Wirkung, Verhinderung Aufheizung der Fassade, gute Verdunstungsrate	Solarer Vorhang (Verschattung im Sommer, Lichteinlass im Winter), gute Verdunstungsrate, Verhinderung Aufheizung der Fassade	Durch hohe Diversität an Arten, auch hohe Verdunstungsrate. Verholzende Arten haben höhere Verdunstungsrate als krautige Arten		Mikroklimatische Wirkung ist abhängig von der Pflanzenwahl in Kombination mit dem Substrat und dessen Wasserrückhaltekapazität	Mikroklimatische Wirkung hängt vom Bewässerungsintervall ab, also wie viel Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht.
Biodiverse Wirkung	Wintergrüne Art, wie beispielweise Efeu (<i>Hedera helix</i>) haben hohen biodiversen Wert für die heimische Fauna.	Dichte, blütenreiche Begrünungen bieten einen Nahrungs- und Nistplatz für viele flugmobile Arten, insbesondere Insekten und Vögel.	Bei Verwendung von einheimischen Pflanzenarten mit einem Blühspektrum während dem ganzen Jahr, reiches Nahrungsangebot für flugmobile Insekten. Tröge bieten Nistplätze für Vögel an.		Bei Verwendung von einheimischen Pflanzenarten mit einem Blühspektrum während dem ganzen Jahr, reiches Nahrungsangebot für flugmobile Insekten.	



Pflanzenauswahl und Pflanzenkatalog – Einführung

Eine Fassadenbegrünung entfaltet ihre wertvollen Ökosystemleistungen nur, wenn der Deckungsgrad der Begrünung möglichst hoch ist. Das Vegetationssystem, welches an der Fassade etabliert werden soll, muss demnach langlebig und vital sein. Um dies zu erreichen, muss ein Standort umfassend analysiert und die passende Pflanzenwahl dazu kombiniert werden. Alle Bedingungen an ein Vegetationssystem müssen aufeinander abgestimmt werden. Welche Faktoren dabei beachtet werden müssen, ist in der Abbildung 10 dargestellt. Die in diesem Projekt erstellten Pflanzenkataloge sollen Planenden dazu eine Hilfestellung bieten.

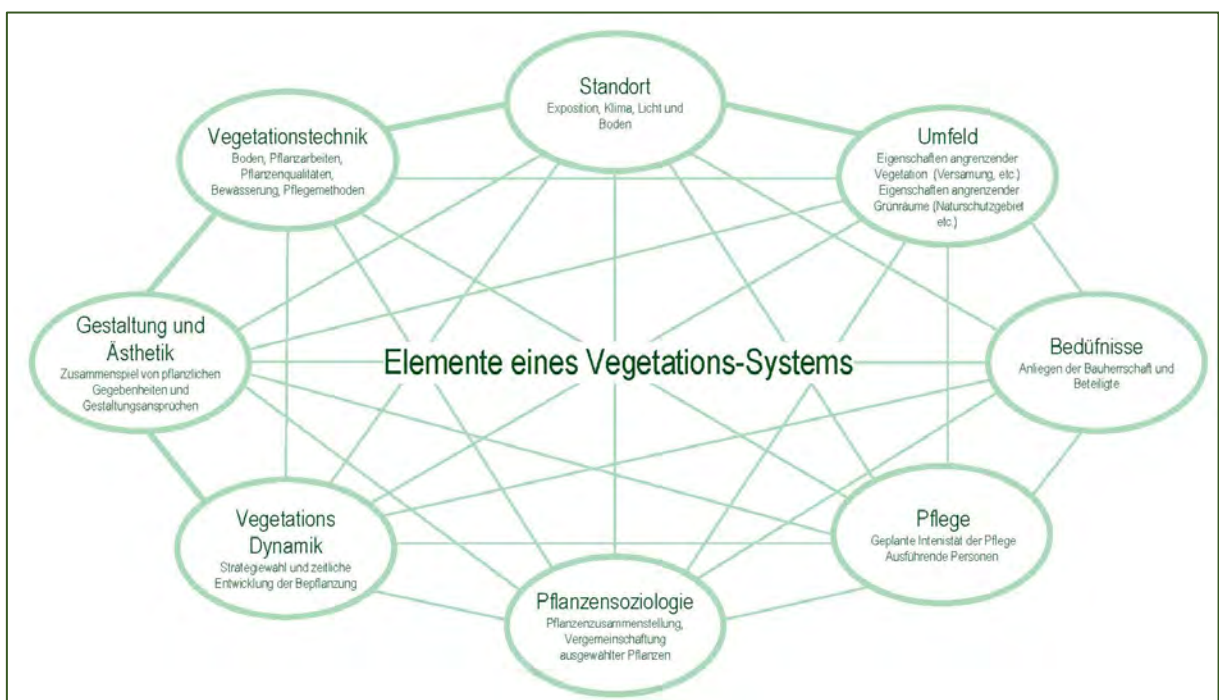


Abbildung 10: Eine Vegetationssystem wird von verschiedenen Bedingungen geprägt, welche alle in engem Zusammenhang stehen (Grafik ZHAW, Forschungsgruppe Pflanzenverwendung)

Der Pflanzenkatalog wurde für Kletterpflanzen der bodengebundenen Begrünung sowie für krautige Arten (Stauden) für wandgebundene Systeme ausgearbeitet.

Als Basis der Untersuchungen wurde auf bestehenden Listen aufgebaut:

Bodengebundene Begrünung – Kletterpflanzen:

- Pflanzenlisten der FLL Richtlinie Fassadenbegrünung (FLL 2018)
- Pflanzenlisten Nicole Pfoser, Buch Vertikale Begrünungen (Pfoser 2018)
- Pflanzenliste der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung der ZHAW (Trachsel 2023)

Wandgebundene Begrünung

- BuGG-Fachinformation geeignete Gehölze für Dachbegrünungen (BuGG 2019)
- BuGG-Pflanzenliste für wandgebundene Fassadenbegrünung (BuGG 2015)
- Pflanzenlisten Nicole Pfoser, Buch Vertikale Begrünungen (Pfoser 2018)



Mit der FLL – Richtlinie zur Fassadenbegrünung 2018 sowie den ausgearbeiteten Verwendungslisten von Pfoser 2018 bestehen bereits gute Planungshilfen zur Begrünung von Fassaden. Die Listen umfassen jedoch nur die gängigen Sortimente und klammern zukunftssträchtige Arten aus. Die im vorliegenden Projekt erarbeiteten Pflanzenkataloge nehmen Bezug auf den Standort sowie die Stadtklima-Tauglichkeit. So wie sich das Klima verändert muss sich auch das Sortiment der Kletterpflanzen weiterentwickeln.

Die folgenden Abschnitte gehen näher auf die Ausarbeitung und Methode zur Entwicklung der Pflanzenkataloge ein.

Pflanzenkatalog bodengebundene Begrünung (Kletterpflanzen)

Kletterpflanzen und Stadtklima

Die Klimaszenarien (CH2018) der Schweiz zeigen, dass die Niederschlagsmenge im Sommer deutlich abnehmen wird. Zusätzlich wird das Klima in der Stadt für die Kletterpflanzen durch den Einfluss der Abgase und Aerosole auf die natürliche Luftzusammensetzung sowie durch die Abstrahlung der Wärme der Gebäude, verschärft (Roloff 2013, S. 169). Diese klimatischen Bedingungen haben einen direkten Einfluss auf die Verwendung der Kletterpflanzen in der Stadt. Sie müssen trotz Hitze- und Dürreperioden vulnerabel und resilient sein. Damit ein funktionsfähiges Vegetationssystem entstehen kann, sind die Pflanzen idealerweise durch ihren natürlichen Standort an diese Stressfaktoren angepasst. Das aktuelle Sortiment der im Handel erhältlichen Kletterpflanzen sowie die meisten in der Schweiz indigenen Arten genügen diesen Anforderungen nicht mehr.

Für Kletterpflanzen stehen Untersuchungen zur Eignung im Stadtklima noch aus. Im vorliegenden Projekt wurde eine Auswahl möglicher klimaresistenter Arten getroffen. Dabei wurden in der Schweiz einheimische Arten sowie im Handel erhältliche und weniger bekannte Arten untersucht.

Kletterpflanzen und die Lebensbereiche der Gehölze

Die Gehölze, so auch die Kletterpflanzen, werden auf Grund ihres natürlichen Vorkommens in sogenannte gärtnerische Lebensbereiche der Gehölze anhand von Kennziffern eingeteilt (Kiermeier 1995) (Abbildung 11). Dieses Kennziffern System vereinfacht die standortgerechte Verwendung der Arten. Bei der Analyse und Bewertung der Kletterpflanzen haben sich besonders Arten aus dem Lebensbereich der Steppengehölze sowie aus den Auen- und Uferwälder als für das Stadtklima geeignet erwiesen. Auf die Analyse der verschiedenen Lebensräume wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Die Steppengehölze sind durch ihre Anpassung an trocken-warme Lagen (xerotherme Lagen) gut an das Stadtklima angepasst. Sie sind langsam wachsend, trockenheitsverträglich und langlebig. Die Auengehölze können als Pionierarten schnellwachsende und als gut transpirierende Begrünung eingesetzt werden. Zudem können sie kurze trockene Phasen ebenso überstehen wie Starkregenereignisse (Roloff 2018, S. 37-38).

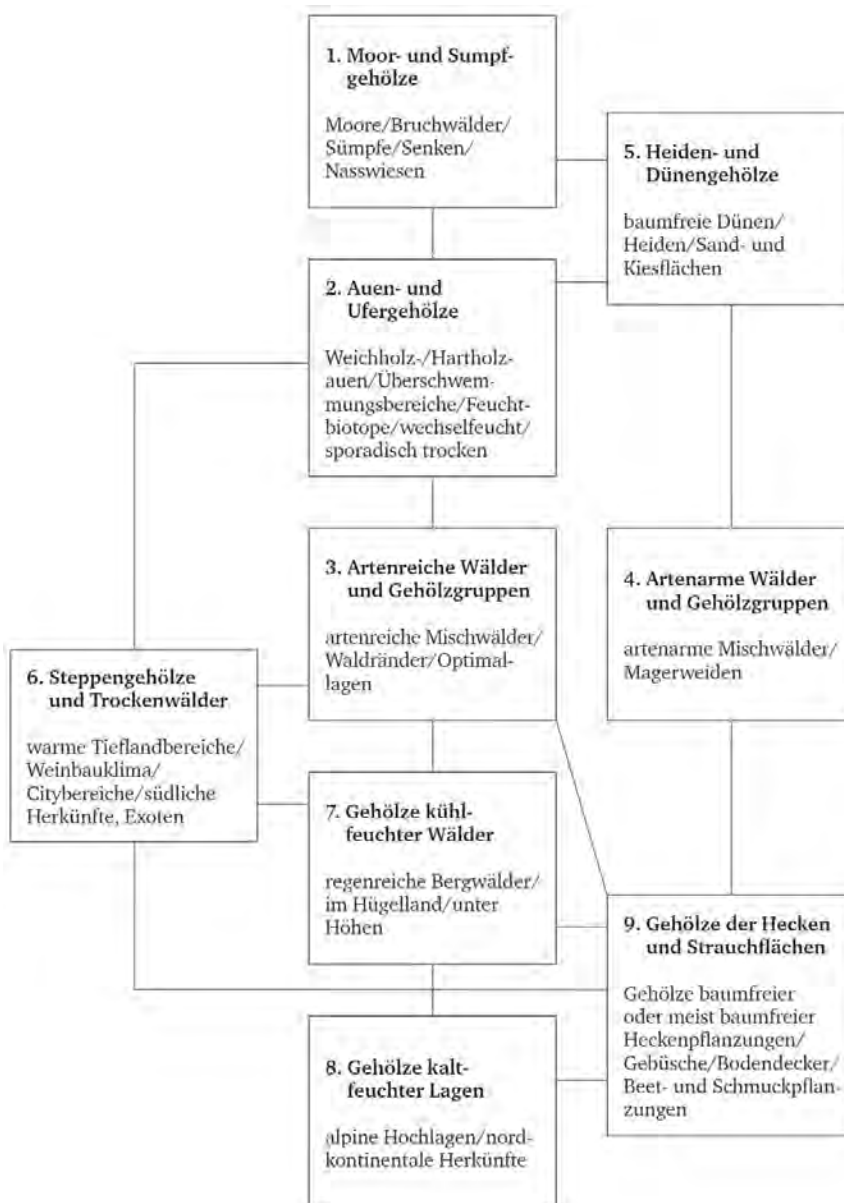


Abbildung 11: Die Lebensbereiche der Gehölze und ihre Zusammenhänge (nach Kiermeier 1996 in Roloff 2018)

Kletterpflanzen und ihre Kletterstrategien

Um Kletterpflanzen gezielt zu verwenden, müssen deren arttypische Eigenschaften zur Klettertechnik beachtet werden. Dabei lassen sich Kletterpflanzen in verschiedene Klettertypen einteilen (Abbildung 12). Jeder Klettertyp ist an eine bestimmte Kletterhilfe gebunden. Bei der Kombination von Arten, muss ein Klettergerüst, welches von allen Typen bewachsen werden kann, eingeplant werden.

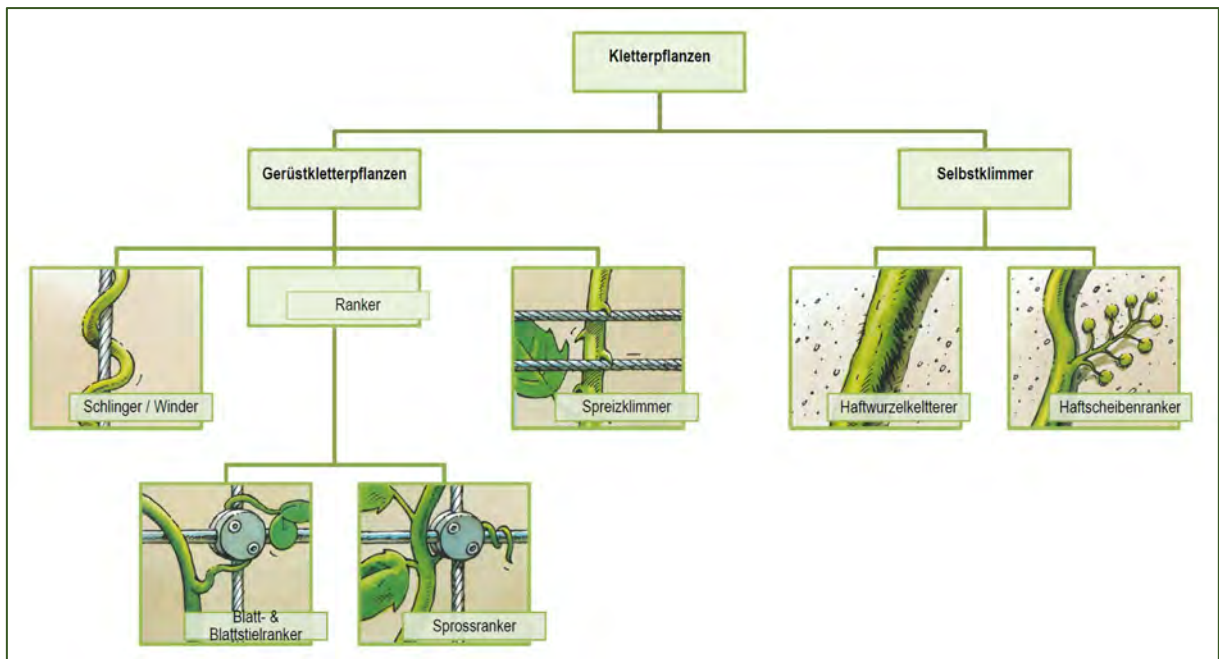


Abbildung 12: Kletterpflanzen können nach ihrem Kletterverhalten eingeteilt werden (Eigene Grafik, Skizzen Jacob AG)

Die folgenden Beschreibungen der Klettertypen stammen aus Unterrichtunterlagen der ZHAW (2019), Forschungsgruppe Pflanzenverwendung:

«Wurzelkletterer können an ihrem Spross entlang Haftwurzeln ausbilden mit denen sie sich an Bäumen, Felsen oder Mauern anheften und daran emporklettern. Sie stammen hauptsächlich von kriechenden Arten ab. Die Voraussetzung für die Bildung von Haftwurzeln ist ein gewisser Lichtmangel. Der negative Fototropismus dieser Pflanzenteile steuert das Wachstum zur Unterlage hin. Die Verankerung erfolgt durch Wurzelhaare. Bei Kontakt mit Humus können sich die Haftwurzeln zu Nährwurzeln umbilden.

Die Haftscheibenranker sind eine botanische Untergruppe der Sprossranker. Sie bilden an den Rankenden Scheibchen aus, die in Berührung mit dem Untergrund eine Art Kleber ausscheiden und so haften bleiben können.

Schlinger / Winder Schlingpflanzen bilden die grösste Gruppe innerhalb der Lianen. Sie wachsen sehr schnell und bilden langgestreckte Internodien aus, während die Blätter zunächst unterentwickelt bleiben. Durch ein ungleichseitiges Längenwachstum führt die Sprossspitze kreisende Bewegungen aus, um eine geeignete, nicht zu dicke Stütze zu erreichen, an der sie sich dann in Schraubenlinien emporwinden kann. Es wird zwischen links- und rechtswindenden Arten unterschieden. Nur wenige können in beide Richtungen schlingen, sie werden als indifferent bezeichnet.

Blattstielranker können, wie die Schlingpflanzen kreisende Suchbewegungen ausführen und reagieren auf die Berührung eines rauen Gegenstandes mit einer Krümmung. Die Ranken verholzen nach einiger Zeit, ohne die Haltefunktion zu verlieren (FLL 2018)

Sprossranker sind die umgeformten Enden von (Seiten)sprossen, die entweder aus einer Blattachsel entspringen oder gegenüber einem Blatt stehen. An den Ranken sind die Blätter zu unscheinbaren Schuppenblättern reduziert.



Die Spreizklimmer sind von allen Kletterpflanzen am wenigsten spezialisiert, sie lehnen sich lediglich an Stützen an. Ihre jungen Sprosse sind relativ steif und haben meist Stacheln (z.B. bei Kletterrosen und Brombeeren), Dornen (z.B. Bocksdom) oder hakenförmige Haare (z.B. Kletten-Labkraut) entwickelt mit denen sie sich an Nachbarpflanzen, im Geäst oder an sonstigen Unterlagen festspreizen und damit ein Zurückrutschen verhindern. Hat ein Spross einen Halt gefunden, kann er sich dort abstützen und noch weiter aufwärtsstreben. Je steifer die Sprossachse, umso längere Strecken können damit ohne Unterstützung überbrückt werden.»

Die folgende Übersicht gibt eine Hilfestellung, um die passende Kletterhilfe zum Klettertyp zu finden.

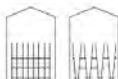
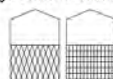
Kletterstrategie	Selbstklimmer		Gerüstkletterpflanzen		
	Wurzelkletterer	Haftscheibenranker	Schlinger / Winder	Ranker Blattstielranker Sprossranker	Spreizklimmer
Kletterhilfe: Konstruktive Anforderungen	leicht poröse Oberflächen (kein rissiges Mauerwerk, vorgehängte Fassaden oder kunststoffhaltige Wandansätze oder Putze)	poröse oder glatte Oberflächen	• vorzugsweise senkrechte Ausrichtung • Abstand der Senkrechten 30– 80 cm • Durchmesser 0,4 – 5 cm • Abrutschsicherungen im Abstand 0,5–2 m je nach Schlingverhalten, Pflanzenstärke sowie Oberflächenstruktur der Kletterhilfe • vorteilhaft sind Rundprofile	• vorzugsweise gitterförmige Konstruktionen • Gitterweiten 10 – 20 cm für eigenständiges Verankern der Pflanzen • Durchmesser 0,4 – 3 cm, artabhängig, so dass sie von der jeweiligen Art umrankt werden können • alle Profilquerschnitte	• vorzugsweise horizontale Ausrichtung • Abstand untereinander ca. 40 cm bei gitterförmigen Konstruktionen • Gitterweite i. d. R. zwischen 30 und 50 cm
Geeignete Systeme	Kein System notwendig 	Seil- und Rohrkonstruktionen, Stäbe 	Scherenformgitter, Stahlmatten, gitterförmige Seilkonstruktionen, Stäbe 	Latten, Stäbe, Seilkonstruktionen 	
Beispiele Arten	<i>Hedera helix</i> & <i>Colchica</i> <i>Hydrangea petiolaris</i> <i>Schizophragma</i> <i>hydrangeoides</i> & <i>integrifolium</i> <i>Campsis radicans</i> <i>Campsis x</i> <i>tagliabuana</i> <i>Euonymus fortunei</i>	<i>Parthenocissus</i> <i>tricuspidata</i>	<i>Wisteria</i> Arten <i>Celastrus orbiculatus</i> <i>Periploca graeca</i> <i>Humulus lupulus</i> <i>Aristolochia</i> Arten <i>Campsis</i> Arten <i>Lonicera</i> Arten <i>Schisandra chinensis</i> <i>Menispermum</i> <i>Fallopia baldschuanica</i> <i>Actinidia</i> Arten <i>Akebia trifoliata</i>	<i>Clematis</i> Arten <i>Bryonia</i> Arten Viele Einjährige: <i>Topaeolum majus</i> Kürbis Gurken <i>Lathyrus</i> Arten	<i>Rosa</i> Arten <i>Jasminum nudiflorum</i> <i>Rubus</i> Arten

Abbildung 13: Übersicht der Klettertypen/Strategien und den dazu passenden Kletterhilfen (Pfoser 2013, geändert und erweitert durch E. Trachsel)

Pflanzenauswahl und Pflanzenkatalog – Methode Erarbeitung Pflanzenkatalog bodengebundene Begrünung (Kletterpflanzen)

Für die Auswahl möglicher zukunftsfähigen Arten werden die Kletterpflanzen nach ihrem Lebensbereich sowie den Klima- und Bodenfaktoren eingeteilt und bewertet. Die Bodenfaktoren geben dabei Aufschluss, wie gut eine Art an Trockenheit angepasst ist. Eine wichtige Rolle dabei spielt auch die Winterhärte, wobei diese auf die aktuellen und zukünftigen Verhältnisse mit erwarteten 2°Grad Erwärmung bewertet werden. Zudem werden Aussagen zur Bewässerungsintensität gemacht, welche im direkten Zusammenhang mit dem Wasserbedarf der Pflanze steht. Eine entscheidende Rolle spielt auch die Toleranz gegenüber Abstrahlung und Hitze.

Die Bewertung der Arten wird für alle Steppengehölze sowie weitere Arten mit Potenzial zur Verwendung im urbanen Raum durchgeführt. Neben den einheimischen Arten werden auch solche aus Asien und Nordamerika ohne invasives Potenzial beachtet.



Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen der Pflanzenauswahl für den Katalog genauer erläutert. Einen grossen Teil der Wahl greift auf die Erfahrungswerte der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung zurück.

1. Vorbilder aus der Natur: Natürliche Pflanzengesellschaften aus verschiedenen Florengebieten
2. Analyse und Bewertung der Lebensbereich-Kennzahlen nach Kiermeier: Nährstoffbedarf, Exposition, Bodenbeschaffenheit
3. Analyse Stadtklima-Verträglichkeit: Hitze, Wind, Salzeinträge etc. (Erfahrungs- und Literatur-Werte)
4. Ästhetische Ansprüche: Blütezeit, Wintergrün, Texturen (Blattschmuck)
5. Einteilung nach Klimawirksamkeit: Geeigneter Einsatz zur Verdunstung, solare Beschattung, Isolation, hoher biodiverser Wert, etc.
6. Vergleich mit Angaben in der Literatur (Standart-Pflanzenliste FLL und Pfoser 2016), Erfahrungswerte

Auswertung der Lebensbereiche der Gehölze in Bezug auf stadtklimafeste Kletterpflanzen

Die Analyse geeigneter Kletterpflanzen basiert unter anderem auf den Lebensbereichen der Gehölze nach Kiermeier (1994). In einem ersten Schritt wurden die Lebensbereiche, welche hier in einer Kurzfassung wiedergegeben werden (Abbildung 14), nach ihrer Eignung untersucht. Neben der Hitze- und Wärmeverträglichkeit wurden auch basische Bodenbedingungen, wie sie in den Städten normalerweise vorkommen, beachtet.

Drei Vegetationstypen wurden definiert:

Rot = trocken, sonnig, heiss

Grün = trocken bis frisch, sonnig bis halbschattig, Arten haben eine gute Wärmeverträglichkeit

Blau = frisch, halbschattig bis schattig, Arten weniger wärmeverträglich



Lebensbereich (X...)	Bodenfaktoren (...X _r)	Klimafaktoren (...X _k)	Wuchsgruppe (...X)
1 Moor- und Sumpfgehölze	1 moorig und nass-torfig 2 Bruchwälder, Feucht- und Nasswiesen, Sumpfstandorte	1 sonnig, kühl 2 halbschattig, kühl 3 sonnig bis lichtschantig 4 halbschattig, wärmeverträglich	
2 Auen- und Ufergehölze	1 frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-kiesig 2 frisch bis feucht, schwach sauer bis alkalisch, Sand, Kies, Schotter 3 mäßig trocken, frisch bis feucht, schwach sauer oder neutral, sandig 4 mäßig trocken, frisch bis feucht, neutral bis alkalisch, sehr nährstoffreich, sandig-kiesig 5 mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis stark alkalisch, nährstoffreich, sandig, kiesig, lehmig	1 sonnig, hitzeverträglich, mäßig frosthart 2 sonnig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig, wärmeliebend, frosthart 4 sonnig bis lichtschantig, kühl bis kalt 5 lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 6 halbschattig, kühl bis kalt, frosthart	
3 Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen	1 robuste, stadtklimaverträgliche Gehölze, mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis alkalisch, nährstoffreich, kein Sand oder Ton 2 anspruchsvolle Gehölze, frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-humos oder lehmig-humos 3 anspruchsvolle, aber anpassungsfähige Gehölze, frisch bis feucht, schwach sauer bis alkalisch, gute bis beste, meist lehmige Böden	1 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frostempfindlich 2 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, kühl-ausgeglichen, frosthart 4 sonnig bis halbschattig, wärmeverträglich, frosthart 5 sonnig bis halbschattig, wärmeverträglich, meist frosthart 6 sonnig bis halbschattig, kühl-ausgeglichen, frosthart 7 licht- bis halbschattig, mäßig frosthart	1 Großbaum (>20 m)
4 Artenarme Wälder und Gehölzgruppen	1 mäßig trocken bis frisch, sauer bis neutral, sandig 2 trocken bis frisch, sauer bis schwach alkalisch, sandig-humos 3 mäßig trocken bis feucht, schwach sauer bis schwach alkalisch, kiesig- oder sandig-lehmig	1 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frostempfindlich 2 sonnig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig, frosthart 4 licht- bis halbschattig, frosthart 5 halbschattig, meist frosthart	2 Mittelgroßer Baum (>15 m)
5 Heiden- und Dünengehölze	1 trocken bis frisch, nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig bis feinkiesig 2 mäßig trocken bis frisch, mäßig nährstoffhaltig, sauer bis schwach sauer, sandig bis humos 3 trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis schwach alkalisch, sandig-kiesig, sandig-humos	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig, wärmeliebend, frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, kühl, frosthart 4 licht- bis halbschattig, kühl-gemäßigt, mäßig frosthart	3 Kleinbaum (>7 m)
6 Steppen- gehölze und Trocken- wälder	1 trocken bis frisch, nässeempfindlich, nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig, sandig-kiesig oder -lehmig 2 mäßig trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig bis sandig-humos 3 mäßig trocken bis frisch, nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch, sandig-lehmig bis lehmig 4 frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis schwach alkalisch, sandig-lehmig bis lehmig	1 sonnig-heiß, frostempfindlich 2 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frosthart 4 licht- bis halbschattig, wärmeliebend, mäßig frosthart	4 Großstrauch (>3 m)
7 Gehölze kühl- feuchter Wälder	1 mäßig trocken bis frisch, nicht zu nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch 2 durchlässig, frisch bis feucht, mäßig nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig- oder kiesig-humos, empfindlich gegen höheren Kalkgehalt 3 schwach sauer bis alkalisch, nährstoffreich, humos- oder sandig-lehmig 4 sauer bis schwach alkalisch, nährstoffreich, humos, sandig-lehmig bis lehmig	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, sommerkühl und winterkalt, frosthart 4 lichtschantig, wintermild, frostempfindlich 5 licht- bis halbschattig, wärmeverträglich, meist frosthart 6 lichtschantig, kühl bis kalt, frosthart	5 Normal- strauch (>1,5 m)
8 Bergwälder und Sträucher alpiner Bereiche	1 frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-humos, -kiesig, felsig, flachgründig 2 mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig-kiesig, -lehmig, felsig, flachgründig	1 sonnig sommerheiß, winterkalt, frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, kühl, wintermild, meist frosthart 3 sonnig bis absonnig, sommerkühl, winterkalt, frosthart 4 absonnig bis lichtschantig, mäßig frosthart 5 absonnig, kalt, frosthart	6 Kleinstrauch (>0,5 m)
9 Gehölze der Hecken und Strauch- flächen	1 trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig- oder lehmig-humos 2 frisch bis feucht, nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig- bis lehmig-humos 3 frisch bis feucht, nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch, alle Substrate außer ärmste Böden	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, sommerkühl, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, frosthart 4 sonnig bis halbschattig, frosthart 5 absonnig oder licht- bis halbschattig, wintermild, mäßig frosthart 6 licht- bis halbschattig, frosthart	7 Zwerg- strauch (>0,1 m)
			8 Halbschrauch 9 Klettergehölze

Abbildung 14: Analyse der Lebensbereiche der Gehölze nach Kiermeier. (Eigene Einteilung auf Grundlage von Roloff 2008/18)



Auszug Katalog bodengebundene Begrünung (Kletterpflanzen)

Alle beispielhaft zusammengestellten Pflanzkombinationen für bodengebundene Fassadenbegrünungen gehen von einem natürlichen Bodenanschluss von mind. 1m³ pro Pflanze aus (nach FLL-Richtlinien 2018). Sofern dieser Wurzelraum vorhanden ist und Niederschlagswasser die Pflanzgrube erreicht, kann auf eine Bewässerung verzichtet werden.

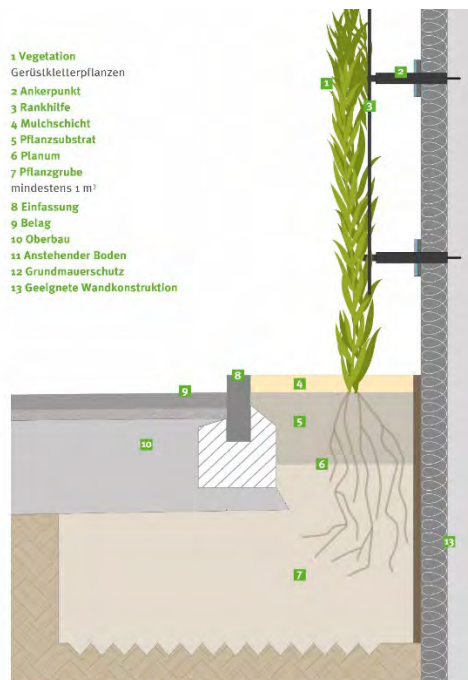


Abbildung 15: Vegetationstechnik, Pflanzgrube bodengebundene Gerüstkletterpflanze. Das Bodenvolumen pro Pflanze sollte 1m³ umfassen (BuGG 2023)

Pflanzenauswahl und Pflanzenkatalog – wandgebundene Fassadenbegrünung

Die FLL-Richtlinie zur Fassadenbegrünung aus dem Jahr 2018 enthält bereits eine ausführliche Auflistung geeigneter Stauden. Diese beinhaltet nur wenige einheimische Arten und legt den Fokus auf wertvolle gärtnerische Stauden sowie Halbsträucher. Zusätzlich wird in dieser Abhandlung die einheimische Flora der Schweiz nach geeigneten Arten für Wandbegrünungen untersucht. Diese Arten können insbesondere zur Erhaltung der Biodiversität einen bedeutenden Beitrag leisten. Kombinationen aus gärtnerischen und einheimischen Arten sind natürlich nicht ausgeschlossen und willkommen.

Die Arten wurden in trockene bis frische Vegetationssystemen eingeteilt. So werden zwei Varianten mit intensiver und sparsamer Bewässerung aufgezeigt.

Jeder Pflanzenstandort an Fassaden ist durch die Abstrahlung der Nachbarsgebäude, Beschattung, Materialien etc. anders. Eine generelle Pflanzenwahl ist daher nicht möglich. Sie muss immer an den Standort angepasst werden.

Bei horizontalen Vegetationsbauweisen, dem sogenannten erweiterten Blumentrog, sind je nach Ausmass der Gefässe auch Gehölze möglich. Hier wird neben den aufgeführten Arten im Pflanzenkatalog (Anhang) auf die Gehölzliste für Dachbegrünungen des Bundesverbandes für GebäudeGrün (BuGG 2019) verwiesen. Diese Liste bietet eine hilfreiche Anleitung bei der Auswahl geeigneter Gehölze für Trogbepflanzungen.



Methode Pflanzenwahl wandgebundene Fassadenbegrünung

Bei der Auswahl der Pflanzenarten wurde nach untenstehender Methode vorgegangen:

1. Analyse der Vorbilder aus der Natur: Natürliche Pflanzengesellschaften – Lebensräume der Schweiz nach Delarce 2015
2. Artenwahl: Vorwiegend einheimische (indigen) und verfügbare Arten in Gärtnereien
3. Physiologische Ansprüche Wachstumsverhalten:
Strategietyp: S- Strategietypen und je nach Nährstoffbedingungen auch CS-Strategien
Wuchsform: Polsterähnlich, Horstig, Ausläufertreibend, begrenzte Höhe (je nach System bei ca. 40cm, Trogsysteme höher und auch verholzend)
4. Ästhetische Ansprüche: Wintergrün, Blütezeit, Texturen (Blattschmuck)
5. Analyse der Zeigerwerte nach Landolt (insbesondere Boden- und Lichtansprüche), wärmeverträglich
6. Vergleich mit Angaben in der Literatur (Standart-Pflanzenliste FLL und Pfoser 2018) und Erfahrungswerte der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung

Vorbilder aus der Natur

Die Lebensräume der Schweiz mit ihren Pflanzengesellschaften bilden die Grundlage zur naturnahen, für die Artenvielfalt wertvolle Pflanzenverwendung. Die Lebensbedingungen ausgewählter Pflanzengesellschaften können, mit denen einer fassadengebundenen Begrünung, gleichgestellt werden. Innerhalb der genannten Lebensräume müssen die Arten nach den oben aufgeführten Kriterien analysiert und selektioniert werden. Schlussendlich wird im urbanen Raum eine neue Lebensgemeinschaft von Pflanzen geschaffen und Arten aus verschiedenen Lebensräumen kombiniert und neu vergesellschaftet.

Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen, Modulare & Flächige Bauweisen (nach Delarce 2015)

Krautige Arten, Standort: Trocken, sonnig, spärliche Bewässerung

Alle Lebensräume befinden sich in der ariden bis trockne Zone, im basischen Bereich. Die fett markierten Lebensräume weisen am meisten geeignete Arten auf.

- 3.4.1.2. Trockene Kalkfelsflur, *Potentillion*
- 3.3.1.5. Trockenwarme Kalkschuttflur, *Stipion calamagrostis*
- 4.1.1. Wärmeliebende Kalkfels-Pionierflur, *Alyso-Sedion*
- 4.1.2. Kalkfels-Pionierflur des Gebirges (Karstfluren), *Drabo-Seslerion*
- 4.2.1.1. Inneralpine Felsensteppe, *Stipo-Poion*
- 4.2.1.2. Kontinentaler Halbtrockenrasen, *Cirsio-Brachypodion*
- 4.2.2. Mitteleuropäischer Trockenrasen, ***Xerobromion***
- 4.2.4. Mitteleuropäischer Halbtrockenrasen, ***Mesobromion***
- 4.3.1. Blaugrashalde, *Seslerion*
- 5.1.1. Trockenwarmer Krautsaum, ***Geranion sanguinei***
- 7.2.1. Trockenwarme Mauerflur, *Centrantho-Parietation*
- 5.4.3. Subalpine Kalkheide (Erikaheide), *Ericion*



Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen Verholzende Arten

Standort: Trocken, sonnig, spärliche Bewässerung (nach Delarce 2015)

2.3.5. Trockenwarmes Gebüsch, *Berberidion*

Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen, Modulare & Flächige Bauweisen (nach Delarce 2015)

Krautige Arten, Standort: Frisch, sonnig bis halbschattig (einzelne Arten auch Schatten), regelmässige Bewässerung

4.5.1. Talfettwiesen (Fromentalwiese), *Arrhenatherion*

4.5.2. Bergfettwiese (Goldhaferwiese), *Polygono-Trisetion*

4.5.3. Talfettweide (Kammgrasweide), *Cynosurion*

5.1.2. Mesophiler Krautsaum, *Trifolion medii*

5.1.5. Nährstoffreicher Krautsaum, *Aegopodion + Alliarion*

5.2.1. Kalkreiche Schlagflur, *Atropion*

7.1.1. Feuchte Trittflur, *Agropyro-Rumicion*

7.1.8. Lägerflur der Tieflagen, *Arction*

3.4.1.3. Schattige Kalkfelsflur, *Cystopteridion*

Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen verholzende Arten,

Standort: Frisch, sonnig bis halbschattig (einzelne Arten auch Schatten), regelmässige Bewässerung (nach Delarce 2015)

5.3.3. Mesophiles Gebüsch, *Pruno-Rubion*

5.3.5. Gebüschreiche Vorwaldgesellschaften, *Sambuco-Salicion*

Pflege von boden- und wandgebundenen Fassadenbegrünungen

Die Pflege der Fassadenbegrünung gewährleistet deren Funktionsfähigkeit. Sie trägt dazu bei, dass die Vitalität erhalten bleibt und der Brandschutz sichergestellt wird. Darüber hinaus unterstützt die Pflege auch weitere Funktionen wie die Verdunstungsleitung oder den solaren Vorhang.

Die erforderlichen Pflegearbeiten und der damit verbundene Aufwand hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. dem angestrebten Begrünungsziel, der gewählten Art, der Grösse und dem Alter der Begrünung. Auch die Erreichbarkeit und der Fassadenaufbau spielen eine signifikante Rolle.

Die Pflege wird in 3 Stufen eingeteilt:

- Fertigstellungspflege umfasst alle Leistungen und Massnahmen unmittelbar nach der Pflanzung oder Aussaat, die eine fachgerechte Pflege der Anlage bis zur Abnahme sicherstellen sollen. Die Leistungen im Zusammenhang mit der Abnahme des Werkes und der Haftung für Mängel sind in den Normen SIA 118 und 318 genau beschrieben.
- Die Entwicklungspflege dauert in der Regel von der Abnahme der Anlage bis zum Ablauf der Garantiezeit nach zwei Jahren. Die Entwicklungspflege schließt unmittelbar an die Fertigstellungspflege an. Zu beachten ist, dass Garantien nur dann bestehen, wenn die Entwicklungspflege vom Unternehmer selbst durchgeführt werden konnte (gemäss SIA 118 / 318).
- Hinsichtlich der langfristigen Bewirtschaftung von Grünflächen schliesst die Erhaltungspflege direkt an die Entwicklungspflege an. Ziel ist primär die Erhaltung des Zustands der Grünflächenanlage, wobei alle erforderlichen Massnahmen darin eingeschlossen sind. Die Erhaltungspflege erstreckt sich über mehrere Jahre, wenn nicht Jahrzehnte.



Um die langfristige Pflege der Fassadenbegrünung sicherzustellen, muss zwingend ein Pflegekonzept sowie ein Pflegevertrag erstellt werden. Das Pflegekonzept muss mindestens die in der Tabelle 2 aufgeführten Arbeiten beinhalten.

Bodengebundene Fassadenbegrünung

Bei der Pflege von Kletterpflanzen wird zwischen Selbstklimmer und Gerüstkletterpflanzen unterschieden. Auf die Pflege von einzelnen Arten wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Tabelle 2: Pflegearbeiten für die bodengebundene Fassadenbegrünung

Pflegearbeit	Selbstklimmer	Gerüstkletterpflanzen
Kontrolle der Fassadenoberfläche 1-2mal jährlich	Feuchtigkeitsbildung an Maueroberfläche, insbesondere bei Holzfassaden	Feuchtigkeitsbildung an Maueroberfläche, insbesondere bei Holzfassaden und WVDS, den Abstand zwischen Kletterhilfe und Fassade mittels Pflege freihalten
Freischneiden sensibler Bauteile (1- 2mal jährlich): Fenster, Fensterläden, Dächer, Fallrohre, Blitzableiter, Markisen und Luftaustrittsöffnungen	Kontrolle ob lichtfliehende Triebe in die sensiblen Bauteile wachsen, Abstand der sensiblen Bauteile zwischen 0.2 bis 0.5 m Abstand	Insbesondere bei Starkschlingern sensible Bauteile 1–2mal jährlich freischneiden
Fixieren, Aufbinden und Leiten der Pflanzen	Evtl. anfangs ein Leiten der Pflanzen notwendig	Je nach Kletterform die Pflanzen in den ersten Jahren an der Kletterhilfe leiten, bei Starkschlingern sie seilparallele Aufleitung beachten
Technische Einrichtungen und Kletterhilfen kontrollieren (1 -2mal Jährlich)		Befestigungspunkt und Spannschlösser
Wasser- und Nährstoffversorgung (ohne künstliche Bewässerung)	Ohne künstliche Bewässerung evtl. in starken Hitzeperioden eine Wasserzugabe notwendig	Ohne künstliche Bewässerung evtl. in starken Hitzeperioden eine Wasserzugabe notwendig
Pflanzenschutzmassnahmen		
Schnittmassnahmen 1-2mal jährlich)	Kleine Polsterdicke für vitales Erscheinungsbild, gute Haftwurzelbildung und reduziertes Brandrisiko	Schnittmassnahmen variieren je nach Arten und Typ der Begrünung. Siehe untenstehende Ausführungen

Schnittmassnahmen bei Kletterpflanzen

Kletterpflanzen sollten möglichst sparsam, aber ausreichend geschnitten werden. Das Ziel ist ein klares Grundgerüst und die Vermeidung von Schäden an Fassadenteilen und technischen Einrichtungen durch unkontrolliertes, starkes Wachstum. Dabei muss besonders auf starkwüchsige und stark verholzende Arten wie beispielsweise die *Wisteria* (Blauregen) geachtet werden. Wenn eine Pflanze einen starken Überhang bildet, ist es ratsam, diesen zurückzuschneiden, um die Bildung von Totholz und die



Angriffsfläche für den Wind möglichst gering zu halten. Im Hinblick auf den Brandschutz ist es ebenfalls wichtig, abgestorbene Pflanzenteile regelmässig zu entfernen und gegebenenfalls einen Erhaltungs- oder Verjüngungsschnitt der Kletterpflanze durchzuführen. Bei einer starken Mattenbildung wie bei Efeu müssen abgestorbene Pflanzenteile im Inneren entfernt werden. Bei Stauden (Hopfen, Platterbesen), welche im Winter absterben und einziehen, müssen abgestorbene Pflanzenteile entfernt werden. Bei der Durchführung von Schnittmassnahmen muss zwischen Frühjahrs- und Sommerblühern unterschieden werden. Frühjahrsblüher bilden ihre Knospen bereits im Vorjahr, wodurch ein Winterschnitt die Blüten entfernen würde. Daher sollten diese bei Bedarf direkt nach der Blüte geschnitten werden. Sommerblühende Pflanzen hingegen bilden erst im Frühjahr ihre Knospen, weshalb hier ein Winterschnitt sinnvoll ist. In der nachfolgenden Abbildung 16 sind die verschiedenen Schnittmassnahmen zusammengefasst.

Gründe für den Pflanzenschnitt

Gewünschter Effekt	Schnittmassnahme	Zeitpunkt
Fördern der Blühfreudigkeit oder der Nachblüte	Sommerschnitt	früh blühende Pflanzen nach der 1. Blüte, spät blühende vor dem Austrieb im Frühjahr (März)
Spalier- oder Formerziehung	Formschnitt, Erziehungsschnitt	Ende Februar bis März, z. B. bei Wein, Spalierobst
Förderung der Fruchtbildung	Erziehungsschnitt	im Sommer bzw. nach der Ernte
Entfernen abgestorbener oder kranker Triebe	Auslichtungsschnitt, Krankheitsvorbeugung	jederzeit
Verjüngung alter Pflanzen	Verjüngungsschnitt	Januar bis Februar an möglichst frostfreien Tagen
Förderung einer reichen Verzweigung und des dichteren Wuchses	Auslichtungsschnitt	Dezember bis März, möglichst vor Nestbau und Brutzeit
Freihalten von Fenstern und anderen Fassadenelementen	Formschnitt	jederzeit, aber Brutzeit beachten
Begrenzung der begrünten Fläche bzw. des Überhangs	Formschnitt	jederzeit, mit Rücksicht auf brütende Vögel und andere Tiere
Renovierungen ermöglichen	Radikalschnitt	jederzeit, mit Rücksicht auf brütende Vögel und andere Tiere
Vertrocknete Stauden (Hopfen, Bohnen) abschneiden	Radikalschnitt mitsamt den Seilen	im Herbst, bis über den Boden

Abbildung 16: Übersicht der Schnittmassnahmen bei winterharten Kletterpflanzen (Kleinod, 2017, S. 159)



Wandgebundene Fassadenbegrünung

Die Pflege der wandgebundenen Fassadenbegrünung wird aufgrund der unterschiedlichen Systeme in vertikale und horizontale Bauweise unterteilt. In der folgenden Tabelle 3 sind die wichtigsten Pflegearbeiten zusammengefasst. Wichtig ist, dass bei allen Systemlösungen die Zugänglichkeit geklärt wird.

Tabelle 3: Pflegearbeiten bei der wandgebundenen Fassadenbegrünung

Pflegearbeit	Vertikale Bauweise	Horizontale Bauweise
Kontrolle der Fassadenoberfläche 1-2mal jährlich	Kontrollieren Durchfeuchtung der Primärkonstruktion	Kontrollieren Durchfeuchtung der Primärkonstruktion
Freischneiden sensibler Bauteile (1- 2mal jährlich): Fenster, Fensterläden, Dächer, Fallrohre, Blitzableiter, Markisen und Luftaustrittsöffnungen	Bei Trogbepflanzungen, welche auch Kletterpflanzen mit beinhalten	Nicht notwendig
Kontrolle des Systems auf Materialermüdung, Korrosion	Kontrolle der Pflanzen tragenden Medien, Kontrolle insbesondere auf Überlastung der Sekundärkonstruktion	Kontrolle der Pflanzen tragenden Medien, Kontrolle insbesondere auf Überlastung der Sekundärkonstruktion
Wasser- und Nährstoffversorgung	Je nach Grösse des Substratvolumens wöchentliche oder monatliche Kontrolle der Bewässerungsanlage	Tägliche bis wöchentliche Kontrolle der Bewässerungsanlage, Winterschutz
Selektives Jäten	1 bis 2mal jährlich (Systemabhängig)	3 bis 4mal jährlich in der Anwachsphase, danach 1 bis 2mal jährlich
Ersatz- und Nachpflanzungen	Bei Bedarf, i.d.R. einmal jährlich in der Anwachsphase	Bei Bedarf, i.d.R. einmal jährlich in der Anwachsphase
Pflanzenschutzmassnahmen	Bei Befall Bekämpfung mit biologischen Schädlingsmitteln	Bei Befall (v.a. Dickmaulrüssler) Bekämpfung mit biologischen Schädlingsmitteln



2.2.2 Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen

Während die Beschattung der Gebäudehüllen eine tragende Rolle für die Regulierung des Gebäudeklimas einnimmt, wird das Potenzial einer begrünten Fassade zur Kühlung des Aussenraumklimas massgeblich durch ihre Transpirationskapazität (Verdunstungspotential) sowie ihrer Strahlungsbilanz beeinflusst (Besir & Cuce, 2018; Hoelscher et al., 2016; Koyama et al., 2015). Mittels Saftflussmessungen an Kletterpflanzen und dem Einsatz von Lysimeter an Trogssystemen werden die evapotranspirativen Kühlleistungen ermittelt.

In der allgemeinen Übersicht zu den klimatischen Wirkungen von Fassadenbegrünungen werden zudem die Werte verschiedener Forschungstätigkeiten zusammengefasst und aufgezeigt. Die gemessenen Wirkungen in der Stadtgärtnerei Zürich werden somit ergänzt und in ihrer Wirkung bestärkt.

Klimatische Wirkungen von Fassadenbegrünungen – eine Übersicht

Bereits in mehreren Forschungen wurden die positiven klimatischen Wirkungen von Fassadenbegrünungen aufgezeigt (Besir & Cuce, 2018; Pfoser, 2018, Davis 2014, Ottele 2011). Davis (2014) nennt vier Gründe, auf welche diese positive Wirkung zurückzuführen ist.

- 1) Von der Vegetation erzeugter Schatten.
- 2) Schutz vor Sonneneinstrahlung durch die Vegetation und das Substrat.
- 3) Verdunstungskälte durch Evapotranspiration.
- 4) Die Verringerung des Windeinflusses auf das Gebäude durch die schützende Barriere des vertikalen Gartens

Die Fachplanung Hitzeminderung der Stadt Zürich (2020) zeigt auf das Fassadenbegrünungen an Süd- und Westfassaden im Strassenraum sowie im Innenhof besonders wirksam sind. Insbesondere in geschützten Innenhöfen kann die Begrünung von Fassaden einen nennenswerten Beitrag zur Absenkung der Wärmebelastung beitragen

Folgend werden die Klimawirksamen Werte von Fassadenbegrünungen aus aktuellen Forschungen zusammengetragen und nach vier Punkten gegliedert

- Kühlung durch Verschattung
- Kühlung durch Verdunstung
- Senkung der Oberflächentemperatur
- Senkung von Luftschadstoffen (CO₂ Absorption)



Die Werte sind auf Grund der verschiedenen Forschungsmethoden nicht vergleichbar, zeigen aber das Wirkungs-Spektrum der boden- und wandgebundenen Begrünungen auf.

Kühlung durch Verschattung

Tabelle 4: Kühlung durch Verschattung

	Wert	Quelle
Verschattung durch Gerüstkletterpflanzen (bei voll ausgeprägter Belaubung)	85-95%	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010
PET Messungen Stadtgärtnerei Zürich (Verschattung auf durch Kletterpflanzen im Pflanztrog)	Im Maximum 10°C (Temperatur hinter der Begrünung auf Balkon)	Hertig & Trachsel, 2021
PET Messungen Stadt Zürich	-6.6 °C im Maximum am Tag (14 Uhr, 1m Abstand zur Fassade)	Fachplanung Hitzeminderung 2020
Temperatursenkung durch Verschattung	2-10K	Pfoser 2016
Beispiel: Flower Tower Paris	5°C (Unterschied Umgebungstemperatur und Temp. Hinter der Begrünung)	Pfoser 2016

Kühlung durch Verdunstung (Evapotranspiration)

Tabelle 5: Kühlung durch Verdunstung

	Wert	Quelle
Kühlung der Umgebung durch Evapotranspiration	Begrünte Wand 1.3°C kühler in 60cm Abstand als Referenzwand	Wong 2010
Verdunstung bodengebundene Kletterpflanze:	10 bis 15 l/m ² /Tag Verdunstung (Fassade 20 m hoch); Verdunstungskühlung von 280 kWh pro Fassade und Tag	BuGG 2023b, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010
Saftflussmessungen an Wisteria im MFO Park Zürich	bis 16 l/m ² /Tag	Hertig & Trachsel 2021
Erhöhung der Luftfeuchtigkeit	20-40% höhere Luftfeuchte im Sommer	Manso et.al. 2021

Senkung der Oberflächentemperatur

Tabelle 6: Senkung der Oberflächentemperatur

	Wert	Quelle
Reduktion der Oberflächentemperatur einer Fassade	zwischen 8 und 19 °C	Pfoser 2016
Beispiel Selbstklimmer, an heller Fassade	- 8°C	Pfoser 2018
Beispiel Selbstklimmer, an dunkler Fassade	- 19°C	Pfoser 2018
Wandgebundene Begrünung Stadtgärtnerei Zürich	Im Maximum 6°C	Hertig & Trachsel, 2021



CO₂ Absorption

Tabelle 7: CO₂ Absorption

	Wert	Quelle
CO ₂ Entzug bodengebundene Begrünung (<i>Hedera helix</i> Wörner), 1'000m ² , Tiefe 20cm	2.3kg CO ₂ /m ² a	Schröder 2009, sempergreen 2022
Wandgebundene Fassadenbegrünung, Studie aus Siena, krautige Arten	0,44–3,18 kg CO ₂ eq/m ² pro Jahr	Marchi & et.al., 2015

Saftflussmessungen Stadtgärtnerei Zürich und MFO-Park

Erste Saftflussmessungen wurden im Sommer 2020 in der Stadtgärtnerei Zürich sowie im MFO-Park durchgeführt. Für zwei Wochen wurden die Saftflussraten drei verschiedener Pflanzenarten gemessen. Dazu wurden an den Stammfuss der zu untersuchenden Pflanzen Saftflusssensoren (SFM1, ICT-International) angebracht, welche mittels der Heat-Ratio-Methode den Xylemfluss der Gehölze in einem 10 Minutentakt aufzeichneten. Bei Pflanzen mit verzweigtem Stammfuss wurden zwei Sensoren angebracht, wobei die Saftflusswerte beider Stämme für die spätere Analyse addiert wurden. Für die Berechnung des tatsächlichen Saftflusses sind weitere Angaben zur Anatomie des Stammes, insbesondere zur Borkendicke notwendig. Zur Bestimmung der Borkentiefe wurde ein flachköpfiger Schraubenzieher sanft in die jeweiligen Stämme geschlagen, bis sich der Klang beim Einschlagen änderte. Die Einschlagstiefe entspricht dabei der Borkentiefe.

In der Stadtgärtnerei sind die drei Arten (*Actinidia arguta* 'Issai', *Vitis* 'Seyval Blanc', *Vitis labrusca* 'Magliasina' gemäss einem Pairwise-Wilcoxon-Test (Man Whitney U Test) untersucht worden und beim MFO-Park eine *Wisteria* sowie zwei Rosen.

Evapotranspiration von Fassadenbegrünungen in Regalbauweise oder Trögen – Lysimeter Messungen

Um die evapotranspirative Kühlleistung von modularen Wandsystemen (Regalbauweise, Tröge) näher bestimmen zu können, wurden im Sommer 2021 stehende Lysimeter am Campus Grüental der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) installiert (Abbildung 17). Dabei werden in diesem Versuch der Wasserhaushalt sowie die physikalischen Eigenschaften von zwei bepflanzten Substrattypen verglichen.

Die vier stehenden Lysimeter (Ready-to-Go Lysimeter, UGT) besitzen hochpräzise Wägezellen, Kippwassersensoren und Bodensensoren, welche in Kombination dazu verwendet werden, den Wasserhaushalt des Boden-Pflanzen-Systems zu bemessen. Um den Wurzelraum in begrünten Wandmodulen möglichst nah zu kommen, wurden lediglich die oberen 30cm der Lysimeter (Ø:800mm, Tiefe: 600mm) mit den jeweiligen Substraten gefüllt und daraufhin einheitlich bepflanzt (einheitliche Artenzusammensetzung, Anordnung und Anzahl der Pflanzen). Die unteren 30 cm wurden mit Splitt befüllt und mit einer gelochten Teichfolie bedeckt (Abbildung 17). Des Weiteren werden am Standort relevante Umweltfaktoren mittels einer stationären Klimamessstationen erfasst. Zwei Lysimeter erhielten jeweils dasselbe Treatment (Substrattyp). Da der Versuch die Bedingungen begrünter Wandmodule nachstellen soll, wurden an allen Lysimeter eine Sprühbewässerung angebracht, welche zweimal täglich die Systeme mit jeweils 3 Liter Wasser versorgen. Ab November 2022 wurde die Bewässerung eingestellt, um reale Werte durch die alleinige Niederschlagsbewässerung zu erhalten.

Die folgenden Parameter werden mit der Kombination von Lysimeter und Klimamessstation erhoben:

- Bodentemperatur bei 20 cm Tiefe (°C)
- Bodenfeuchtigkeit resp. Bodensättigung (%) bei 20 cm Tiefe



- Gewichtsänderung des Bodenpflanzensystems (kg h^{-1})
- Abfluss des Bodenwassersystems pro Stunde (ml h^{-1})
- Niederschlag pro Stunde (mm h^{-1})
- Mittlere stündliche Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- relative Luftfeuchtigkeit (%)
- Mittlere stündliche Globalstrahlung (Wh)

Die Lysimeter wurden im Sommer 2021 in Betrieb genommen wobei die Messungen bis in den Herbst 2023 liefen. Alle Tröge zeigen ein gut etabliertes Pflanzenwachstum.

- *Nepeta faassenii* 'Snowflake'
- *Campanula poscharskyana* 'Stella'
- *Calamintha nepeta ssp nepeta*
- *Ceratostigma plumbaginoides*
- *Geranium sanguineum*
- *Gypsophila repens*

Substrate:

- Ricoter Kübelpflanzensubstrat
- ZHAW Mischung: 40% Landerde, 10% Kompost, 10% Schwarzerde, 30% Blähschiefer und 10% Sand

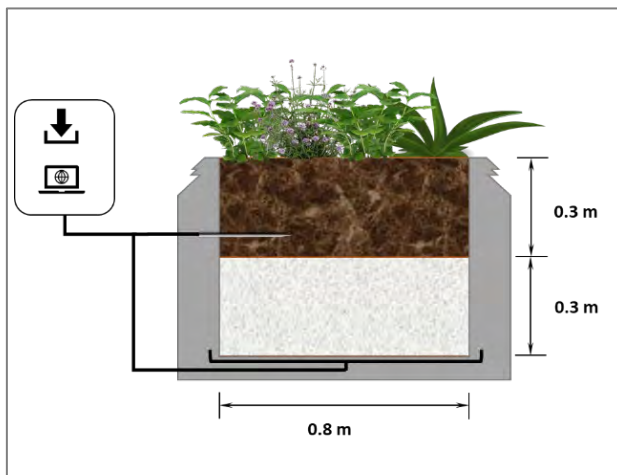


Abbildung 17: links: Schematische Ansicht Lysimeter-Aufbau (Grafik: Tal Hertig), rechts: Drohnenaufnahme Lysimeter-Versuchsaufbau nach Bepflanzung (Foto: Tal Hertig)

Berechnung Evapotranspiration (ETR) mittels Messungen

Um die evapotranspirative Kühlleistung der Systeme zu bestimmen, wird mittels der erhobenen Parameter die reale Evapotranspiration (ETR) wie folgt berechnet:



$$ETR = \frac{(P + B) - \Delta W - A}{\Delta t} \quad (1)$$

Dabei ist A der Abfluss (l), P die Niederschlagssumme (mm resp. L m^{-2}), B die Bewässerungsmenge (l) und ΔW die Gewichtveränderung des Boden-Pflanzensystems (kg resp. L) für ein beliebiges Zeitintervall Δt (h).

Die Lysimeter wurden im Sommer 2021 in Betrieb genommen wobei in diesem Jahr, aufgrund technischer Probleme mit den Geräten, grössere Datenlücken entstanden sind. Deshalb werden in diesem Bericht die Daten für die Messsaison 2022-2023 präsentiert.

Die Rohdaten der Lysimeter wurden in Microsoft Excel bearbeitet und ausgewertet. Für die Aufbereitung der Daten wurden Lücken, welche durch Messfehler entstanden sind, mit Werten ersetzt, welche mittels einer linearen Funktion und der vorangehenden und nachfolgenden Messwerte berechnet wurden.

2.2.3 Messung der Oberflächentemperatur und der gefühlten Kühlleistung (PET)

Die Temperatur in Gebäudenähe wird neben der Verdunstungsleistung auch durch die Verschattungswirkung von Kletterpflanzen entscheidend beeinflusst, wie im vorliegenden Beispiel auf einem Balkon mittels PET-Messungen bei der Stadtgärtnerei Zürich nachgewiesen wurde. Des Weiteren wird mittels Thermographie-Bildern die verminderte Aufheizung einer Fassade durch eine wandgebundene Begrünung aufgezeigt.

PET-Messungen

Im Sommer 2020 fanden am Werkgebäude der Stadtgärtnerei in Zürich Messungen der Physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) statt. Hierfür wurden auf der ersten Etage Klimamessstationen aufgestellt – eine hinter einer Fassadenbegrünung und die andere vor einem unbegrünten Wandsegment (Abbildung 18). Hierfür wurden auf der ersten Etage Klimamessstationen aufgestellt – eine hinter einer Fassadenbegrünung und die andere vor einem unbegrünten Wandsegment (Abbildung 18). Die Auswertung erfolgte anschliessend. Beide Stationen waren mit Messinstrumenten ausgestattet, die in der Lage waren, die Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) zu bestimmen.

PET ist eine Masseinheit zur Kennzeichnung der Wärmebelastung und beruht auf der Transferierung der aktuellen Klimawerte der Aussenumgebung in ein vergleichbares Raumklima, dass durch die gleiche thermophysiologische Belastung charakterisiert ist (Höppe, 1999). Zur Ermittlung des PETs wurden an beiden Stationen die folgenden Parameter zeitgleich im 10 Minutentakt erfasst und in das RayMan© Model zur Berechnung eingegeben (Matzarakis et al., 2007, 2010):

- Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) und relative Luftfeuchtigkeit (%) wurden mittels strahlungsgeschützte Ibutton® (Hygrochon Temp/Hum Logger) auf einer Höhe von 1.1 m erfasst.
- Zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur ($^{\circ}\text{C}$) wurden auf einer Höhe von 1.1m Globe-Thermometer Sonden (Testo 440) aufgestellt. Die erfassten Globe-Temperaturen wurden daraufhin zusammen mit den ermittelten Lufttemperaturen in die Formel nach ISO 7726 (1998) eingegeben, um danach die mittlere Strahlungstemperatur zu erhalten



Abbildung 18: PET-Messtationen bei der Stadtgärtnerei in Zürich. (Bilder: E. Trachsel)

Wärmebilder

Um Aussagen über eine mögliche Temperaturreduktion durch Fassadenbegrünungen zu erhalten, wurden an einem wandgebundenen Begrünungssystem sowie der danebenliegenden Referenzwand Wärmebildaufnahmen gemacht.



Abbildung 19: Versuchsobjekt für die Wärmebildaufnahmen. Zu sehen ist die nördliche Fassade an am Lagergebäude der Stadtgärtnerei Zürich. (Bild: Evelyn Trachsel)

2.2.4 Fazit zu den Untersuchungen Pflanzen für die Gebäudehüllenbegrünung

Im Folgenden soll aufgrund der vielfältigen und komplexen Zusammenhänge und Ergebnisse ein Fazit als Schlussfolgerung zu den gemachten Untersuchungen aufgelistet werden:

- Pflanzenkatalog bodengebundene Begrünung (Kletterpflanzen):

Steppengehölze eignen sich vorallem bei trockenen Umgebungssituationen für die Gebäudebegrünung. Die Steppengehölze sind durch ihre Anpassung an trocken-warme Lagen (xerotherme Lagen) gut an das Stadtklima angepasst. Sie sind langsam wachsend, trockenheitsverträglich und langlebig. Die Auengehölze können als Pionierarten schnellwachsende und als gut transpirierende Begrünung eingesetzt werden. Zudem können sie kurze trockene Phasen ebenso überstehen wie Starkregenereignisse.

Die Kategorisierung erfolgt unter anderem bzgl. der Klettertypen bei den Bodengebundenen Begrünungen. Die folgende Übersicht gibt eine Hilfestellung, um die passende Kletterhilfe zum Klettertyp zu finden.



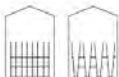
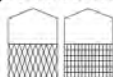
Kletterstrategie	Selbstklimmer		Gerüstkletterpflanzen		
	Wurzelkletterer	Haftscheibenranker	Schlinger / Winder	Ranker Blattstielranker Sprossranker	Spreizklimmer
Kletterhilfe: Konstruktive Anforderungen	leicht poröse Oberflächen (kein rissiges Mauerwerk, vorgehängte Fassaden oder kunststoffhaltige Wandanstriche oder Putze)	poröse oder glatte Oberflächen	- vorzugsweise senkrechte Ausrichtung - Abstand der Senkrechten 30–80 cm - Durchmesser 0,4 – 5 cm - Abrutschsicherungen im Abstand 0,5–2 m je nach Schlingverhalten, Pflanzenstärke sowie Oberflächenstruktur der Kletterhilfe - vorteilhaft sind Rundprofile	- vorzugsweise gitterförmige Konstruktionen - Gitterweiten 10 – 20 cm für eigenständiges Verankern der Pflanzen - Durchmesser 0,4 – 3 cm, artabhängig, so dass sie von der jeweiligen Art umrankt werden können - alle Profilierschnitte	- vorzugsweise horizontale Ausrichtung - Abstand untereinander ca. 40 cm bei gitterförmigen Konstruktionen - Gitterweite i. d. R. zwischen 30 und 50 cm
Geeignete Systeme	Kein System notwendig 		Seil- und Rohrkonstruktionen, Stäbe 	Scherenformgitter, Stahlmatten, gitterförmige Seilkonstruktionen, Stäbe 	Latten, Stäbe, Seilkonstruktionen 
Beispiele Arten	<i>Hedera helix</i> & <i>Colchica</i> <i>Hydrangea petiolaris</i> <i>Schizophragma hydrangeoides</i> & <i>integrifolium</i> <i>Campsis radicans</i> <i>Campsis x tagliabuana</i> <i>Euonymus fortunei</i>	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	<i>Wisteria</i> Arten <i>Celastrus orbiculatus</i> <i>Peniploca græcia</i> <i>Humulus lupulus</i> <i>Aristolochia</i> Arten <i>Campsis</i> Arten <i>Lonicera</i> Arten <i>Schisandra chinensis</i> <i>Menispermum</i> <i>Fallopia baldschuanica</i> <i>Actinidia</i> Arten <i>Akebia trifoliata</i>	<i>Clematis</i> Arten <i>Bryonia</i> Arten Viele Einjährige: <i>Topaeolum majus</i> Kürbis Gurken <i>Lathyrus</i> Arten	<i>Rosa</i> Arten <i>Jasminum nudiflorum</i> <i>Rubus</i> Arten

Abbildung 20: Übersicht der Klettertypen/Strategien und den dazu passenden Kletterhilfen (Pfoser 2013, geändert und erweitert durch E. Trachsel)

- Auswertung der Lebensbereiche der Gehölze in Bezug auf stadtklimafeste Kletterpflanzen

Die Analyse geeigneter Kletterpflanzen basiert unter anderem auf den Lebensbereichen der Gehölze nach Kiermeier (1994). In einem ersten Schritt wurden die Lebensbereiche, welche hier in einer Kurzfassung wiedergegeben werden (Abbildung 14), nach ihrer Eignung untersucht. Neben der Hitze- und Wärmeverträglichkeit wurden auch basische Bodenbedingungen, wie sie in den Städten normalerweise vorkommen, beachtet.

Drei Vegetationstypen wurden definiert:

Rot = trocken, sonnig, heiss

Grün = trocken bis frisch, sonnig bis halbschattig, Arten haben eine gute Wärmeverträglichkeit

Blau = frisch, halbschattig bis schattig, Arten weniger wärmeverträglich



Lebensbereich (X...)	Bodenfaktoren (.X _r)	Klimafaktoren (.X _k)	Wuchsgruppe (...X)
1 Moor- und Sumpfgehölze	1 moorig und nass-torfig 2 Bruchwälder, Feucht- und Nasswiesen, Sumpfstandorte	1 sonnig, kühl 2 halbschattig, kühl 3 sonnig bis lichtschantig 4 halbschattig, wärmeverträglich	
2 Auen- und Ufergehölze	1 frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-kiesig 2 frisch bis feucht, schwach sauer bis alkalisch, Sand, Kies, Schotter 3 mäßig trocken, frisch bis feucht, schwach sauer oder neutral, sandig 4 mäßig trocken, frisch bis feucht, neutral bis alkalisch, sehr nährstoffreich, sandig-kiesig 5 mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis stark alkalisch, nährstoffreich, sandig, kiesig, lehmig	1 sonnig, hitzeverträglich, mäßig frosthart 2 sonnig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig, wärmeliebend, frosthart 4 sonnig bis lichtschantig, kühl bis kalt 5 lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 6 halbschattig, kühl bis kalt, frosthart	
3 Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen	1 robuste, stadtklimaverträgliche Gehölze, mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis alkalisch, nährstoffreich, kein Sand oder Ton 2 anspruchsvolle Gehölze, frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-humos oder lehmig-humos 3 anspruchsvolle, aber anpassungsfähige Gehölze, frisch bis feucht, schwach sauer bis alkalisch, gute bis beste, meist lehmige Böden	1 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frostempfindlich 2 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, kühl-ausgeglichen, frosthart 4 sonnig bis halbschattig, wärmeverträglich, frosthart 5 sonnig bis halbschattig, wärmeverträglich, meist frosthart 6 sonnig bis halbschattig, kühl-ausgeglichen, frosthart 7 licht- bis halbschattig, mäßig frosthart	1 Großbaum (>20 m)
4 Artenarme Wälder und Gehölzgruppen	1 mäßig trocken bis frisch, sauer bis neutral, sandig 2 trocken bis frisch, sauer bis schwach alkalisch, sandig-humos 3 mäßig trocken bis feucht, schwach sauer bis schwach alkalisch, kiesig- oder sandig-lehmig	1 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frostempfindlich 2 sonnig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig, frosthart 4 licht- bis halbschattig, frosthart 5 halbschattig, meist frosthart	2 Mittelgroßer Baum (>15 m)
5 Heiden- und Dünengehölze	1 trocken bis frisch, nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig bis feinkiesig 2 mäßig trocken bis frisch, mäßig nährstoffhaltig, sauer bis schwach sauer, sandig bis humos 3 trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis schwach alkalisch, sandig-kiesig, sandig-humos	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig, wärmeliebend, frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, kühl, frosthart 4 licht- bis halbschattig, kühl-gemäßigt, mäßig frosthart	3 Kleinbaum (>7 m)
6 Steppen- gehölze und Trocken- wälder	1 trocken bis frisch, nässeempfindlich, nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig, sandig-kiesig oder -lehmig 2 mäßig trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig bis sandig-humos 3 mäßig trocken bis frisch, nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch, sandig-lehmig bis lehmig 4 frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis schwach alkalisch, sandig-lehmig bis lehmig	1 sonnig-heiß, frostempfindlich 2 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, wärmeliebend, frosthart 4 licht- bis halbschattig, wärmeliebend, mäßig frosthart	4 Großstrauch (>3 m)
7 Gehölze kühl- feuchter Wälder	1 mäßig trocken bis frisch, nicht zu nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch 2 durchlässig, frisch bis feucht, mäßig nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig- oder kiesig-humos, empfindlich gegen höheren Kalkgehalt 3 schwach sauer bis alkalisch, nährstoffreich, humos- oder sandig-lehmig 4 sauer bis schwach alkalisch, nährstoffreich, humos, sandig-lehmig bis lehmig	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, sommerkühl und winterkalt, frosthart 4 lichtschantig, wintermild, frostempfindlich 5 licht- bis halbschattig, wärmeverträglich, meist frosthart 6 lichtschantig, kühl bis kalt, frosthart	5 Normal- strauch (>1,5 m)
8 Bergwälder und Sträucher alpiner Bereiche	1 frisch bis feucht, sauer bis neutral, sandig-humos, -kiesig, felsig, flachgründig 2 mäßig trocken bis frisch, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig-kiesig, -lehmig, felsig, flachgründig	1 sonnig sommerheiß, winterkalt, frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, kühl, wintermild, meist frosthart 3 sonnig bis absonnig, sommerkühl, winterkalt, frosthart 4 absonnig bis lichtschantig, mäßig frosthart 5 absonnig, kalt, frosthart	6 Kleinstrauch (>0,5 m)
9 Gehölze der Hecken und Strauch- flächen	1 trocken bis frisch, mäßig nährstoffreich, schwach sauer bis stark alkalisch, sandig- oder lehmig-humos 2 frisch bis feucht, nährstoffreich, sauer bis neutral, sandig- bis lehmig-humos 3 frisch bis feucht, nährstoffreich, schwach sauer bis alkalisch, alle Substrate außer ärmste Böden	1 sonnig, wärmeliebend, mäßig frosthart 2 sonnig bis lichtschantig, sommerkühl, meist frosthart 3 sonnig bis lichtschantig, frosthart 4 sonnig bis halbschattig, frosthart 5 absonnig oder licht- bis halbschattig, wintermild, mäßig frosthart 6 licht- bis halbschattig, frosthart	7 Zwerg- strauch (>0,1 m)
			8 Halbschrauch 9 Klettergehölze

Abbildung 21: Analyse der Lebensbereiche der Gehölze nach Kiermeier. (Eigene Einteilung auf Grundlage von Roloff 2008/18)



- **Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen, Modulare & Flächige Bauweisen**

Krautige Arten, Standort: Trocken, sonnig, spärliche Bewässerung

- 4.2.2. Mitteleuropäischer Trockenrasen, *Xerobromion*
- 4.2.4. Mitteleuropäischer Halbtrockenrasen, *Mesobromion*
- 5.1.1. Trockenwarmer Krautsaum, *Geranion sanguinei*

- **Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen Verholzende Arten**

Standort: Trocken, sonnig, spärliche Bewässerung (nach Delarce 2015)

- 2.3.6. Trockenwarmes Gebüsch, *Berberidion*

- **Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen, Modulare & Flächige Bauweisen (nach Delarce 2015)**

Krautige Arten, Standort: Frisch, sonnig bis halbschattig (einzelne Arten auch Schatten), regelmässige Bewässerung

- 4.5.1. Talfettwiesen (Fromentalwiese), *Arrhenatherion*
- 4.5.2. Bergfettwiese (Goldhaferwiese), *Polygono-Trisetion*
- 5.1.2. Mesophiler Krautsaum, *Trifolion medii*
- 5.1.5. Nährstoffreicher Krautsaum, *Aegopodion + Alliarion*

- **Auswertung der Lebensräume der Schweiz für die horizontale Vegetationsflächen verholzende Arten,**

Standort: Frisch, sonnig bis halbschattig (einzelne Arten auch Schatten), regelmässige Bewässerung (nach Delarce 2015)

- 5.3.3. Mesophiles Gebüsch, *Pruno-Rubion*

- **Pflege von boden- und wandgebundenen Fassadenbegrünungen**

Bodengebundene Fassadenbegrünung

Bei der Pflege von Kletterpflanzen wird zwischen Selbstklimmer und Gerüstkletterpflanzen unterschieden. Auf die Pflege von einzelnen Arten wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Tabelle 8: Pflegearbeiten für die bodengebundene Fassadenbegrünung

Pflegearbeit	Selbstklimmer	Gerüstkletterpflanzen
Kontrolle der Fassadenoberfläche 1-2mal jährlich	Feuchtigkeitsbildung an Maueroberfläche, insbesondere bei Holzfassaden	Feuchtigkeitsbildung an Maueroberfläche, insbesondere bei Holzfassaden und WVDS, den Abstand zwischen Kletterhilfe und Fassade mittels Pflege freihalten
Freischneiden sensibler Bauteile (1- 2mal jährlich):	Kontrolle ob lichtfliehende Triebe in die sensiblen Bauteile wachsen, Abstand der sensiblen	Insbesondere bei Starkschlingern sensible Bauteile 1-2mal jährlich freischneiden



Fenster, Fensterläden, Dächer, Fallrohre, Blitzableiter, Markisen und Luftaustrittsöffnungen	Bauteile zwischen 0.2 bis 0.5 m Abstand	
Fixieren, Aufbinden und Leiten der Pflanzen	Evtl. anfangs ein Leiten der Pflanzen notwendig	Je nach Kletterform die Pflanzen in den ersten Jahren an der Kletterhilfe leiten, bei Starkschlingern sie seilparallele Aufleitung beachten
Technische Einrichtungen und Kletterhilfen kontrollieren (1 -2mal Jährlich)		Befestigungspunkt und Spannschlösser
Wasser- und Nährstoffversorgung (ohne künstliche Bewässerung)	Ohne künstliche Bewässerung evtl. in starken Hitzeperioden eine Wasserzugabe notwendig	Ohne künstliche Bewässerung evtl. in starken Hitzeperioden eine Wasserzugabe notwendig
Pflanzenschutzmassnahmen		
Schnittmassnahmen 1-2mal jährlich)	Kleine Polsterdicke für vitales Erscheinungsbild, gute Haftwurzelbildung und reduziertes Brandrisiko	Schnittmassnahmen variieren je nach Arten und Typ der Begrünung. Siehe untenstehende Ausführungen

Wandgebundene Fassadenbegrünung

Tabelle 9: Pflegearbeiten bei der wandgebundenen Fassadenbegrünung

Pflegearbeit	Vertikale Bauweise	Horizontale Bauweise
Kontrolle der Fassadenoberfläche 1-2mal jährlich	Kontrollieren Durchfeuchtung der Primärkonstruktion	Kontrollieren Durchfeuchtung der Primärkonstruktion
Freischneiden sensibler Bauteile (1-2mal jährlich): Fenster, Fensterläden, Dächer, Fallrohre, Blitzableiter, Markisen und Luftaustrittsöffnungen	Bei Trogbepflanzungen, welche auch Kletterpflanzen mit beinhalten	Nicht notwendig
Kontrolle des Systems auf Materialermüdung, Korrosion	Kontrolle der Pflanzen tragenden Medien, Kontrolle insbesondere auf Überlastung der Sekundärkonstruktion	Kontrolle der Pflanzen tragenden Medien, Kontrolle insbesondere auf Überlastung der Sekundärkonstruktion
Wasser- und Nährstoffversorgung	Je nach Grösse des Substratvolumens wöchentliche oder monatliche Kontrolle der Bewässerungsanlage	Tägliche bis wöchentliche Kontrolle der Bewässerungsanlage, Winterschutz
Selektives Jäten	1 bis 2mal jährlich (Systemabhängig)	3 bis 4mal jährlich in der Anwachsphase, danach 1 bis 2mal jährlich
Ersatz- und Nachpflanzungen	Bei Bedarf, i.d.R. einmal jährlich in der Anwachsphase	Bei Bedarf, i.d.R. einmal jährlich in der Anwachsphase
Pflanzenschutzmassnahmen	Bei Befall Bekämpfung mit biologischen Schädlingsmitteln	Bei Befall (v.a. Dickmaulrüssler) Bekämpfung



mit biologischen
Schädlingsmitteln

- Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen

Kühlung durch Verschattung

Tabelle 10: Kühlung durch Verschattung

	Wert	Quelle
Verschattung durch Gerüstkletterpflanzen (bei voll ausgeprägter Belaubung)	85-95%	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010
PET Messungen Stadtgärtnerei Zürich (Verschattung auf durch Kletterpflanzen im Pflanztrug)	Im Maximum 10°C (Temperatur hinter der Begrünung auf Balkon)	Hertig & Trachsel, 2021
PET Messungen Stadt Zürich	-6.6 °C im Maximum am Tag (14 Uhr, 1m Abstand zur Fassade)	Fachplanung Hitzeminderung 2020
Temperatursenkung durch Verschattung	2-10K	Pfoser 2016
Beispiel: Flower Tower Paris	5°C (Unterschied Umgebungstemperatur und Temp. Hinter der Begrünung)	Pfoser 2016

Kühlung durch Verdunstung (Evapotranspiration)

Tabelle 11: Kühlung durch Verdunstung

	Wert	Quelle
Kühlung der Umgebung durch Evapotranspiration	Begrünte Wand 1.3°C kühler in 60cm Abstand als Referenzwand	Wong 2010
Verdunstung bodengebundene Kletterpflanze:	10 bis 15 l/m²/Tag Verdunstung (Fassade 20 m hoch); Verdunstungskühlung von 280 kWh pro Fassade und Tag	BuGG 2023b, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010
Saftflussmessungen an Wisteria im MFO Park Zürich	bis 16 l/m²/Tag	Hertig & Trachsel 2021
Erhöhung der Luftfeuchtigkeit	20-40% höhere Luftfeuchte im Sommer	Manso et.al. 2021

Senkung der Oberflächentemperatur

Tabelle 12: Senkung der Oberflächentemperatur

	Wert	Quelle
Reduktion der Oberflächentemperatur einer Fassade	zwischen 8 und 19 °C	Pfoser 2016
Beispiel Selbstklimmer, an heller Fassade	- 8°C	Pfoser 2018
Beispiel Selbstklimmer, an dunkler Fassade	- 19°C	Pfoser 2018



Wandgebundene Begrünung Stadtgärtnerei Zürich	Im Maximum 6°C	Hertig & Trachsel, 2021
--	----------------	-------------------------

CO₂ Absorption

Tabelle 13: CO₂ Absorption

	Wert	Quelle
CO ₂ Entzug bodengebundene Begrünung (Hedera helix Wörner), 1'000m ² , Tiefe 20cm	2.3kg CO ₂ /m ² a	Schröder 2009, sempergreen 2022
Wandgebundene Fassadenbegrünung, Studie aus Siena, krautige Arten	0,44–3,18 kg CO ₂ eq/m ² pro Jahr	Marchi & et.al.,2015

2.3 Gebäudeebene

2.3.1 Energiebilanz

Der Heizwärmebedarf ist die auf die Energiebezugsfläche bezogene Wärmemenge, die pro Jahr erforderlich ist, um ein Gebäude auf einer gewünschten Raumtemperatur zu halten und lässt sich nach SIA 380/1 folgendermassen ermitteln:

$$Q_h = \Sigma [Q_T + Q_V - \eta_g (Q_i + Q_s)] \quad (2)$$

Mit

- Q_h: Heizwärmebedarf
- Q_T: Transmissionswärmeverlust
- Q_V: Lüftungswärmeverlust
- Q_i: interne Wärmegewinne
- Q_s: solare Wärmegewinne
- η_g: Ausnutzungsgrad für Wärmegewinne

Alle Wärmeverluste hängen von einer Temperaturdifferenz ab. Wenn die Aussentemperatur tiefer ist als die Innentemperatur geht der Wärmefluss von innen nach aussen, es handelt sich dabei also, aus Sicht des Innenraums um Verluste. Wenn die Aussentemperatur höher ist als die Innentemperatur verläuft der Wärmefluss in die entgegengesetzte Richtung. Aus Sicht des Innenraums handelt es sich dann um Wärmegewinne. In dieser Studie wurden die Lüftungswärmeverluste Q_V nicht analysiert.

Die internen Gewinne resultieren aus der Anzahl und dem Verhalten der Bewohner und sind Klimaunabhängig.

Die solare Wärmegewinne die effektiv im Inneren des Gebäudes gelangen, hängen von der Sonneneinstrahlung ab, sowie von der Verschattung. Diese Verschattung kann durch die Umgebung erschaffen werden (Bäume, andere Gebäude, usw.) oder durch Storen oder einen anderweitigen Sonnenschutz.

Der Ausnutzungsgrad für die Wärmegewinne wird seinerseits in der SIA 380/1 als abhängig vom Verhältnis der Gewinne zu den Verlusten und von der thermischen Trägheit des Gebäudes beschrieben.

Je nach Bilanz Verluste-Gewinne und der gewünschten Innentemperatur muss entweder geheizt werden oder, falls eine Anlage besteht, gekühlt werden. Falls die jeweiligen Anlagen nicht leistungsfähig genug oder nicht vorhanden sind, kann die Innentemperatur negativ beeinflusst werden.

Das Ziel dieses Projektes auf Gebäudeebene ist es den Einfluss von einer Begrünung auf den Energieverbrauch und den thermischen Komfort zu quantifizieren, das heisst, vereinfacht, den Einfluss von einer Begrünung auf die verschiedenen Parameter der Energiebilanz abzuschätzen.



In Zusammenarbeit mit der Dienststelle für Energie und Wasserkraft des Kantons Wallis wurden brauchbare Informationen aus der Gebäudedatenbank des Kantons recherchiert, welche Begrünungsparameter beinhalten, in der Hoffnung auswertbare Daten nutzen zu können. Die sehr geringe Anzahl an auswertbaren Informationen liess eine weitere Verfolgung des Ziels nicht zu.

In dieser Arbeit wurde entschieden den Einfluss einer Begrünung auf die folgenden Parameter zu untersuchen:

1. Die Oberflächentemperatur. Die Oberflächentemperatur einer Wandfläche wird unter anderem durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen beeinflusst und durch die Verschattung.
Eine Veränderung der Oberflächentemperatur verändert unter anderem den Wärmefluss durch die analysierte Wand also den Q_T , der wie schon erwähnt von der Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Innenluft abhängt.
2. Die Verschattung hat nicht nur einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur, sondern auch auf die solare Wärmegewinne. Die Ausrichtung der Begrünung wird hier genauso untersucht wie das Sonnenschutzmanagement.
3. Die thermische Gebäudehülle, sprich die Wärmedämmung, die einen Einfluss auf Q_T hat, sowie die Struktur des Gebäudes, die sich auf die Trägheit des Gebäudes auswirkt.

Darüber hinaus können auch die Wirkung von Parametern untersucht, die nicht unmittelbar mit einer Begrünung einhergehen, wie die internen Wärmegewinne und die Belüftung, auch wenn sich Letztere im Falle einer Begrünung verändern kann. Sie hängen indirekt mit dem Wohlbefinden mit den Nutzern zusammen: Weniger direkte Einstrahlung führt zu höherem Wärmebedarf in der Heizperiode bei immergrünen Pflanzen bzw. reduziert den Kühlbedarf im Sommer bei erhöhtem Lichtbedarf bei Verschattung.

Um den Einfluss auf den Energieverbrauch und den Komfort zu bestimmen werden Simulationen mittels bSol durchgeführt.

2.3.2 Simulationstool bSol

Die Entscheidung bSol für die Simulationen zu benutzen hat zwei Gründe, zum einen wurde das Tool von der HES-SO Valais-Wallis entwickelt, zum anderen ermöglicht es dieses Tool eben Energiebilanzen und Überhitzungsstunden, das heisst Stunden über 26°C Innentemperatur, zu berechnen, dies nach SIA 380/1 Standard.

Bei bSol handelt es sich um einen klassischen Simulationstool, das einen Energiebedarf berechnet. Das heisst es werden U-Werte, Flächen, Energiebezugsfläche (EBF), Verschattungsfaktoren usw. eines Gebäudes eingetragen, um einen Wärme- bzw. Kältebedarf zu berechnen. Das Tool beinhaltet jedoch keine Parameter, die es direkt ermöglichen den Einfluss einer Begrünung miteinzuberechnen. Eine Erweiterung des Tools, um die Aspekte der Begrünung miteinzubeziehen wäre daher nötig.

Betreffend die Indikatoren ermöglicht es bSol unter anderem den Verlauf der Innentemperatur zu ermitteln, die Überhitzungsstunden, die Jahresenergiebilanz sowie die Spitzenlasten bei Kälte und Wärme. Diese Indikatoren sollen reichen, um die Wirkung einer Begrünung zu quantifizieren.

Die Simulationsmethodik auf Gebäudeebene ist in der Abbildung 20 ersichtlich:

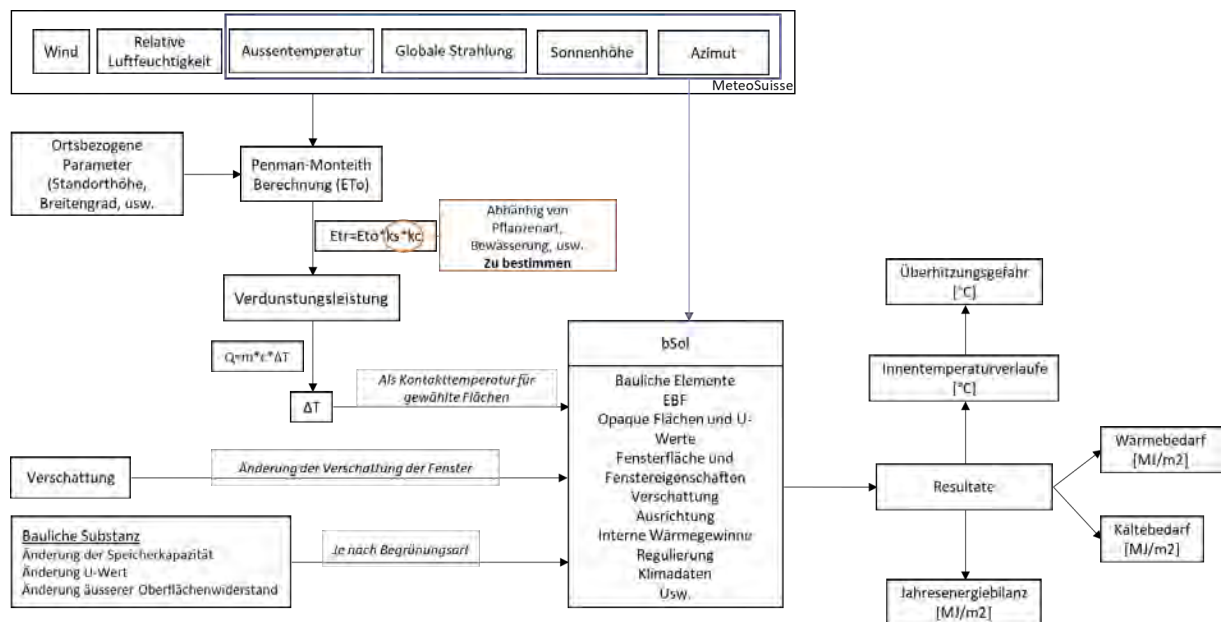


Abbildung 22: Simulation methodology on building level. Source: Authors

Da die Berechnung der Verdunstungsleistung nicht in bSol selbst durchgeführt werden kann, muss diese vorab erstellt werden und in bSol als Oberflächentemperatur bzw. Kontakttemperatur einer bestimmten Fläche einfließen.

Die Berechnung der Temperaturreduzierung durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen kann auf verschiedene Arten erfolgen. In diesem Projekt wurden zwei Methoden getestet:

1. Die Methode, die wir hier Methode Eto nennen
2. Die Methode nach Blatttemperatur

Methode 1

Die erste Methode besteht darin die Temperaturreduzierung durch Verdunstungsleistung mittels der latenten Wärme zu berechnen, die ihrerseits von der Menge Wasser abhängt die evapotranspiert wird.

Es wird folgendermassen vorgegangen:

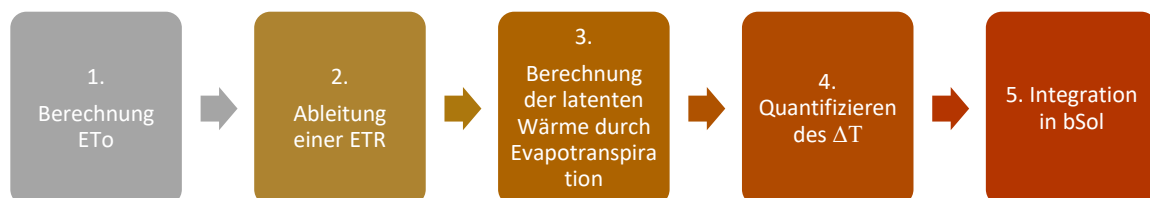


Abbildung 23: Surface temperature calculation according to the Eto method. Source: Authors.

1. Für die Berechnung der Eto existieren mehrere Gleichungen zum Beispiel nach Turc oder Penman-Monteith. Im Rahmen dieses Projekts wurde überwiegend die Penman-Monteith Berechnung benutzt:

Die Gleichung nach Penman-Monteith, die von der FAO empfohlen wird, ist folgende:



$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

R_n = Nettostrahlung [$MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] (Differenz zwischen empfangener kurzwelliger Strahlung und abgegebener langwelliger Strahlung).

G = Wärmefluss vom Boden [$MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]

γ = psychrometrische Konstante [$KPa \cdot ^\circ C^{-1}$]

u_2 = Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über dem Boden [$m \cdot s^{-1}$]

T_{mean} = Durchschnittliche Lufttemperatur [$^\circ C$]

Δ = Steigung der Sättigungsdampfdruck – Kurve bei Lufttemperatur [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]

e_s = Sättigungsdampfdruck bei Lufttemperatur [kPa]

e_a = Aktueller Dampfdruck [kPa]

Die genauen Schritte werden in (Rod, 2022) ausgeführt.

2. Wenn schließlich alle Parameter zusammengestellt sind und die Referenz-Evapotranspiration Eto berechnet wurde, erhält man durch Multiplikation mit dem Kultur- und dem Wasserstresskoeffizienten die effektive Evapotranspiration der Kultur:

$$ETR = ks * ETM = ks * kc * Eto \quad (4)$$

ETR = Evapotranspiration der Kultur [$mm \cdot h^{-1}$]

ks = Wasserstresskoeffizient [–]

γ = Kulturkoeffizient [–]

3. Die latente Wärme durch Verdunstungsleistung lässt sich mittels der folgenden Gleichung ermitteln:

$$\lambda ET = \frac{\rho_e c_e ET_R}{3.6 * 10^6} \quad (5)$$

λET = Latente Wärme durch Evapotranspiration [$W \cdot m^{-2}$]

ρ_e = Volumenmasse von Wasser, 1000 [$kg \cdot m^{-3}$]

c_e = Latente Verdampfungswärme von Wasser bei 20°C, $2.45 * 10^6$ [$J \cdot kg^{-1}$]

4. Der Einfluss der Verdunstungsleistung auf die Temperatur im Bereich der Begrünung lässt sich schliesslich berechnen:

$$\Delta T = \frac{\lambda ET * 3600}{f e_f \rho_a c_a R_p R_a} \quad (6)$$

ΔT = Temperaturunterschied [$^\circ C$]

e_f = Dicke der Begrünung [m]

ρ_a = Volumenmasse der Luft, 1.204 [$kg \cdot m^{-3}$]

R_p = Verhältnis des Luftanteils zur Vegetation [–]

f = Evapotranspirationsrate [–]

R_a = Luftaustausch [h^{-1}]

Die Aussentemperatur wird dann durch dieses ΔT korrigiert.

5. Die neue korrigierte Aussentemperatur (entweder durch das ΔT oder durch die Blatttemperatur, die in Methode 2 beschrieben wird) kann dann direkt in bSol integriert werden. Dabei kann entweder die Klimadatei, die von bSol gelesen wird, angepasst werden, das heisst die Aussentemperatur im generellen reduziert werden oder die neue Temperatur als Kontakttemperatur für eine bestimmte Wand ausgelegt werden.



Methode 2

Die induzierte Temperaturreduktion kann auch ohne die Berechnung der Eto erfolgen. In der Arbeit von (Rod, 2022) wurde dafür anhand der folgenden Gleichung nach (Campbell, 2000) die Blattemperatur ermittelt:

$$T_f = T_{mean} + \frac{\gamma'}{\frac{\Delta}{P} + \gamma'} \left[\frac{Q_{leaf}}{g_{Hr} c_{pa}} - \frac{e_s - e_a}{P * \gamma'} \right] \quad (7)$$

T_f = Blattemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

γ' = psychrometrische Konstante [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

c_{pa} = Spezifische Wärme bei konstantem Druck, $29.3 \text{ [J.mol}^{-1}.\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}]$

Q_{leaf} = Isothermale Nettostrahlung angewandt auf eine grüne Fassade [W.m^{-2}]

g_{Hr} = Leitfähigkeit konvektiv – radiativ [$\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]

P = Luftdruck [kPa]

Die detaillierten Schritte, die es ermöglichen alle Parameter zu bestimmen sind in der Arbeit von (Rod, 2022) zu finden. Was dabei bemerkt werden kann, ist das die Blattbreite der Pflanze (L_f) eine indirekte, aber wichtige Rolle bei der Berechnung der Blattemperatur spielt (in dem Begriff g_{Hr}). In dieser Arbeit wird auch aufgezeigt (anhand einer externen kurzen Messstrecke), dass beide Methoden ähnliche Resultate aufweisen wie auf (Abbildung 22) und (Abbildung 23) zusehen.

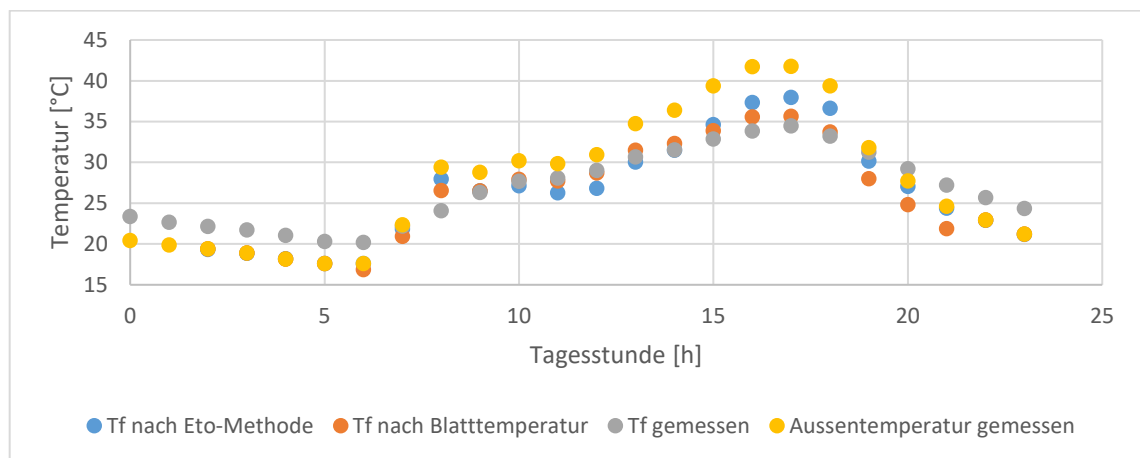


Abbildung 24: Berechnung der blattbezogenen Temperatur nach den genannten Methoden, in Chens-sur-Léman, 24.07.2022. Quelle: Rod, 2022

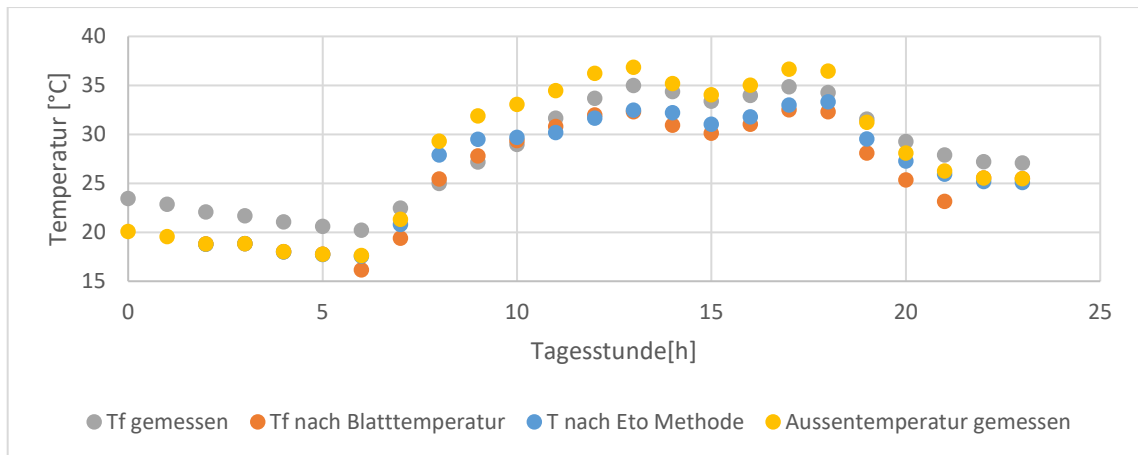


Abbildung 25: Berechnung der blattbezogenen Temperatur nach den genannten Methoden, in Chens-sur-Léman, am 25.07.2022.

Quelle: Rod, 2022

2.3.3 Fallstudien – quantitativen Einfluss einer Begrünung

Folgende Forschungsfragen leiten sich durch die Anwendung der beschriebenen zwei Methoden ab: Welchen quantitativen Einfluss haben die Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Gebäudes? Können die Begrünungsmassnahmen nach Effizienz klassifiziert werden und falls ja, welche Begrünungsmassnahmen weisen bei welchen Gebäudetypen eine höhere Effizienz auf?

Die Gebäudesimulationen werden hier an verschiedene Gebäudetypen durchgeführt speziell in Bezug auf deren thermischer Trägheit.

An jedem Gebäudetyp werden Simulationen mit und ohne Begrünung durchgeführt, um den Einfluss der Begrünung zu berechnen. Nachdem alle Simulationen durchgeführt wurden, können die Begrünungsmassnahmen voraussichtlich nach deren Effizienz an verschiedenen Gebäudearten klassifiziert und typisiert werden.

Das Referenz-Gebäude an dem (Rod, 2022) Fallstudien durchgeführt hat, ist ein fiktives Gebäude in Zürich damit die Vegetationsmerkmale, mit denen von der ZHAW gemessenen Werte verglichen werden können. Dafür müssen die Klimadaten für Zürich in bSol eingefügt werden. Das Gebäude hat drei Stockwerke und eine EBF von 510m².

Das Haus hat vier identische Wände mit identischen Fensterflächen. Alle opaken Bauteile weisen einen U-Wert von 0.22 W/m²K und die Fenster einen U-Wert von 1.5 W/m²K auf.

Die internen Wärmegewinne sind nach SIA 2024 eingerichtet.

Eine Heizungsanlage von maximal 50 W/m² ab 20°C und eine Klimaanlage von maximal 20 W/m² ab 26°C können eingeschaltet werden.

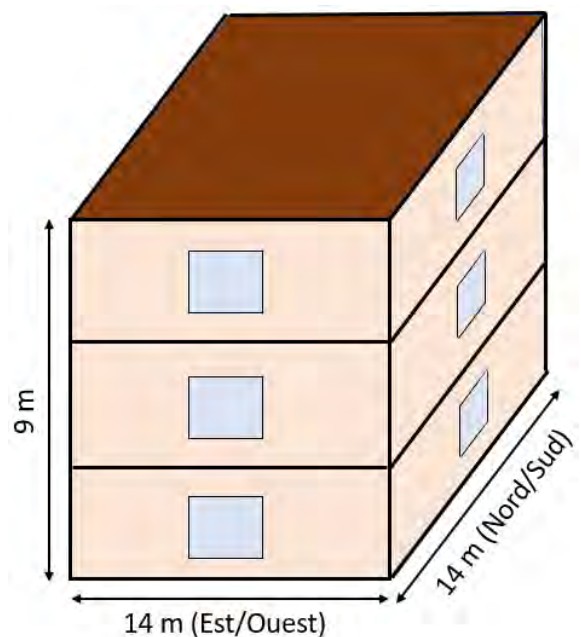


Abbildung 26: Referenz-Gebäude bSol. Quelle: Rod, 2022



Das Gebäude hat eine geringe Wärmeträgheit (Wärmekapazität von 62 MJ/K oder 34Wh/m²K). In der Tat wurde in einer früheren Bachelorarbeit (Tran, 2020) gezeigt, dass bei einem Gebäude mit geringer Trägheit der Einfluss der Begrünung markanter ist.

Tabelle 14: Einfluss einer Begrünung auf die Innentemperatur nach Trägheit des Gebäudes. Quelle: Tran, 2020

	Leicht		Mittel		Schwer	
	<i>Ohne Begrünung</i>	<i>Mit Begrünung</i>	<i>Ohne Begrünung</i>	<i>Mit Begrünung</i>	<i>Ohne Begrünung</i>	<i>Mit Begrünung</i>
<i>Überhitzungsstunden</i>	486	0	181	0	100	0
<i>Maximale Innentemperatur [°C]</i>	29.2	26.9	27.9	25.9	27.3	25.5
<i>Maximale Innentemperaturdifferenz [°C]</i>	3.1		2.5		2.2	

Die Trägheit kann jedoch beliebig verändert werden.

Die eingefügte Begrünung ähnelt einer Begrünung durch Kletterpflanzen. Die Begrünung hat somit keinen Einfluss auf die Wärmedämmung des Gebäudes (keine zusätzliche Dämmschicht).

Das Gebäude wurde zuerst mit Hilfe von bSol und dessen User interface simuliert. Dabei wurden verschiedene Parameter untersucht:

- der Einfluss der Verdunstungsleistung,
- der Einfluss der Verschattung,
- der Einfluss weiterer Parameter wie die Aussentemperatur, die internen Wärmegewinne, die Solltemperatur im Gebäude, die Lüftung und der Sonnenschutz.



2.3.4 Energiebilanzgleichung von bSol in Matlab®

Auf dem User interface von bSol ist es nicht möglich die verschiedenen Parameter einfach in der Energiebilanz zu integrieren. Entweder können die Parameter wie der g-Wert zum Beispiel nicht saisonal variiert werden oder nicht nach Fassadenausrichtung verändert werden (Reduzierung der Oberflächentemperatur). Darüber hinaus müssen manche Aspekte extern berechnet werden wie die Verdunstungsleistung. Aus diesen Gründen war es nicht möglich alle Parameter gleichzeitig anzuwenden.

Um dies zu umgehen wurde entschieden auf dem User Interface zu verzichten ausser, um das Gebäude zu charakterisieren und direkt mit der Gleichung zu arbeiten, unter der bSol funktioniert bzw. mit der die Energiebilanz berechnet wird. Dafür wurde die Gleichung auf Matlab® getestet und angepasst. Die Energiebilanz unter bSol wird wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 T_{in}(h) &= T_{in}(h-1) \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * d_{bat} * T_{ext}(h-1) \rightarrow T_{zone} \\
 &- \frac{3600}{cCal} * d_{tot} * T_{in}(h-1) \rightarrow T_{int} \\
 &+ \rho_a * c * D * (T_{ext}(h-1) - T_{in}(h-1)) * \frac{EBF}{cCal} \rightarrow T_{aer} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ terrain} d_{terrain} * T_{terrain}(h-1) \rightarrow T_{terrain} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * I_{irradiance}(h-1) \rightarrow T_{solaire} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * G_i(h-1) * EBF \rightarrow T_{Gains\ internes} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * P_{Heizung}(h-1) \text{ oder } \frac{3600}{cCal} * P_{Kühlung}(h-1) \rightarrow T_c \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ local\ chauffé} d_{lc} * T_{lc}(h-1) \rightarrow T_{lc} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ local\ non\ chauffé} d_{lnc} * T_{lnc}(h-1) \rightarrow T_{lnc}
 \end{aligned} \tag{8}$$

d_{bat} = Transmission nach aussen [$W \cdot K^{-1}$]

d_{tot} = Transmission nach aussen + Terrain + beheiztes Lokal + nicht beheiztes Lokal [$W \cdot K^{-1}$]

$d_{terrain}$ = Transmission ins Terrain [$W \cdot K^{-1}$]

d_{lc} = Transmission nach beheiztes Lokal [$W \cdot K^{-1}$]

d_{lnc} = Transmission nach nicht beheiztes Lokal [$W \cdot K^{-1}$]

G_i = Interne Wärmegewinne (Apparate + Personen) [$W \cdot m^{-2}$]

$I_{Strahlung}$ = Eingehende Sonneneinstrahlung [W]

C_{cal} = Wärmekapazität [$J \cdot K^{-1}$]

D = Luftstrom [$m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$]

c = Wärmekapazität der Luft [$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$]



Dies hat es ermöglicht die Berechnungen flexibler zu gestalten und zusätzliche Optionen einzufügen:

- Die Oberflächentemperatur kann unterschiedlich je nach Saison und nach Ausrichtung angewandt werden
- Die Saisonalität der Vegetation kann ebenfalls in der Verschattung einbezogen werden, dies durch einen variablen LAI (siehe Kapitel 3.2.2) und somit einen variablen g-Wert
- Eine von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängige Belüftung kann eingefügt werden (nach dem Enthalpie Prinzip):

$$\rho * c_s * D * (T_f(h-1) - T_{in}(h-1)) * \frac{EBF}{C_{cal}} \rightarrow T_{aer} \quad (9)$$

c_s = Wärmekapazität von feuchter Luft [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_f = Blatttemperatur [K]

T_{in} = Innentemperatur [K]

Die relative Luftfeuchtigkeit wird verwendet, um Informationen über den Feuchtigkeitsgehalt im Gebäude zu vermitteln und die spezifische Luftfeuchtigkeit zu bestimmen, die für die Berechnung der Wärmekapazität der Luft erforderlich ist, wodurch sich die Lüftungsverluste ändern. Da die Begrünung eine Temperaturänderung induziert, muss dies auch im Lüftungsstrom berücksichtigt werden.

Alle Parameter, die zuvor direkt in bSol angewandt wurden und die drei oben erwähnten Optionen können kombiniert oder wiederum einzeln untersucht werden.

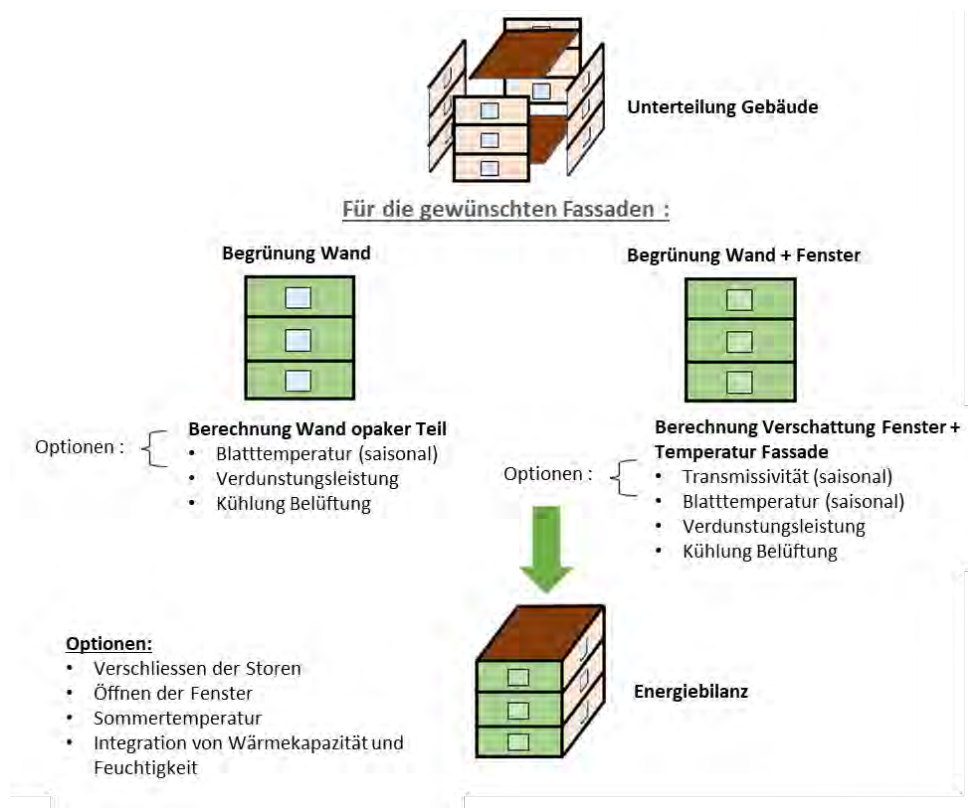


Abbildung 27: Struktur der Simulationen. Quelle: Rod, 2022



2.4 Arealebene

Auf Arealebene soll in einem ersten Schritt das Simulationstool CitySim erweitert werden. CitySim berücksichtigt Einflussparameter, die sich mit der näheren Umgebung eines Gebäudes befassen wie die Interreflektion oder das Windprofil. Jedoch müssen Parameter, die eine Begrünung beschreiben neu hinzugefügt werden. In einem zweiten Schritt sollen Simulationen durchgeführt werden, am besten an Gebäuden und Areale für die direkt Messungen von der ZHAW bestehen.

Da sich die Implementierung von Begrünung in bSol schwieriger erwies als zu Projektbeginn angenommen, wurde an dieser Stelle entschieden Simulationen mit CitySim auf Gebäudeebene durchzuführen. CitySim kann durch sein eigenes Verschattungsmodell den nahen Horizont selbst berechnen. In bSol muss dieser für jedes Gebäude selbst erzeugt werden. Darüber hinaus gilt hier das Interesse nicht nur dem Innenklima eines Gebäudes (Energieverbrauch und Innentemperatur), sondern auch der näheren Umgebung des studierten Gebäudes.

Die Simulationsmethodik funktioniert wie auf Abbildung 26 dargestellt:

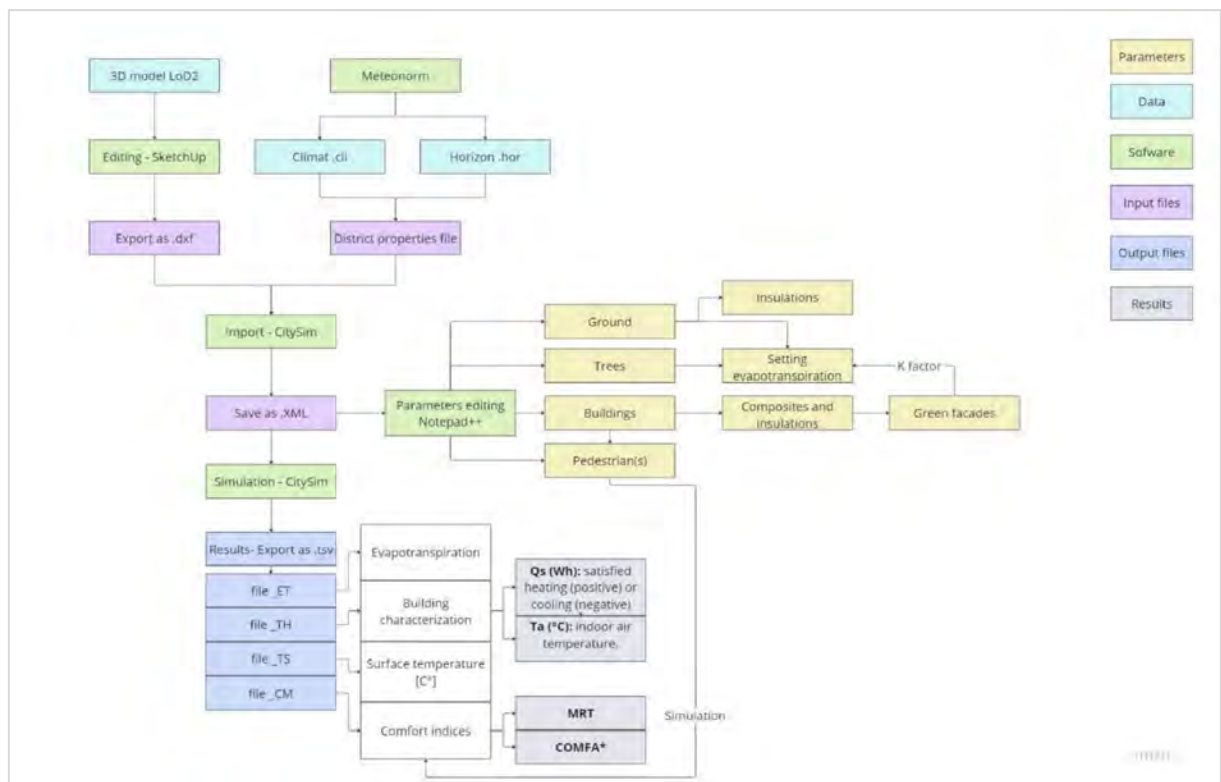


Abbildung 28: Methodik von CitySim. Quelle: Défago, 2023

2.4.1 Simulationstool CitySim

CitySim Solver ist eine Software, die im Labor für Solarenergie und Bauphysik der EPFL von Dr. Jérôme Kämpf entwickelt wurde. Sie soll in den Bereichen Energie und Umwelt eine Entscheidungshilfe bieten, indem sie eine Modellierung von Energiesystemen auf Stadtviertelebene ermöglicht.

Um Simulationen durchzuführen, benötigt CitySim nur eine geringe Anzahl von Informationen wie:

- Stündliche Klimadaten
- Daten über den Umgebungsprofil und Horizontwinkel, aufgenommen vom Zentrum der untersuchten Szene
- 3D-Daten und thermo-physikalische Eigenschaften der Gebäude (Heiz- und Kühlungssysteme, Eigenschaften von Baumaterialien, usw.) und der Umgebung (Boden, Begrünung, usw.).



Das von CitySim verwendete Modell hat die Besonderheit, dass es die stochastische Natur der Anwesenheit und des Verhaltens der Bewohner durch Profile berücksichtigt. Diese Profile können einfach angepasst werden. Darüber hinaus berücksichtigt es auch den Einfluss, den die Umwelt auf ein Gebäude haben kann. Einerseits wird die Bestrahlung einer Oberfläche durch die Interreflexion der Sonnenstrahlung an Flächen beeinflusst, die Teil der näheren Umgebung der genannten Oberfläche sind. Andererseits wird der Einfluss der Verschattung, die diese Oberfläche abgibt auf die Bestrahlung der anderen Flächen berücksichtigt.

In ihrer Doktorarbeit hat Dr. Silvia Coccolo in CitySim ein Modul hinzugefügt, mit dem das Potenzial der Verdunstungsleistung der Pflanzen sowie die erzeugten Schatten bewertet werden können.

Um Fassadenbegrünungen miteinzuberechnen, benötigt CitySim folgende Veränderungen:

- Anpassung des Bestrahlungsmodells, um die Änderung der Albedo der Vegetationsoberfläche zu berücksichtigen,
- Anpassung der thermischen Trägheit des Gebäudes durch die hinzugefügten Pflanzen,
- Integration der Verdunstungsleistung in das Modell, um die Auswirkungen auf eine Wärmeinsel besser abschätzen zu können.

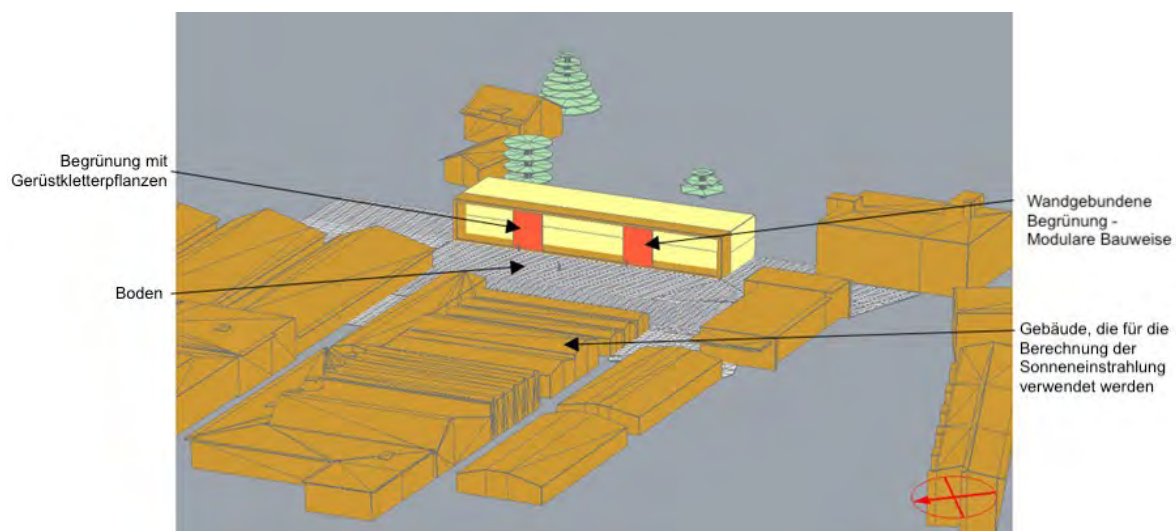


Abbildung 29: Wiedergabe des 3D-Modells vor der Simulation, die in CitySim importiert wird

Für das IVECT-Projekt hat das in Abbildung 27 gezeigte Fallstudiengebäude Außenwände aus Zement (in Abbildung 27 gelb) mit einer sehr hohen Wärmeträgheit. Die Vegetation wird jedoch auf zwei nach Nordwesten ausgerichtete Teile gelegt (in Abbildung 27 orangefarben), von denen einer eine hohe thermische Trägheit und der andere eine geringe thermische Trägheit aufweist. Um die Fallstudie in CitySim zu modellieren, müssen wir ein semantisches Modell mit eindeutigen Kompositen für Wände, Dächer und Böden erstellen. Wir haben daher die Zementeigenschaften verwendet, um die Außenwände zu definieren, und wir haben die Dacheigenschaften verwendet, um die Vegetation an dem Gebäude zu modellieren. Auf diese Weise können wir verschiedene Oberflächentemperaturen unterscheiden. Um den Effekt der Evapotranspiration auf die Dachkomposite zu modellieren, wurden die für den Boden und die Bäume definierten Verdunstungsgleichungen in dieser Arbeit für die Dachelemente (in Abbildung 27 in orange) übernommen.

Im Rahmen des Projekts IVECT wenden wir diesen Begriff auch auf Fassaden an. Dem Oberflächentemperaturknoten T_s der Dächer wurde ein Senken-Term hinzugefügt, um die durch den Evapo-Transpirationsprozess Q_{ET} freigesetzte Wärme zu berechnen. Der entsprechende Code wurde



modifiziert und auf GitHub veröffentlicht: <https://github.com/idiap/CitySim-Solver> in den folgenden Dateien: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-7756> wurden in dieser Arbeit für die Dachelemente (in Abbildung 27 orange) aufgenommen:

```
double getSourceTerm(unsigned int i, float Tout, float Tground, float Qs=0.f) {
    // air temperature node
    if (i == 0)    return getUA()*Tout
                  + getUAGround()*Tground
                  + hc_int
                  *(getWw()*getQsun2()+Lr)
                  /(hc_int+Kw2)
                  + getWa()*getQsun2()+Lc+Qs;
    // wall temperature node
    else if (i == 1) return Zone2N::getSourceTerm(i,Tout,Tground,Qs);
    // roof temperature node
    else if (i == 2) { double term3 = 0.;
                      for (size_t i=0; i<roofs.size(); ++i) {
                          term3 += Kr1*roofs[i]->getRoofArea()
                                  *(+roofs[i]->get_hc()*Tout
                                    +roofs[i]->getShortWaveIrradiance()*(1.-roofs[i]->getShortWaveReflectance_opaque())
                                    +roofs[i]->get_hr()*roofs[i]->getEnvironmentalTemperature()
                                    -roofs[i]->get_Y()) // see function below for the calculation of Y
                                  /(Kr1+roofs[i]->get_hc()+roofs[i]->get_hr()+roofs[i]->get_X()); // see function below for X
                      }
                      return term3;
    }
    // out of range
    else throw(string("Only " + toString(nNodes) + " nodes, therefore cannot access element "+toString(i)));
}
```

Die Funktion `getSourceTerm` berechnet den Quellterm für den Dachtemperaturknoten, die Temperatur im Inneren des Daches unter Verwendung der beiden Funktionen `get_Y()` und `get_X()`, die in der folgenden Datei definiert sind.

- `surface.h:853` in den Funktionen:

```
float get_Y() { return Y; }
float get_X() { return X; }
void set_YX(Climate* pClimate, unsigned int day, unsigned int hour) {
    if (hasET()) {
        Y = kFactor*
            pClimate->getGamma(day,hour)*(Climate::getSaturatedVapourPressure(getTemperature()) -
            pClimate->getSaturatedVapourPressureDerivative(getTemperature())*getTemperature() -
            pClimate->getVapourPressure(day,hour));
        X = kFactor*pClimate->getGamma(day,hour)*
            pClimate->getSaturatedVapourPressureDerivative(getTemperature());
    }
    else return;
}
```




Die Wärmeabgabe durch Verdunstungsleistung an der berechneten Oberfläche der Temperatur T_s^n wird wie folgt berechnet:

$$Q_{ET} = (Y + X \cdot T_s^n)$$

Um diese Gleichung zu finden, gehen wir vom Evapotranspirationswärmestrom Q_{ET} aus, der gegeben wird durch:

$$Q_{ET} = \gamma \cdot (e_s(T_s) - e(T_a))$$

und linearisieren den Sättigungsdampfdruck $e_s(T_s)$ mit einer Taylor-Erweiterung erster Ordnung um $T_s^{(n-1)}$, die die Oberflächentemperatur des früheren Zeitschritts ist, um folgendes zu erhalten (Upadhyay, 2015):

$$Q_{ET} = \gamma \cdot \left(e_s(T_s^{n-1}) - \Delta \cdot T_s^{n-1} - e_s(T_a) \cdot \frac{RH}{100} + \Delta \cdot T_s^n \right)$$

Wir können in den ersten Gleichungen die Elemente in X und Y mit folgendem identifizieren:

$$X = \gamma \cdot \Delta$$

$$Y = \gamma \cdot \left(e_s(T_s^{n-1}) - \Delta \cdot T_s^{n-1} - e_s(T_a) \cdot \frac{RH}{100} \right)$$

CitySim ist in der Lage, den Energiebedarf von Gebäuden zu simulieren.

Es ist auch in der Lage, die Energieressourcen dieser Gebäude aus erneuerbaren Quellen zu bestimmen, einschließlich des durch die städtische Umgebung induzierten Strahlungsaustauschs, der durch eine Reihe von häufig verwendeten Energieumwandlungssystemen erzeugt wird.

Die verwendeten Modelle bieten einen akzeptablen Kompromiss zwischen Simulationszeit und Genauigkeit der Ergebnisse. An einem normalen Laptop kann eine Simulation für ein Stadtviertel innerhalb eines Tages durchgeführt werden.

Simulationen, die das Mikroklima mit lokalen Winden berücksichtigen, brauchen in der Regel CFD Modelle wie OpenFOAM oder CIM. Diese können mit CitySim in einer Co-Simulation gekoppelt werden, aber brauchen sehr genaue 3-D Modelle sowie Rechencluster um innerhalb von mehreren Wochen, die Auswirkungen auf denselben ausgesuchten einzelnen Tag zu berechnen. Wir werden nicht auf diese Co-Simulation im Laufe des Projekts zurückgreifen. Ohne Co-Simulation nehmen wir als Hypothese, dass das Mikroklima in allen Simulationen gleich ist. Somit berechnen wir relative Unterschiede zwischen den Szenarien und keine absoluten.

2.4.2 Aufbau der Simulation

Die Simulationen ermöglichen es, die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Arten von begrünten vertikalen Fassaden, troggebundene Fassadenbegrünung und modulare Bepflanzung, zu verstehen.

Bei der Fallstudie handelt es sich um ein zweigeschossiges Gebäude des Zürcher Gewächshauskomplexes mit der Adresse Sackzelg 25 in 8047 Zürich, das derzeit als Lager genutzt wird und das im Kapitel 2.2.1.1 beschrieben wurde. Im Anschluss an die Klimamessungen der ZHAW-Partner im Juli 2020 wurde im Rahmen des Projekts die Übereinstimmung zwischen den Messungen und der Software-Simulation überprüft. Letztere testete eine Softwareimplementierung von Grünflächen auf vertikalen Objekten wie Gebäudefassaden.

Der Vorteil von CitySim ist die gleichzeitige Berücksichtigung der Auswirkungen von Begrünungen im Aussenbereich sowie die Tageslichtsimulation für die Auswirkungen auf das Innenklima. Im Vergleich zu herkömmlicher Gebäudeenergie-Simulationstools berücksichtigt CitySim die Interaktion mit der Umgebung, dem nahen und weiten Horizont und dem Klima, um die Modellierung des Energieverbrauchs und des thermischen Komforts im Gebäude zu verbessern. Zweitens kann durch CitySim der Einfluss der Begrünung außerhalb des Gebäudes untersucht werden, wodurch die städtische Wärmeinsel auf lokaler Ebene berücksichtigt wird.



Die Simulation verwendet das von der Stadt Zürich zur Verfügung gestellte und mit SketchUp® modifizierte 3D-Modell des Gebäudes und seiner Umgebung sowie den von Meteonorm® bereitgestellten Horizont und die Klimadaten.

Das Projekt basiert auf der Umsetzung von zwei vertikalen grünen Wänden, die von der Außenhülle des Gebäudes abgetrennt sind, einer troggebundenen Fassadenbegrünung und einer grünen modularen Fassade. Bei den Messungen vor Ort wurden Klimadaten an zwei verschiedenen Positionen gesammelt: hinter der troggebundenen Wand und an der exponierten Wand im ersten Stock des Gebäudes (aber nicht hinter der modularen Wand).



Abbildung 30: Sicht auf das Areal mit Darstellung in CitySim der simulierten Fassaden in Rot. Quelle links: OpenStreetMap, Quelle rechts: Eigene Darstellung in CitySim

Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig zu verstehen, dass beide grünen Wände gegen Norden ausgerichtet sind, wodurch die potenziellen Auswirkungen der Begrünung auf die Klimaregulierung minimiert werden, da keine direkte Sonneneinstrahlung auf diese nordorientierte Fläche vorliegt. Außerdem beschränken sich die in die Simulation integrierten Mechanismen auf Verschattung und Verdunstungsleistung. Der Energieverbrauch für Heizung und Kühlung wurde durch die Annahme eines Standardverbrauchs simuliert, da das Gebäude, an dem die Messungen in Zürich durchgeführt wurden, nicht mit einem System ausgestattet ist.

Da das Gebäude nicht von Menschen benützt wird, wurde das Gebäude des Idiaps für die Tageslichtstudie gewählt.

Model für Reduzierung des Tageslichtpotenzials bei begrünten Fassaden

Begrünte Fassaden können einen erheblichen Einfluss auf das Tageslicht in Gebäuden und damit auf einen möglichen Anstieg des Stromverbrauchs für die elektrische Beleuchtung haben. Im Folgenden wird der potenzielle Anstieg des Stromverbrauchs in einem typischen Bürogebäude untersucht. Abbildung 29 zeigt den Raum 103 des Centre du Parc in Martigny mit den folgenden Merkmalen:

- Ein Einzelbüro mit einem großen Fenster in Richtung Südwesten,
- Das Büro ist mit elektrischen Jalousien ausgestattet,
- Das Büro ist mit dimmbaren LED-Leuchten ausgestattet.

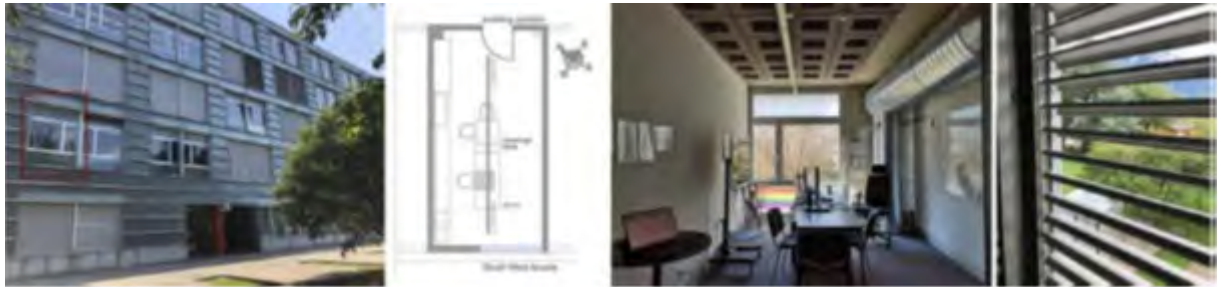


Abbildung 31: Bürogebäude im Centre du Parc in Martigny, mit einem nach Südwesten ausgerichteten Einzelbüro.

Das Büro 103 wurde mit einem automatischen Steuerungssystem für das BFE-Projekt LUCIDELES (Nembrini und Kämpf, 2023) ausgestattet. Die Beleuchtungsstärke des Schreibtisches wird in Abhängigkeit vom Sonnenstand, der diffusen und globalen Bestrahlungsstärke und der Position der Jalousien berechnet (Basurto et al., 2022). Die elektrische Beleuchtung wird in ihrer Intensität so gesteuert, dass sie 500 lx auf der Arbeitsebene erreicht und das durch die Jalousien einfallende Tageslicht nur in der erforderlichen Weise ergänzt.

Um die Wirkung der Vegetation auf die Reduzierung des Tageslichts im Raum nachzuahmen, haben wir die Jalousien auf 0° (horizontale Lamellen) eingestellt, was einer Transmission von 25 % entspricht. Das Modell zur Berechnung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch wurde für das ganze Jahr 2022 unter Berücksichtigung sehr unterschiedlicher Sonnenstände und klimatischer Bedingungen (zwischen bewölkt und sonnig) durchgeführt.

Dazu haben wir die globalen horizontalen und diffusen horizontalen Daten der MeteoSuisse-Wetterstation in Evionnaz, die Martigny am nächsten liegt, aus IDAWEB extrahiert.



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchungen Pflanzen zur Gebäudehüllenbegrünung

3.1.1 Pflanzenkatalog und Begrünungstypen für Fassaden

Um die Forschungsfragen der WP2 zu untersuchen, wurde eine Kategorisierung der geeigneten Pflanzen für die Gebäudehüllenbegrünung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in zwei Katalogen dokumentiert. Beide Pflanzenkataloge (boden- und wandgebunden) enthalten Arten für trockene bis frische, sonnige, halbschattige bis schattige Standorte. Dadurch werden alle Wandexpositionen (Nord-Ost-Süd-West) sowie verschiedene Intensitäten der Bewässerung abgedeckt. Dies wurde mit dem Ziel durchgeführt, für alle gängigen Situationen Anwendungsempfehlungen machen zu können.

Die ausführliche Liste der Kletterpflanzen sowie der krautigen Arten und Gehölzen sind dem Anhang 7.1 zu entnehmen. Neben den pflanzenspezifischen Angaben und Auswahlkriterien werden in der Liste auch Angaben zur Ökologie und Pflege gemacht. Die Ergebnisse werden exemplarisch im folgenden dargestellt, sind aber auch für andere Anwendungskriterien verfügbar:

Auszug aus dem Pflanzenkatalog bodengebundene Begrünung (Kletterpflanzen):

Analog der Auswertung der Lebensbereiche wie im Kapitel 2.2.1.4 (S.24) beschrieben, wird folgend beispielhaft für den gesamten Katalog eine trockene-sonnige-Variante, eine frisch-humose-sonnig bis halbschattige Variante sowie eine frisch-schattige Variante visualisiert. Jeder Pflanzenstandort ist jedoch verschieden und muss neu geplant werden.

Da das Sortiment an einheimischen, stadtklimatauglichen Kletterpflanzen beschränkt ist, werden an dieser Stelle Arten aus verschiedenen Florengebieten vorgeschellt. Keine der Arten zeigen jedoch invasives Potenzial. Welche flugmobile Fauna von den Pflanzenarten profitieren ist in den Pflanzenlisten im Anhang abgebildet.

Beispiel für Süd / Süd-West Fassade, keine Bewässerung

- Eigenschaften des Pflanzenstandortes: trocken, sonnig, und heiss mit durchlässigem, magerem Substrat (hoher mineralischer Anteil), niedriger Nährstoffbedarf
- Bewässerung: Keine, nur Niederschlagswasser
- Grün und Gebäude: Sommerlicher Wärmeschutz, Grüner Vorhang, gefiedertes Laub – Lichtdurchlässig
- Klimawirksamkeit: Hitzeminderung durch Beschattung, wenig Evapotranspiration da die Pflanzen die Verdunstung an Hitzetagen einstellen



			
Gattung / Art	<i>Clematis orientalis</i>	<i>Clematis flammula</i>	<i>Lycium chinense</i>
Lebensbereich	6.1.3.9	6.3.1.9	6.1.3.5
Höhe in m / Blüte	8 / 8-9	5 / 7-9	4-6 / 6-9
Kletterform	Blattstielranker	Blattstielranker	Blattstielranker
Bemerkungen	Winterschmuck Samenstände	duftet	Beeren essbar
			
Gattung / Art	<i>Jasminum officinale</i>	<i>Periploca graeca</i>	<i>Rosa setigera</i>
Lebensbereich	6.3.1.9	6.3.2.9	6.3.3.9
Höhe in m / Blüte	10 / 6-9	15 / 7-8	5 / 6-8
Kletterform	Spreizklimmer	Schlinger	Spreizklimmer
Bemerkungen	Duft, in Stadtklima winterfest	genügsam	Blütenschmuck
			
Gattung / Art	<i>Campsis x tagliabuana</i>	<i>Passiflora caerulea</i>	<i>Jasminum nudiflorum</i>
Lebensbereich	6.3.2.9	6.3.1.9	6.3.1.9
Höhe in m / Blüte	5 / 7-9	4 / 6-10	3 / 1-4
Kletterform	Schlinger	Sprossranker	Spreizklimmer
Bemerkungen	robust, leuchtende Blüte	in Stadtklima winterfest	sehr trocken resistent

Abbildung 32: Beispiel für Kletterpflanzen an einer Süd, Süd-West Fassade, sonnig und trocken, ohne Bewässerung (Eigene Darstellung, Bilder Baumschule Horstmann und Wikipedia)

Beispiel Nord-West – West Fassade, mit gelegentlicher Bewässerung

- Eigenschaften des Pflanzenstandortes: Frisch, sonnig- halbschattig, warm, humoser Boden, mittlerer Nährstoffbedarf
- Bewässerung: In der Anwuchsphase und bei langanhaltender Trockenheit
- Grün und Gebäude: Sommerlicher Wärmeschutz, dichte Belaubung, gute Beschattung
- Klimawirksamkeit: Hitzeminderung durch Transpiration der Pflanzen, Beschattung



			
Gattung / Art	<i>Clematis vitalba</i>	<i>Berchemia racemosa</i>	<i>Lonicera x brownii</i>
Lebensbereich	2.5.3.9 (6.4.3.9)	3.2.1.9	6.4.4.9
Höhe in m / Blüte	30 / 7-9	4 / 6-7	3 / 5-8
Kletterform	Blattstielranker	Schlinger	Schlinger
Bemerkungen	regelmässiger Schnitt	selten, robust	robust
			
Gattung / Art	<i>Sinofranchetia chinensis</i>	<i>Akebia quinata</i>	<i>Clematis texensis</i>
Lebensbereich	6.4.2.9	7.4.5.9	6.4.1.8
Höhe in m / Blüte	5-10 / 5	10 / 5	6-9 / 2m
Kletterform	Schlinger	Schlinger	Blattstielranker
Bemerkungen	selten, mit Akebia verwandt	kann auch basisch stehen	Blütenschmuck

Abbildung 33: Beispiel für Kletterpflanzen für Nord-West und West Fassade mit Bewässerung, frischer Boden, Sonne bis Halbschatten.
(Eigene Darstellung, Bilder Baumschule Horstmann und Wikipedia)

Beispiel Ost / Nord-Ost Fassade, mit gelegentlicher Bewässerung

- Eigenschaften des Pflanzenstandortes: Frisch, halbschattig-schattig, humoser Boden, mittlerer Nährstoffbedarf
- Bewässerung: In der Anwachsphase und bei langanhaltender Trockenheit
- Grün und Gebäude: Dichte Belaubung = gute Dämmung im Winter
- Klimawirksamkeit: Hitzeminderung durch Transpiration der Pflanzen (nur in stark bebauten Gebieten)



			
Gattung / Art	<i>Ampelopsis delavayana</i>	<i>Aristolochia macrophylla</i>	<i>Clematis virginiana</i>
Lebensbereich	9.1.5.9 (6.4.2.9)	2.4.6.9	2.4.5.9 (4.3.4.9)
Höhe in m / Blüte	8 / unscheinbar	10 / 5	6 / 8-9
Kletterform	Sprossranker	Schlinger	Blattstielranker
Bemerkungen	auffallende Beeren	Grosse Blätter	Duftend
			
Gattung / Art	<i>Lonicera x americana</i>	<i>Rosa arvensis</i>	<i>Hydrangea petiolaris</i>
Lebensbereich	3.3.7.9	3.3.6.6	7.2.6.9
Höhe in m / Blüte	8 / 6-9	4 / 6-7	10-20 / 6-7
Kletterform	Schlinger	Spreizklimmer	Wurzelkletterer
Bemerkungen	Duft in der Nacht	einheimisch	nur an intakte Mauern

Abbildung 34: Beispiel für Kletterpflanzen für Ost, Nord-Ost Fassade mit Bewässerung, frischer Boden, Halbschatten. (Eigene Darstellung, Bilder Baumschule Horstmann und Wikipedia)

Auszug Pflanzenkatalog wandgebundene Fassadenbegrünung

Im Folgenden werden anhand der Gesamtliste (Anhang) zwei Beispiele für mögliche Pflanzenzusammenstellungen visualisiert. Die Zusammenstellungen geben nur eine Möglichkeit von vielen Kombinationen wieder. Bei der Artenwahl wurde auf eine begrenzte Höhe bei 40cm geachtet (modulare Begrünung) sowie einen über mehrere Monate anhaltenden Blühaspekt. Zudem sind alle Arten wintergrün, was für die grüne Fassade im Winter massgebend ist.

Die erste Auswahl (Abbildung 33) stellt eine trockene modulare Begrünung an einem sonnigen Standort an Süd bis Süd-West exponierten Wänden dar. Alle Arten sind an aride bis trockene Gegebenheiten angepasst und benötigen nur eine spärliche Bewässerung. Durch die Anpassung an die Trockenheit ist die Verdunstung gemäss der durchgeführten Saftflussmessungen in den Sommermonaten geringer als bei regelmässig bewässerten Wänden. Durch die verringerte Abstrahlung heizt sich die begrünte Wand jedoch weniger auf und kann dadurch zur Hitzereduzierung in urbanen Quartieren beitragen, was durch die Messungen der Oberflächentemperaturen sichtbar wird. Weiter ist die Artenzusammenstellung wertvoll für viele Wildbienen, Schmetterling und andere Insekten.



Die zweite Auswahl (Abbildung 34) ist angelehnt an eine frische modulare Begrünung an einem sonnig bis halbschattigen Standort. Die Pflanzen sind weniger Hitze und Wärme verträglich als bei der ersten Variante und an einen mesophilen Standort angepasst. Um diese Bedingungen zu schaffen, ist eine regelmässige Bewässerung zwingend. Durch die höhere Blattmasse und Wasserverfügbarkeit kann diese Begrünung durch die Verdunstungskühlung zur Hitzeminderung in der Stadt beitragen. Auch bei dieser Auswahl sind alle Arten wintergrün und haben interessante Blatttexturen. Sie bieten Nahrung für Schmetterlinge, Wildbeinen und andere Insekten (Wildstauden 2022).

Bei jeder Pflanze werden die Zeigerwerte, die Höhe, Blütezeit, Wuchsform sowie den Code für den Lebensbereich der Schweiz angegeben. Die Codes können im Anhang 7.1. nachgeschlagen werden. Das Symbol # deutet auf eine Wintergrüne Pflanze hin.



			
Gattung / Art	<i>Teucrium montanum</i>	<i>Melica ciliata</i>	<i>Thymus pulegioides</i>
Zeigerwerte	1+w+52-434	1+w42-44+4	2w32-434
Höhe in cm / Blüte	5-15 / 5-9	30-60 / 5-6	5-20 / 5-10
Wuchsform	polsterartig / #	horstig / #	polsterartig / #
Lebensbereich	3.3.1.5, 4.1.2	4.1.1	4.2.4
			
Gattung / Art	<i>Helianthemum nummularium</i>	<i>Geranium sanguineum</i>	<i>Prunella grandiflora</i>
Zeigerwerte	1+42-54+4	2w42-33+4	2w+42-43+4
Höhe in cm / Blüte	20-40 / 5-10	15-30 / 4-9	20-40 / 6-10
Wuchsform	lockeres Polster / #	kleinbuschig / #	Rosette / #
Lebensbereich	4.2.1.2	5.1.1	4.2.1.2
			
Gattung / Art	<i>Petrorhagia saxifraga</i>	<i>Koeleria vallesiana</i>	<i>Potentilla verna</i>
Zeigerwerte	1+42-44+4	141-545	1+32-44+3
Höhe in cm / Blüte	10-25 / 6-10	10-40 / 5-6	5-10 / 3-5
Wuchsform	lockeres Polster / #	horstig / #	kriechend / #
Lebensbereich	4.2.1.1	4.2.1.1, 4.2.2	4.2.2, 4.2.4

Abbildung 35: Die Pflanzenwahl simuliert eine trockene modulare Begrünung an einem sonnigen Standort an Süd bis Süd-West exponierten Wänden (Eigene Darstellung, alle Bilder von www.wildstauden.ch, # = wintergrün)



			
Gattung / Art	<i>Ajuga reptans</i>	<i>Origanum vulgare</i>	<i>Calamintha menthifolia</i>
Zeigerwerte	333-33+3	243-33+4	2+w43-344
Höhe in cm / Blüte	10-30 /	30-70 / 7-10	40 / 7-10
Wuchsform	Rosette, flache Polster / #	Buschig, aufrecht / #	Buschig, aufrecht / #
Lebensbereich	5.1.5	5.1.2	5.1.2
			
Gattung / Art	<i>Lamium maculatum</i>	<i>Prunella vulgaris</i>	<i>Viola tricolor</i>
Zeigerwerte	3+35-33+2	3+33-433	323-443
Höhe in cm / Blüte	20-50 / 3-10	10-25 / 6-10	10-20 / 3-9
Wuchsform	niederliegend, Ausläufer	Rosette / #	bienne, versamend / #
Lebensbereich	5.1.5	4.5.3	keine Angaben
			
Gattung / Art	<i>Geranium pyrenaicum</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Glechoma hederacea</i>
Zeigerwerte	333-342	333-333	3+w43-33+
Höhe in cm / Blüte	30-60 / 4-11	5-20 / 4-6	10-50 / 4-5
Wuchsform	aufrecht, verzweigt / #	niederliegend, Ausläufer / #	niederliegend, Ausläufer / #
Lebensbereich	5.1.5	5.2.1	5.1.5

Abbildung 36: Die Pflanzenauswahl simuliert eine frische, modulare Begrünung an einem sonnig bis halbschattigen Standort an Nord-West, Nord-Ost oder Ost Fassaden. (Eigene Darstellung, alle Bilder von www.wildstauden.ch, # = wintergrün)



3.1.2 Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen

Saftflussmessungen Stadtgärtnerei Zürich und MFO-Park

In der Stadtgärtnerei sind die drei Arten (*Actinidia*, *Vitis Seyval B* und *Vitis M*) gemäss einem Pairwise-Wilcoxon-Test mit Ausnahme des Zeitintervalls zwischen 7 und 8 Uhr, alle signifikant unterschiedlich zueinander hinsichtlich ihrer mittleren Saftflussraten ($p < 0.05$). Dieser durchschnittliche Tagesverlauf ist auf der Abbildung 35 graphisch dargestellt. Die höchsten Saftflussraten werden im Schnitt bei *Actinidia* beobachtet mit einem Peak im Zeitintervall von 18-19 Uhr (123.63 ml h^{-1}). Die tiefsten durchschnittlichen Saftflussraten werden durchgehend bei der *Vitis* 'Seyval B' beobachtet.

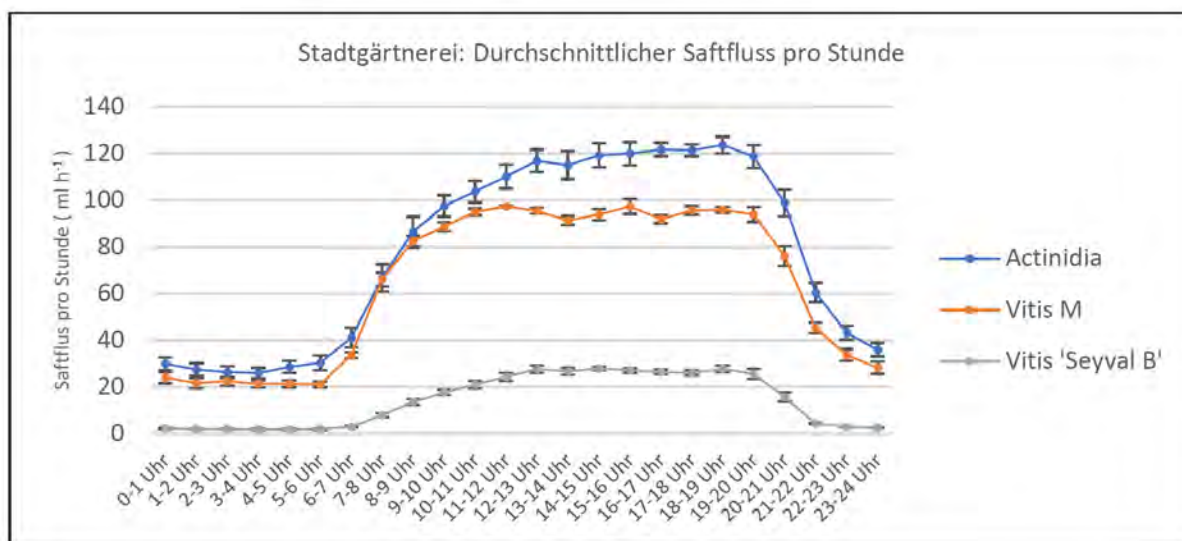


Abbildung 37: Durchschnittlicher Tagesverlauf der stündlichen Saftflussraten (inkl. Standardfehler) von drei Kletterpflanzen in der Stadtgärtnerei Zürich für die Messperiode vom 30.6.2020 – 12.7.2020. (Erstellt in Microsoft Excel, 2018) (Heti&Trachsel 2021)

Wie bei den Arten in der Stadtgärtnerei sind gemäss einem Pairwise-Wilcoxon-Test in allen Zeitintervallen, mit Ausnahme der Stunden 3-4 Uhr, 4-5 Uhr und 6-7 Uhr, alle Pflanzen signifikant unterschiedlich zueinander hinsichtlich ihrer mittleren Saftflussraten ($p < 0.05$). Dieser durchschnittliche Tagesverlauf ist auf Abbildung 36 zu sehen. Die höchsten Saftflussraten werden im Schnitt bei der *Wisteria* beobachtet, mit einem Peak im Zeitintervall von 16-17 Uhr ($977.99 \pm 16.52 \text{ ml h}^{-1}$). Die Rosen zeigen eine deutlich geringere Saftflussrate als die *Wisteria*, was unter anderem auch auf ihre Physiologie und natürlichen Lebensraum zurückgeführt werden kann. Rosen sind an trockene Bedingungen angepasst und haben einen Verdunstungsschutz durch das eher ledrige Blatt. Die *Wisteria* wird dem Lebensbereich der Auengehölze zugeteilt und kann als Pionier- und wasserpumpendes Gehölz hohe Verdunstungsraten erreichen.

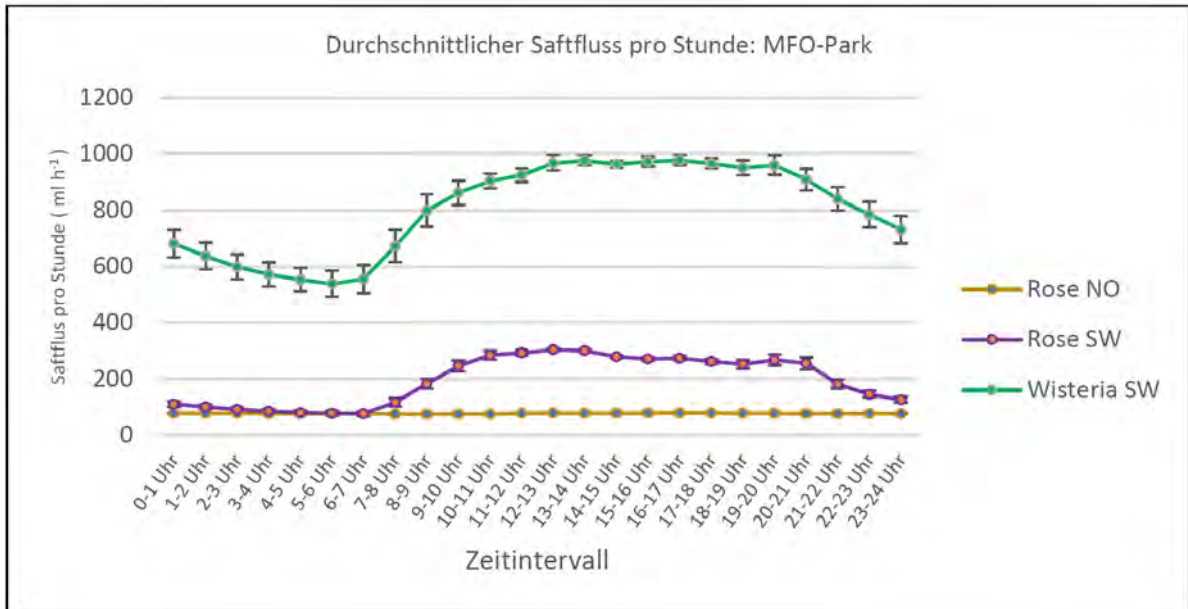


Abbildung 38: Durchschnittlicher Tagesverlauf der stündlichen Saftflusswerte (inkl. Standardfehler) von drei Kletterpflanzen im MFO-Park Zürich (Oerlikon) für die Messperiode vom 14.7.2020 - 31.7.2020. (Quelle: Hertig & Trachsel 2021)

Die Saftflussmessungen gaben aufschlussreiche Daten über die Transpirationsleistung der Kletterpflanzen. Um die Daten zu verifizieren, müssten die Messungen an weiteren Arten und differenten Standorten von trocken und heiss bis schattig und frisch durchgeführt werden.

Evapotranspiration von Fassadenbegrünungen in Regalbauweise oder Trögen – Lysimeter Messungen

Resultate

Die Tabelle 9 sowie die Abbildung 37 zeigen die zusammengefassten Daten für 3 Lysimeter für die Monaten April 2022 – August 2023. Dabei sind die Daten pro Monat aufgelistet. Die höchste mittlere ET pro Tag wird im Juli 2022 mit 9.53 mm beobachtet. Es ist anzumerken, dass die Daten, welche in den Wintermonaten (November-Februar) erhoben wurden mit grossen Unsicherheiten behaftet sind.

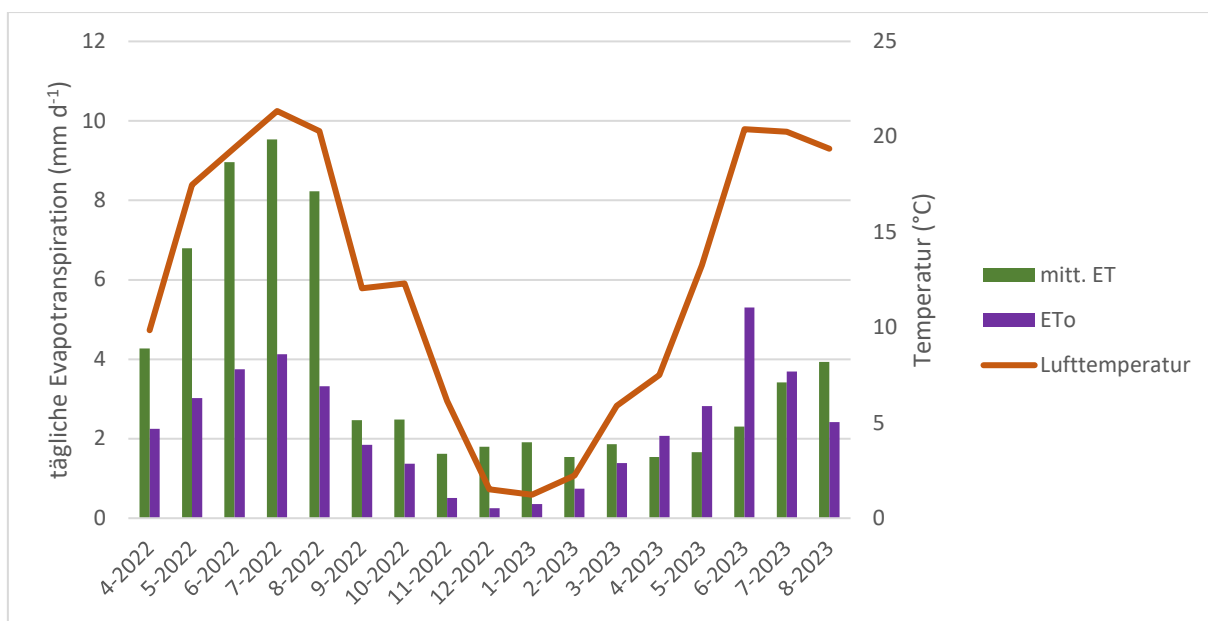


Abbildung 39: mittlere, monatliche Evapotranspiration (ET; Grün) und Referenzevapotranspiration (ET₀; Violett). Ebenfalls ist die mittlere Lufttemperatur pro Monat abgebildet.

Tabelle 15: Mittlere Evapotranspiration der Lysimeter (ET) und Referenzevapotranspiration (ET₀) pro Monat und Tag für die Messzeit April 2022-August 2023. Ebenfalls wird der Crop Coefficient (K_c; ET/ET₀) für die mittlere Tageswerte angegeben. Daten, welche in den Wintermonaten (grau) erhoben wurden, sind mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Jahr	Monat	Mittl. ET pro Monat ± SEM (mm)	Mittl. ET pro Tag ± SEM (mm)	ET ₀ pro Tag (mm)	K _c (Tag)
2022	April	91.02 ± 10.55	4.15 ± 0.33	2.25	1.85
2022	Mai	189.93 ± 5.13	6.79 ± 0.38	3.02	2.1
2022	Juni	264.98 ± 25.37	8.83 ± 0.85	3.75	2.14
2022	Juli	295.37 ± 9.44	9.53 ± 0.3	4.13	2.4
2022	August	246.87 ± 9.49	8.23 ± 0.32	3.32	2.3
2022	September	64.35 ± 8.28	2.47 ± 0.32	1.85	1.34
2022	Oktober	76.85 ± 13.87	2.48 ± 0.45	1.37	1.81
2022	November	48.47 ± 10.62	1.62 ± 0.35	0.51	3.15
2022	Dezember	55.95 ± 3.44	1.8 ± 0.11	0.25	7.20
2023	Januar	59.23 ± 8.7	1.91 ± 0.28	0.36	5.35
2023	Februar	43.13 ± 9.2	1.54 ± 0.33	0.74	2.07
2023	März	57.58 ± 8.33	1.86 ± 0.27	1.39	1.33
2023	April	46.35 ± 9.42	1.54 ± 0.31	2.07	0.75
2023	Mai	51.6 ± 9.71	1.66 ± 0.31	2.82	0.59
2023	Juni	69.36 ± 13.24	2.31 ± 0.44	5.30	0.44
2023	Juli	106.1 ± 13.92	3.42 ± 0.45	3.69	0.93
2023	August	121.73 ± 18.56	3.93 ± 0.6	2.42	1.63



Diskussion/ Fazit Lysimeter Messungen

Beim Vergleich der Ergebnisse mit Daten aus der Literatur, zeichnet sich ein heterogenes Bild ab. In einigen Studien, wo von Modulare Systemen die Evapotranspiration gemessen wurde, liegt die sommerliche Verdunstungsrate weit tiefer, als was in dieser Versuchsreihe gemessen wurde. Jedoch beziehen sich die Mehrheit dieser Studien auf kleine modulare Einheiten mit beschränkten Substrattiefen. In diesem Versuch wurden hingegen den Pflanzen mehr Wurzelraum geboten, um die Situation von wandgebundenen Pflanztrögen nachzuahmen. Ebenfalls wurden in diesem Versuch die Pflanzen zweimal täglich mit 10-12 L Wasser versorgt. In Vergleich zu anderen Studien ist dies viel.

Interessant ist die Auswirkung einer ausstehenden Bewässerung auf die Verdunstungsleistung. Ab November 2022 wurde die Bewässerung gänzlich eingestellt. So beobachten wir im Frühling und Sommer 2023 Kc Werte >1. Die Ausnahme bilden dabei März und August 2023.

3.1.3 Messung der Oberflächentemperatur und der gefühlten Kühlleistung (PET)

Die durchschnittlichen Tagesverläufe der PET beider Klimastationen sind in Abbildung 38 zu sehen. Die höchste PET im durchschnittlichen Tagesverlauf erreicht KS1 (mit Begrünung) im Zeitintervall von 18-19 Uhr (37.51 ± 2.47 °C) und KS2 (ohne Begrünung) im Zeitintervall von 19-20 Uhr (45.44 ± 2.4 °C).

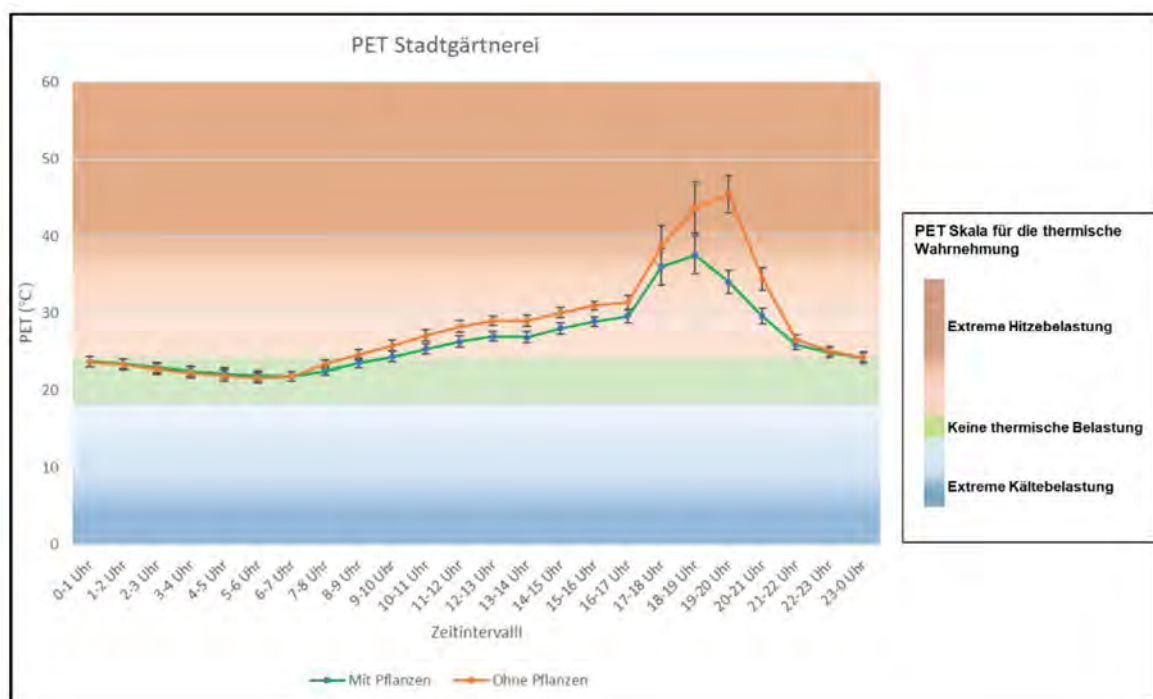


Abbildung 40: Durchschnittlicher Verlauf der stündlichen PET-Werte, der physiologischen Äquivalenz-Temperatur, gemessen von zwei Klimamessstationen in der Stadtgärtnerei Zürich für die Messperiode vom 17.7.2020 - 31.7.2020. Die grüne Linie zeigt den Verlauf einer Station hinter einer trogge-bundenen Begrünung und die orangene Linie, die einer Station vor einem unbegrünten Wandsegment auf gleicher Höhe. Eingezeichnet sind die jeweiligen Standardfehler als auch die PET-Skala der thermischen Belastung gemäss Mayer et al. (1997). (Erstellt in Microsoft Excel) (Heti&Trachsel 2021)

Während die Fassadenbegrünung in den meisten Fällen während des Tages statistisch gesehen keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen PET-Werte hat, kann sie dennoch zwischen 12 und 21 Uhr die Temperaturen überwiegend im Bereich einer leichten bis mässigen Hitzebelastung halten. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Referenzstation ab 12 Uhr mittags überwiegend starke Hitzebelastung



(mit einer extremen Hitzebelastung zwischen 18-20 Uhr). Der Kühlungseffekt der Fassadenbegrünung ist mehrheitlich auf die Reduktion der einfallenden Strahlung zurückzuführen.

Wärmebilder

Im Tagesverlauf vom 20.7.2020, war die durchschnittliche Oberflächentemperatur des begrünten Wandmodus stets im Bereich zwischen 28-29 °C währenddessen sich die durchschnittliche Oberflächentemperatur des unbegrünten Wandsegments im Bereich zwischen 30 und 35 °C bewegte.

Besonders interessant ist die Nachtaufnahme (Abbildung 39, um 22.31). Diese bestätigt die positive Wirkung von Grünflächen zur Auskühlung von Wandoberflächen in der Nacht und dem damit verminderten Hitzeinseleffekt.

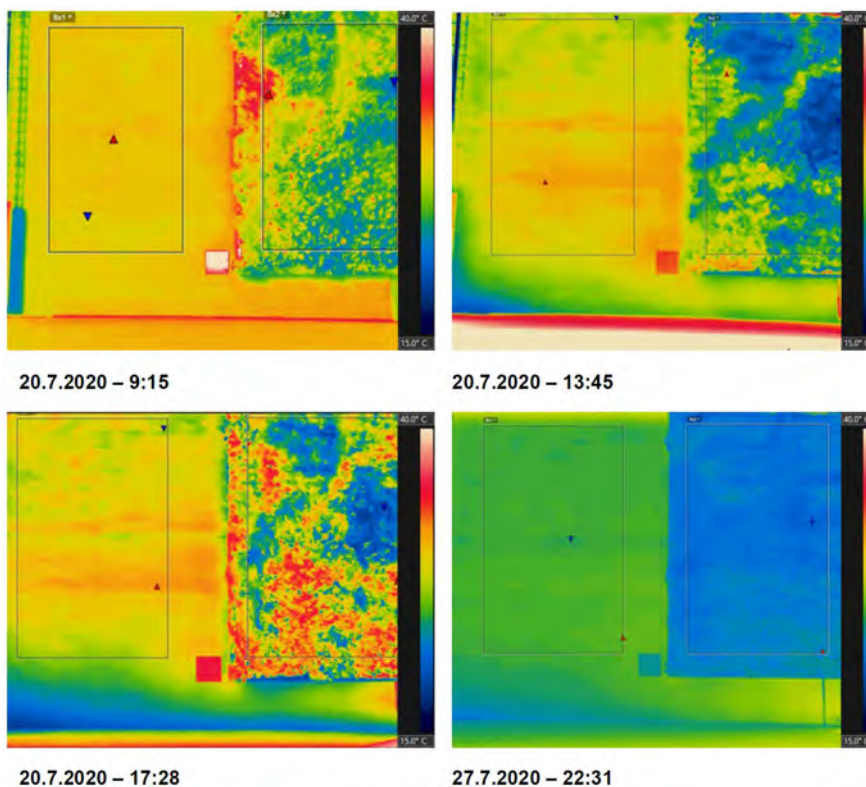


Abbildung 41: Thermalbildaufnahmen der Oberflächentemperatur bei der Stadtgärtnerei Zürich. Temperaturmaximum (rot) und -minimum (blau) sind mit Dreiecken gekennzeichnet. (Bilder: Tal Hertig, Bearbeitet in FLIR Tools+) (Hertig und Trachsel 2021)

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung Pflanzen zur Gebäudehüllenbegrünung:

- Für alle regional wichtigen Gebäudeausrichtungen und Umgebungsbedingungen konnten für die Kategorien punktuelle Begrünung, lineare Begrünung und flächige Begrünung Pflanzen identifiziert werden, welche den Nutzungsbedingungen bestmöglich entsprechen und diese in einem Pflanzenkatalog klassifiziert werden.
- Zur Ermittlung der spezifischen Parameter, die für die Quantifizierung des Einflusses der Begrünung auf die Energiebilanz von Gebäuden wurden Lysimetermessungen zur Ermittlung des Saftflusses und die Errechnung der Verdunstungsleistung, sowie der Verschattungsleistung



(Blattflächenindex) durchgeführt und dokumentiert. Maximalwerte von 120ml/h (Actinidia) 30ml/h (Rose NW) konnten gemessen werden.

- Mittels PET und Oberflächentemperaturmessungen wurden die Temperaturunterschiede an den Teststrecken aufgenommen im Vergleich mit und ohne Begrünungsmassnahmen. Hierbei sind Temperaturunterschiede in der Grösse von ca. 8K maximal, im Mittel ca. 1.4K vorzuweisen.



3.2 Gebäudeebene

Die Untersuchungen im Bereich der Quantifizierung des Einflusses der Begrünung wurde zunächst analytisch durchgeführt, um die Grössenordnung der zu erwartenden Resultate zu bestimmen, hierbei wurde das Vorgehen nach Penman-Monteith herangezogen. Anschliessend wurden Gebäude unterschiedlicher thermischer Trägheit mittels Software bSol simuliert.

Die detaillierten Ergebnisse befinden sich im Anhang 7.3., 7.4., sowie 7.5. (Simulationsarbeiten als Bachelor-Diplomarbeiten der HES-SO, Tran, Rod und Défago, sowie Merz, welche im Rahmen dieses Projekts in Zusammenarbeit mit dem Forschungsteam des vorliegenden Projekts durchgeführt wurden).

Die untersuchten fassadenbegrünungsspezifischen Parameter, wurden einzeln in bSol eingefügt um deren jeweiligen Einfluss auf den Energieverbrauch, die Überhitzungsstunden oder die Innentemperaturen zu quantifizieren.

3.2.1 Einfluss der Verdunstungsleistung

Die Verdunstungsleistung hat einen Einfluss auf die Temperaturen in der Nähe der Vegetation. Zur Vereinfachung wird diese Temperatur im Falle einer begrünten Fassade als identisch mit der Oberflächentemperatur der Wand betrachtet.

Die Überhitzungsstunden, die Anzahl der Stunden für die die durchschnittliche Raumlufthtemperatur über 26°C liegt, sinken bei einer kompletten Begrünung auf allen vier Fassaden um 9% bei einer Blattbreite von 10 cm und um 5% bei einer Blattbreite l_f von 1 cm. Bei einer Begrünung einer einzigen Wand und ein $l_f = 10$ cm sinken die Stunden nur um 2%. Die maximale Innentemperatur wird reduziert (Abbildung 40).

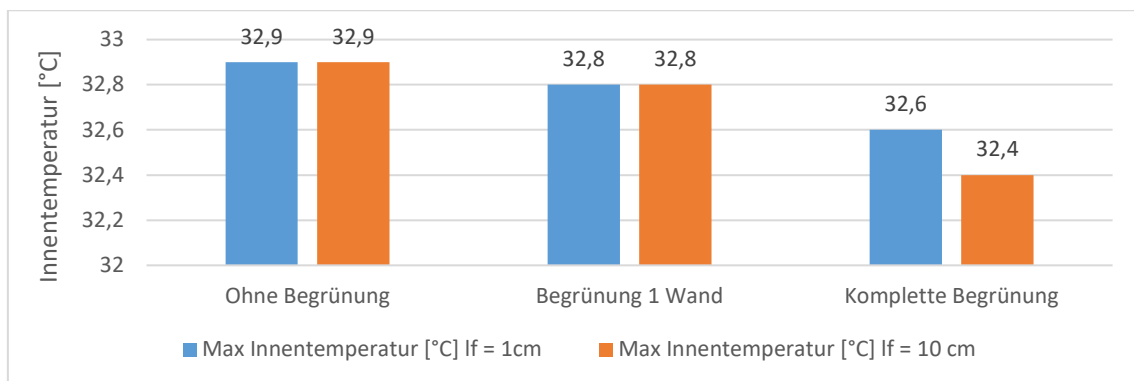


Abbildung 42: Einfluss der Oberflächentemperaturreduzierung auf die Raumlufthtemperatur. Quelle: Rod, 2022

Der Energieverbrauch für die Klimatisierung (Abbildung 41) nimmt bei einer Begrünung auf einer einzigen Wand um etwas mehr als 3% und bei einer kompletten Begrünung um 12% ab bei $l_f = 10\text{cm}$.

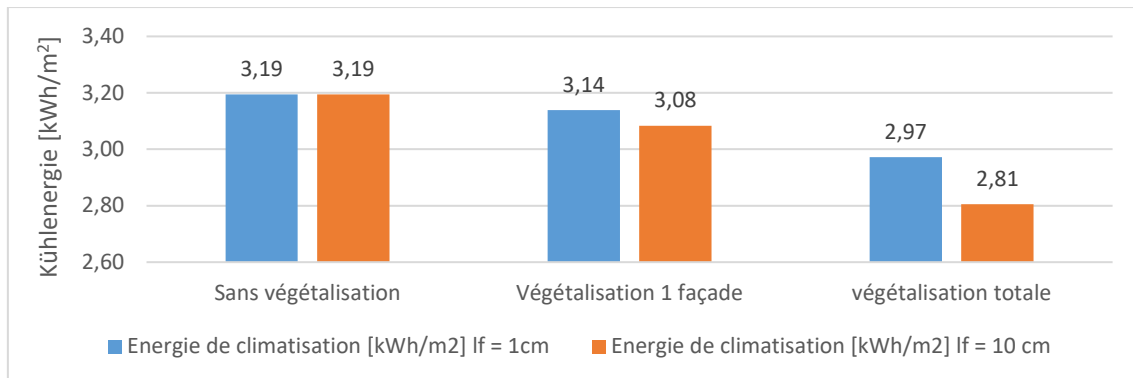


Abbildung 43: Einfluss der Oberflächentemperaturreduzierung auf den Energieverbrauch für die Klimaanlage. Quelle: Rod, 2022

Die Reduktion der Oberflächentemperatur durch die Verdunstungsleistung erscheint hier als nebensächlich insbesondere, wenn nur eine Wand begrünt wird, was in den meisten Fällen der Fall ist.

Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu geniessen, denn bSol hat seine Grenzen:

- Die Kühlleistung ist identisch für jede Fassade, was in der Realität nicht stimmt. Die Kühlleistung hängt auch von der Sonneneinstrahlung ab, die nach Fassadenausrichtung unterschiedlich ist. In bSol kann die Kühlleistung der Pflanzen nur indirekt integriert werden, indem die Aussentemperatur reduziert wird (siehe Kapitel 2.3.2). Diese Aussentemperatur wird anhand einer Klimadatei in bSol integriert und ist für jede Fassadenausrichtung identisch.
- Die Saisonalität wurde in Bezug auf die Begrünung ignoriert jedoch verändert sich das Blattwerk und somit das Albedo im Laufe des Jahres.
- Die Lüftung wurde ebenfalls ausser Acht gelassen. Letzte sollte allerdings zu einer stärkeren Reduktion der Innentemperatur beitragen und somit auch des Kühlverbrauchs.

3.2.2 Einfluss der Verschattung

Die Begrünung ist im Stande auf unterschiedliche Arten (Absorption, Reflektion) die solare Energie und die damit verbunden Energiegewinn im Gebäude zu reduzieren. Zusätzlich wird Energie für die Photosynthese und durch die Evapotranspiration umgewandelt. Diese Effekte lassen sich in der Simulation mittels bSol durch opake Bauteile, Fensterflächen (g-Wert) oder Verschattungsziffer darstellen.

Dafür wurde die Transmissivität ermittelt und als g-Wert für die Fenster in bSol eingefügt. Die Berechnung erfolgt nach dem Beer-Lambert-Gesetz:

$$\tau = \exp(-k * LAI) \quad (10)$$

τ = Transmissivität [–]

k = Extinktionskoeffizient [–]

LAI = Blattflächenindex (Leaf Area Index)[–]

Wobei der Blattflächenindex LAI angibt, wie viele Schichten von Blättern ein m² Bodenfläche bedecken können und der k-Koeffizient den Energieverlust durch Strahlung, der von der Ausrichtung der Sonne und der Blätter abhängt. Die Transmissivität sinkt exponentiell mit einem Anstieg des Blattflächenindex LAI und des k-Wertes.

Mit einer kompletten Begrünung und einer hohen Transmissivität von $\tau=0.75$ sinken die Überhitzungsstunden um 27% und die Kühlungsstunden um 20% (Abbildung 42 und Abbildung 43). Bei einer tiefen Transmissivität von $\tau=0.25$ sinken beide Indikatoren um 70% respektive 63%. Die



durchschnittliche Innentemperatur auf die Frühling-Sommer Periode nimmt dabei um 1.4% ab und der Klimakältebedarf (hier Kühlenergie genannt) um 76%.

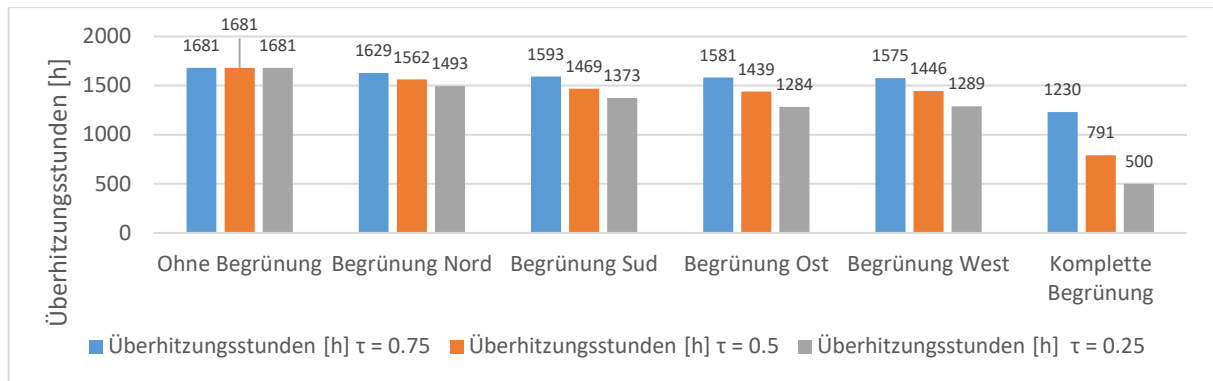


Abbildung 44: Überheizungsstunden nach Wandausrichtung und nach Transmissivität. Quelle: Rod, 2022

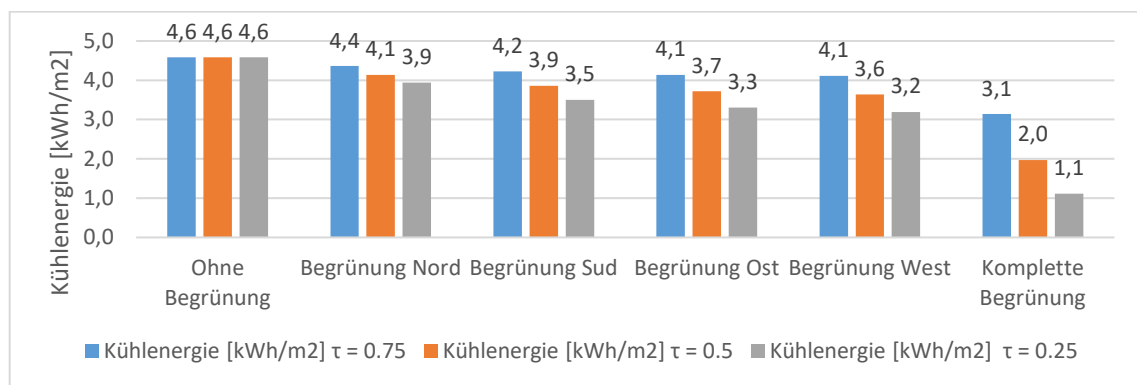


Abbildung 45: Kühlenergie nach Wandausrichtung und nach Transmissivität. Quelle: Rod, 2022

Dies zeigt, wie wichtig es ist, die richtigen Pflanzenarten auswählen mit dem richtigen Blattflächenindex LAI. Zudem hängt die Wirksamkeit der Begrünung von der Orientation ab. Am effektivsten ist die Begrünung in unserem Fall auf eine westliche Wandfläche, wenn es um die Reduktion der Überheizungsstunden geht. Die nördliche Fassade erscheint am ungeeignetsten.

Auch hier zeigt bSol seine Grenzen auf. Die Saisonalität des Blattflächenindex LAI wurde ignoriert. Die Möglichkeit den g-Wert für die Fenster zu variieren könnte dies ändern. Der g-Wert gibt den Gesamtenergiedurchlassgrad und somit auch die direkt durchgelassene Sonnenstrahlung an. Bei einem hohen Blattflächenindex sinkt der g-Wert, bei einem niedrigen LAI steigt der g-Wert. Dies müsste in bSol verändert werden (vgl. Software IDA ICE).

3.2.3 Einfluss von weiteren Parametern

Der Einfluss weiterer Parameter, die nicht unmittelbar mit einer Begrünung zusammenhängen wurde, untersucht. Das Ziel war es die Wirksamkeit der Begrünung im Vergleich zu anderen Parametern zu bewerten (Abbildung 44).

Einfluss der Aussentemperatur: Eine Erhöhung der Aussentemperatur um 1°C hat eine Erhöhung der Anzahl an Kühlungsstunden von 19% zu verantworten.

Einfluss der internen Wärmegewinne: Bei einer Verdoppelung der internen Wärmegewinne steigen die Kühlungsstunden um 57% und der Klimakältebedarf um 54%.



Einfluss der Solltemperatur für die Kühlanlage: Eine Reduzierung der Solltemperatur von 26°C auf 25°C im Sommer hat eine Erhöhung der Kühlungsstunden von 32% zu Folge.

Einfluss des Luftwechsels und des Sonnenschutzes: Eine Lüftung (Fenster- oder Zwangslüftung) mit einer thermischen Entlastung von 2.4m³/h wurde hinzugefügt. Diese läuft, wenn die Raumlufttemperatur über 22°C liegt und die Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur mindestens 2°C beträgt. Die Kühlungsstunden werden um 60% reduziert. Dazu wurden an allen Wänden Storen integriert mit einem g-Wert von 0.1. Diese schliessen sich, wenn die Innentemperatur über 24°C liegt. Die Kühlungsstunden werden dann um 88% gesenkt.

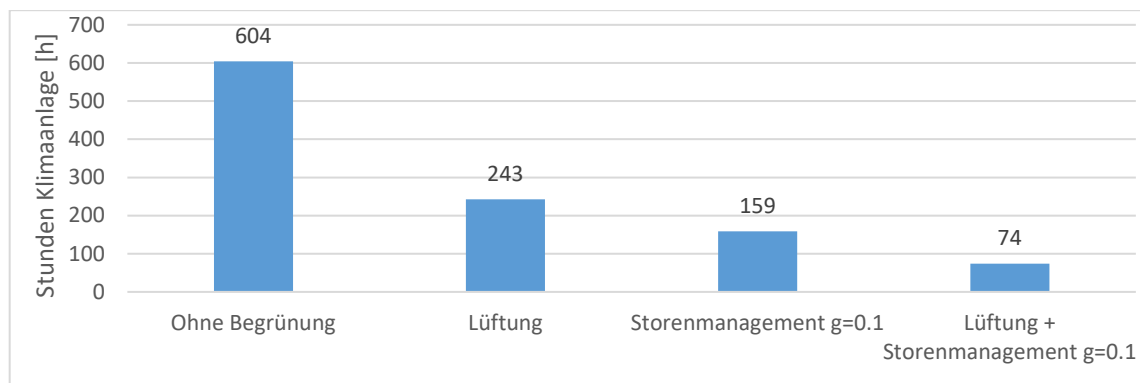


Abbildung 46: Stunden in denen die Klimaanlage funktioniert je nach angewandtem Parameter in bSol (ohne Begrünung). Quelle: Rod, 2022

Die Nutzung einer Klimaanlage hängt nicht nur von den äusseren Bedingungen wie der Sonneneinstrahlung oder der Temperatur ab oder von den internen Wärmegewinne aber auch vom Nutzungsverhalten der Bewohner.



3.2.4 Fallstudie mit der Energiebilanzgleichung von bSol in Matlab

Weitere Berechnungen wurden mittels der Energiebilanzgleichungen ohne das bSol User Interface durchgeführt. Das simulierte Gebäude ist immer noch das Gleiche und zeigt jeweils die gleiche Trägheit auf. Verschiedene Situationen von ohne Begrünung bis zur vollständigen Begrünung wurden simuliert.

Bei einer Begrünung der vier Aussenwänden mit einer nichtimmergrünen Pflanzenart sinkt die Oberflächentemperatur der Ostwand durchschnittlich um 0.9°C und maximal um 5.8°C . Dabei wurde die Methode ETo angewandt mit einem kc-Wert von 0.3 und eine Blattwerkdicke von 30 cm.

Wenn darüber hinaus die Fenster durch eine Begrünung verschattet werden mit einem maximalen Blattflächenindex LAI von 4, werden die Kühlungsstunden um 81%, die Kühlleistung um 5 kW und den Energieverbrauch der Klimaanlage um 89% gesenkt. Dies muss aber mit der eventuell nötigen Energie für zusätzliche Beleuchtung gegengerechnet werden, da dies durch die fehlende Sonneneinstrahlung nun nötig ist. Bezüglich des thermischen Komforts wird die Innentemperatur ohne die Nutzung einer Klimaanlage um durchschnittlich fast 3°C gemindert und um maximal 7°C . Eine Verschattung der Fenster führt automatisch zu einem anderen Effekt: Die Benutzer werden eine Tageslichtlampe brauchen, die auch Energie verbraucht, wenn auch weniger als Klimaanlage.

Der jeweilige Einfluss der einzelnen Parameter wurde ebenfalls untersucht. Die Verschattung durch die Begrünung an den Fenstern hat die stärkste Wirkung. Dies kann man in der Abbildung 45 anhand der nötigen Kühlenergie sehen. Die anderen Parameter, sprich die Oberflächentemperatur der Wände oder der Fenster, die durch die Begrünung begünstigt wird, sowie die Temperaturminderung dank der Belüftung haben nur einen geringen Einfluss auf die Kühlenergie. Bei der Belüftung wird nur die Temperatursenkung untersucht, die durch das Öffnen der Fenster einhergeht, die Dank der tieferen Aussentemperatur nahe der Begrünung effektiver ist.

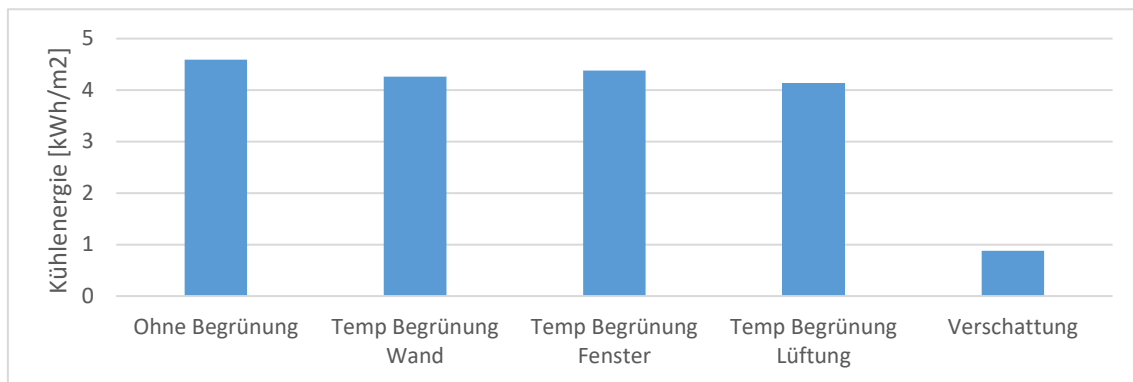


Abbildung 47: Reduzierung des Klimakältebedarfs nach Parameter der Begrünung. Quelle: Rod, 2022

Wenn wiederum nur eine Wandbegrünung untersucht wird, das heisst dass die Begrünung in diesem Fall nicht vor den Fenstern entlangläuft und zusätzlich die Regulierungsparameter hinzugefügt werden, sprich eine intelligente Regulierung der Storen und eine intelligente Belüftung (mit Luftfeuchtigkeit- und Wärmekapazität Veränderung) sehen die Resultate wie folgt aus:

- Die maximale Raumlufttemperatur beträgt 27°C was eine Reduzierung von 4% darstellt im Vergleich zu einer Situation ohne Begrünung.
- Die Kühlungsstunden werden um 79% gesenkt im Vergleich zu einer Situation ohne Begrünung.

Auffällig ist, dass die Begrünung im Vergleich zu einer Storenautomatisierung (hier Verschattung) und einer Zwangsbelüftung nur einen geringen Nutzen aufweist, was die Raumlufttemperatur angeht (Abbildung 45). Bei einem Gebäude ohne intelligente Regulierung kann die Begrünung allerdings wesentlich zum thermischen Komfort beitragen.

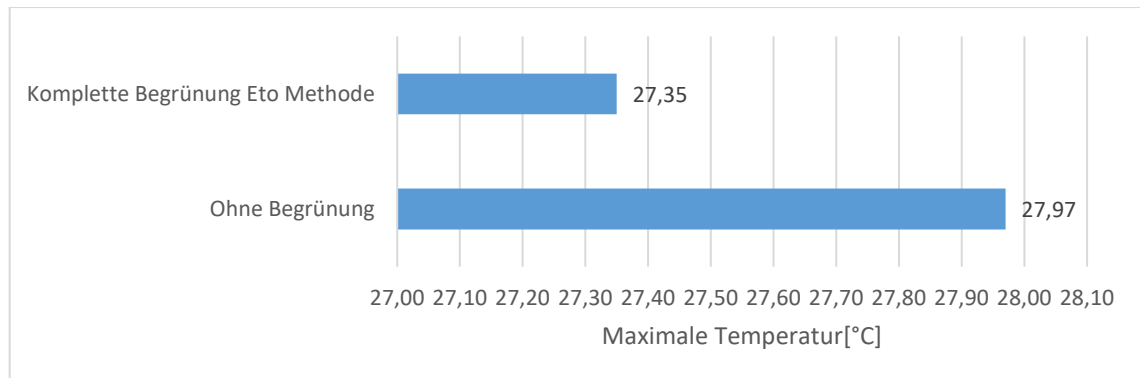


Abbildung 48: Nutzen einer Begrünung im Vergleich zur Regulierung der Storen und der Belüftung. Quelle: Rod, 2022

3.2.5 Fazit Begrünung und bSol

Mit dem Simulationstool bSol können gebäudespezifische Parameter einfach verändert werden, um verschiedene Energiebilanzen zu quantifizieren. Die pflanzenspezifischen Parameter sowie das Zusammenspiel Begrünung-Gebäude benötigt jedoch weit mehr Veränderungen im Tool als vor Anfang des Projektes angenommen.

Zum einen ist es nicht möglich die Temperaturreduktion durch Verdunstungsleistung einfach direkt im Tool zu integrieren. In der Tat verändert dies die Bedingungen des Aussenklimas. Das Aussenklima insbesondere die Aussentemperatur wird als externer Inputparameter zusammengestellt, die für die Simulationen vorab in bSol bereitgestellt wird. Auf dem User Interface des Tools selbst kann das Aussenklima direkt nicht verändert werden. Die Gleichungen im Tool müssten angepasst werden, damit das lokale Klima eine dynamische Grösse während der Simulation wird.

Die Verschattung kann auch nicht saisonal variiert werden. Da die Verschattung durch die Begrünung verändert wird und diese Begrünung sich auch saisonal mit dem Wachstum der Pflanzen entwickelt, ist dies nicht optimal, zumal die Verschattung sich als eines der wichtigsten Aspekte herausgestellt hat.

Die Begrünung einer einzigen Wand muss auch durch Umwege erstellt werden. Ansonsten ermittelt bSol ein Durchschnittswert für die gesamten Wandflächen, was oft nicht zielführend ist.

Das Windprofil (Konvektion) kann nicht berücksichtigt werden.

Das Simulationstool ist im unveränderten Zustand bedingt geeignet, um den Einfluss einer Begrünung auf die Energiebilanz zu quantifizieren, die Anpassungen müssen derzeit von geübten bSol-Nutzern durchgeführt werden. Eine Anpassung des User-Interfaces wäre jedoch möglich.

Fazit: Laut der Simulation in bSol kann die Kühlbedarf um von 4.6 kWh/m² auf 3.1 kWh/m² bei totaler Fassadenbegrünung abgesenkt werden. Durch eine niedrigere Transmissivität kann der Kühlbedarf sogar bis auf 1.1 kWh/m² abgesenkt werden. Das entspricht einem Einfluss von bis 30 bis zu 75%. Der Heizbedarf bleibt so gut wie unverändert.

Der Gesamtenergiebedarf setzt aus dem Heizbedarf von fast 30 kWh/m² und dem variablen Kühlbedarf zusammen. Somit konnte der Bedarf von insgesamt 34 kWh/m² auf maximal 30.5 kWh/m² abgesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion von maximal 11%.



3.3 Arealebene

3.3.1 Auswirkungen auf die Energiebilanz der Gebäude im Areal

Grundsätzlich bringt CitySim fast alle nötigen Voraussetzungen für die Integration von begrünten Fassaden auf Gebäude oder Arealebene mit. Die Resultate der CitySim Simulation gleichen den Messwerten. CitySim könnte somit bSol für die Gebäudesimulation ersetzen, braucht aber mehr Inputdaten. In den hier durchgeführten Simulationen wird nicht spezifisch auf die Lüftung eingegangen, da ist nicht mit dem Einfluss von grünen Fassaden zusammenhängt. Bei einer Außentemperatur von bis zu 35°C ist das ausgewählte Gebäude ohne begrünte Fassade von 282 Überhitzungsstunden pro Jahr betroffen, die durch die Anwendung von begrünten Fassaden um 60 % reduziert werden.

Der Kühlbedarf wird durch die beiden begrünten Wände um 16 % gesenkt bei einer Vegetationsdicke von 20%, während der Heizbedarf um 2 % steigt. Was die jährlichen CO₂-Emissionen betrifft, so führt der Kompromiss zwischen Kühlung und Heizung zu einem Anstieg der Emissionen um bis zu 692 kg CO₂ durch den Einsatz von begrünten Wänden. Dieser theoretische Anstieg würde durch ein fossiles Heizungssystem mit Klimaanlage entstehen, da die Pflanzen die solaren Energiegewinne im Winter durch Verschattung reduzieren. Je nach gewählter Pflanzenart kann dieser Effekt deutlich reduziert werden, wenn die Blätter im Winter nicht vorhanden sind. In der Simulation wird dieser Effekt nicht berücksichtigt. Bei der Berechnung wurde der durch die Begrünung gespeicherte Kohlenstoff nicht berücksichtigt, da dieser vernachlässigbar klein ist.

Im Worst-Case-Szenario mit der höchsten Tagesdurchschnittstemperatur kann die Innentemperatur um bis zu 1,1 °C gesenkt werden (Abbildung 47).

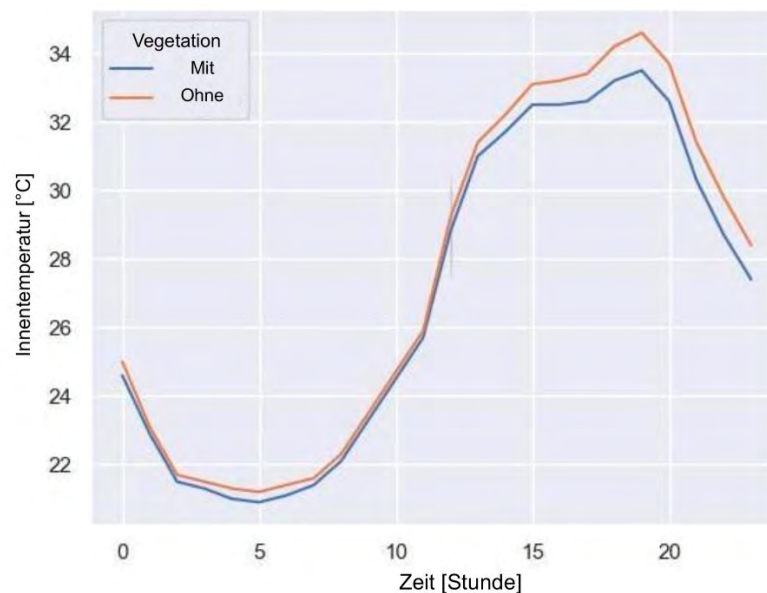


Abbildung 49: Innentemperaturreduzieren dank Begrünungsmassnahmen nach CitySim Simulationen. Quelle: Défago, 2023

Der Einsatz von begrünten Wänden wirkt sich auf den Wasserverbrauch aus, da bis zu 4,8 mm/m² Wasser pro Grünfläche benötigt werden, um lediglich die Evapotranspiration der Begrünung zu unterstützen. Der Verbrauch ist bei der modularen Wand um bis zu 11 % höher als bei der Wand mit Kletterpflanzen. Der Wasserbedarf dürfte aufgrund der Bodenverdunstung sogar noch höher sein. Die Wandbegrünung verlangt eine Lösung für die Wasserspeicherung in den warmen Monaten, um das Austrocknen der Pflanzen in Hitzeperioden zu verhindern. Ausserdem kann durch ungünstige



Orientation von Wind und Wand, der fallende Regen gar nicht an die Wand kommen. Somit sollte eine begrünte Fassade auch eine zusätzliche Bewässerungslösung enthalten.

Die Ergebnisse stimmen mit den in der wissenschaftlichen Literatur angegebenen Werten überein wie dies in der Übersicht (Besir,2018) zu sehen ist, zeigen aber aufgrund der nordwestlichen Platzierung der begrünten Wände eine geringe Wirkung.

Tabelle 16 Spezifischer Energieverbrauch des mit CitySim simulierten Gebäudes mit einer Fläche von 469 m²: Das nicht isolierte Gebäude hätte einen extrem hohen Energieverbrauch, wenn es beheizt würde.

	Mit begrünten Fassaden	Ohne begrünten Fassaden	Absolute Differenz [kWh/m ²]	Relativ [%]
Heizung [kWh/m ²]	321	314	6.56	2.09
Kühlung [kWh/m ²]	0.98	1.17	0.19	15.98

3.3.2 Auswirkungen auf die Umgebung: lokaler Massstab

Die Auswirkungen der Strahlungsbilanz der begrünten Wand sind auf die Nähe der Wände beschränkt und können bei einer Distanz ab 10 m als irrelevant angesehen werden. Andere Studien mit anderen Modellen zeigen andere Ergebnisse: Das Modell «Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat sources», kurz FITNAH, zum Beispiel, dass von Geo.Net benutzt wird, weist auf einen Effekt von mehreren Grad Celsius unterschied hin, der bis zu einer Entfernung von 14 m spürbar ist (Stadt Zürich). Dieselbe Quelle listet einige Parameter auf, die zu unterschiedlichen Resultaten führen können, darunter auch die Windrichtung oder die Ausrichtung der Begrünung. Das FITNAH Modell berücksichtigt den Wind aber eben nicht die Energiebilanz des Gebäudes. Beide machen eine Bilanzierung der eingehenden Sonnenstrahlung. CitySim berücksichtigt den Wind nicht aber verbindet die Energiebilanz mit der Sonneneinstrahlung. Die Fallstudie betrachtet eine Nordwand, somit wird auch diese Ausrichtung mittels CitySim simuliert. Dies könnte die schlechtere Effizienz zum Teil erklären. Ergebnisse der CitySim Simulation gelten ohne Einschränkung somit nur für windstillere Tage.

Die Reduzierung ist im Allgemeinen bei der modular begrünten Fassade höher als bei der Wand mit Kletterpflanzen, da das Simulationstool eine dichtere Vegetation simuliert. Durch die Integration von begrünten Wänden ist die mittlere Strahlungstemperatur der Fassaden im Durchschnitt um 2 °C und die Bodentemperatur um 0,17 °C niedriger, wenn sie weniger als einen Meter von der Wand entfernt ist. Im ungünstigsten Fall, das heisst bei der maximalen Durchschnittstemperatur, reduziert die mit Kletterpflanzen versetzte Wand ihre Oberflächentemperatur um 5 °C, die modulare Wand sogar um 6 °C.

Der thermische Komfortindex COMFA* in W/m² gibt den Wärmestrom durch die menschliche Haut an. Er unterscheidet sich innerhalb eines Radius von 3 m von den Fassaden erheblich. So kann der COMFA* in 2 m Entfernung auf bis zu 14,3 W/m² reduziert werden, während die COMFA*-Reduktion jenseits von 10 m unter 3 W/m² liegt. Im ungünstigsten Fall wird das lokale Klima durch die Begrünung zwischen 16 und 19 Uhr von der Klasse "sehr heiß" (über 200 W/m²) auf "heiß" (zwischen 120 und 200 W/m²) herabgestuft. Gerade für Menschen hohen Alters mit schwachen Herzkreislaufsystem kann diese Absenkung lebensrettend sein.

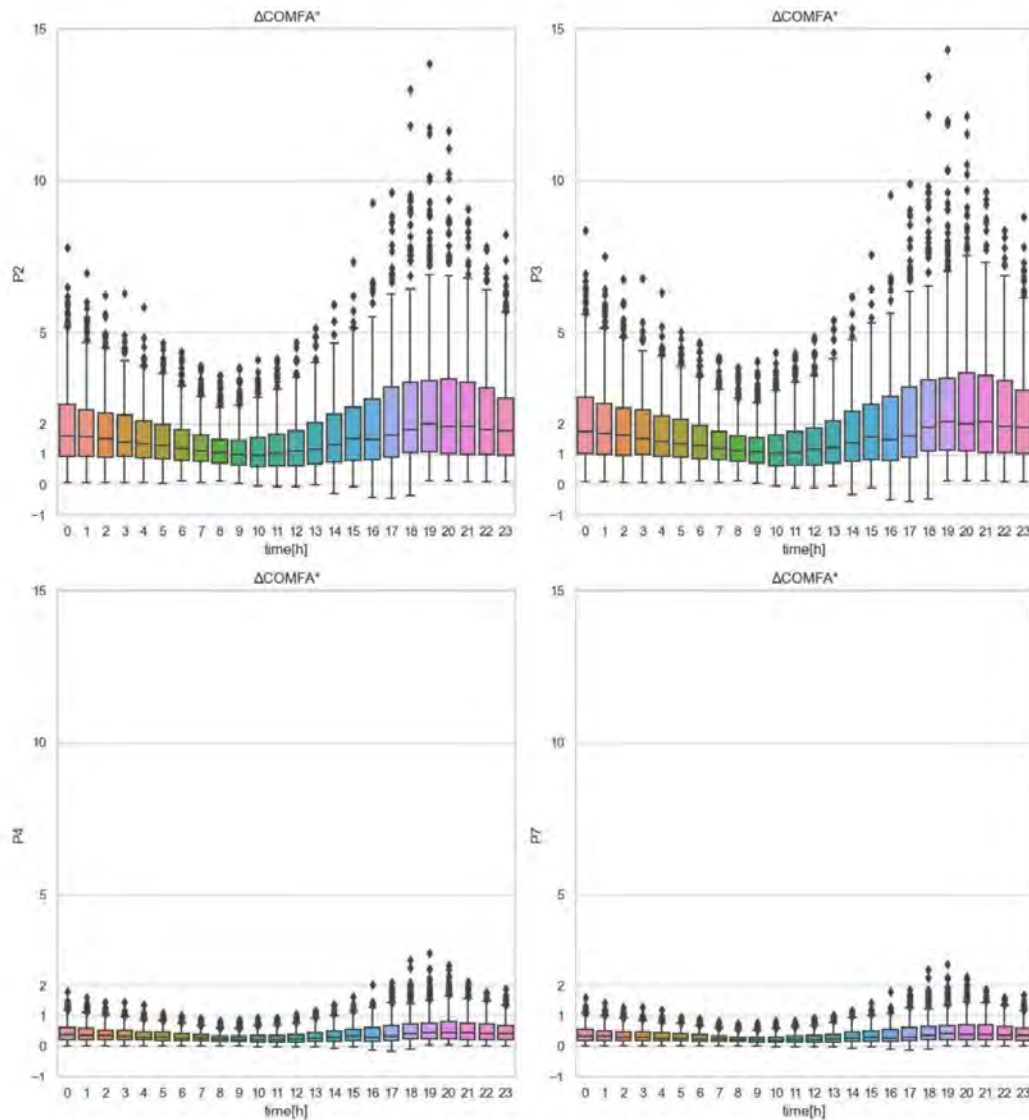


Abbildung 50: COMFA in Abhängigkeit von der Entfernung vom Gebäude. P2=Fussgänger 2 m vor der modularen Wand, P3=Fussgänger 2 m vor der Wand mit Kletterpflanzen, P4=Fussgänger in 10 m Entfernung zwischen den zwei Wänden und P7=Fussgänger in 13m Entfernung zwischen den zwei Wänden. Quelle: Défago, 2023

3.3.3 Simulationen für 2050

Die Simulationen nach den IPCC-Szenarien A2, ein Worst-Case Szenario und B1, ein optimistisches Szenario, zeigen keinen relevanten Unterschied. Die IPCC-Datensätze, die für die CitySim-Simulation für 2050 verwendet wurden, stammen von Meteonorm®. Die Klimadaten für 2050 unterscheiden sich nicht wesentlich von den gemessenen Daten für 2020, entweder weil die Modelle veraltet sind und auf alten Trends beruhen und/oder weil die IPCC-Trends, bei denen es sich um langfristige Durchschnittswerte handelt, die in den heißen Monaten beobachteten Spitzenwerte nicht berücksichtigen.

Wir stellen jedoch fest, dass der Vorteil von begrünten Wänden zwischen den Szenarien für 2020 und 2050 leicht zunimmt. Der MRT-Vorteil von begrünten Wänden steigt von 1,21 °C im Jahr 2020 auf 1,79



°C im Jahr 2050. Ebenso steigen die Überhitzungsstunden um 30 (2050 B1), während der Vorteil des Kühlbedarfs auf -14,2 % (2050 B1) sinkt.

3.3.4 Messungen und Simulation

Die gemessene mittlere Strahlungstemperatur (MRT) beträgt im Durchschnitt 2,5 °C zwischen der Wand ohne Begrünung und der Wand mit Begrünung (Kletterpflanzen). Der Simulationsvergleich deutet darauf hin, dass dies grösstenteils auf den Verschattungseffekt zurückzuführen ist und nicht auf die Verdunstungsleistung.

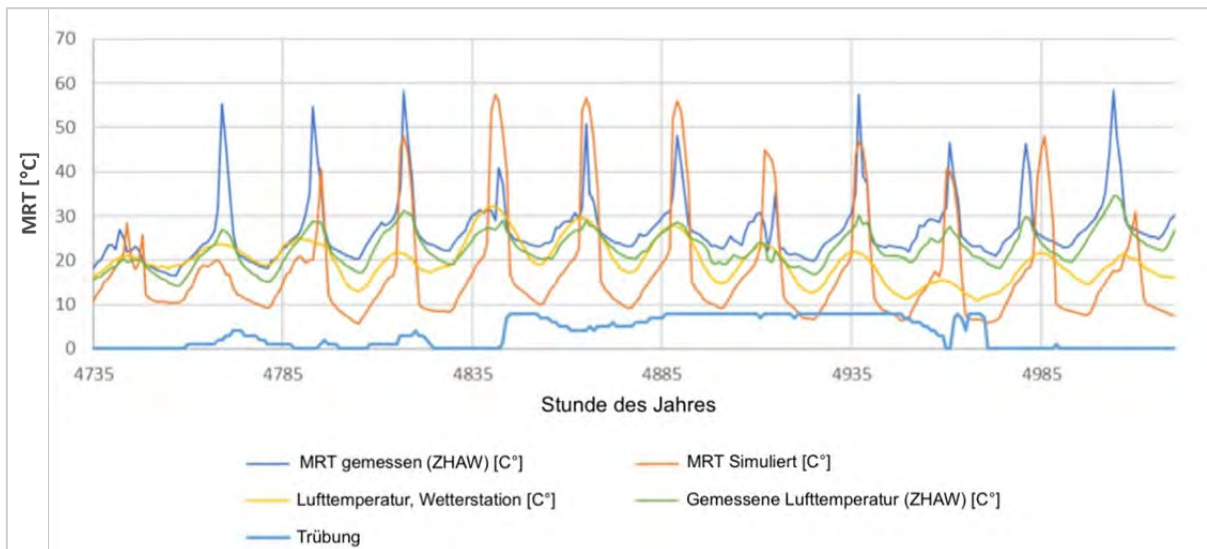


Abbildung 51: MRT gemessen und simuliert zwischen dem 17.07.2020 und dem 31.07.2020 hinter der Vorhangfassade (Kletterpflanzen). Quelle: Défago

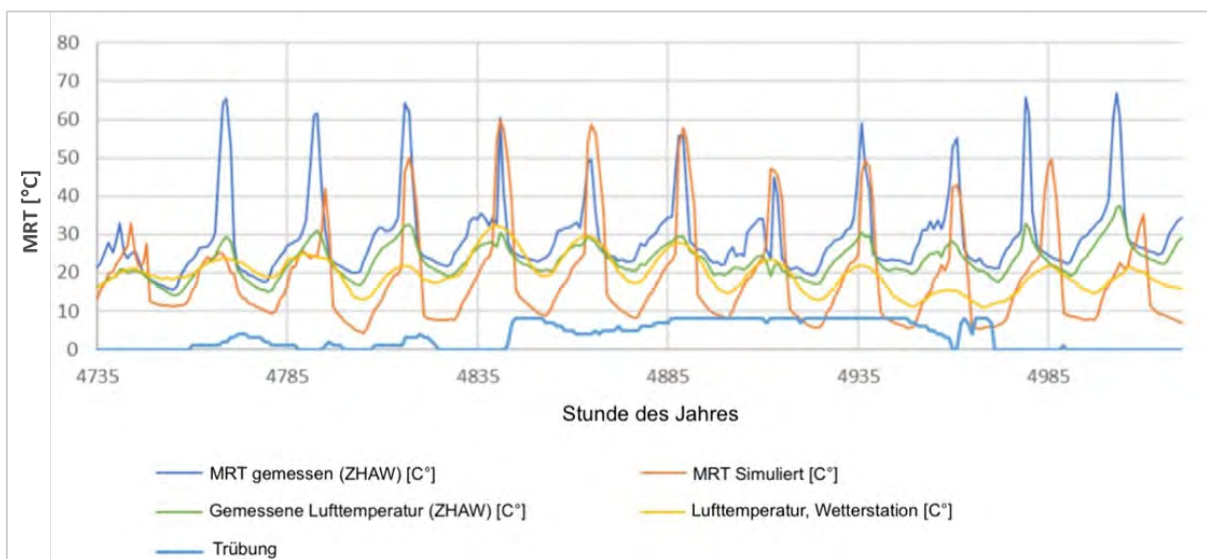


Abbildung 52: MRT gemessen und simuliert zwischen dem 17.07.2020 und dem 31.07.2020 vor der kahlen Wand. Quelle: Défago

Der grafische Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den MRT-Messungen von der ZHAW zeigt, dass die Simulationen als eine gute Schätzung angesehen werden können. Beim Worst-Case-Szenario sind ein Durchschnittsunterschied und eine lokale Divergenz bei den Spitzenwerten zu



beobachten. Wir können vermuten, dass dieser Unterschied mit der fehlenden thermischen Trägheit und der teilweisen Verschattung durch die Kletterpflanzen zusammenhängt. In der Tat wird in CitySim die Verschattung durch die Kletterpflanzen als perfekt und die Struktur, auf der diese Kletterpflanzen hängen als Beton angegeben, dies ist in der Realität allerdings nicht der Fall.

Andere mögliche Erklärungen sind die lokalen Variationen der Wetterdaten, die in CitySim verwendeten Klimadaten werden von drei Standorten in Zürich interpoliert, oder die unterschiedlichen Annahmen in der MRT-Berechnung (z. B. Windgeschwindigkeit).

3.3.5 Tageslicht

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch für vollständig geöffnete Jalousien, die unsere Ausgangsbasis darstellen, und horizontale Lamellen, die dem Bewuchs des Fensters entsprechen. Wir haben sechs Tage ausgewählt, einen bewölkten und einen sonnigen, um die Wintersonnenwende, die Frühjahrs-Tagundnachtgleiche und die Sommersonnenwende.

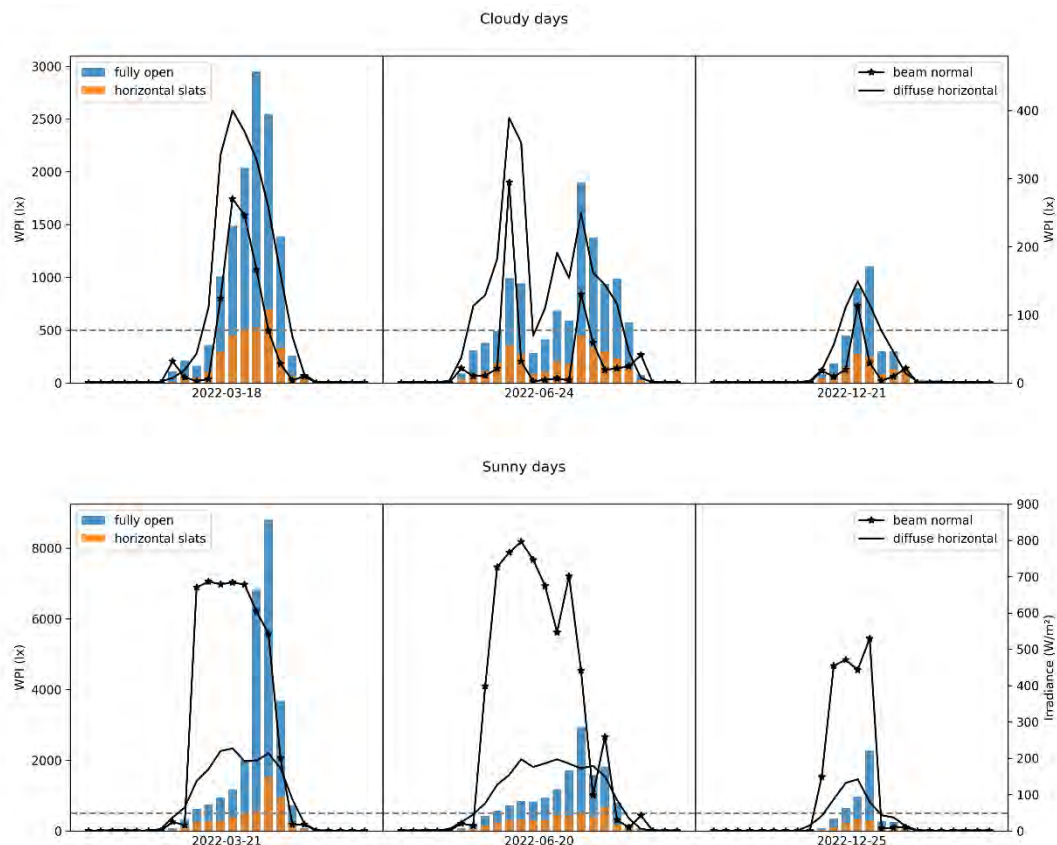


Abbildung 53: Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche (WPI) als Funktion der direkten normalen und diffusen horizontalen Bestrahlungsstärke für bewölkte und sonnige Tage zur Frühlings-Tagundnachtgleiche, im Sommer und zur Wintersonnenwende. Die gestrichelte Linie entspricht 500 lx der WPI

Wie in Abbildung 51 zu sehen ist, reduzieren die horizontalen Lamellen die Beleuchtungsstärke der Arbeitsebene deutlich in Richtung der horizontalen Linie von 500 lx nach der SIA-Norm für Büroarbeit - DIN EN 12464-1:2019. Wir haben außerdem den entsprechenden Stromverbrauch berechnet, indem wir die LED-Leuchten gedimmt haben, um während der Arbeitszeiten von 8 bis 18 Uhr insgesamt 500 lx auf dem Schreibtisch zu erreichen. Die Ergebnisse für die gleichen Tage sind in Abbildung 52 dargestellt.

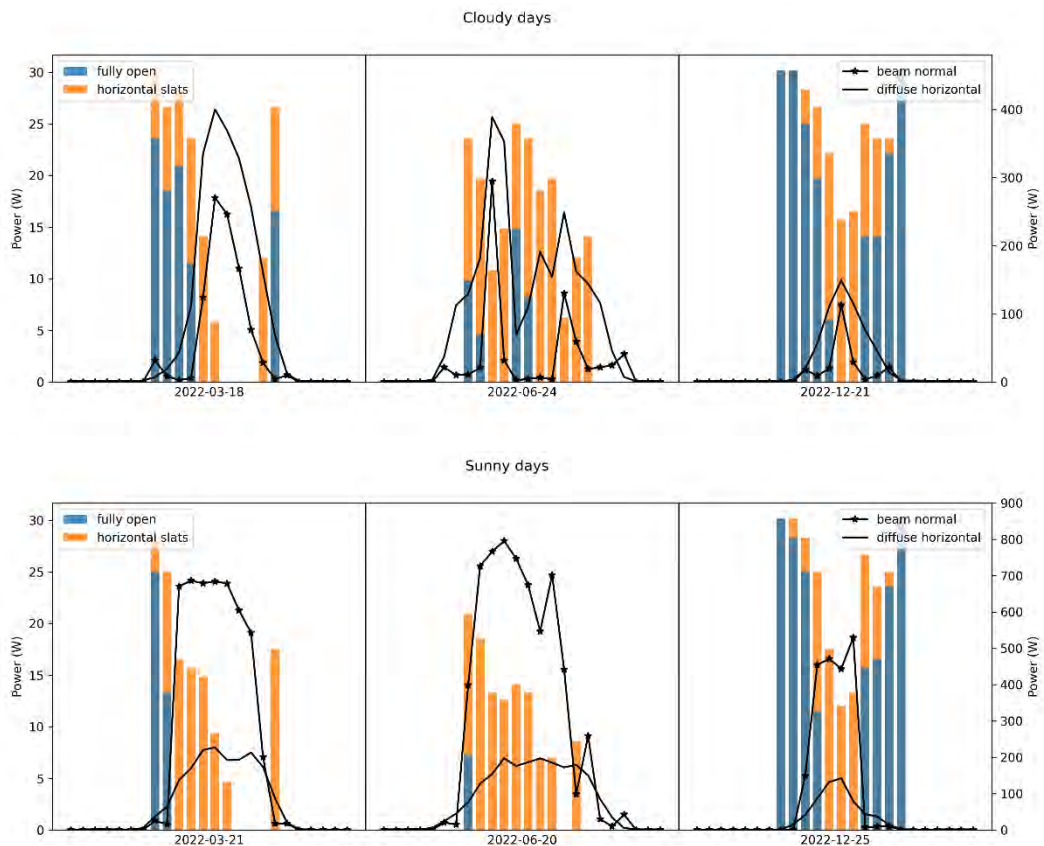


Abbildung 54: Stromverbrauch von dimmbaren LED-Beleuchtungen an den in Abbildung 51 dargestellten Tagen.

In Abbildung 52 ist zu erkennen, dass die horizontalen Lamellen fast immer den Einsatz von elektrischer Beleuchtung erfordern, um die Norm für die Beleuchtungsstärke der Arbeitsebene zu erreichen. Über das ganze Jahr hinweg beträgt der Stromverbrauch für die Beleuchtung bei vollständig geöffneten Jalousien 30.0 kWh pro Jahr und bei 0° geneigten Jalousien 68.8 kWh pro Jahr. Die Verbrauchssteigerung entspricht einem beeindruckenden Wert von +129%, was bei modernen dimmbaren LED-Beleuchtungen bei einem Strompreis von 0.34 CHF/kWh einem Plus von 13.20 CHF entspricht. Betrachtet man die nicht dimmbaren LED-Leuchten, so liegt der Stromverbrauch bei voll geöffneten Jalousien bei 90.6 kWh pro Jahr und bei Jalousien mit 0° Neigung bei 193.8 kWh pro Jahr. Der entsprechende Mehrverbrauch entspricht 114% und +35.1 CHF.

Unter Berücksichtigung der Hypothese, dass die Vegetation einen Transmissionsgrad von 25 % hat, der der horizontalen Neigung der Lamellen entspricht, können wir schließen, dass die Vegetation einen wichtigen Einfluss auf die Tageslichtversorgung in Gebäuden hat. Ihr Einfluss auf den Stromverbrauch mit dimmbaren oder sogar nicht dimmbaren LED-Leuchten ist jedoch gering im Vergleich zu den Energiekosten eines Bürogebäudes.

3.3.6 Fazit Begrünung und CitySim

CitySim, als Open Source Software, ermöglicht die Simulation von einzelnen Gebäuden bis hin zu Grossstädten. Diese Flexibilität bedingt: die Inputdaten müssen vorhanden sein und eine gute Qualität haben, da CitySim darauf basierend reproduzierbare Ergebnisse berechnet. Es ist die einzige Software, die Strahlenbilanzen pro Fassade zusammen mit Wärme- und Kältebedarf für jedes Gebäude abschätzt.

CitySim benützt Meteonorm ® für die Klimadaten. Dies sollte stets berücksichtigt werden speziell in Bezug auf die zukünftigen Klimaszenarien nach IPCC-Trends. CitySim kann aber auch andere



Klimadaten, die z.B. selbst erzeugt werden, verwenden. Für die Energieplanung sowohl auf Stadtebene wie auf Arealebene ist es von entscheidender Bedeutung, verlässliche Trends auf lange Sicht zu integrieren. Grünflächen sind von Klimafaktoren abhängig: In der Schweiz kommt es bereits zu Ausfällen von Begrünungen insbesondere von Gründächern aufgrund falscher Annahmen bei Extremwetterereignissen und Wartung. Konvektion durch Wind berücksichtigt CitySim nicht, verwendet für alle Fassaden die gleich Windgeschwindigkeit. Genaue CFD-Simulationen für Wind könnten helfen, sorgen aber für überproportionale Rechenzeiten: 1 Simulationsstunde braucht schnelle 1 Tag Rechenzeit.

Die CitySim-Simulation erfordert auch die intensive Nutzung von SketchUp® für die Erstellung des 3D-Modells. Das 3D-Modell wurde manuell angepasst, um mit CitySim kompatibel zu sein. Diese Abhängigkeit von externen Diensten kann eine zusätzliche Fehlerquelle darstellen, die schwierig zu beziffern ist.

Die Vielzahl an Daten die CitySim benötigt sind bekannt. Das kann als Hindernis betrachtet werden und für eine stadtweite Anwendung dazu zählen: Kohärenz zwischen den Oberflächen, topografisches Bodenmodell, Näherungswerte für Albedo und Baumaterialien, Energiesystem und -nutzung, k-Faktoren der Begrünung, Bodentemperatur im Untergrund und lokale Klimadaten, um die wichtigsten zu nennen. Die Ergebnisse der COMFA-Berechnung mit CitySim hängen von der Platzierung der Fußgänger ab: Wir schlagen vor, eine erste Simulation ohne Fußgänger durchzuführen und anhand der Ergebnisse Bereiche von Interesse zu ermitteln, in denen eine begrenzte Anzahl von Personen in den Hotspots platziert werden sollte. Die nächste Simulation liefert dann genauere Strahlenbilanzen pro Person mit und ohne Vegetation.

Die Alternative ist die Verwendung von vereinfachten 2D-Physikmodellen wie das InVest® Modell der Stanford University zur Identifizierung von Bereichen von Interesse, wie Blöcken oder kleinen Stadtteilen. Danach könnten detaillierte CitySim-Simulationen bei Bedarf an den identifizierten Objekten durchgeführt werden.

CitySim simuliert begrünte Wände: Mit den vorhandenen Messdaten kann eine begrünte Dachfläche auf eine vertikalen Fassadenfläche verschoben werden. Mit mehr Messwerten könnte auch verschiedene Begrünungstypen in CitySim implementiert werden. Diese Simulation auf Umwegen hat zur Folge, dass nicht alle Begrünungstypen simuliert werden können wie Kletterpflanzen an einer metallischen Struktur zum Beispiel. Wie bei einer Dachbegrünung wird bei einer Fassadenbegrünung ein volles Medium bzw. Träger angenommen, was eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit suggeriert und eine perfekte Windbarriere. Eine weitere Einschränkung für die hängende grüne Wand besteht darin, dass CitySim grüne Flächen nur eine Seite zuschreiben kann, wodurch in manchen Fällen wie bei hängenden Wänden Schatteneffekte vermisst werden.

Verschiedene Bepflanzungsmodelle zu simulieren stellt an sich keine Herausforderung dar. Es sollten aber im Idealfall für die Kalibrierung stündliche Messungen der Evapotranspiration an Fassaden vorliegen. Dies stand in dieser Studie aber nicht zur Verfügung und scheinen überhaupt schwierig zu bekommen zu sein.

Fazit: Das Gebäude in Zürich mit Messwerten zu der begrünten Fassade kann nur begrenzt als Referenz angesehen werden, da es eigentlich nicht beheizt ist. Allerdings stehen uns keine anderen Messwerte zur Verfügung. CitySim kann auf Gebäudeebene die Tendenzen von bSol bestätigen. Der Einfluss der zusätzlichen Beleuchtung, falls das Tageslichts durch Bewuchs der Fenster nicht mehr ins Zimmer kommt, ist mit maximal 100 kWh pro Jahr bei herkömmlichen Leuchtmitteln für ein Büro vernachlässigbar. Bei der Wahl von LED-Leuchten kann dieser Wert schon auf ca. 30 kWh pro Jahr reduziert werden.



Tabelle 17: Zusammenfassung der Parameter in bSol, CitySim und Envi-met. Bei Envi-met sind frei Felder Hinweise auf unklare Dokumentation.

		bSol	bSol + Matlab	CitySim	Envi-met
Parameter					
Open source		x	x	✓	x
Verschattung	Horizont	✓	✓	✓	
	Umgebung (andere Gebäude, Bäume, usw.)	x	x	✓	✓
	Storen	✓	✓	✓	
Klimadaten	Wind	x	x	✓	✓
	Sonneneinstrahlung	✓	✓	✓	✓
	Feuchtigkeit	✓	✓	✓	✓
	Aussentemperatur	✓	✓	✓	✓
Pflanzen	Verdunstungsleistung	x	✓	✓	✓
	Albedo	x	x	✓	
	Blatttemperatur	x	✓	✓	✓
	k-Wert	x	x	✓	
Gebäude	Differenzierte Parameter je nach Ausrichtung	~	✓	✓	
	U-Werte	✓	✓	✓	✓
	Heizleistung/Kühlleistung	✓	✓	✓	~
	Belüftung	✓	✓	✓	~
	Interne Wärmegewinne	✓	✓	✓	x
	Oberflächentemperatur	x	x	✓	✓
	Tageslicht	x	x	✓	✓
Indikatoren					
Energiebilanz		✓	✓	✓	~
Überhitzung		✓	✓	✓	~
Innerer Komfort	PET	x	x	x	✓
	Innentemperatur	✓	✓	✓	✓
Wärmeinsel		x	x	✓	✓

3.4 Gesamtenergiebilanz

Begrünte Fassaden wirken sich auf die Gesamtenergiebilanz positiv aus. Sie verbessert sich um ca. 10% bis 15%. Allerdings wäre die Bestätigung durch einen realen Fall wünschenswert, da der Fehlerbereich bei gut kalibrierten Simulationen in der gleichen Grössenordnung liegt. Somit kann der Benutzer des Gebäudes einen (unfreiwilligen) Einfluss auf das Ergebnis haben.



Eine begrünte Fassade kann auch vor Fenster wachsen. Damit sorgt sie für weniger Licht in dem dahinterliegenden Raum als empfohlen: Durch unsere Simulation eines Büroraumes konnten wir zeigen, dass dies den Energieverbrauch durch Einschalten einer LED-Leuchte erhöht. Aber der Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz des Gebäudes wäre mit ca. 30 kWh pro Jahr, Leuchte und Raum gering.

Der Einfluss von Wind wurde nicht simuliert, da er komplexe und Rechenintensive CFD-Modelle brauchen würde. Laut der Literatur braucht es diese komplizierten Modelle, um Kühllasten gerade für Wärmeinseln genau zu berechnen, die bis zu einem Faktor von 1.8 steigen könnten (Allegrini, J., 2012). Diese Modelle berücksichtigen aber wiederum keine begrünten Fassaden oder nur mit erzeugter Konvektion (Convertino, F. 2019).

Die Simulationen zeigten alle den gleichen Einfluss auf Temperaturspitzen, die durch begrünte Fassaden deutlich verkleinert werden konnten. Durch die niedrigere Temperatur und durch weniger Stunden, die sie pro Jahr erreicht wird, können Menschenleben gerettet werden.

3.5 Bewertung von zusätzlichen Einflussfaktoren

3.5.1 Soziale Einflussfaktoren

Der soziale Einfluss stand nicht im Zentrum dieser Studie. In der Literatur wird er aber als nicht zu vernachlässigter Faktor genannt. Die Aufklärung über die positiven Effekte auf die Luftqualität, Lärminderung und das Wohlbefinden kann die Zustimmung der Anwohner beeinflussen. Die direkten gesundheitlichen Vorteile könnten die Akzeptanz steigern.

3.5.2 Wirtschaftliche Einflussfaktoren

In wirtschaftlicher Hinsicht müssen die anfänglichen Investitionskosten für die Installation und deren Wartung im Verhältnis zu den langfristigen Vorteilen wie zum Beispiel Energieeinsparungen und Wertsteigerung gebracht werden.

Die Wartung einer grünen Fassade ist wichtig, wenn diese langlebig, effektiv und ästhetisch sein soll. Nach Pérez-Urrestarazu, 2018, sind eine angemessene Bewässerung und Pflege entscheidend für den optimalen Zustand und die Leistung vertikaler Begrünungssysteme. Diese Aufgaben sind bei vertikalen Anlagen aufgrund ihrer einzigartigen Merkmale komplexer als bei traditionellen grünen Infrastrukturen. Die Bewässerungsmethoden variieren je nach System; begrünte Fassaden werden in der Regel an der Basis oder in den einzelnen Pflanzkästen bewässert, während lebende modulare Wände ein komplizierteres Netzwerk mit mehreren Bewässerungsleitungen in verschiedenen Höhen aufweisen. Die Wasserspeicherkapazität des Substrats muss unbedingt berücksichtigt werden, und bei der Platzierung der Pflanzenarten sollte deren Wasserbedarf unter Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgefälles entlang der modularen Wand berücksichtigt werden. Eine Fassadenbegrünung benötigt also reichlich Wasser, um nicht zu veröden. Wasser ist jedoch auch ein kostbares Gut. Die Messungen von der ZHAW zeigen jedoch, dass widerstandsfähige Pflanzen, die wenig Wasser benötigen für eine Fassadenbegrünung zu finden sind. Das Absterbe-Risiko solcher Pflanzen bei einer Fassadenbegrünung und bei sehr geringen Niederschlagsmengen sollte jedoch untersucht werden.

Die Herausforderungen bei der Pflege sind in erster Linie mit der Arbeit in den Höhenlagen verbunden und umfassen Tätigkeiten wie Düngen, Beschneiden, Schädlings- und Krankheitsbekämpfung sowie Unkrautbekämpfung. Diese Tätigkeiten könnten kostspieliger werden, da eine spezielle Ausrüstung dann nötig ist. Sie wären aber gleichzeitig auch Teil einer möglichst lokalen Wertschöpfungskette.

Mit einer Begrünung sinkt jedoch auch der Bedarf an Kühlenergie und somit auch der elektrische Verbrauch der Klimaanlage. Dies ist im aktuellen Kontext einer Stromknappheit und steigenden Stromimporte und Strompreise relevant.



3.5.3 Rechtliche Einflussfaktoren

Änderungen in Bauvorschriften können eventuell erforderlich sein, um grüne Fassaden zu ermöglichen. Klare Richtlinien zur Sicherheit, Brandschutz und Pflanzenauswahl sind hierbei zentral.

Die Integration von grünen Fassaden in Stadtplanungsrichtlinien kann Anreize wie Steuervergünstigungen oder schnellere Genehmigungsprozesse schaffen, um ihre Implementierung zu erleichtern.

Klärung von Haftungsfragen und Anpassung von Versicherungspolicen bezüglich möglicher Schäden oder Wartungsansprüchen durch Pflanzenwuchs oder Strukturschäden sind rechtlich relevante Aspekte. Falls zum Beispiel die Begrünung einer Fassade erstellt wird, um die Umgebung abzukühlen, kann auch die Frage gestellt werden, wer denn dafür aufkommt und wer für eventuelle Schäden an der Fassade haftet.

Zudem ist es bisher auch unklar ob z.B. bei einer Renovierung Pflanzen schützenswert sein könnten.

3.5.4 Andere Einflussfaktoren

Die Kohlenstoffbindung durch begrünte Fassaden muss weiter erforscht werden, insbesondere in experimentellen Studien. Die vertikale Begrünung wird jedoch nach (Charoenkit, 2016) ausfolgenden Gründen als die am wenigsten leistungsfähige Art der Kohlenstoffbindung angesehen. Betrachtet man den Lebenszyklus von begrünten Fassaden, so sind die Emissionen bei der Umsetzung und Pflege höher als bei anderen Grünanlagen, so dass sie wahrscheinlich ihre relativen Auswirkungen verringern werden. Eine weitere Grenze bei der Kohlenstoffbindung hängt mit der strukturellen Wachstumsgrenze zusammen.

Die begrünte Fassade kann einen positiven Umwelteinfluss auf die Biodiversität haben. Ausserdem kann die Fassade bei Regen Wasser zurückhalten und damit die Kläranlage ein wenig entlasten.

Zusätzlich können die positiven Effekte einer begrünten Fassade vom «falschen», klassischen schwarz Teerstrassenbelag mehr als aufgehoben werden: Der Strassenbelag hat mehr Einfluss auf die gefühlte Temperatur, die eine Person vor dem Haus wahrnimmt, als die begrünte Fassade.

3.6 Stakeholder Feedback

Rückmeldung der interviewten Interessensvertreter:

Joel Fournier, Chef der Dienststelle Energie und Wasserkraft, Kanton Wallis:

Die erwartete Entwicklung der Sommertemperaturen erfordert eine Anpassung des Gebäudebestands, um den Bewohnern der Gebäude einen akzeptablen Komfort zu bieten.

Die Begrünung der Fassaden stellt eine Möglichkeit dar, die das Projekt untersucht hat. Es zeigt sich, dass diese Begrünung a priori interessanter für leichte Gebäude ohne automatische Jalousien und ohne Belüftung ist, auch wenn je nach den Eigenschaften der gewählten Pflanzen (Verdunstungskapazität, Dichte und Oberflächenindex der Blätter) die Ergebnisse konsolidiert werden müssten. Es zeigt sich auch, dass eine Begrünung in städtischen Gebieten einen erheblichen Einfluss auf die gefühlte Temperatur auf der Straße hätte. Es scheint auch, dass die Errichtung von Fassadenbegrünungen und deren Pflege wirtschaftlich schwer zu rechtfertigen sein könnten.

Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse wäre es daher angemessen, einen Vergleich mit anderen Strategien zur Anpassung des Gebäudebestands und zur Begrünung von Straßen anzustellen, um besondere Situationen zu identifizieren, in denen eine Fassadenbegrünung empfohlen werden kann.



Jerome Kaempf, Projektleiter IDIAP:

Das Projekt bot die Gelegenheit, Evapo-Transpirationsmodelle, die üblicherweise für horizontale Vegetationsflächen angewendet werden, auf vertikale Gebäudeflächen anzuwenden. Die Herausforderung auf der Ebene der thermischen Gebäudesimulation bestand darin, die Berechnung des Wärmeflusses zwischen der Wandfläche und der umgebenden Luft zu integrieren und dabei die Faktoren Leitung/Konvektion, solare Gewinne und Infrarot-Austausch zu berücksichtigen. Eine Integration dieses Modells in CitySim ermöglichte es, Simulationen durchzuführen und diese mit einigen Messungen vor Ort zu vergleichen. Die Ergebnisse sind ermutigend und werden es städtischen Entscheidungsträgern ermöglichen, ihre Varianten unter Berücksichtigung der in das Gebäude integrierten Vegetation zu simulieren und zu testen.

Das Projekt war eine einmalige Gelegenheit, verschiedene Experten mit unterschiedlichen Sichtweisen zu einem Thema zusammenzubringen: Simulationsspezialisten, Messspezialisten und Pflanzenspezialisten. Die Herausforderung bestand darin, die üblicherweise an Pflanzen gemessenen Elemente, die im öffentlichen Raum gemessen werden, um den Komfort für die Menschen zu bewerten, und die Ergebnisse von Simulationswerkzeugen zusammenzubringen, und das alles in einem bestehenden Fallbeispiel. Jeder Spezialist benötigt unterschiedliche Daten, die nicht miteinander kompatibel sind: von Messungen des Wasserverbrauchs der Pflanze über Infrarotbilder bis hin zu Messungen mit einer schwarzen Thermokugel. So musste das Projektteam mit Messdaten umgehen, die für die Simulation als unzureichend erachtet wurden, was den Umfang der Validierung der Simulationen einschränkte, aber den Austausch zwischen den Projektteilnehmern bereicherte.

Das Projekt weckte das Interesse von Partnern aus der Privatwirtschaft, die nun mit CitySim Simulationen ihrer Architekturprojekte durchführen möchten. Da die Stadtvegetation ein wichtiger Aspekt bei der Milderung von Hitzeinseln ist, trägt dieses Projekt einen kleinen Teil dazu bei und eröffnet interessante Perspektiven für zukünftige städtische Projekte zur Renovierung des öffentlichen Raums und von Gebäuden. Über das Unternehmen kaemco werden alle Projektergebnisse für Praktiker frei zugänglich zur Verfügung gestellt.

Evelyn Trachsel, Forschungsgruppe Pflanzenverwendung ZHAW:

Die Forschung hat bereits mehrfach aufgezeigt, dass die Fassadenbegrünung einen Beitrag zur Klimaanpassung im urbanen Raum leisten kann. Dennoch bestehen nach wie vor Hemmnisse eine Fassadenbegrünung im Bestand sowie bei Neubauten umzusetzen. Bislang sind entsprechende Massnahmen in Städten kaum sichtbar. Die Motivation der Forschungsgruppe Pflanzenverwendung, ist, dass Fassadenbegrünung in Stadtentwicklungsprozessen, überall da, wo keine horizontale Begrünung möglich ist, oder auch in dessen Kombination mehr Verwendung finden sollten. Dazu müssen Argumentationshilfen neben der Förderung der Biodiversität, dem Erlebarmachen von Grün und den gestalterischen Kriterien erbracht werden. An diesem Punkt setzt das Projekt IVECT an. Die Kombination der Energieeffizienz eines Gebäudes mit der standortgerechten, biodiversen Pflanzenauswahl und ihrer klimatischen Wirkung in Einklang zu bringen, weist hohes Potenzial auf und liefert Argumente, welche zur Umsetzung von Fassadenbegrünungen beitragen können. Mittels Simulation kann die positive Wirkung der geplanten Begrünung auf das Gebäude sowie auf das Mikroklima in unmittelbarer Umgebung aufgezeigt werden, was Planende und Bauherren überzeugt. Des weiteren schafft der positive Einfluss auf die Energiebilanz eines Gebäudes ökonomische Anreize.

Die Verdunstungsleistung einer Fassadenbegrünung ist sehr von ihrem System, der Pflanzenwahl und der Bewässerungsintensität abhängig. Eine generelle Aussage zu treffen ist somit sehr schwierig. Weiter wird im Projekt ein Pflanzenkatalog aufgeführt, welcher Anhaltspunkte zur standortgerechten und einheimischen Verwendung der Pflanzen gibt, jedoch nicht ohne Fachwissen angewendet werden



kann. Die Wahl der Pflanzen ist wiederum sehr an ein System gebunden und kann nicht generell getroffen werden.

Dennoch bietet das Projekt IVECT Anreize, Fassadenbegrünungen zu schaffen, und vernetzt die verschiedenen Disziplinen miteinander, was für eine erfolgreiche Umsetzung unabdingbar ist.

Michael Hagenauer Projektleiter Grünstadt Zürich:

Die Ergebnisse der seitens ZHAW durchgeführten Messstrecken an den vertikalen Systembeispielen in der Stadtgärtnerei (Saftflussmessungen, Temperaturverläufe...) sind ein wichtiger Bestandteil bei Führungen (intern oder extern) oder Veranstaltungen zum Thema Fassadenbegrünung. Die daraus gewonnen Erkenntnisse und Fakten werden dabei mittels Schemas oder Visualisierungen den Teilnehmern vorgestellt und erklärt. Dies unterstützt effektiv die Sensibilisierung und Aufklärung zum Thema thermischer Einfluss der Begrünung auf die Gebäudehülle und Umgebung und wird dadurch zu einem grossen Mehrwert bei der Entscheidungsfindung ein Fassadenbegrünungsprojekt zu realisieren.

Zusätzlich wird die Notwendigkeit von Innovation und auch Umsetzung Alternativer Wasser-Ressourcen für den Bereich der Bewässerung der Systeme (Grauwasser, Regenwasser...) aufgezeigt, um auch einen der wichtigen Leistungsaufträge einer Fassadenbegrünung, der Kühlung, zukünftig erfüllen zu können.



3.7 Schlussfolgerungen und Fazit

Eine erfolgreiche Begrünung benötigt das Zusammenspiel der in Abbildung 53 gezeigten Partner.

Nicht nur der Standort der Begrünung sollte gut überlegt werden, sondern auch die Begrünungsart, die Pflanzenauswahl und die Pflanzenpflege, welche vom Gärtner/Pflanzenexperte vorgeschlagen wird.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass für dichtbesiedelte Areale, in welchen Räume für eine horizontale Begrünung wie Wiesen oder Bäume fehlen, Fassadenbegrünungen die gefühlte Temperatur positiv verändert, speziell nahe an der begrünten Fassade. Die Quantifizierung ist möglich, allerdings bedarf es derzeit noch einen Ingenieur, welcher die vielfältigen Tools einzusetzen weiss und die erforderlichen Parameter beurteilen kann.

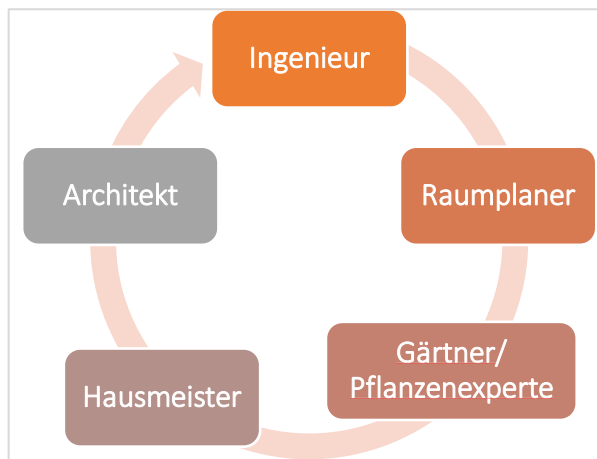


Abbildung 55: Akteure einer erfolgreichen Begrünung

Hier sollte der Einfluss von Konvektion wie durch Wind noch weiter erforscht werden.

In der Annahme, dass mehrere Gebäude in einem Areal begrünt werden, kann sich dieser Effekt ausweiten. Somit kann ein «grüner Erholungskorridor» entstehen. Im täglichen Betrieb bleiben sie eine Herausforderung, da sie die richtige Pflege zur richtigen Zeit brauchen, die vom Raumplaner in Zusammenarbeit mit Hausmeister und Pflanzenexperte abgestimmt werden sollte.

Der Einfluss einer Begrünung auf die Energiebilanz eines Gebäudes kann mittels Simulation quantifiziert werden. Benötigt werden dazu die pflanzenspezifischen Kennwerte der Verdunstungsleistung und die Blattdichte und der Blattflächenindex. Die Methodik zur Simulation nach 2 unterschiedlichen Ansätzen wurde für die Simulationssoftware bSol definiert. Hierbei spielt jedoch die Evapotranspiration eine untergeordnete Rolle, es wird gezeigt, dass vor allem bei Gebäuden mit geringer thermischer Trägheit die Überhitzungsstunden im Sommer signifikant reduziert werden können. Nicht berücksichtigt werden kann bisher die durch Wind hervorgerufene Konvektion, welche vor allem den Einfluss der Verdunstungsleistung der Pflanzen massgeblich verändert. Dafür gibt es verschiedene spezialisierte Methoden und Tools, die allerdings noch mehr Daten und oft enorme Rechenzeiten oder Kapazitäten verlangen.

Ob Gebäude begrünt werden sollten oder ob das Verhältnis Aufwand-Nutzen vorteilhaft ist, kann nur fallweise entschieden werden, wenn es um den Energieverbrauch oder den thermischen Komfort innerhalb des Gebäudes geht. Zur exakten Berechnung muss eine Vielzahl an Tools verwendet werden, die dieses Projekt nicht abschliessend liefern kann. Hier konnten basierend auf einer Messreihe Effekte und Zusammenhänge, sowie Grössen erklärt werden.

Die Software CitySim kann den Einfluss einer Fassadenbegrünung auf Gebäude und Areale simulieren und arealspezifische Indikatoren der Begrünung berechnen. Die Implementierung weiterer Parameter wie der Blattflächenindex über das ganze Jahr wird benötigt, um den Einfluss einer Fassadenbegrünung innerhalb eines Gebäudes oder auf die Umgebung gänzlich quantifizieren zu können. Darüber hinaus ist es zwingend nötig weitere Messungen an einem beheizten Gebäude mit anderer Orientierung der Fassadenbegrünung durchzuführen, um diese Simulationen dann auch energetisch zu verifizieren. Dies konnte im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden.

Im Allgemeinen lässt sich jedoch sagen, dass eine Fassadenbegrünung eine grössere Wirkung zeigt an Gebäuden, die eine geringe Trägheit aufweisen.



Die genaue Begrünungsart, ob modulare Wand, indirekte oder direkte Begrünung usw. konnte noch in keinem der zwei Simulationstools integriert werden. Deswegen kann diesbezüglich auf Simulationsebene nichts ausgesagt werden.

Die Pflanzenauswahl ist in jedem Fall ausschlaggebend. Nach den Simulationen zu urteilen, sollten die Pflanzen einen hohen Blattflächenindex (LAI) und eine hohe Verdunstungsleistungsrates aufweisen. Zudem sollten Pflanzen ausgewählt werden, die ihre Blätter in den Wintermonaten verlieren, da die solaren Wärmegevinne zu dieser Jahreszeit essenziell sind, zumindest wenn der Energieverbrauch nicht negativ beeinflusst werden soll.

Hinsichtlich auf die Klimaerwärmung und des stetigen Wassermangels, sollten wärmebeständige Pflanzen ausgesucht werden, deren Wasserverbrauch gering ist. Einheimische Pflanzen sind dafür am geeignetsten speziell, wenn zusätzlich auf die Biodiversität Acht gegeben wird.

Schlussendlich müssten diese Pflanzen leicht zu pflegen sein und die Gärtner oder Hauswörter müssten geschult werden, um die Fassadenbegrünung korrekt zu pflegen, damit diese langlebig bleibt, ohne zu Schäden an der Gebäudehülle zu führen.

Die rechtlichen Unsicherheiten erschweren heute das Entstehen begrünter Fassaden. Ausserdem kann die Wirtschaftlichkeit nur schwierig und im Einzelfall beurteilt werden, da wie oben angesprochen, allein schon die Simulationen schwierig durchzuführen sind, um den energetischen Einfluss der begrünten Fassade richtig abzuschätzen. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft wird es aber durchaus einen positiven Einfluss auf ein Areal haben.

4 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Für weitere Untersuchungen, welche eine genauere Quantifizierung der Einflüsse von Begrünungen hinsichtlich der Energiebilanz auf Gebäude und Areale beinhalten, wird vor allem der Einfluss der Konvektion durch Wind identifiziert.

Eine Überprüfung und Verifizierung der Simulationsergebnisse an einem flächig begrünten und klimatisierten Gebäude mittels Messstrecken wäre in einem nächsten Schritt zielführend um die gemachten Aussagen fundiert belegen zu können.

Derzeit ist die Simulation mittels der Software bSol und CitySim nur durch Mitglieder der Forschungsgruppe durchführbar, da diese Tools für eine kundennutzbare Simulation angepasst werden müssten. Diese Anpassungen und Ergänzungen sind möglich und werden bei einer Wirtschaftlichkeit der Massnahmen folgen.

Die sich im Zuge des Klimawandels verändernden Klimadaten konnten im Projekt zwar einbezogen werden, eine Studie, welche den integralen Nutzen von begrünten Arealen und Quartieren beinhaltet sollte folgen, um für zukünftige Raumplanungsprojekte in Städten bessere Grundlagen zu haben.

5 Publikationen

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde während der Projektlaufzeit an den folgenden Anlässen publiziert:

- Energissima 2021 (Bulle), regionale Leitmesse für Energie und Energiewende
- Assises de la transition Energétique 2022 (Genf), Dreiländerausstellung zur Energiewende
- **Atelier** Construction Valais (2022 und 2023), Energypolis Sion, Jährliches Treffen und Workshop der Gewerkschaft Bauen Wallis



6 Literaturverzeichnis

- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106, 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.003>
- Allen, R. G. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO.
- Basurto, C. et al. (2022). Integrating Daylight with General and Task Lighting: A Longitudinal in-the-Wild Study in Individual and Open Space Working Areas. *Solar Energy Advances* 2. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100027>.
- Berengena, J. & Gavilan, P. (2005). *Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment*. *Journal of irrigation and drainage engineering*, Volume 131, American Society of Civil Engineers, Reston, VA. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(147\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147))
- 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>
- BuGG (2020): BuGG-Fachinformation „Geeignete Gehölze für Dachbegrünungen“. Bundesverband GebäudeGrün e.V., Berlin
- BuGG (2023): Präsentation zur bodengebundenen Fassadenbegrünung. Unveröffentlicht.
- BuGG (2023b): Fachinformation «Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen». Berlin.
- Campbell, G. S. (2000). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.
- CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.
- Charoenkit, S., Yiemwattana, S. (2016). *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*, *Building and Environment*, Volume 105, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.031>.
- Coma, J. & et.al. (2017). *Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades*, *Building and Environment*, Volume 111, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>.
- Convertino, F., Vox, G., & Schettini, E. (2019). Convective heat transfer in green façade system. *Biosystems Engineering*, 188, 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.006>
- Davis, M (2014): *The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation*. In : *Building and Environment*, 92, S. 135-141.
- Défago, L. (2023). *Simulation façade verte : impact sur le climat du quartier*. Bachelorarbeit, HES-SO Valais-Wallis, Sion.
- Delarce, R, et.al. (2015): *Lebensräume der Schweiz. Ökologie – Gefährdung – Kennarten*. Ott- Verlag (hep-Verlag), Bern.
- Djedjig, R., (2013). *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain*, Université de La Rochelle : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01141046>



- Fischer, U. (2002): *Optimierung von TWD Speichersystemen unter Beachtung der Bauschadensfreiheit. Natürliche Begrünung als sommerlicher Überhitzungsschutz*, Schlussbericht zum BMWi-Projekt 0335004 V/2. Cottbus, S. 27 ff.
- FLL (Hrsg.) (2018). Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen.
- Hertig, T., & Trachsel, E. (2021). Wirkungsmessungen Vertikale Begrünungen Stadtgärtnerei Zürich und MFO Park. Forschungsprojekt im Auftrag der Grün Stadt Zürich, Fachstelle Naturschutz, Bettina Tschander: Forschungsgruppe Pflanzenverwendung. ZHAW -Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- 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.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of biometeorology*, 43(2), 71-75.
- Hui, C. M., (2009). Study of thermal and energy performance of green roof systems, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva Switzerland.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jacquet, S., (2010). Etude de la performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal, Ecole de technologie supérieure.
<https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/647/>
- Karima. B. & Saliha, A., (2010). Evaluation des transferts thermiques à travers la paroi végétalisée, Conference : Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, Tunisie.
- Kiermeier, P. (1995). Die Lebensbereiche der Gehölze: Eingeteilt nach dem Kennziffersystem. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Koyama, T., Yoshinaga, M., Maeda, K.-i., & Yamauchi, A. (2015). Transpiration cooling effect of climber greenwall with an air gap on indoor thermal environment. *Ecological Engineering*, 83, 343-353.
- Manso, M. & et.al. (2021). *Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 135, Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Marchi, M., & et.al. (Volume 306 2015). Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling*, S. 45-56.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 51(4), 323-334.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 54(2), 131-139.
- Merz, T. (2021). *Case Studie IVECT*. Bachelorarbeit, HES-SO Valais-Wallis, Sion.
- Nembrini, J., Kämpf, J. (2023). LUCIDELES – Nutzung von Benutzerzentriertem Intelligentem Tageslicht Und Elektrischer Beleuchtung Zur Energieeinsparung. Schlussbericht.
<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=46889>.



- Ottele, M. (2011): The green building envelope: vertical greening [dissertation]. Delft University of Technology
- Pérez, G. & et.al. (2011). *Behaviour of green facades in Mediterranean continental climate*, Energy Conversion and Management, Volume 52, Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>
- Pérez-Urrestarazu, L., Urrestarazu, M. (2018). *Chapter 2.2 - Vertical Greening Systems: Irrigation and Maintenance*, Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability, Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00005-7>.
- Pfoser, N. (2016). Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Dissertation Technische Universität Darmstadt
- Pfoser, N. (2018). Vertikale Begrünungen. Stuttgart: Ulmer Verlag
- Rod, N. (2022). *Etude de simulation énergétique d'un bâtiment avec une enveloppe végétalisée*. Bachelorarbeit, HES-SO Valais-Wallis, Sion.
- Roloff, A.; Bärtels, A (2018). Flora der Gehölze: Bestimmung, Eigenschaften, Verwendung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Roloff, A. (2013). Bäume in der Stadt: Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich (2009). SIA380/1, Thermische Energie im Hochbau, Zürich.
- sempergreen. (15. Februar 2022). Vorteile von Fassadenbegrünung. Von:
<https://www.sempergreen.com/de/loesungen/Gruenfassade/vorteilegruenfassade#:~:text=Sorgt%20f%C3%BCr%20sauberere%20Luft,tragen%20Sie%20zur%20Luftreinigung%20bei>.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung. Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung, Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2010.
- Schröder, F.-G. (2009). Automatisierte, biologische, senkrechte, städtische Fassadenbegrünung mit dekorativen funktionellen Parametern; Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt im Rahmen von PRO INNO II. Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- Trajkovic, S. (2011). Estimating hourly reference evapotranspiration from limited weather data by sequentially adaptive RBF network. *Architecture and Civil Engineering* Vol.9, N°3, pp.473-480.
- Tran, A. (2020). *Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel*. Bachelorarbeit, HES-SO Valais-Wallis, Sion.
- Upadhyay G., Mauree D., Kämpf J. und Scartezzini J-L, (2015). *Evapotranspiration Model to Evaluate the Cooling Potential in Urban Areas – A Case Study in Switzerland*, Proceedings of Building Simulation 2015: 14th Conference of IBPSA, Hyderabad, India,
<https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2548>
- Wildstauden (2022): Wildstaudengärtnerei Eschenbach. www.wildstauden.ch
- Wong, N.-H. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), S. 663–672.
- ZHAW, (2019): Skript Naturgartenlehrgang Thema Fassadenbegrünung. Unveröffentlichtes Lehrmittel der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wädenswil



7 Anhang

- 7.1 Übersicht der Kletterpflanzen mit Einteilung nach den Lebensbereichen der Gehölze
- 7.2 Auswertung Lebensräume der Schweiz nach Delarze (2015)
- 7.3 Diplomarbeit Tran
- 7.4 Diplomarbeit Rod
- 7.5 Diplomarbeit Défago
- 7.6 Präsentationen aus Workshops der Projektbegleitgruppe

Pflanzenkatalog
Wandgebundene Fassadenbegrünung
TOP 15

Nord-West, Nord-Ost oder Ost Fassade

alle Pflanzen in der Schweiz einheimisch und im Handel
erhältlich, Fokus auf krautige Arten

Bilder: wildstauden.ch
= winter- oder immergrün

Eigenschaften des Pflanzenstandortes:
Frisch, sonnig- halbschattig, warm, mittlerer Nährstoffbedarf

Bewässerung:
von Vorteil mit Niederschlagswasser, Systemabhängig von ein
bis mehrmals täglich

Grün und Gebäude:
hohe Biodiversitätsförderung durch reiches Angebot an einheimischen
Blütenpflanzen, je nach System dämmende Wirkung

Klimawirksamkeit:
Je nach System gute Verdunstungsleistung, Schwammstadtbaustein



Gattung / Art	<i>Ajuga reptans</i>
Zeigerwerte	333-33+3
Höhe in cm / Blüte	10-30 /
Wuchsform	Rosette, flache Polster / #
Lebensraum CH	5.1.5
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Origanum vulgare</i>
Zeigerwerte	243-33+4
Höhe in cm / Blüte	30-70 / 7-10
Wuchsform	Buschig, aufrecht / #
Lebensraum CH	5.1.2
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmet- terlinge, zieht Feldermäuse an



Gattung / Art	<i>Calamintha menthifolia</i>
Zeigerwerte	2+w43-344
Höhe in cm / Blüte	40 / 7-10
Wuchsform	Buschig, aufrecht / #
Lebensraum CH	5.1.2
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Lamium maculatum</i>
Zeigerwerte	3+35-33+2
Höhe in cm / Blüte	20-50 / 3-10
Wuchsform	niederliegend, Ausläufer
Lebensraum CH	5.1.5
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmet- terlingsraupen



Gattung / Art	<i>Prunella vulgaris</i>
Zeigerwerte	3+33-433
Höhe in cm / Blüte	10-25 / 6-10
Wuchsform	Rosette / #
Lebensraum CH	4.5.3
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmet- terlingsraupen



Gattung / Art	<i>Viola tricolor</i>
Zeigerwerte	323-443
Höhe in cm / Blüte	10-20 / 3-9
Wuchsform	biennen, versamend / #
Lebensraum CH	keine Angaben
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmet- terlinge, zieht Feldermäuse an



Gattung / Art	<i>Geranium pyrenaicum</i>
Zeigerwerte	333-342
Höhe in cm / Blüte	30-60 / 4-11
Wuchsform	aufrecht, verzweigt / #
Lebensraum CH	5.1.5
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen



Gattung / Art	<i>Fragaria vesca</i>
Zeigerwerte	333-333
Höhe in cm / Blüte	5-20 / 4-6
Wuchsform	niederliegend, Ausläufer / #
Lebensraum CH	5.2.1
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Vögel



Gattung / Art	<i>Glechoma hederacea</i>
Zeigerwerte	3+w43-33+
Höhe in cm / Blüte	10-50 / 4-5
Wuchsform	niederliegend, Ausläufer / #
Lebensraum CH	5.1.5
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Achillea millefolium</i>
Zeigerwerte	233+433
Höhe in cm / Blüte	30-60 / 6-10
Wuchsform	aufrecht, #
Lebensraum CH	5.1.2 / 4.5.1 und weitere
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Veronica chamaedrys</i>
Zeigerwerte	2+43-333
Höhe in cm / Blüte	10-30 / 4-5
Wuchsform	niederliegend-aufsteigend, #
Lebensraum CH	5.1.2 / 4.5.1 und weitere
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen



Gattung / Art	<i>Sedum telephium</i>
Zeigerwerte	2w+33-43+3
Höhe in cm / Blüte	30-70 / 7-9
Wuchsform	Rosettenförmig, aufrecht
Lebensraum CH	5.1.2 / 7.2.1
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Lamium album</i>
Zeigerwerte	335-344
Höhe in cm / Blüte	30-60 / 4-11
Wuchsform	flächig, Ausläufer bildend, #
Lebensraum CH	7.1.8
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen



Gattung / Art	<i>Potentilla anserina</i>
Zeigerwerte	3w+34+-433
Höhe in cm / Blüte	10-15 / 5-7
Wuchsform	flächig, Ausläufer bildend, #
Lebensraum CH	7.1.1
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen



Gattung / Art	<i>Mentha pulegium</i>
Zeigerwerte	4w+44+-34+2
Höhe in cm / Blüte	20-50 / 7-9
Wuchsform	aufrecht, Ausläufer bildend
Lebensraum CH	7.1.1
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge

Pflanzenkatalog

Wandgebundene Fassadenbegrünung

TOP 15

Süd bis Süd-West, und West Fassade

alle Pflanzen in der Schweiz einheimisch und im Handel
erhältlich, Fokus auf krautige Arten

Bilder: wildstauden.ch
= winter- oder immergrün

Eigenschaften des Pflanzenstandortes:
trocken bis frisch, sonnig, warm, niederer bis mittlerer Nährstoffbedarf

Bewässerung:
von Vorteil mit Niederschlagswasser, Systemabhängig von ein bis maximal 3mal täglich

Grün und Gebäude:
hohe Biodiversitätsförderung durch reiches Angebot an einheimischen Blütenpflanzen, Je nach System dämmende Wirkung

Klimawirksamkeit:
Je nach System gute Verschattungswirkung, verminderte Aufheizung der Oberflächentemperatur, jedoch wenig Evapotranspiration



Gattung / Art	<i>Sedum dasyphyllum</i>
Zeigerwerte	132-434
Höhe in cm / Blüte	5-15 / 5-7
Wuchsform	polsterförmig, #
Lebensraum CH	3.4.1.2 / 7.2.1
Biodiversitätsförderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Asplenium trichomanes</i>
Zeigerwerte	222-333
Höhe in cm / Blüte	5-20
Wuchsform	Blattschmuck, #
Lebensraum CH	3.4.1.2 / 7.2.1
Biodiversitätsförderung Fauna	keine Angaben



Gattung / Art	<i>Saxifraga paniculata</i>
Zeigerwerte	242-523
Höhe in cm / Blüte	10-30 / 5
Wuchsform	rosettenförmig, #
Lebensraum CH	3.4.1.2 / 4.1.2
Biodiversitätsförderung Fauna	verschiedene Insekten



Gattung / Art	<i>Linaria alpina</i>
Zeigerwerte	3*42-51*4
Höhe in cm / Blüte	10-15 / 6-8
Wuchsform	kriechend
Lebensraum CH	3.3 / 3.3.1.2 / 3.2.1.1
Biodiversitätsförderung Fauna	insbesondere Erdhummeln



Gattung / Art	<i>Alyssum montanum</i>
Zeigerwerte	142-444
Höhe in cm / Blüte	10-20 / 4-5
Wuchsform	polsterförmig, #
Lebensraum CH	4.2.2
Biodiversitätsförderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge



Gattung / Art	<i>Pseudolysimachion spicatum</i>
Zeigerwerte	1*42-43*5
Höhe in cm / Blüte	20-40 / 6-10
Wuchsform	rosettenförmig, aufrecht, #
Lebensraum CH	4.2.1.2 / 4.2.2
Biodiversitätsförderung Fauna	Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen



Gattung / Art

Teucrium montanum

Zeigerwerte

1+w+52-434

Höhe in cm / Blüte

5-15 / 5-9

Wuchsform

polsterartig / #

Lebensraum CH

3.3.1.5 / 4.1.2

Biodiversitäts-
förderung Fauna

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen

Melica ciliata

1+w42-44+4

30-60 / 5-6

horstig / #

4.1.1

Futterpflanze für Schmetterlingsraupen

Thymus pulegioides

2w32-434

5-20 / 5-10

polsterartig / #

4.2.4

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlinge, zieht Feldermäuse an



Gattung / Art

Helianthemum nummularium

Zeigerwerte

1+42-54+4

Höhe in cm / Blüte

20-40 / 5-10

Wuchsform

lockeres Polster / #

Lebensraum CH

4.2.1.2

Biodiversitäts-
förderung Fauna

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge

Geranium sanguineum

2w42-33+4

15-30 / 4-9

kleinbuschig / #

5.1.1

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge

Prunella grandiflora

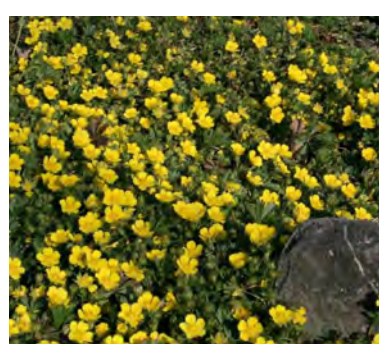
2w+42-43+4

20-40 / 6-10

Rosette / #

4.2.1.2

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze Schmetterlinge



Gattung / Art

Petrorhagia saxifraga

Zeigerwerte

1+42-44+4

Höhe in cm / Blüte

10-25 / 6-10

Wuchsform

lockeres Polster / #

Lebensraum CH

4.2.1.1

Biodiversitäts-
förderung Fauna

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlinge

Koeleria vallesiana

141-545

10-40 / 5-6

horstig / #

4.2.1.1 / 4.2.2

Pollenpflanze für Wildbienen

Potentilla verna

1+32-44+3

5-10 / 3-5

kriechend / #

4.2.2 / 4.2.4

Nektar und Pollen für Wildbienen & Bienen, Futterpflanze für Schmetterlingsraupen & Schmetterlinge

Pflanzenkatalog

Bodengebundene Fassadenbegrünung

TOP 15

Süd / Süd-West Fassade,

Bewässerung nur in langanhaltenden Hitzeperioden

Bilder: ZHAW, Baumschule Hauenstein und Baumschule Horstmann

Eigenschaften des Pflanzenstandortes:

Trocken, sonnig, heiss mit durchlässigem, magerem Substrat (hoher mineralischer Anteil), niedriger Nährstoffbedarf

Bewässerung:

Niederschlagswasser, Wasserzugabe in langanhaltenden Trockenperioden von Vorteil

Stadtklima feste Arten =

- neue Zukunftsarten (noch nicht alle sind im üblichen Handel erhältlich)
- Hitzeverträglich, Abstrahlung ertragend
- Trockenheitsverträglich und windstabil

Grün und Gebäude:

Sommerlicher Wärmeschutz, Grüner Vorhang, gefiedertes Laub – Lichtdurchlässig

Klimawirksamkeit:

Hitzeminderung durch Beschattung, wenig Evapotranspiration, da die Pflanzen die Verdunstung an Hitzetagen einstellen



Periploca sepium

Gattung / Art

Lebensbereich

6.1.1.9

Höhe in m / Blüte

10 / 6-7

Kletterform

Schlinger

Bemerkungen

gut trockenresistent

Biodiversitätsförderung Fauna

Blüten & Nektar locken Insekten an



Periploca graeca

6.3.2.9

15 / 7-8

Schlinger

genügsam

Blüten & Nektar locken Insekten an



Passiflora caerulea

6.3.1.9

4 / 6-10

Sprossranker

in Stadtklima winterfest

keine typische Nektarpflanze, zieht aber dennoch Bienen & Insekten an



Aristolochia sempervirens

Gattung / Art

Lebensbereich

6.3.1.9

Höhe in m / Blüte

5 / 5-6

Kletterform

Schlinger

Bemerkungen

im Stadtklima winterfest, selten

Biodiversitätsförderung Fauna

Blüten ziehen Fliegen an, Bestäubung durch Fliegen



Lycium chinense

6.1.3.5

4-6 / 6-9 (Beeren essbar)

Blattstielranker

Sorte ohne Ausläufer verwenden!

Blüten & Nektar locken Wildbienen an



Cocculus orbiculatus

6.3.1.9

3 / 1-4

Spreizklimmer

sehr trocken resistent, selten

noch keine Resultate bekannt



Gattung / Art	<i>Clematis orientalis</i>
Lebensbereich	6.1.3.9
Höhe in m / Blüte	8 / 8-9
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	Winterschmuck Samenstände
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Clematis flammula</i>
Lebensbereich	6.3.1.9
Höhe in m / Blüte	5 / 7-9
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	duftet
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



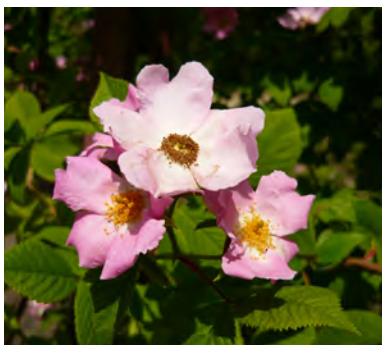
Gattung / Art	<i>Clematis ladakhiana</i>
Lebensbereich	6.1.3.9
Höhe in m / Blüte	3-5 / 7-10
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	feines Laub, gesprenkelte Blüten
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Jasminum officinale</i>
Lebensbereich	6.3.1.9
Höhe in m / Blüte	10 / 6-9
Kletterform	Spreizklimmer
Bemerkungen	Duft, in Stadtklima winterfest
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bestäubung vor allem durch Nachtfalter



Gattung / Art	<i>Rosa sempervirens</i>
Lebensbereich	6.1.1.9
Höhe in m / Blüte	5-10 / 6-7
Kletterform	Spreizklimmer
Bemerkungen	Duft, in Stadtklima winterfest
Biodiversitäts- förderung Fauna	Blüten & Nektar locken Insekten an, Hagebutten Nahrung für Vögel



Gattung / Art	<i>Rosa setigera</i>
Lebensbereich	6.3.3.9
Höhe in m / Blüte	5 / 6-8
Kletterform	Spreizklimmer
Bemerkungen	Blütenschmuck, Hagebutten
Biodiversitäts- förderung Fauna	Blüten & Nektar locken Insekten an, Hagebutten Nahrung für Vögel



Gattung / Art	<i>Jasminum nudiflorum</i>
Lebensbereich	6.3.1.9
Höhe in m / Blüte	3 / 1-4
Kletterform	Spreizklimmer
Bemerkungen	sehr trocken resistent
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrungsquelle für früh im Jahr aktive Wildbienen



Gattung / Art	<i>Campsis x tagliabuana</i>
Lebensbereich	6.3.2.9
Höhe in m / Blüte	5 / 7-9
Kletterform	Schlinger
Bemerkungen	robust, leuchtende Blüte
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bienenweide, Hummelweide, Schmetterlingsfutterpflanze



Gattung / Art	<i>Campsis radicans</i>
Lebensbereich	6.3.1.9
Höhe in m / Blüte	10 / 7-10
Kletterform	Selbstklimmer, schwach windend
Bemerkungen	robust, leuchtende Blüte
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bienenweide, Hummelweide, Schmetterlingsfutterpflanze

Pflanzenkatalog
Bodengebundene Fassadenbegrünung
TOP 15

Nord-West – West Fassade,
mit gelegentlicher Bewässerung

Bilder: ZHAW, Baumschule Hauenstein und Baumschule Horstmann

Eigenschaften des Pflanzenstandortes:
Frisch, sonnig- halbschattig, warm, humoser Boden, mittlerer Nährstoffbedarf
Bewässerung:
In der Anwuchsphase und bei langanhaltender Trockenheit (1m³ Erdvolumen pro Pflanze muss gegeben sein)

Grün und Gebäude:
Sommerlicher Wärmeschutz, dichte Belaubung, gute Beschattung
Klimawirksamkeit:
Hitzeminderung durch Transpiration der Pflanzen, Beschattung der Fassadenoberfläche



Gattung / Art	<i>Ampelopsis bodinieri</i>
Lebensbereich	6.4.4.9
Höhe in m / Blüte	6 / 7-9
Kletterform	Sprossranker
Bemerkungen	Herbstfärbung, Beeren
Biodiversitäts-förderung Fauna	Bienenpflanze, Hummeln, Vogelnährgehölz



Gattung / Art	<i>Wisteria floribunda</i>
Lebensbereich	2.3.2.9
Höhe in m / Blüte	12-20 / 5-6
Kletterform	(Stark-)Schlinger
Bemerkungen	stark wachsend
Biodiversitäts-förderung Fauna	insektenfreundlich (Bienen, Hummeln)



Gattung / Art	<i>Wisteria frutescens</i>
Lebensbereich	6.4.2.9
Höhe in m / Blüte	10 / 7-9
Kletterform	(Stark-)Schlinger
Bemerkungen	trockenheitsverträgliche Art
Biodiversitäts-förderung Fauna	insektenfreundlich (Bienen, Hummeln)



Gattung / Art	<i>Vitis amurensis</i>
Lebensbereich	3.2.2.9
Höhe in cm / Blüte	15 / 6-7
Kletterform	Sprossranker
Bemerkungen	Herbstfärbung
Biodiversitäts-förderung Fauna	Vogelnährgehölz



Gattung / Art	<i>Actinidia chinensis</i>
Lebensbereich	6.4.1.9
Höhe in cm / Blüte	10 / 6
Kletterform	Schlinger
Bemerkungen	Kiwi, Früchte essbar
Biodiversitäts-förderung Fauna	Blüten & Nektar locken Insekten an



Gattung / Art	<i>Trachelospermum jasminoides</i>
Lebensbereich	keine Angaben
Höhe in cm / Blüte	3-4 / 5-8
Kletterform	Schlinger
Bemerkungen	Duft, immergrün
Biodiversitäts-förderung Fauna	Blüten & Nektar locken Insekten an



Gattung / Art	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>
Lebensbereich	7.3.2.9
Höhe in m / Blüte	20-25 / unscheinbar
Kletterform	Selbstklimmer
Bemerkungen	robust, Herbstfärbung
Biodiversitäts- förderung Fauna	Vogelnährgehölz



Gattung / Art	<i>Lonicera x tellmanniana</i>
Lebensbereich	6.4.2.9
Höhe in m / Blüte	4-6 / 6-7
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	duften in der Nacht
Biodiversitäts- förderung Fauna	ziehen Nachtfalter an



Gattung / Art	<i>Lonicera x brownii</i>
Lebensbereich	6.4.4.9
Höhe in m / Blüte	3 / 5-8
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	robust, duften in der Nacht
Biodiversitäts- förderung Fauna	ziehen Nachtfalter an



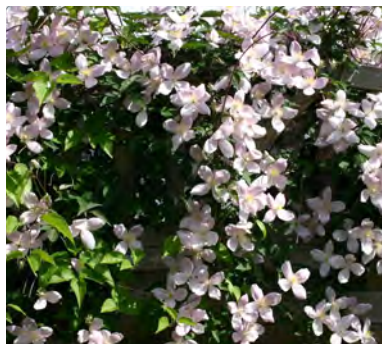
Gattung / Art	<i>Sinofranchetia chinensis</i>
Lebensbereich	6.4.2.9
Höhe in m / Blüte	5-10 / 5
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	selten, mit Akebia verwandt
Biodiversitäts- förderung Fauna	noch keine Untersuchung bekannt



Gattung / Art	<i>Akebia quinata</i>
Lebensbereich	7.4.5.9
Höhe in m / Blüte	10 / 5
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	kann auch basisch stehen
Biodiversitäts- förderung Fauna	Pollen z.t. von Bienen, Schwebefliegen genutzt, keine Nektarbildung



Gattung / Art	<i>Clematis texensis</i>
Lebensbereich	6.4.1.8
Höhe in m / Blüte	6-9 / 2m
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	Blütenschmuck
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Clematis montana</i> Rubens
Lebensbereich	7.2.2.9 (9.2.2.9)
Höhe in cm / Blüte	8 / 5
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	sehr wüchsig
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Clematis vitalba</i>
Lebensbereich	2.5.3.9 (6.4.3.9)
Höhe in cm / Blüte	30 / 7-9
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	regelmässiger Schnitt, sehr wüchsig
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Smilax aspera</i>
Lebensbereich	6.4.4.9
Höhe in cm / Blüte	15 / 8-9
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	im Stadtklima winterfest
Biodiversitäts- förderung Fauna	Insektenmagnet, Raupenfutterpflan- ze, Vogelnährgehölz

Pflanzenkatalog
Bodengebundene Fassadenbegrünung
TOP 12

Nord – Ost Fassade,
mit gelegentlicher Bewässerung

Eigenschaften des Pflanzenstandortes:
Frisch, halbschattig-schattig, lichtschattig, warm, humoser
Boden, mittlerer Nährstoffbedarf

Bewässerung:
In der Anwuchsphase und bei langanhaltender Trockenheit
(1m³ Erdvolumen pro Pflanze muss gegeben sein)

Grün und Gebäude:
Dichte, wintergrüne Belaubung = gute Dämmung im Winter

Klimawirksamkeit:
Hitzeminderung durch Transpiration der Pflanzen (nur in stark versiegelten
Gebieten bedeutend)



Gattung / Art	<i>Hydrangea petiolaris</i>
Lebensbereich	7.2.6.9
Höhe in cm / Blüte	10-20 / 6-7
Kletterform	Wurzelkletterer
Bemerkungen	nur an intakte Mauern
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bienenweide



Gattung / Art	<i>Hydrangea hydrangeoides</i>
Lebensbereich	6.4.4.9
Höhe in cm / Blüte	10 / 7
Kletterform	Wurzelkletterer
Bemerkungen	nur an intakte Mauern
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bienenweide



Gattung / Art	<i>Clematis alpina</i>
Lebensbereich	8.1.5.9
Höhe in cm / Blüte	2-3 / 5-6
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	schwachwüchsig
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Ampelopsis delavayana</i>
Lebensbereich	9.1.5.9 (6.4.2.9)
Höhe in m / Blüte	8 / unscheinbar
Kletterform	Sprossranker
Bemerkungen	auffallende Beeren
Biodiversitäts- förderung Fauna	Bienenpflanze, Hummeln, Vogelnährgehölz



Gattung / Art	<i>Aristolochia macrophylla</i>
Lebensbereich	2.4.6.9
Höhe in m / Blüte	10 / 5
Kletterform	Schlinger
Bemerkungen	Grosse Blätter, wüchsig
Biodiversitäts- förderung Fauna	Blüten ziehen Fliegen an, Bestäu- bung durch Fliegen



Gattung / Art	<i>Clematis virginiana</i>
Lebensbereich	2.4.5.9 (4.3.4.9)
Höhe in m / Blüte	6 / 8-9
Kletterform	Blattstielranker
Bemerkungen	Duftend
Biodiversitäts- förderung Fauna	Nahrung & Lebensraum für Bienen, Schmetterlinge & Schmetterlings- raupen



Gattung / Art	<i>Lonicera x americana</i>
Lebensbereich	3.3.7.9
Höhe in m / Blüte	8 / 6-9
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	Duft in der Nacht
Biodiversitäts- förderung Fauna	Zieht Nachfalter an



Gattung / Art	<i>Lonicera periclymenum</i>
Lebensbereich	3.2.7.9
Höhe in m / Blüte	4-10 / 5-6
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	Duft in der Nacht
Biodiversitäts- förderung Fauna	Zieht Nachfalter an



Gattung / Art	<i>Rosa arvensis</i>
Lebensbereich	3.3.6.6
Höhe in m / Blüte	4 / 6-7
Kletterform	Spreizklimmer
Bemerkungen	robust, Duft, Hagebutten
Biodiversitäts- förderung Fauna	Blüten & Nektar locken Insekten an, Hagebutten Nahrung für Vögel



Gattung / Art	<i>Menispermum dauricum</i>
Lebensbereich	7.3.2.9
Höhe in cm / Blüte	4 / 6
Kletterform	Schlänger
Bemerkungen	grossblättrig, schwarze Beeren
Biodiversitäts- förderung Fauna	Vogelnährgehölz



Gattung / Art	<i>Hedera helix</i>
Lebensbereich	3.1.5.9
Höhe in cm / Blüte	8-10 / 9-10
Kletterform	3.1.7.9
Bemerkungen	nur intakte Mauern
Biodiversitäts- förderung Fauna	Wertvoll in Wintermonaten für Bienen, Hummeln, Vögel und weitere Insekten



Gattung / Art	<i>Euyonimus fortunei</i>
Lebensbereich	3.1.7.9
Höhe in cm / Blüte	6-7 / unscheinbar
Kletterform	3.1.7.9
Bemerkungen	Herbstfärbung, wintergrün
Biodiversitäts- förderung Fauna	keine Untersuchung bekannt

Anhang 8.2

Auswertung Lebensräume der Schweiz nach Delarze (2015)

Krautige Arten, wandgebundene Fassadenbegrünung

Standort: Trocken, sonnig, spärliche Bewässerung

Im Handel erhältliche Arten

3.4.1.2. Trockene Kalkfelsflur <i>Potentillion</i>
Botanischer Name
<i>Athamanta cretensis</i>
<i>Campanula cochleariifolia</i>
<i>Campanula rotundifolia</i>
<i>Sedum dasyphyllum</i>
<i>Asplenium ruta-muraria</i>
<i>Asplenium trichomanes</i>
<i>Primula auricula</i>
<i>Silene saxifraga</i>
<i>Erinus alpinus</i>
<i>Saxifraga paniculata</i>

3.3.1.5. Trockenwarme Kalkschuttflur <i>Stipion calamagrostis</i>
Botanischer Name
<i>Achnatherum calamagrostis</i>
<i>Calamintha nepeta</i>
<i>Linaria alpina</i> subsp. <i>petraea</i>
<i>Epilobium dodonaei</i>
<i>Euphorbia seguieriana</i> subsp. <i>seguieriana</i>
<i>Laserpitium siler</i>
<i>Peucedanum verticillare</i>
<i>Reseda lutea</i>
<i>Rumex scutatus</i>
<i>Teucrium montanum</i>
<i>Thalictrum minus</i> subsp. <i>saxatile</i>
<i>Vincetoxicum hirundinaria</i>

4.1.1. Wärmeliebende Kalkfels-Pionierflur <i>Alyso-Sedion</i>
Botanischer Name
<i>Acinos arvensis</i>
<i>Allium lusitanicum</i>
<i>Melica ciliata</i>
<i>Sedum acre</i>
<i>Sedum album</i>
<i>Sedum sexangulare</i>

4.1.2. Kalkfels-Pionierflur des Gebirges <i>Drabo-Seslerion</i> (Karstfluren)
Botanischer Name
<i>Draba aizoides</i>
<i>Dryas octopetala</i>
<i>Globularia cordifolia</i>
<i>Gypsophila repens</i>
<i>Helianthemum alpestre</i>
<i>Iberis saxatilis</i>
<i>Dianthus sylvestris</i>
<i>Saxifraga paniculata</i>
<i>Sempervivum tectorum</i>
<i>Teucrium montanum</i>
<i>Thymus praecox</i> subsp. <i>polytrichus</i>

4.2.1.1. Inneralpine Felsensteppe <i>Stipo-Poion</i>
Botanischer Name
<i>Achillea tomentosa</i>
<i>Stipa capillata</i>
<i>Anthyllis vulneraria</i> subsp. <i>polyphylla</i>
<i>Euphorbia seguieriana</i>
<i>Hyssopus officinalis</i>
<i>Petrorhagia saxifraga</i>
<i>Thymus praecox</i>
<i>Thymus pulegioides</i>
<i>Tulipa sylvestris</i>

4.2.1.2. Kontinentaler Halbtrockenrasen <i>Cirsio-Brachypodium</i>
Botanischer Name
<i>Knautia purpurea</i>
<i>Potentilla alba</i>
<i>Scabiosa ochroleuca</i>
<i>Aster linosyris</i>
<i>Bromus erectus</i>
<i>Campanula glomerata</i>
<i>Centaurea jacea</i>
<i>Centaurea scabiosa</i>
<i>Filipendula vulgaris</i>
<i>Prunella grandiflora</i>
<i>Thymus praecox</i>
<i>Trifolium montanum</i>

4.2.2. Mitteleuropäischer Trockenrasen <i>Xerobromion</i>
Botanischer Name
<i>Allium carinatum</i> subsp. <i>pulchellum</i>
<i>Eryngium campestre</i>
<i>Pulsatilla vulgaris</i>
<i>Salvia sclarea</i>
<i>Allium carinatum</i>
<i>Allium sphaerocephalon</i>
<i>Alyssum montanum</i>
<i>Anthericum liliago</i>
<i>Artemisia campestris</i>
<i>Aster linosyris</i>
<i>Helianthemum nummularium</i>
<i>Hippocrepis comosa</i>
<i>Pimpinella saxifraga</i>
<i>Potentilla verna</i>
<i>Pseudolysimachion spicatum</i>
<i>Seseli montanum</i>
<i>Stachys recta</i>
<i>Teucrium chamaedrys</i>

4.2.4. Mitteleuropäischer Halbtrockenrasen <i>Mesobromion</i>
Botanischer Name
<i>Euphorbia verrucosa</i>
<i>Ononis repens</i>
<i>Ajuga genevensis</i>
<i>Briza media</i>
<i>Buphthalmum salicifolium</i>

<i>Bromus erectus</i>
<i>Campanula glomerata</i>
<i>Carex caryophylla</i>
<i>Carex montana</i>
<i>Centaurea jacea</i>
<i>Centaurea scabiosa</i>
<i>Daucus carota</i>
<i>Dianthus carthusianorum</i>
<i>Euphorbia cyparissias</i>
<i>Festuca ovina</i>
<i>Galium verum</i>
<i>Helianthemum nummularium</i>
<i>Hieracium pilosella</i>
<i>Hippocrepis comosa</i> L.
<i>Ononis spinosa</i>
<i>Pimpinella saxifraga</i>
<i>Plantago media</i>
<i>Potentilla verna</i>
<i>Primula veris</i>
<i>Salvia pratensis</i>
<i>Sanguisorba minor</i>
<i>Silene nutans</i>
<i>Scabiosa columbaria</i>
<i>Thymus serpyllum</i>
<i>Trifolium montanum</i>

4.3.1. Blaugrashalde <i>Seslerion</i>
Botanischer Name
<i>Scutellaria alpina</i>
<i>Acinos alpinus</i>
<i>Alchemilla conjuncta</i>
<i>Androsace villosa</i>
<i>Anthyllis vulneraria</i>
<i>Centaurea scabiosa</i>
<i>Cytisus emeriflorus</i>
<i>Erigeron alpinus</i>
<i>Helianthemum nummularium</i>
<i>Laserpitium siler</i>
<i>Phyteuma orbiculare</i>
<i>Thymus praecox</i>

5.1.1. Trockenwarmer Krautsaum <i>Geranium sanguinei</i>
Botanischer Name
<i>Anemone sylvestris</i>
<i>Anthericum ramosum</i>
<i>Bupleurum falcatum</i>
<i>Clematis recta</i>
<i>Coronilla coronata</i>
<i>Dictamnus albus</i>
<i>Fragaria viridis</i>
<i>Geranium sanguineum</i>
<i>Peucedanum carvifolia</i>
<i>Peucedanum cervaria</i>
<i>Seseli libanotis</i>
<i>Thalictrum minus</i>
<i>Trifolium rubens</i>
<i>Vicia cracca</i>
<i>Anthericum liliago</i>
<i>Arabis turrita</i>
<i>Buphthalmum salicifolium</i>
<i>Campanula persicifolia</i>
<i>Campanula rapunculoides</i>
<i>Campanula rapunculus</i>
<i>Cytisus decumbens</i>
<i>Hieracium umbellatum</i>
<i>Hypericum montanum</i>
<i>Inula conyzae</i>
<i>Iris graminea</i>
<i>Laserpitium siler</i>
<i>Medicago falcata</i>
<i>Polygonatum odoratum</i>
<i>Potentilla rupestris</i>
<i>Rosa gallica</i>
<i>Rosa spinosissima</i>
<i>Ruta graveolens</i>
<i>Silene flos-jovis</i>
<i>Silene nutans</i>
<i>Tanacetum corymbosum</i>
<i>Teucrium chamaedrys</i>
<i>Veronica teucrium</i>

7.2.1. Trockenwarme Mauerflur <i>Centrantho-Parietarien</i>
Botanischer Name
<i>Centranthus ruber</i>
<i>Corydalis lutea</i>
<i>Cymbalaria muralis</i>
<i>Erigeron karvinskianus</i>
<i>Erysimum cheiri</i>
<i>Arabis alpina</i>
<i>Artemisia pontica</i>
<i>Asarina procumbens</i>
<i>Asplenium ruta-muraria</i>
<i>Asplenium trichomanes</i>
<i>Aurinia saxatilis</i>
<i>Campanula poscharskyana</i>
<i>Chelidonium majus</i>
<i>Satureja hortensis</i>
<i>Sedum album</i>
<i>Sedum dasyphyllum</i>
<i>Sedum spurium</i>
<i>Sedum telephium</i>
<i>Sempervivum tectorum</i>

5.4.3. Subalpine Kalkheide (Erikaheide) <i>Ericion</i> , z.t. verholzend
Botanischer Name
<i>Rhododendron hirsutum</i>
<i>Erica carnea</i>
<i>Juniperus communis</i>

Verholzende Arten

5.3.2. Trockenwarmes Gebüsch

Berberidion

Botanischer Name
<i>Amelanchier ovalis</i>
<i>Colutea arborescens</i>
<i>Cotoneaster tomentosus</i>
<i>Lonicera caprifolium</i>
<i>Lycium barbarum</i>
<i>Rosa glauca</i>
<i>Rosa majalis</i>
<i>Rosa villosa</i>
<i>Berberis vulgaris</i>
<i>Cotinus coggygria</i>
<i>Crataegus monogyna</i>
<i>Hippocrepis emerus</i>
<i>Hippophaë rhamnoides</i>
<i>Ligustrum vulgare</i>
<i>Prunus mahaleb</i>
<i>Prunus spinosa</i>
<i>Rhamnus cathartica</i>
<i>Rosa rubiginosa</i>
<i>Rosa tomentosa</i>
<i>Viburnum lantana</i>

Anhang xy

Auswertung Lebensräume der Schweiz nach Delarze (2015)

Krautige Arten, wandgebundene Fassadenbegrünung

Standort: Frisch, sonnig bis halbschattig (einzelne Arten auch Schatten), regelmässige Bewässerung
im Handel erhältliche Arten

4.5.1. Talfettwiesen (Fromentalwiese) <i>Arrhenatherion</i>
Botanischer Name
<i>Crepis biennis</i>
<i>Geranium pratense</i>
<i>Malva moschata</i>
<i>Achillea millefolium</i>
<i>Anthriscus sylvestris</i>
<i>Campanula rapunculus</i>
<i>Centaurea jacea</i>
<i>Knautia arvensis</i>
<i>Lathyrus pratensis</i>
<i>Plantago lanceolata</i>
<i>Rumex acetosa</i>
<i>Silene vulgaris</i>
<i>Veronica chamaedrys</i>
<i>Vicia cracca</i>

4.5.2. Bergfettwiese (Goldhaferwiese) <i>Polygono-Trisetion</i>
Botanischer Name
<i>Muscari botryoides</i>
<i>Narcissus radiiflorus</i>
<i>Anthriscus sylvestris</i>
<i>Astrantia major</i>
<i>Geranium phaeum</i>
<i>Geranium sylvaticum</i>
<i>Knautia dipsacifolia</i>
<i>Lathyrus pratensis</i>
<i>Phyteuma spicatum</i>
<i>Pimpinella major</i>
<i>Polygonum bistorta</i>
<i>Primula elatior</i>
<i>Trollius europaeus</i>
<i>Viola tricolor</i>

4.5.3. Talfettweide (Kammgrasweide) <i>Cynosurion</i>
Botanischer Name
<i>Achillea millefolium</i>
<i>Alchemilla vulgaris</i>
<i>Bellis perennis</i>
<i>Carum carvi</i>
<i>Hypochaeris radicata</i>
<i>Plantago major</i>
<i>Prunella vulgaris</i>

5.1.2. Mesophiler Krautsaum <i>Trifolion medii</i>
Botanischer Name
<i>Agrimonia eupatoria</i>
<i>Geranium phaeum</i>
<i>Lathyrus latifolius</i>
<i>Sedum telephium</i>
<i>Vicia sylvatica</i>
<i>Achillea millefolium</i>
<i>Calamintha menthifolia</i>
<i>Campanula trachelium</i>
<i>Geranium phaeum</i>
<i>Hypericum perforatum</i>
<i>Knautia dipsacifolia</i>
<i>Lathyrus sylvestris</i>
<i>Lithospermum officinale</i>
<i>Origanum vulgare</i>
<i>Potentilla sterilis</i>
<i>Veronica chamaedrys</i>

5.1.5. Nährstoffreicher Krautsaum <i>Aegopodion + Alliarion</i>
Botanischer Name
<i>Anthriscus cerefolium</i>
<i>Bryonia dioica</i>
<i>Geranium robertianum</i>
<i>Ornithogalum nutans</i>
<i>Viola odorata</i>
<i>Aegopodium podagraria</i>
<i>Ajuga reptans</i>
<i>Alliaria petiolata</i>
<i>Chelidonium majus</i>
<i>Corydalis cava</i>
<i>Geranium pyrenaicum</i>
<i>Glechoma hederacea</i>
<i>Hesperis matronalis</i>
<i>Lamium maculatum</i>
<i>Vicia sepium</i>

5.2.1. Kalkreiche Schlagflur <i>Atropion</i>
Botanischer Name
<i>Hypericum hirsutum</i>
<i>Stachys alpina</i>
<i>Digitalis lutea</i>
<i>Eupatorium cannabinum</i>
<i>Fragaria vesca</i>
<i>Verbascum nigrum</i>

7.1.1. Feuchte Trittflur <i>Agropyro-Rumicion</i>
Botanischer Name
<i>Mentha pulegium</i>
<i>Mentha suaveolens</i>
<i>Potentilla anserina</i>
<i>Teucrium scordium</i>

3.4.1.3. Schattige Kalkfelsflur <i>Cystopteridion</i>
Botanischer Name
<i>Campanula cochleariifolia</i>
<i>Phyllitis scolopendrium</i>

7.1.8. Lägerflur der Tieflagen <i>Arction</i>
Botanischer Name
<i>Ballota nigra</i>
<i>Lamium album</i>
<i>Mentha spicata</i>
<i>Artemisia vulgaris</i>
<i>Chelidonium majus</i>
<i>Geranium pyrenaicum</i>
<i>Melissa officinalis</i>

Verholzende Arten

5.3.3. Mesophiles Gebüsch <i>Pruno-Rubion</i>
Botanischer Name
<i>Ribes uva-crispa</i>
<i>Corylus avellana</i>
<i>Crataegus laevigata</i>
<i>Crataegus monogyna</i>
<i>Euonymus europaeus</i>
<i>Frangula alnus</i>
<i>Lonicera xylosteum</i>
<i>Prunus spinosa</i>
<i>Rosa canina</i>
<i>Viburnum opulus</i>

5.3.5. Gebüschreiche Vorwaldgesellschaften <i>Sambuco-Salicion</i>
Botanischer Name
<i>Salix caprea</i>
<i>Sambucus nigra</i>
<i>Sambucus racemosa</i>
<i>Corylus avellana</i>

Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de Bachelor Diplôme 2020

Quoc Hung Alexandre Tran

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

-  Professeur
Dr. Klaus Kreher
-  Expert
Prof. Dr. Andreas Luible
-  Date de la remise du rapport
14.08.2020

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2019/20	No TD / Nr. DA ER/2020/83
Mandant / Auftraggeber ☒ HES—SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Quoc Hung Tran Professeur / Dozent Klaus Kreher	Lieu d'exécution / Ausführungsort ☒ HES—SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit ☐ oui / ja ¹ ☒ non / nein	Expert / Experte (données complètes) Prof. Dr. Andreas Luible (andreas.luible@hslu.ch)	

Titre / Titel Etude sur l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel
Description / Beschreibung Les façades vertes sont reconnues pour améliorer l'acoustique et la qualité de l'air. Dans le cas d'un verdissement intensif, l'effet du refroidissement par transpiration et l'influence de l'augmentation de l'inertie thermique (due à la masse du sol et des plantes, et à l'humidité) peuvent également être pris en compte. Les travaux prendront en compte ces aspects pour le calcul du bilan énergétique annuel et fourniront des informations sur l'efficacité. En même temps, des calculs de simulation seront effectués pour montrer l'intégration des mesures de végétalisations lors de l'utilisation des programmes de simulation.
Objectifs / Ziele — Recherche de l'art de lieu concernant la physique du bâtiment — Etude de l'impact de l'évapotranspiration et l'implémentations dans un calcul du bilan énergétique (BSol) — Etude de l'influence de l'inertie thermique du bâtiment par rapport d'un végétalisation de la façade / toiture. — Rédaction d'un rapport scientifique comme résumé des résultats

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 25.05.2020 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation Semaine / Woche 26 (22.06 – 26.06.2020) Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 14.08.2020, 12:00 Exposition / Ausstellung der Diplomarbeiten: 28.08.2020 (si autorisé / falls genehmigt) Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine / Woche 36 (31.08 – 04.09.2020)
---	--

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.



Source : apur (2016)

Travail de diplôme | édition 2020 |

Filière
*Énergie et techniques
environnementales*

Domaine d'application
Énergies renouvelables

Professeur responsable
*Klaus Kreher
klaus.kreher@hevs.ch*

Étude de l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment par rapport au bilan énergétique annuel

Diplômant/e Alexandre Tran

Objectif du projet

L'objectif de ce projet consiste à déterminer l'impact d'une végétalisation d'un bâtiment sur le bilan énergétique annuel et le confort thermique. Pour cela, il faudra déterminer l'évapotranspiration et ensuite l'implémenter dans le logiciel bSol. Ce travail étudie aussi l'impact de l'inertie thermique sur ces bâtiments végétalisés.

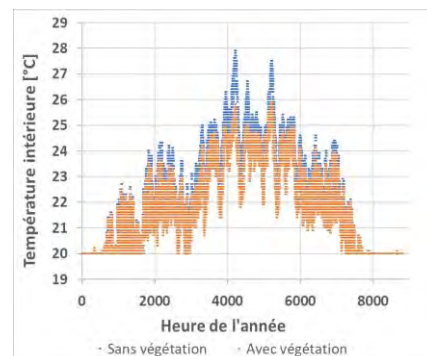
Méthodes | Expériences | Résultats

Ce travail considère des façades végétalisées composées de plantes grimpantes persistantes situées à Viège. Afin d'identifier l'impact de ces façades, il a fallu calculer l'évapotranspiration réelle et son impact sur le refroidissement de la température ambiante extérieure. Ce refroidissement est ensuite introduit dans le logiciel de simulation bSol comme étant une diminution de la température ambiante extérieure. Ensuite, il a été possible de réaliser les simulations qui ont permis de déterminer l'impact des façades végétalisées sur le bilan énergétique annuel. Ce dernier a été déterminé pour un bâtiment sans climatisation, un bâtiment avec climatisation et plusieurs bâtiments de différents étages. L'impact sur le confort thermique a aussi été pris en compte. Finalement, l'étude présente également l'impact de l'inertie thermique dans le cas d'un bâtiment végétalisé.

Ce travail a permis de montrer que l'impact sur le bilan énergétique est faible en raison d'un faible besoin en climatisation à Viège. En revanche, le confort thermique se trouve grandement amélioré grâce à une diminution des heures de surchauffe et une diminution des températures intérieures. Finalement, il a été montré qu'une haute inertie thermique réduit l'impact de la façade végétalisée.

	Sans climatisation	
	Sans végé	Avec végé
Energie chauffage [kWh]	9164	9320
Energie climatisation [kWh]	0	0
Total [kWh]	9164	9320
	Avec climatisation	
	Sans végé	Avec végé
Energie chauffage [kWh]	9164	9320
	215	0
Total [kWh]	9379	9320

Impact sur le bilan énergétique annuel pour des bâtiments avec et sans climatisation.



Comparaison des températures intérieures entre un bâtiment sans végétation et un bâtiment avec végétation.

Remerciements

Je tiens à remercier M. Klaus Kreher, professeur référent, de m'avoir encadré durant tout le travail de Bachelor et de m'avoir apporté un précieux soutien dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également les professeurs Sébastien Dervev et Pierre-André Seppey et l'assistant Timothée Carron pour leur aide notamment dans la compréhension de la physique du bâtiment et du logiciel bSol et pour l'acquisition des données climatiques.

Je remercie également ma famille et mes amis de m'avoir soutenu durant cette période de travail de Bachelor.

Tables des matières

Listes des figures	iii
Listes des graphiques	iii
Liste des tableaux.....	iii
Glossaire.....	iv
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs	2
1.3 Cahier des charges.....	3
1.4 Méthodologie.....	3
2 Couvertures végétales.....	4
2.1 Toitures végétales	4
2.1.1 Définition et composants	4
2.1.2 Typologie des toits.....	5
2.2 Façades végétalisées	7
2.2.1 Définition.....	7
2.2.2 Typologie des façades	7
2.3 Avantages.....	9
3 Etat de l'art	12
4 Bilan énergétique dans une surface végétalisée	16
5 Inertie thermique d'un bâtiment.....	18
6 Evapotranspiration	20
6.1 Définition.....	20
6.2 Calcul de l'évapotranspiration.....	21
6.3 Calcul de l'impact de l'évapotranspiration sur la température environnante.....	23
6.4 Résultats de l'évapotranspiration et de son impact	25
6.5 Analyse et résumé des résultats de l'évapotranspiration et de son impact	26
7 Simulation sur bSol	27
7.1 Paramètres de simulation dans bSol	27
7.1.1 Paramètres climatiques.....	27
7.1.2 Paramètres des bâtiments	28
7.1.3 Paramètres d'exploitation.....	28
7.2 Méthode de simulation des façades végétalisées.....	28
7.2.1 Impact sur le bilan énergétique	29
7.2.2 Impact sur le confort thermique en été	29
7.2.3 Impact par rapport à l'inertie thermique	29

8 Présentation des résultats de simulation	30
8.1 Impact sur le bilan énergétique	30
8.2 Impact sur le confort thermique en été	31
8.3 Impact de l'inertie thermique	33
9 Analyse et résumé des résultats de simulation	34
9.1 Impact sur le bilan énergétique	34
9.2 Impact sur le confort thermique en été	35
9.3 Impact de l'inertie thermique	36
9.4 Limite de la méthode proposée	37
10 Conclusions	38
11 Liste de références bibliographiques	40
12 Annexes.....	43
Annexe 1 Évolution de l'écart de la température mondiale	43
Annexe 2 Évolution de l'écart de la température en Suisse	43
Annexe 3 Comparaison du cas de Montréal avec d'autres cas au Canada de la température maximale annuelle au niveau de la membrane d'étanchéité	44
Annexe 4 Caractéristiques majeures des quatre toits étudiés par Hui (2009).....	44
Annexe 5 Variation de l'humidité relative à Viège	45
Annexe 6 Hauteur du soleil et horizon (en bleu) pour Viège	45
Annexe 7 Température ambiante extérieure à Viège	45
Annexe 8 Irradiance pour Viège.....	46
Annexe 9 Dimensionnement du facteur d'ombrage dynamique	46
Annexe 10 Composition des murs, du toit et du sol	46
Annexe 11 Dimensions des surfaces vitrées par étage	47
Annexe 12 Dimensions des surfaces opaques	47
Annexe 13 Valeurs pour les paramètres d'exploitation dans le logiciel bSol	47
Annexe 14 Bilans énergétiques pour les bâtiments de différents étages	48

Listes des figures

Figure 1 Flux thermiques à travers une surface végétalisée. Tiré de Djedjig (2013).....	16
Figure 2 Déphasage et amortissement de la variation de la température intérieure grâce à l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)	18
Figure 3 Impact de l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)	19
Figure 4 Phénomène d'évapotranspiration. Tiré de Arborera (2004)	20
Figure 5 Comparaison des heures de surchauffe (en haut : sans végétalisation, en bas : avec végétalisation)	32

Listes des graphiques

Graphique 1 Variation de l'évapotranspiration durant l'année	25
Graphique 2 Variation de la différence de température extérieure durant l'année.....	26
Graphique 3 Comparaison des températures intérieures avec la végétalisation	31
Graphique 4 Écart de température intérieure	31

Liste des tableaux

Tableau 1 Comparaison entre les toits extensifs et intensifs. Tiré de (Trottier, 2007, p. 6)	6
Tableau 2 Exemples de plantes grimpantes. Tiré de (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011)	8
Tableau 3 Comparaison des températures de surface pour différents matériaux (Trottier, 2007, p. 42)	14
Tableau 4 Variations de la température sur les différents types de toit. Tiré de Sam C. M. Hui (2009) p. 35	15
Tableau 5 Composition des trois bâtiments pour l'analyse par rapport à l'inertie thermique.....	29
Tableau 6 Consommation énergétique annuelle du bâtiment simulé avec et sans climatisation	30
Tableau 7 Impact de la végétalisation sur le bilan énergétique annuelle en fonction du nombre d'étages	30
Tableau 8 Comparaison des bilans énergétiques d'un bâtiment végétalisé et d'un bâtiment non végétalisé pour différentes inerties.....	33
Tableau 9 Comparaison des températures, des écarts de température et des heures de surchauffe (confort thermique) d'un bâtiment végétalisé et d'un bâtiment non végétalisé pour différentes inerties thermiques	33

Glossaire

Abréviations	Définition
AFAT	Secteur de l'agriculture, des forêts et des changements d'affectations des terres
CFC	Chlorofluorocarbure
CH₄	Méthane
CLO	Rayonnement à courtes longueurs d'onde
CO₂	Dioxyde de carbone
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EPDM	Éthylène-propylène-diène monomère
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLO	Rayonnement à grandes longueurs d'onde
N₂O	Protoxyde d'azote
NCCS	Centre national pour les services climatiques
PM	Équation d'évapotranspiration de Penman-Monteith
PVC	Polychlorure de vinyle
SDES	Le service de la donnée et des études statistiques
TPO	Thermoplastique polyoléfine
UQAM	Université du Québec à Montréal

Variable	Unités	Définition
ΔH_{vap}	[MJ/kg]	Chaleur latente de vaporisation
ΔT	[°C]	Différence de température provoquée par l'évapotranspiration
a	[m ² /s]	Diffusivité thermique du matériau
C_p	[J/kg/K]	Capacité thermique du matériau
e	[m]	Épaisseur de la couche de végétation
E_{lat_surfacique}	[MJ/m ²]	Énergie latente surfacique liée à l'évapotranspiration
E_{lat_totale}	[MJ]	Énergie latente totale liée l'évapotranspiration
ETM	[mm]	Évapotranspiration maximale
ETR	[mm]	Évapotranspiration réelle
ET_{ref}	[mm]	Évapotranspiration potentielle
ET_{ref-heure}	[mm]	Évapotranspiration de référence par heure
ET_{ref-jour}	[mm]	Évapotranspiration de référence par jour
ETR_{masse}	[kg/m ²]	Évapotranspiration réelle
H_r	[%]	Humidité relative
k_{air-plante}	[-]	Taux d'air dans le volume de la façade végétalisée
k_c	[-]	Coefficient de culture
k_{refroidissement}	[-]	Coefficient de refroidissement
k_s	[-]	Coefficient sécheresse
P	[mm]	Précipitations
R	[mm]	Ruissellement / écoulement souterrain
R_{gcal}	[cal/cm ² /jour]	Rayonnement global

RgWatt	[W/m ²]	Rayonnement global
S	[mm]	Accumulation de la période précédente
S + ΔS	[mm]	Accumulation à la fin de la période
Sveg	[m ²]	Surface végétalisée
T	[°C]	Température moyenne journalière
Text	[°C]	Température extérieure
Tint	[°C]	Température intérieure
λ	[W/m/K]	Conductivité thermique du matériau
ρ	[kg/m ³]	Masse volumique du matériau
ρair	[kg/m ³]	Masse volumique de l'air
ρvapeur d'eau	[kg/m ³]	Masse volumique de la vapeur d'eau

1 Introduction

1.1 Contexte

Depuis les années 1900, un réchauffement climatique est incontestablement observé comme le montrent les mesures effectuées par Morice, Kennedy, Rayner & Jones (2012) (annexe 1) au niveau mondial ou alors par le National Centre for climate services NCCS (s. d.) pour la Suisse (annexe 2). L'écart de température pour la Suisse est encore plus grand que la moyenne mondiale, soit 2.1 °C depuis ces 150 dernières années. D'après Dessus, Laponche & Le Treut (2008), une des causes de ce phénomène provient sans aucun doute des gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) ou encore les chlorofluorocarbures (CFC). Dans leur rapport de synthèse sur les changements climatiques, GIEC, Pachauri & Meyer (2015) affirment que :

L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie et, aujourd'hui, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont les plus élevées jamais observées. Les changements climatiques récents ont eu de larges répercussions sur les systèmes humains et naturels. (p.2)

D'après GIEC et al. (2015), il est donc extrêmement probable que ces gaz soient la cause principale du réchauffement climatique. Plusieurs changements ont été observés comme le réchauffement de l'atmosphère et des océans, la diminution de la couverture neigeuse, ou encore l'élévation des niveaux des mers. Des phénomènes extrêmes comme la diminution des extrêmes de froid, l'augmentation des extrêmes de chaleur, la hausse des niveaux extrêmes de pleine mer et la multiplication de fortes précipitations dans diverses régions ont également été attribués aux activités humaines. Pour éviter un réchauffement supplémentaire et une modification durable des composantes du système, il est impératif de diminuer fortement et durablement les émissions de gaz à effets de serre. Dans le cas contraire, les conséquences sur les populations et les écosystèmes seront encore plus graves. Pour ce faire, les émissions de GES devront être quasi nulles d'ici la fin du siècle afin de limiter le réchauffement à moins de 2°C. Cela entraînera des complications au niveau de la technique, de l'économie, du social et des institutions. Cependant, plus les mesures d'atténuation tarderont à être prises, plus ces complications seront difficiles à surmonter. Pour y arriver, plusieurs éléments sont nécessaires afin d'atteindre les objectifs de réduction du réchauffement climatique : « des institutions solides, une gouvernance rationnelle, l'innovation, l'investissement dans les technologies et une infrastructure respectueuse de l'environnement, des moyens de subsistance durables et des comportements et modes de vie appropriée. » (GIEC et al., 2015, p. 27). Les actions entreprises devront être réalisées à l'échelle internationale, nationale et régionale afin d'en optimiser l'efficacité. Pour ce qui est des émissions de CO₂, elles sont imputables à l'utilisation de combustibles fossiles et aux procédés industriels. D'après suisseEnergie (s. d.), à l'échelle mondiale, les combustibles fossiles sont bien plus présents et représentent 81.1% (2016). Pour la Suisse, en 2018, deux tiers de l'énergie finale consommée provenaient de sources non renouvelables (carburants et combustibles issus du pétrole, gaz naturel). Au niveau mondial, GIEC et al. (2015) mentionnent les plus grands secteurs d'émission de GES comme étant la production d'électricité (25%), l'AFAT (24%), l'industrie (21%) et le transport (14%).

Ainsi, un réchauffement mondial de 1.5°C aura un impact sur les températures extrêmes. Cela entraînera non seulement des chaleurs extrêmes plus fréquentes et plus intenses dans toutes les régions de la terre, mais aussi des périodes de chaleur plus longues (IPCC, 2018). Ces augmentations de température, notamment en été, entraîneront donc une augmentation de consommation d'énergie

(climatisation par exemple) afin de pouvoir conserver un confort thermique acceptable dans les habitations. Or, le domaine du bâtiment représente déjà une grande partie de la consommation d'énergie. D'après suisseEnergie (s. d.), en Suisse, 29% de l'énergie finale consommée proviennent des ménages pour l'année 2019 dont 69.5% sont utilisés pour la technique du bâtiment (chauffage 67% et ventilation et autre 2%). Pour la France, le service de la donnée et des études statistiques SDES (2019) indique que ce pourcentage s'est aussi élevé à 29% en 2017 dont les parts sont réparties comme suit : électricité (33%), gaz naturel (28%), les énergies renouvelables (22%) et le pétrole (13%). Pour le secteur tertiaire, il est de 17.4%. Pour certains pays, la situation est bien plus grave. D'après Metta (2015), pour Hong-Kong, le bâtiment représente 63% de l'énergie consommée. En matière d'électricité, la part liée au bâtiment est de 90%. Cela est principalement dû à l'utilisation intensive de la climatisation. Cette dernière représente entre 30 et 60% en fonction des périodes. Cependant, il est important de ne pas négliger le fait que Hong-Kong est situé dans un climat subtropical.

Le DETEC (s. d.), Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, mentionne que la Suisse veut également participer aux efforts internationaux visant à limiter le réchauffement climatique à 1.5°C. Pour cela, la Stratégie 2050 a été instaurée. Quatre axes composent cette stratégie : amélioration de l'efficacité énergétique, développement des énergies renouvelables, prise de mesures dans le domaine des réseaux électriques et l'arrêt du nucléaire. À cela s'ajoute la réduction de la consommation énergétique. En se basant sur la nécessité de sortir du nucléaire et de diminuer la consommation énergétique, il n'est donc pas concevable d'aller dans une stratégie qui nécessiterait d'augmenter la consommation.

Afin de faire face à la surconsommation d'énergie et au réchauffement climatique, la végétalisation des rues (arbres par exemple) ou encore des surfaces végétalisées (toitures et façades) est une solution intéressante. En effet, d'après Bernier (2011), cette solution offre un rafraîchissement naturel avec peu voire sans consommation d'énergies fossiles durant l'exploitation de ces structures. Ces dernières offrent des avantages au niveau thermique, mais aussi au niveau de l'isolation phonique, des îlots de chaleur urbains ou encore de la gestion des eaux de pluie. L'évapotranspiration, qui est un phénomène naturel de régulation des températures des plantes, permet un rafraîchissement de l'air autour des feuilles et du substrat. De plus, l'ombrage offert permet de diminuer les radiations solaires durant l'été. Finalement, pour les toitures ou façades végétales, elles représentent également une couche isolante supplémentaire (inertie). En diminuant ainsi la consommation énergétique et l'utilisation des énergies fossiles, cela aidera également à atteindre les objectifs concernant le réchauffement climatique. Ces enveloppes végétales permettent donc de se diriger vers un futur moins énergivore et plus durable.

1.2 Objectifs

Ces structures végétalisées offrent plusieurs avantages : isolation phonique, amélioration de la qualité de l'air, diminution des effets d'îlot de chaleur urbain, diminution des flux thermiques. Ce travail traitera seulement de la partie thermique qui prend en considération le bilan énergétique annuel, le confort thermique et l'influence de l'inertie thermique pour un habitat collectif équipé d'une façade végétale. Ainsi, l'objectif de ce travail consiste donc d'abord à calculer l'évapotranspiration pour en déterminer son effet sur la température ambiante extérieure (proche du mur du bâtiment). Ensuite, cet effet est implémenté dans le logiciel bSol afin d'en déterminer l'impact des façades végétalisées sur le bilan énergétique et le confort thermique. Ce travail présente également une étude de l'impact de la végétalisation sur des bâtiments d'inertie différente. L'étude considère des façades végétalisées composées de plantes grimpantes persistantes.

1.3 Cahier des charges

Le cahier des charges de ce travail est le suivant :

- Recherche de l'état de l'art concernant la physique du bâtiment
- Étude de l'impact de l'évapotranspiration et l'implémentation dans un calcul du bilan énergétique (bSol)
- Étude de l'influence de l'inertie thermique du bâtiment par rapport à une végétalisation de la façade / toiture.
- Rédaction d'un rapport scientifique comme résumé des résultats

1.4 Méthodologie

Dans un premier temps, les différents types de couvertures végétalisées avec leurs caractéristiques et leurs avantages sont détaillés. Un état de l'art est ensuite réalisé afin de présenter les différents travaux effectués au niveau mondial. S'en suit le bilan énergétique d'une surface végétalisée afin de mieux comprendre les processus thermiques présents. Finalement, un chapitre axé sur l'inertie thermique permettra de mieux comprendre ce concept et son impact sur les flux thermiques dans un bâtiment.

Dans un deuxième temps, ce travail présente l'évapotranspiration ainsi que le calcul permettant de la quantifier. Un autre calcul permet de déterminer le refroidissement de la température environnante à la végétation et donc du mur du bâtiment. Le refroidissement de l'air est ensuite implémenté dans le logiciel bSol par le biais des fichiers climatiques. Ces derniers seront modifiés en fonction de la capacité de refroidissement en déduisant la différence de température à la température ambiante.

Dans un troisième temps, il s'agit de modéliser le type de bâtiment étudié sur bSol. Pour ce faire, ce logiciel a besoin des caractéristiques de différentes surfaces du bâtiment (vitres, murs, toit et sol), des données d'exploitation (ventilation, charges internes, occultation des fenêtres, etc.) ou encore de la surface énergétique (SRE). Ensuite, il est également nécessaire de récupérer les données climatiques pour la ville de Viège (Suisse) afin de les intégrer dans le logiciel bSol.

Finalement, plusieurs simulations vont être réalisées pour étudier de l'impact d'une végétalisation des façades. Ces simulations sont applicables pour des façades végétalisées composées de plantes grimpantes persistantes. Les simulations sont divisées en trois parties. La première étude analyse l'impact de la végétalisation sur le bilan énergétique d'un bâtiment sans climatisation, un bâtiment avec climatisation et de bâtiments de différentes hauteurs. La deuxième étude met en avant l'impact des façades végétalisées sur le confort thermique. La dernière étude permet de déterminer l'impact de ces façades sur le bâtiment en fonction de différentes inerties thermiques.

2 Couvertures végétales

2.1 Toitures végétales

2.1.1 Définition et composants

Selon Bouattour & Fuchs (2009),

Le principe de la toiture végétale (aussi : toit vert ou toit végétalisé) existe depuis la préhistoire. Il consiste à recouvrir d'un substrat végétalisé un toit plat ou à faible pente (jusqu'à 35° et rarement plus, au-delà, on parlera de mur végétalisé) (p. 5).

Le terme « toiture végétalisée » est utilisé de manière générale pour désigner tout type de toit avec des plantations végétales. Il existe plusieurs termes plus spécifiques servant à définir ce genre de structure comme écotait, toit vivant, toit marron, toit vert ou encore terrasse-jardin. Souvent utilisés sans distinction, il y a tout de même certaines différences entre ces termes. En effet, les deux premiers sont « des systèmes de végétalisation qui accomplissent un cycle de vie saisonnier tel que la dormance due à la chaleur ou au froid » (Djedjig, 2013, p. 30). Quant au toit marron (utilisé au Royaume-Uni), il réutilise la terre provenant des processus d'aménagement urbain dans lequel les sols perturbés sont utilisés comme substrat. Le toit vert peut avoir deux connotations. Il peut correspondre au sens général caractérisant tout type de toit végétalisé ou alors désigner une fine couche verte de substrat et de végétation. Finalement, le toit-terrasse représente un jardin sur le toit d'un bâtiment. Actuellement, il n'existe aucune taxinomie universelle ou accord sur la terminologie. Cela explique pourquoi les différents termes sont utilisés de manière interchangeable (Coffman, 2007). Les couches composant les toitures végétalisées peuvent varier entre les systèmes. Cependant, d'après Djedjig (2013), les éléments suivants sont généralement présents :

- La végétation : le choix du type de plante va dépendre de plusieurs facteurs, en particulier le climat, la hauteur finale désirée des plantes, la période de floraison et le type de substrat présent. Spala et al. (2008) proposent un état de l'art sur la sélection des plantes.
- Le substrat de culture : il contient tous les éléments nutritifs utiles pour les plantes. Il doit pouvoir laisser l'eau s'infiltrer, retenir une partie des eaux de pluie et évacuer le surplus.
- Un filtre géotextile : Ce filtre évite que la couche de drainage soit bouchée.
- Une couche de drainage : Cette couche permet d'évacuer l'eau en surplus ou d'en retenir lorsque cela est nécessaire. Elle offre également une aération. En effet, les conditions doivent être optimisées afin de garantir la bonne santé des plantes.
- Une barrière anti-racine : cette barrière protège la membrane d'étanchéité contre la pénétration et la dégradation des racines. Certaines membranes d'étanchéité sont suffisamment résistantes de sorte que la barrière anti-racine ne soit pas nécessaire (par exemple les membranes en PVC ou EPDM)
- Une membrane d'étanchéité : Barrière protectrice contre les infiltrations. Elle évacue aussi le surplus d'eau lorsque le toit végétal est saturé. Certains types de membranes nécessitent une barrière anti-racine (élastomère ou bitume) et d'autres pas (TPO et EPDM).
- La structure portante : Elle correspond au toit à proprement dit qui peut être en béton, en acier ou encore en bois. La solidité du toit doit être assurée afin qu'il puisse contenir les différentes couches. À noter que lorsque le substrat est saturé, le poids peut doubler, voire tripler.

2.1.2 Typologie des toits

Il existe plusieurs types de toitures végétalisées, avec des caractéristiques propres (choix du type de végétation, le poids ou encore les coûts). En effet, en fonction de l'épaisseur du substrat et le degré d'arrosage souhaité, trois typologies se présentent : extensive, semi-extensive (ou semi-intensive) et intensive (Bouattour & Fuchs, 2009). Les trois diffèrent également par leurs besoins en énergie et en ressources (Trottier, 2007).

Typologie extensive

Les toits verts extensifs se distinguent des intensifs par un poids plus léger, un plus faible coût et un entretien minimal (Bernier, 2011). Les plantations choisies ne nécessitent pas ou peu d'arrosage (sauf en cas de longue sécheresse). Les conditions sont donc « sévères » pour les plantes. Le substrat possède une épaisseur, dite mince, pouvant aller jusqu'à 15 cm (voire 20 cm dans certains cas). La diversité des espèces végétales utilisables est restreinte (Djedjig, 2013). Le substrat choisi possède des propriétés qui lui permettent de retenir le plus d'eau possible. La mousse, l'herbe et des plantes grasses peuvent être utilisées comme végétation (Bouattour & Fuchs, 2009). Ainsi, un toit vert extensif serait semblable à un terrain vague laissé à lui-même. La stabilité de l'écosystème est régie par les intrants d'eau et d'énergie et sans intervention humaine (Trottier, 2007).

Typologie intensive

Appelés aussi « terrasse plantée » ou « toitures jardins », les toits verts intensifs possèdent un poids et un coût plus élevés, des plantations importantes et un entretien plus exigeant. En effet, ces structures peuvent contenir également des arbres et des buissons offrant ainsi un écosystème plus complexe (Bernier, 2011). Ainsi, la diversité de plantes utilisables est plus importante pour ce type de toit. L'épaisseur du substrat peut varier entre 20 cm et 100 cm (Djedjig, 2013). Les types de plantes utilisés pour les toits verts intensifs consomment plus d'éléments nutritifs. De ce fait, la capacité en termes de retenue d'eau est plus faible pour ce type de substrat, car il faut laisser de la place pour les éléments nutritifs. En général, ces toits sont équipés de système d'arrosage, car les types de plantes utilisés nécessitent un arrosage régulier au contraire des plantes des toits verts extensifs. Il est également conseillé de poser des haubans pour que les plantes puissent résister aux vents forts (Bouattour & Fuchs, 2009). Ainsi, ce type de toit nécessite des soins (eau, engrais ou encore désherbage) plus fréquents afin de rester stable (Trottier, 2007).

Typologie semi-intensive

Pour ce type de toit, l'épaisseur de substrat reste relativement mince, mais il est possible d'y mettre une plus grande variété de plantes que le système extensif. De ce fait, un toit semi-intensif nécessitera des soins plus fréquents (par exemple une plus grande consommation d'eau) (Trottier, 2007). Le substrat peut varier de 12 cm à 25 cm. En général, ce système utilise un système d'arrosage goutte à goutte grâce à des petits conduits situés sous le substrat entre la couche filtrante et la barrière anti-racine. La couche filtrante doit également être absorbante afin de pouvoir humidifier les racines des plantes tout en évitant la réduction de leur oxygénation. Ce système consomme que très peu d'eau. Quant aux types de plantes, cette structure peut être constituée de couvre-sol, de plantes à fleurs ou à feuillage, de petits arbustes. Des plantes grimpantes (par exemple vigne vierge ou chèvrefeuille) sont également envisageables. La capacité de rétention d'eau du substrat se situe entre celles des toits verts extensifs et intensifs (Bouattour & Fuchs, 2009).

Comparaison entre les toits intensifs et extensifs

Le Tableau 1 est repris du travail de Trottier (2007) et compare en détail les avantages et les inconvénients des toits verts extensifs et intensifs.

Toit extensif	Toit intensif
Substrat mince, peu ou pas d'irrigation, conditions difficiles pour les plantes, faible diversité dans le choix de plantes	Sol profond, système d'irrigation, conditions plus faciles pour les plantes, grande diversité dans le choix des plantes, souvent accessible
Avantages	Avantages
▪ Léger ▪ Renforcement de la structure du toit souvent moins nécessaire ▪ Plus facile à implanter sur une structure existante ▪ S'intègre bien à des travaux de rénovation ▪ Idéal pour les grandes surfaces ▪ Convient aux toits de 0 à 45 degrés de pente ▪ Faible entretien et longue durée ▪ Système d'irrigation et de drainage spécialisé rarement nécessaires ▪ Peu onéreux ▪ Apparence plus naturelle ▪ Le service municipal d'urbanisme peut plus facilement l'exiger comme condition à l'autorisation de construire	▪ Plus grande diversité de plantes et habitats ▪ Possibilité d'inclure des arbres ▪ Meilleures propriétés isolantes ▪ Efficacité énergétique et rétention des eaux pluviales supérieures ▪ Peut simuler un jardin naturel au sol ▪ Plus ornemental ▪ Souvent accessible ▪ Permet des fonctions variées : loisirs, espace vert, potager, etc.
Inconvénients	Inconvénients
▪ Efficacité énergétique et rétention des eaux pluviales moindre ▪ Choix de plantes plus restreint ▪ Rarement accessible pour des loisirs ou d'autres fonctions ▪ Repoussant pour certains, surtout l'hiver ▪ Moins esthétiques	▪ Charge sur le toit supérieur ▪ Implantation restreinte sur des structures existantes ▪ Nécessité de systèmes d'irrigation et de drainage d'où consommation d'énergie, d'eau et de matériaux ▪ Coûts d'immobilisation et d'entretien nettement supérieurs ▪ Plus difficile à déplacer en cas de fuite et bris de la membrane d'étanchéité

Tableau 1 Comparaison entre les toits extensifs et intensifs. Tiré de (Trottier, 2007, p. 6)

2.2 Façades végétalisées

2.2.1 Définition

Selon Bouattour & Fuchs (2009),

Les concepts de mur vivant, mur végétalisé et mur végétal décrivent des jardins ou écosystèmes verticaux, plus ou moins artificiels, conçus tantôt comme éléments esthétiques de décor, dans le cadre de ce que l'on appelle le jardinage urbain, tantôt comme œuvres d'art utilisant le végétal, ou encore comme éléments d'écologie urbaine.

Ces murs s'élèvent parallèlement à ceux du bâtiment. Ce type de structure permet de protéger le bâtiment contre les vents dominants, les intempéries, le bruit, l'ensoleillement, mais aussi la pollution. Ils jouent également un rôle pour la biodiversité en tant que refuge ou de garde-manger pour les oiseaux et les invertébrés (Bouattour & Fuchs, 2009). On distingue deux types de façades végétalisées : les façades végétales et les murs vivants. En fonction du type, la croissance des plantes se fait de manière différente (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011). En fonction du type de mur, le comportement thermohydrique et aéraulique sera différent. En effet, la présence de substrat permet de dissiper une partie de l'énergie reçue par évaporation et augmente la résistance et l'inertie thermique. De plus, l'existence d'une lame d'air entre le mur végétal et le mur du bâtiment influence les échanges thermiques entre les deux murs avec des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde et des flux thermiques sensibles et latents (Djedjig, 2013).

2.2.2 Typologie des façades

Façades végétales

Ce type de façade est le plus répandu. Les plantes sont soit enracinées au sol soit plantées dans des bacs en haut (plantes tombantes) ou en bas du bâtiment (plantes grimpantes). Les plantes vont ramper le long du mur ou sur un support. Cette structure est la plus accessible et la moins coûteuse (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011). Elles se distinguent également par la proximité avec le mur du bâtiment. En effet, si les plantes sont directement sur les murs, on parlera de végétalisation directe. Dans le cas contraire (présence de support), on parlera de végétalisation indirecte (Djedjig, 2013). D'après Bouattour & Fuchs (2009), les murs avec un support offrent un plus grand enrichissement de la biodiversité et une amélioration de la qualité de l'air plus intéressante. En revanche, ils demandent plus d'entretien et des coûts plus importants. De plus, ils sont plus difficiles à mettre en place.

Pour couvrir ces façades verticales, plusieurs types de plantes sont exploitables en fonction de leur préhension comme le montre le Tableau 2 :

Types de plante grimpante	Méthode d'accroche	Exemple
<u>Sans support</u>		
Grimpantes à ventouses	Substance adhésive produite par de petits tentacules	Vigne vierge, lierre de Boston
Grimpantes à racines crampons	Les racines aériennes s'accrochent aux surfaces rugueuses	Bignone commune, Hydrangée grimpante

<u>Avec support</u>		
Grimpantes à tiges volubiles	Les tiges s'enroulent autour du support	Bourreau des arbres, houblon commun, chèvrefeuille, glycine
Grimpantes à pétioles volubiles	Le pétiole des feuilles s'enroule autour du support en forme de filet ou d'un treillis	Clématites
Grimpantes à vrilles	S'enroulent autour des treillis ou des filets	Pois de senteur vivace
Grimpantes à palisser	S'accrochent sur les supports horizontaux grâce aux épines crochues, aux poils ou aux pousses latérales écartées	Rosier grimpant

Tableau 2 Exemples de plantes grimpantes. Tiré de (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011)

Murs vivants

À la différence des façades végétales, les plantes poussent à la verticale sur les murs vivants comme les plantes des falaises (Bernier, 2011).

1. Murs modulaires avec substrat de croissance

Ces murs sont composés de modules contenant le substrat organique qui diffère des terreaux traditionnels par un poids plus léger et de par sa composition. Ce type de structure nécessite l'installation préalable d'un système de fixation solide afin de supporter le poids du substrat et des plantes (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011). La croissance des plantes est d'abord réalisée à l'horizontale, les modules étant introduits dans le mur vertical par la suite (Bernier, 2011).

D'après Djedjig, (2013), il est également possible de mettre une plus grande variété de plantes (que les grimpantes) dans ce type de murs. De ce fait, ils nécessitent plus d'entretien. Ainsi, afin de garantir une bonne fonctionnalité, cette technique demande un soin particulier comme :

- Un arrosage à différents niveaux le long du mur avec l'utilisation de la gravité pour couvrir tout le mur
- Un apport d'une solution nutritive pour répondre aux besoins en eau et en sels minéraux des plantes
- Une pompe électrique (dans la plupart des cas) (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011)

À noter que le système d'irrigation doit être vidé aux premiers gels en automne afin que le mur puisse entrer dans une période de dormance. Cette dernière permet aux plantes de résister au gel jusqu'au printemps suivant. En plus d'un entretien plus strict, les coûts pour ce genre de construction sont également plus élevés (système d'irrigation et matériaux) (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011).

2. Murs en mode de croissance hydroponique

Ce type de structure ne contient pas de substrat. Souvent, les racines sont placées entre deux couches de géotextiles qui ont des trous permettant de laisser sortir le feuillage. La distribution de l'eau et des éléments nutritifs sur toute la surface du mur se fait grâce à un système d'irrigation goutte à goutte combiné à la capillarité des couches géotextiles. L'absence de substrat, la diversité de plantes et l'utilisation de très peu d'espace sont des avantages indéniables des murs à croissance hydroponique. En effet, le seul espace au sol nécessaire est celui qui sert à récupérer les eaux d'écoulements comme les eaux de pluie. Cela permet donc de diminuer les besoins en ressources (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011). De plus, cette technique permet aux plantes de consommer seulement ce dont elles ont besoin, tout en évitant d'être noyées (Bouattour & Fuchs, 2009).

Cependant, comme pour les murs modulaires, cette installation engendre des coûts considérables en raison de la nécessité d'une pompe électrique et de la mise en place d'une tuyauterie complexe. Et l'entretien n'est pas négligeable. En général, à cause des coûts élevés d'entretien, les privés optent rarement pour cette solution (Bernier & Centre d'écologie urbaine (Montréal), 2011).

2.3 Avantages

Les couvertures végétales offrent de nombreux avantages que ce soit au niveau environnemental, au niveau du confort thermique ou encore au niveau de la régulation de la température en région urbaine.

Isolation thermique et consommation d'énergie

Les couvertures végétales possèdent des propriétés isolantes et évitent les chocs thermiques (Bernier, 2011). En effet, d'après Peck, Callaghan, Kuhn, Arch & Bass (1999), le réchauffement ou le rafraîchissement d'un bâtiment dépend des échanges de chaleur qui eux dépendent des températures intérieures et extérieures. L'isolation permet donc de limiter cette différence de chaleur. En été, la chaleur en intrant est diminuée alors qu'en hiver, c'est le transfert vers l'extérieur qui est diminué. Plus la couche végétale est dense et épaisse, plus les effets bénéfiques sont importants. Les auteurs mentionnent qu'une façade végétale de 16 cm avec une couche d'air (entre le bâtiment et la végétation) de 4 cm permet d'augmenter la valeur R du mur jusqu'à 30%.

De plus, il faut ajouter l'impact de l'évapotranspiration. Ce processus naturel des plantes permet de refroidir la surface du bâtiment en été. Ainsi, ces différents éléments entraînent une diminution de la consommation d'énergie pour la climatisation et le chauffage (Bernier, 2011). Des statistiques montrent qu'une diminution de 3 °C à 7 °C de la température intérieure engendre des économies d'énergie de climatisation d'environ 10% (Landreville, 2005 cité par Jacquet, 2010). D'après Peck et al. (1999), plusieurs facteurs peuvent influencer le potentiel d'énergie : la situation du bâtiment, le climat, les matériaux, l'épaisseur du substrat, les types de plantes, etc.

Régulation de la température (îlot de chaleur urbain)

D'après Bernier (2011), le climat urbain possède des caractéristiques bien différentes de celles d'un climat dans la périphérie :

- Nombre élevé de constructions (absorption de chaleur et irradiance plus importante)

- La faible part de surface végétalisée signifie une faible surface d'évapotranspiration et d'ombrage
- Activité anthropique importante (voiture, usine, climatisation, etc.)
- Les vents rafraîchissants sont limités par les immeubles

Ces différents éléments entraînent donc des températures et une humidité de l'air plus élevées, des émissions de gaz à effet de serre plus importantes, un taux élevé de pollution atmosphérique et une forte concentration de particules en suspension. L'effet d'îlot de chaleur urbain est un phénomène caractéristique des zones urbaines avec des températures plus élevées. Il s'explique par l'absorption des radiations solaires par les grandes surfaces imperméables foncées (les toits par exemple) et les surfaces goudronnées. Le flux de chaleur créé par les climatisations est également une cause de ce réchauffement. Après avoir été absorbées, ces radiations sont irradiées sous forme de chaleur. En plus d'une augmentation des températures, les îlots de chaleur urbains entraînent également de la pollution atmosphérique, le stress par la chaleur sur le vivant et une consommation énergétique (climatisation) plus importante. Deux moyens sont mentionnés afin de combattre les îlots de chaleur : augmenter la réflectivité des surfaces ou augmenter la présence de végétation en ville. Ces moyens vont permettre une augmentation de l'albédo des surfaces. D'après Bass et Baskaran (2001), cité par Bernier (2011), les toits verts agissent plutôt sur les effets d'îlot de chaleur urbain sur les surfaces alors que les façades végétales agissent sur les effets d'îlots chaleur urbains atmosphériques. L'impact des toits et des façades verts s'explique par le phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage. En effet, d'après Peck et al. (1999), l'énergie solaire captée par les plantes se décompose ainsi : la photosynthèse (2 %), le stockage dans la plante (48 %), la transformation en chaleur par évaporation (30 %) et la réflexion (20%). D'après Landreville (2005), cité par Bernier (2011), :

La végétalisation de 6 % de la surface disponible sur les toits en milieu urbain peut diminuer la température de 1 à 2 °C. La diminution de 1 °C de l'effet d'îlot de chaleur urbain diminue de 5 % la demande en électricité pour la climatisation et la réfrigération. La diminution de la consommation d'énergie entraîne la réduction d'émission de gaz à effet de serre et autres polluants atmosphériques (p. 56).

Amélioration de la qualité de l'air

Comme expliqué dans le chapitre 1.1 *Contexte*, l'impact de l'homme sur le réchauffement climatique est indiscutable. En effet, le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz à effet de serre produit en abondance par les activités humaines (combustibles fossiles par exemple). Quant à la photosynthèse des plantes, c'est un processus naturel qui a lieu à l'intérieur des feuilles et des tiges vertes. Ce processus leur permet de synthétiser du glucose (énergie) grâce à l'énergie lumineuse, en absorbant le dioxyde de carbone dans l'air et de l'eau et en rejetant de l'oxygène (Peck et al., 1999).

Ainsi, en absorbant le CO₂, ces couvertures végétales participent directement à la réduction de la quantité de dioxyde de carbone dans l'air et donc à l'amélioration de la qualité de l'air. Cependant, la photosynthèse a également ses limites. En effet, la réaction chimique peut être diminuée ou arrêtée complètement en fonction des conditions climatiques (lorsqu'il fait trop chaud ou trop froid). De plus, durant la nuit, les plantes font le processus inverse. Elles consomment de l'oxygène et relâchent du dioxyde de carbone. Le bilan final reste tout de même positif. De plus, les plantes sont également capables de capter certains polluants dans l'air (Bernier, 2011).

Qualité et gestion des eaux pluviales

À cause de la grande part de surface imperméable en ville, les eaux de pluie sont moins absorbées et ruissellent jusqu'aux égouts. Cela peut donc provoquer la surcharge des stations d'épurations en cas de fortes pluies. En cas d'inondations des stations, de l'eau polluée non traitée peut se jeter dans les cours d'eau et les contaminer (Dunnett et Kingsbury, 2008 cité par Bernier, 2011). Quant aux surfaces plantées, l'eau est absorbée par le sol pour se diriger vers la nappe phréatique, elle est aussi absorbée par les plantes ou encore évacuée par évapotranspiration (Bernier, 2011).

Ainsi, en fonction de la capacité de rétention spécifique à chaque toit, les toits verts peuvent aider à retenir et stocker une partie des eaux de pluie et donc « soulager » les stations d'épuration. La capacité de rétention varie en fonction des saisons, du substrat, de l'angle du toit ou encore du type de plante (Dunnett et Kingsbury, 2008 cité par Bernier, 2011). Les façades végétales ont un impact moins important que les toits. En cas de forts vents poussant la pluie contre la façade, la rétention d'eau est plus importante. La présence de substrat ou non de substrat a également un impact sur l'efficacité (Bass et Baskaran, 2001 cité par Bernier, 2011). D'après Bouattour & Fuchs (2009), un toit végétal pourrait absorber annuellement jusqu'à 50 % de l'eau tombant sur les toits. Cela entraînerait une diminution des coûts de traitement de l'eau de 5 à 10 %.

Isolation phonique

Le bruit constant en ville peut provenir de multiples sources comme les machines, la circulation ou encore les avions. Le substrat, les plantes et la couche d'air emprisonnée entre les plantes et la surface du bâtiment sont des moyens pouvant isoler le bruit extérieur. En effet, le substrat a tendance à bloquer les basses fréquences alors que les plantes bloquent les fréquences plus élevées (Peck et al., 1999). Des tests ont montré qu'une couche de substrat de 12 cm permet de diminuer l'impact sonore de 40 dB, une couche de 20 cm de 46 dB (Hooker et Hendriks, 1994 cité par Peck et al., 1999). De plus, le son du vent sur les feuilles et les branches des façades vertes peuvent aussi jouer un rôle dans le bien-être humain (Peck et al., 1999). Des simulations numériques de la propagation du son à partir d'une rue canyon vers une cour intérieure ont également permis de montrer l'amélioration de la tranquillité dans la cour (Van Renterghem et al., 2013 cité par Djedjig, 2013).

Protection de l'enveloppe

Les rayons ultraviolets, les températures élevées et les variations journalières de températures sont les principaux éléments causant des dégâts (désagrégation, délaminage, fissures et ruptures de la membrane) à la membrane d'étanchéité. Les couvertures végétales ont la capacité de protéger la membrane contre ces différents facteurs de stress (Dunnett et Kingsbury, 2008 cité par Bernier, 2011). D'après (Bouattour & Fuchs, 2009), la membrane d'étanchéité peut avoir une durée de vie de 30 à 50 ans grâce aux couvertures végétalisées. Certains toits verts berlinois sont restés en bon état pendant 90 ans avant qu'ils nécessitent de grandes réparations (Oberndorfer, Lundholm et coll., 2007 cité par Trottier, 2007).

Biodiversité

La biodiversité regroupe la diversité d'espèce, la diversité génétique et la variété écosystémique. Des études ont montré l'existence d'un lien entre la diversité floristique et la diversité faunique. Pour ce qui est des façades et les toitures végétalisées, elles permettent d'augmenter la biodiversité, la

diversité faunique dépendant ici des propriétés des toitures végétales comme l'épaisseur du substrat et la variété des plantes présentes (Djedjig, 2013).

Bien que les murs et les toits végétaux ne soient pas des habitats naturels, ils permettent tout de même de servir de corridor écologique. En effet, ils assurent des connexions entre plusieurs réservoirs de biodiversité, favorisant ainsi les déplacements des différentes espèces (Bernier, 2011). De plus, les murs végétaux peuvent servir d'habitat pour les oiseaux et les insectes, leur écosystème offrant de la nourriture comme des fruits ou encore des insectes (Peck et al., 1999). D'après Trottier (2007), l'utilisation de plantes indigènes permet d'assurer la pérennité de la flore et de fournir des habitats et des ressources pour la faune.

3 Etat de l'art

Des recherches sur l'impact des couvertures végétales ont été réalisées dans le monde entier. Les bénéfices offerts par ce type de structure ont été démontrés dans plusieurs ouvrages et recherches. Cet état de l'art permettra donc de citer quelques travaux ayant montré les avantages au niveau de la thermique du bâtiment. Les recherches citées dans cet état de l'art ont été réalisées pour différentes zones géographiques et donc plusieurs types de climats différents.

Pour sa thèse de doctorat, **Djedjig (2013)** a mené une expérience grâce à la maquette Climabat à l'université de la Rochelle (France). Cette maquette simule une scène urbaine à l'échelle 1:10. Elle est composée de cinq bâtiments rectangulaires identiques (1.26 m x 1.13m x 1.68m) pour un climat océanique (précipitations importantes, température moyenne 12.6 °C (climate-data, s. d.-a)). Les façades des bâtiments sont orientées vers l'est et l'ouest. À noter que les cinq bâtiments ne contiennent pas de fenêtre réduisant ainsi les apports solaires (source principale d'énergie). Ceci est en partie compensé par la faible épaisseur des parois non isolées (inertie faible-bâtiment réel à structure légère) permet de compenser cela en partie. Les plantes utilisées sont du sedum, de la menthe, du thym, de la vinca, de la campanule et du delosperma jaune.

Grâce au système de mesure mis en place, Djedjig a pu déterminer l'impact des façades végétalisées. Il constate qu'en été la façade permet de réduire la température de surface des murs. Les pics de réduction maximale s'élèvent à 15 °C. En effet, lorsque la température extérieure est de 45 °C, celle des murs ne dépasse pas les 28°C. À noter que les températures varient également avec la hauteur des points de mesure, les zones plus hautes étant sujettes à une plus grande exposition au soleil que les zones plus basses. La différence entre les deux zones est de 5 °C (pics). Durant la nuit (00h00-9 h00), il constate que la température de surface est plus élevée de 2 °C dus au fait que le mur végétal réduit les déperditions radiatives de grandes longueurs d'onde.

Les conditions hivernales sont relativement différentes des conditions estivales. Les températures varient entre 0-10 °C, le temps d'ensoleillement est inférieur à 360 W.m⁻² et le temps d'ensoleillement est de 9h. Avec ces conditions, la différence de température est plus petite la journée et plus grande la nuit. Le mur végétal permet donc de diminuer la température de 3 à 5 °C durant la journée et d'augmenter de tout autant la nuit.

Dans sa recherche, l'auteur a également évalué l'impact sur le bilan énergétique. Pour ce faire, il a considéré les flux thermiques entrants et sortants durant trois semaines. Il en résulte un bilan énergétique rafraîchissant en période estivale. Les pertes étant supérieures aux gains. En revanche, en hiver, la façade végétale agit plutôt comme un isolant. Durant cette période, les gains et pertes

thermiques sont les deux réduits. Finalement, le mur végétal offre une meilleure performance, avec un bilan total supérieur de 20 % par rapport au mur de référence.

L'auteur a également analysé la température de la lame d'air entre la façade végétale et le mur de la maquette. Il observe que la température augmente avec la hauteur. En effet, le substrat est plus humide dans la partie basse du mur et donc le refroidissement évaporatif de l'air est plus important. Un ensoleillement plus long pour la zone supérieure est également la cause des températures plus élevées.

Ainsi, une atténuation des différences de température permet de diminuer les besoins énergétiques en climatisation et de chauffage, de prolonger la durée de vie de la membrane d'étanchéité et de protéger la structure portante du toit. Djedjig (2013) mentionne également que pour des toits verts, « L'impact de la végétalisation du toit sur les besoins énergétiques et le confort des occupants est moins important lorsque le rapport Toit/Enveloppe est faible » (p. 56). En effet, pour de grands immeubles avec beaucoup d'étages, l'impact d'un toit vert est moindre. Des façades végétalisées seraient plus adaptées pour observer des économies énergétiques intéressantes.

Pérez, Rincón, Vila, González & Cabeza (2011) ont effectué des expériences en Espagne (Lleida) sur l'impact des façades végétales dans climat continental méditerranéen sec (peu de précipitations annuelles, température moyenne 15.2 °C (climate-data, s. d.-b)). Pour ce faire, ils ont utilisé plusieurs conteneurs sur lesquels ils ont posé des surfaces végétalisées, en les orientant vers le sud. Ils ont choisi de planter du lierre, du chèvrefeuille, de la vigne verte et de la clématite. Ces plantes ont été observées durant une année.

Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la croissance de plusieurs types de plantes, mais également l'impact de l'ombrage. Après une année de mesure (2009), ils constatent que la température moyenne des murs végétalisés est en moyenne inférieure de 5.5 °C. Vers le mois de septembre, cette différence peut monter jusqu'à 15.2 °C.

La température de l'espace intermédiaire (entre le mur du bâtiment et le mur végétal) est plus élevée en hiver de 3.8 °C que l'air extérieur. En été, elle est inférieure de 1.4 °C par rapport à l'air extérieur. Quant à l'humidité relative, en été, elle est supérieure de 7 % en juin dans l'espace intermédiaire par rapport à l'extérieur alors qu'en hiver elle est inférieure de 8 %.

Ainsi, l'air dans l'espace intermédiaire varie créant ainsi un microclimat. En hiver, en période sans feuilles, les températures sont plus élevées et l'humidité est plus basse. En été, en période avec des feuilles, les températures sont plus basses, mais l'humidité est supérieure. Ces mesures montrent que le mur végétal agit bel et bien comme une barrière contre le vent. Elle signale aussi la présence d'évapotranspiration qui peut également se voir par des différences d'humidité.

Trottier (2007) a réalisé une étude par prise de mesure de température. Cet exercice avait pour objectif de déterminer les températures sur les toits, d'estimer la contribution de plusieurs types de matériaux rencontrés sur un toit, puis de les comparer avec des surfaces végétalisées. L'étude a été réalisée à l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le climat de cette région est de type tempéré froid (fortes averses, température moyenne 3.9°C (climate-data, s. d.-b)). Les mesures ont été prises le 9 août 2007 entre 12h et 15h, puis ont été moyennées. À ces heures, la température ambiante variait entre 20.5 °C et 22 °C.

Les valeurs du Tableau 3 montrent qu'une végétalisation (gazon tondu, végétaux d'environ 30 cm ou encore des arbres) peut grandement diminuer les températures de surfaces par phénomène d'évapotranspiration et par l'ombrage que procurent ces surfaces. Il est toutefois nécessaire de réguler

correctement l'humidité des couvertures végétales pour optimiser l'effet d'évapotranspiration. En effet, lorsque le terreau ou le gazon est sec, les températures s'approchent de celles des dalles en béton.

Elastomère	45.4	°C
Membrane multicouche	37.1	°C
Dalles en béton	33	°C
Mur de brique	28.1	°C
Terreau sec	35	°C
Terreau humide	21.1	°C
Gazon sec	34.5	°C
Gazon tondu	22.8	°C
Végétaux d'environ 30 cm	9.3	°C
Arbres	7.3	°C

Tableau 3 Comparaison des températures de surface pour différents matériaux (Trottier, 2007, p. 42)

L'étude de **Karima & Saliha (2010)**, réalisée en Tunisie en 2010, permet d'évaluer l'impact de la végétalisation sur le confort thermique. Pour cela, les auteurs comparent deux pièces quasi identiques, une des deux possédant une surface végétalisée (plantes grimpantes). Les façades sont orientées vers sud et sud-ouest. Les mesures ont été prises durant l'été. Le climat de la région est de type méditerranéen (faibles précipitations annuelles, température moyenne 18°C (climate-data, s. d.-c)).

Les températures de la pièce avec la façade végétalisée sont inférieures à celles de l'autre pièce, ceci durant toute la journée. L'écart maximal est de 4.4 °C à 16h. Les températures surfaciques peuvent quant à elles monter jusqu'à 40 °C, alors que pour la pièce avec surface végétalisée, le maximum se situe à 29.5 °C.

Les auteurs expliquent cette différence de température par le phénomène d'évapotranspiration des plantes. Ce dernier refroidit l'air en contact avec le feuillage. Ensuite, par convection, cet air diminue la température de la surface du bâtiment. De plus, l'ombrage créé par la végétalisation est également une source de refroidissement pour le bâtiment. Ainsi, le mur végétal permet de diminuer le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et participe donc à la réduction de la température des surfaces et celle de l'air intérieur.

Jacquet (2010) a mené une étude sur un toit vert extensif installé sur une plateforme expérimentale située dans la ville de Montréal. La plateforme est formée de trois sections : section irriguée (42 m²), section sèche (42 m²) et section de référence (sans toit vert, 15 m²). Concernant les plantes, il a choisi du sedum pour le toit non irrigué en raison de sa résistance à la sécheresse. Pour le toit irrigué, une grande variété de plantes (graminées et autres vivaces) a été utilisée, un apport d'eau étant assuré par un système d'irrigation intégré. Le climat de la région est tempéré et froid (fortes averses toute l'année, température moyenne 3.9 °C (climate-data, s. d.-d)).

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact du toit vert sur la réduction énergétique et sur la durée de vie de la membrane d'étanchéité. Pour ce faire, quatre éléments ont été étudiés : la température maximale de la membrane d'étanchéité, la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité, le flux de chaleur traversant le toit et la performance énergétique du toit. Les

différentes mesures d'humidité et de température ont été réalisées toutes les 15 minutes durant l'année 2007.

Les mesures montrent que les températures maximales de la membrane d'étanchéité sont diminuées de 25 % pour la surface non irriguée et de 27 %, pour la surface irriguée. Pour les gains de chaleur, en été, l'auteur observe une diminution de 91 % (non irriguée) et de 99 % (irriguée). En hiver, les pertes de chaleur sont diminuées de 27 % (non irriguée) et de 38 % (irriguée). La surface non irriguée a donc permis de diminuer la consommation d'énergie en climatisation de 91 % et pour le chauffage de 27 %. Cela amène donc à une diminution totale annuelle de 37.7 %. Quant à la surface irriguée, elle offre une réduction de 99 % pour la climatisation et 47.2 % pour le chauffage. Cela permet donc une diminution de la consommation annuelle de 47.2 %. Ces réductions proviennent sans aucun doute de la présence de la toiture végétale. En effet, les éléments suivants permettent de diminuer le transfert de chaleur : la masse thermique supplémentaire du toit vert, le phénomène d'évaporation du contenu en eau du substrat, le phénomène d'évapotranspiration et l'ombrage.

Les valeurs relevées lors de cette étude ont ensuite été comparées avec des études réalisées ailleurs au Canada (annexe 3). Ces autres études montrent les mêmes impacts dus aux toitures végétales sur les éléments étudiés. En effet, dans les quatre cas, elles permettent de diminuer la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité, de réduire la fluctuation des températures, de réduire le flux de chaleur et d'amener des économies d'énergie sur la climatisation et le chauffage.

Hui (2009) a également réalisé une étude sur les performances énergétique et thermique des toitures végétalisées. Pour ce faire, l'auteur a réalisé des mesures sur quatre sites de toits verts : Centre APB, l'immeuble de bureau municipal Ngau Tau Kok, l'école primaire du gouvernement Yuen Long et l'école primaire catholique. Sur chaque toit se trouvaient une partie sans couverture végétale, une partie avec des plantes courtes et une partie avec de hautes plantes. Les mesures ont été prises de juillet à septembre 2009. Les principales caractéristiques de chaque site sont présentées en annexe 4. Le Tableau 4 montre les différents toits qui ont été étudiés. Le climat de la région est de chaud à tempéré (fortes précipitations, température moyenne 22.6 °C (climate-data, s. d.-e)). Le Tableau 4 est repris du rapport concernant l'étude et montre les variations journalières de température dues aux différents types de couvertures végétales.

Site	Date	Fluctuations des températures journalières [°C] (Température maximale journalière - Température minimale journalière)			
		Ambiant	Toit nu	Toiture végétale (plantes courtes)	Toiture végétale (plantes hautes)
Ngau Tau Tok (NTK) Building	03.08.2009	5.4 (35.7 - 30.0)	25.4 (54.1 - 28.7)	8.5 (37.2 - 28.7)	7 (33.8 - 28.8)
APB Centre 4/f	08.08.2009	7.4 (36.1 - 28.7)	13 (42.9 - 29.9)	3.2 (31.5 - 28.3)	N/A
Yuen Long Govt Primary school	16.08.2009	7.3 (34.8 - 27.5)	17.8 (43.4 - 25.6)	5.6 (36.0 - 30.4)	1.0 (30.1 - 29.1)
St. Bonaventure Catholic Primary School	08.09.2009	7.7 (34.0 - 26.3)	31.3 (55.8 - 24.5)	18.1 (44.4 - 26.3)	11.3 (36.1 - 24.8)

Tableau 4 Variations de la température sur les différents types de toit. Tiré de Sam C. M. Hui (2009) p. 35

Les toitures végétalisées permettent donc de diminuer les fluctuations des températures et donc d'en diminuer les chocs thermiques. Par exemple, pour Ngau Tau Tok, l'écart de température s'élève à 25.4 °C pour le toit nu tandis que pour les surfaces végétalisées, ils sont seulement de 8.5 °C pour les plantes courtes et 7 °C pour les plantes hautes. De plus, les valeurs de températures maximales sont à la baisse : pour Ngau Tau Tok, les températures de surface peuvent atteindre 54.1 °C. Les surfaces végétalisées font descendre cette valeur à 37.2 °C (plantes courtes) et à 33.8 °C (plantes hautes). La même tendance se retrouve pour les bâtiments des trois autres sites.

Cette étude montre que l'humidité varie considérablement. En cas de séchage de plantes, plusieurs conséquences peuvent être attendues : faible teneur en eau, mauvaise végétation, faible couverture des plantes ou encore des plantes en mauvaise santé. Ceci aura donc des conséquences directes sur les effets recherchés par la végétalisation comme une évaporation insuffisante. Ces toits nécessitent donc un entretien et une humidité adéquate pour garantir les performances souhaitées.

Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer le comportement thermique de ces façades végétales et donc de déterminer l'influence sur le coefficient de transfert de chaleur U. Ce dernier peut varier de 16 % à 42 %. Ces simulations ont également pu déterminer que la charge thermique du toit représente 15.3 % à 24.3 % de la consommation électrique. Cependant, ce pourcentage baisse avec le nombre d'étages constituant l'immeuble. Pour des bâtiments de 10, 20 et 30 étages, cela correspond respectivement à 1.8, 0.9 et 0.6 %. L'auteur mentionne également que la présence d'une ventilation, entre la surface du toit et l'intérieur, réduit considérablement les effets positifs recherchés et qu'une toiture végétale aura plus d'impact sur un immeuble mal isolé.

Résumé des avantages des surfaces végétalisées présentés dans les travaux ci-dessus :

- Réduction des températures des façades ou murs
- Réduction des températures maximales des façades ou murs
- Réduction des fluctuations thermiques (chocs thermiques)
- Réduction des flux de chaleur
- Réduction de la consommation énergétique

4 Bilan énergétique dans une surface végétalisée

D'après Djedjig (2013), « l'analyse des systèmes biophysiques et de leurs interactions avec l'environnement repose sur le principe de conservation de la masse et de l'énergie » (p. 74). Comme le montre la Figure 1, il est nécessaire de considérer les énergies reçues, cédées et stockées par le système considéré afin d'en déterminer le bilan énergétique :

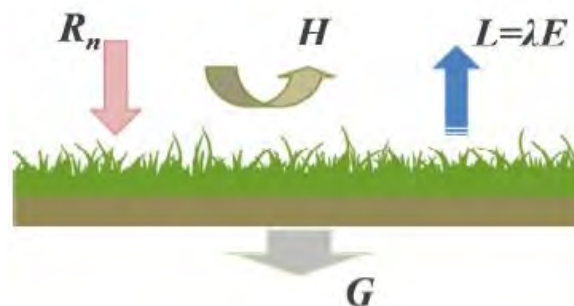


Figure 1 Flux thermiques à travers une surface végétalisée. Tiré de Djedjig (2013).

L'Éq. (1) représente le bilan énergétique dans une couverture végétalisée en $[W/m^2]$ proposé par Djedjig (2013) :

$$Rn + M - H - \lambda E = G \quad (1)$$

Le terme (Rn) représente le rayonnement net absorbé par la surface végétale. Ce rayonnement est composé des flux radiatifs de grandes longueurs d'onde (GLO) et de courtes longueurs d'onde (CLO). Les CLO proviennent essentiellement du rayonnement solaire direct ou indirect. Ils peuvent être soit diffusés par l'atmosphère ou alors réfléchis par d'autres surfaces. Les longueurs d'ondes des CLO se situent entre les domaines de l'ultraviolet et du visible du spectre de rayonnement. Les GLO représentent l'échange thermique entre deux surfaces à températures différentes et qui ne sont pas en contact. Les longueurs d'onde des GLO se situent dans le domaine infrarouge (Pajani, 2012). Lorsque le sol absorbe le rayonnement solaire, il émet en retour du rayonnement infrarouge. Ce dernier est capté par les gaz à effet de serre (GES) et ensuite redirigé vers le sol. Ainsi, les GES sont également responsables de l'augmentation des GLO (Jancovici, 2003).

Les réactions chimiques produites dans les plantes telles que l'apport énergétique du métabolisme et l'absorption de l'énergie pour la photosynthèse sont considérées dans le terme (M). Dans le cas de Djedjig (2013), il néglige ce terme, car il représenterait seulement 1 % de l'énergie solaire arrivant sur la feuille. Des recherches, comme celles de Feng, Meng & Zhang (2010), mentionnent que l'énergie en lien avec la photosynthèse peut s'élever jusqu'à 10%. Cependant, Nobel (2005) cité par Djedjig (2013) remet en cause cette estimation à cause des mesures intrusives de la température des feuilles.

Quant au terme (H), il contient la dissipation thermique par flux sensible due à une différence de température. La chaleur sensible influence la température d'une matière. En effet, lorsque la température augmente, la chaleur sensible fait de même. Dans ce cas, le transfert de chaleur se fait par convection.

La dissipation thermique par flux latent (évapotranspiration) est prise en considération par le terme (λE). (λ) $[J.kg^{-1}]$ correspond à la chaleur latente de vaporisation et (E) $[kg.m^{-2}.s^{-1}]$ au taux massique d'évapotranspiration. À la différence de la chaleur sensible, la chaleur latente modifie l'état physique d'une matière sans en changer la température.

Finalement, le terme (G) prend en compte soit le stockage thermique par le sol et les plantes soit la restitution par les matériaux de conduction. Le stockage des feuilles peut être négligé alors que celui du sol et des éléments massifs doivent être pris en considération. En effet, d'après Nobel (2005 cité par Djedjig (2013) :

L'utilisation de la méthode du gradient nul montre que la constante de temps des feuilles n'est que de quelques secondes (Nobel, 2005b). Or, l'échelle temporelle des variations des conditions météorologiques est plutôt de l'ordre de l'heure. Le stockage thermique des feuilles est donc très faible et l'inertie thermique foliaire peut être négligée (p. 75).

Le calcul de ces différents termes ne sera pas expliqué sauf pour l'évapotranspiration au chapitre suivant. En effet, les équations mathématiques permettant de déterminer les termes (Rn), (M), (H) et (G) ne sont pas utilisées directement dans le cadre de ce travail. La thèse de Djedjig (2013) est accessible en ligne et donne plus de précisions sur le détail de chaque terme si nécessaire. Quant à l'évapotranspiration, son calcul est primordial afin de déterminer son impact sur le bilan énergétique et le confort thermique.

5 Inertie thermique d'un bâtiment

L'inertie thermique d'un bâtiment est un élément déterminant pour le confort thermique dans un immeuble. D'après le cours de K. Kreher, professeur à la Haute École d'ingénierie de Sion, l'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à amortir les variations de température intérieure en accumulant et en restituant de l'énergie en fonction du changement des conditions ambiantes (Document non publié [Support de cours], 2019/2020). Sauf précisions particulières, les différentes explications de ce chapitre proviennent également du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020).

L'amortissement des variations de température intérieure s'explique par les phénomènes de déphasage et d'amortissement de l'excitation thermique. Le déphasage correspond au décalage entre la température de surface intérieure des murs et la température extérieure. En effet, lorsque le mur extérieur subit une différence de température, cette dernière se fera sentir plus tard dans la journée au niveau de la température de surface intérieure. Un déphasage suffisant peut permettre à la chaleur extérieure de n'arriver qu'en fin de journée dans l'habitat (« Inertie thermique », 2007). Quant à l'amortissement, c'est la diminution de l'amplitude du signal de variation de température. Le déphasage dépend de la masse volumique et de la capacité thermique alors que l'amortissement dépend de la conductivité thermique.

Ainsi, plus l'inertie est grande, plus le déphasage et l'amortissement sont importants et donc plus la variation de la température intérieure est faible. Ces phénomènes sont illustrés par la Figure 2. L'image de gauche correspond à un déphasage et à un amortissement d'un choc thermique et l'image de droite à une perturbation périodique (variation journalière ou variation saisonnière par exemple). Dans le cas d'une perturbation périodique, la profondeur de pénétration est également considérée. Celle-ci correspond à la profondeur à laquelle l'amplitude du signal de température s'est atténuée d'un facteur $1/e$ (≈ 0.33).

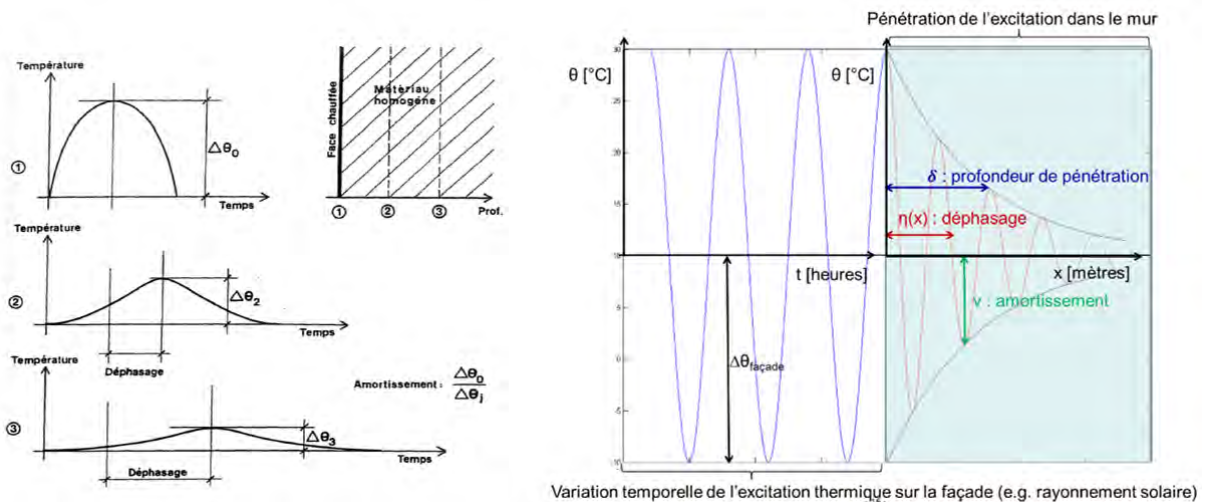


Figure 2 Déphasage et amortissement de la variation de la température intérieure grâce à l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)

L'inertie thermique dépend de plusieurs caractéristiques du matériau : la diffusivité, la capacité thermique, la masse volumique et la conductivité thermique. La relation entre ces différents éléments est représentée par l'Éq. (2) provenant du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020) :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

- a : Diffusivité thermique du matériau [m^2/s]
 λ : Conductivité thermique du matériau [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$]
 ρ : masse volumique du matériau [kg/m^3]
 c_p : capacité thermique du matériau [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$]

La capacité thermique d'un matériau est la quantité de chaleur nécessaire afin d'élever de 1 [K] sa température. Elle peut également se définir comme étant la quantité de chaleur que le matériau peut absorber et restituer lorsqu'il est soumis à des variations de température. Quant à la diffusivité, elle peut être exprimée comme étant la vitesse à laquelle la chaleur se propage. Ainsi, la diffusivité et la capacité thermique sont indispensables afin de caractériser l'inertie thermique d'un bâtiment.

En effet, plus l'inertie est grande, plus il sera possible d'amortir les variations de température. Par exemple, le béton possède une meilleure inertie que le bois, de ce fait la réduction des variations des températures intérieures sera plus importante. La Figure 3 indique les éléments fondamentaux à retenir pour l'inertie thermique.

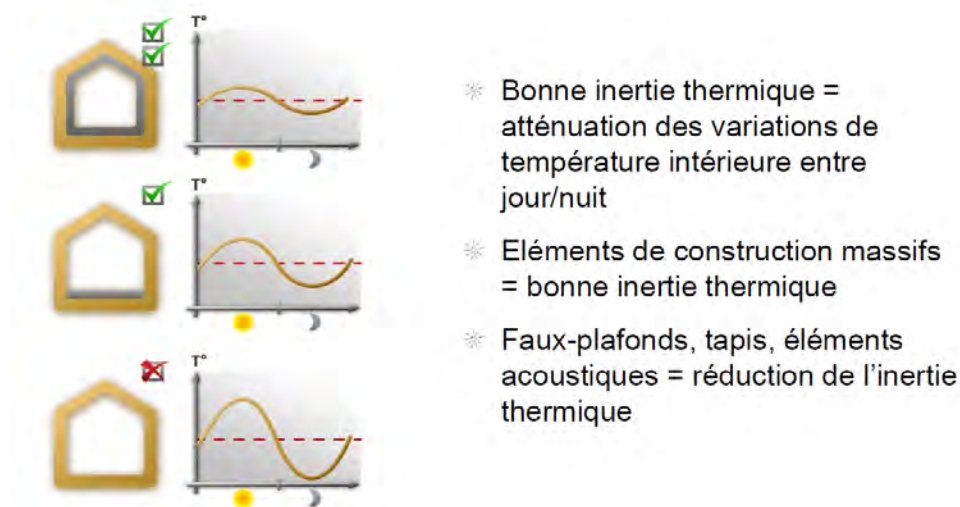


Figure 3 Impact de l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)

Ainsi, en fonction du choix des matériaux de construction, l'inertie thermique du bâtiment change. Les bâtiments de grande inertie (lourds) « régulent » déjà suffisamment bien les températures intérieures alors que cela n'est pas le cas pour des bâtiments de faible inertie. De ce fait, il est intéressant d'analyser l'impact d'une façade végétalisée sur un bâtiment en fonction de l'inertie thermique.

6 Evapotranspiration

6.1 Définition

L'évapotranspiration (ET) est un phénomène important provenant de la végétation qui doit être considérée dans différents domaines. Par exemple, dans le cas de l'agriculture, l'estimation de l'ET permet de déterminer les besoins en irrigation Calanca, Smith, Holzkämper & Ammann (2011). La météorologie est également un domaine nécessitant la connaissance de l'ET, car il peut être utilisé comme indice de sécheresse (MétéoSuisse, 2020).

Dans le cadre de ce travail, la quantification de l'ET permettra de déterminer la capacité de « refroidissement » de la couverture végétalisée et donc son impact sur la consommation énergétique et le confort thermique. L'ET intervient dans le cadre d'un bilan hydrologique prenant en compte plusieurs éléments comme le montre l'Éq. (3) (Musy, 2005) :

$$P + S = R + ETR + (S + \Delta S) \quad (3)$$

- P : Précipitations [mm]
- S : Accumulation de la période précédente [mm]
- R : Ruissellement / écoulement souterrain [mm]
- ETR : Évapotranspiration réelle [mm]
- (S + ΔS) : Accumulation à la fin de la période [mm]

Comme le montre la Figure 4, l'ETR est composée de deux processus, soit l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes :

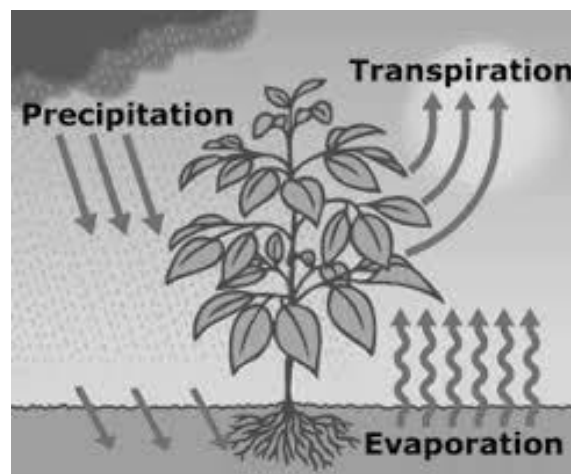


Figure 4 Phénomène d'évapotranspiration. Tiré de Arborera (2004)

Le premier a lieu au-dessus « des surfaces d'eau (océans, mers, lacs et cours d'eau), des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace » (Musy, 2005, chapitre 4.1.2). Il dépend directement du rayonnement solaire. En effet, plus les rayonnements sont importants, plus l'évaporation est forte. Il faut également considérer le gradient d'humidité qui joue un rôle dans la

vitesse d'évaporation. Plus l'air est sec, plus l'eau s'évapore vite (ECOVEGETAL, 2019). Concernant la transpiration, l'eau provenant du substrat est absorbée par les racines pour ensuite remonter vers les feuilles. Ensuite, le siège de la transpiration sera essentiellement au niveau des stomates. Finalement, la transpiration permettra à la vapeur d'eau de s'échapper des plantes et ainsi de rafraîchir l'air environnant la végétation et le sol. Dans le cas d'un sol recouvert de végétation, les pertes d'eau par transpiration sont plus importantes que celles liées à l'évaporation directe (Musy, 2005).

On distingue l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}), maximale (ETM) et réelle (ETR). L' ET_{ref} , anciennement appelée évapotranspiration potentielle, est l'évapotranspiration pour une culture de référence (gazon ou alfalfa). C'est une culture qui couvre entièrement le sol durant toute l'année et considère une bonne irrigation du sol. L'ETM est l'évapotranspiration maximale. Elle dépend du coefficient de culture (k_c) qui varie entre 0 (culture non couvrante) et 1 (pleine couverture) par rapport à ET_{ref} (Morlon & Itier, 2020). La valeur de k_c comprend les effets des 4 caractéristiques primaires qui différencient une culture de la culture de référence : la hauteur de la culture, la résistance de surface du sol-végétation, l'albédo et l'évaporation de sol (Boudjelal, 2007). Toujours d'après (Boudjelal, 2007, chapitre 1.2.2.1) :

Les facteurs qui influent sur la valeur de k_c sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif, les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations.

Cependant, il est mentionné que le k_c varie essentiellement avec les caractéristiques liées à la culture. Le climat n'a que peu d'influence sur la variation de k_c . De ce fait, dans le cas d'une approximation, il est possible de transférer les valeurs k_c à d'autres zones climatiques. Pour des calculs précis, il est plutôt recommandé de le déterminer expérimentalement dans la région étudiée (Musy, 2005). Quant à l'évapotranspiration réelle (ETR), elle évolue selon un coefficient de sécheresse (k_s) par rapport à ETM. La valeur varie entre 0 (quand la plante est complètement flétrie) et 1 (lorsque l'alimentation en eau est garantie) (Morlon & Itier, 2020).

6.2 Calcul de l'évapotranspiration

L'Éq. (4) résume les liens entre les coefficients et les différents types d'évapotranspiration (Morlon & Itier, 2020) :

$$ETR = k_s \cdot ETM = k_s \cdot k_c \cdot ET_{ref} \quad (4)$$

- ETR : Évapotranspiration réelle sur la période considérée [mm]
- ETM : Évapotranspiration maximale sur la période considérée [mm]
- ET_{ref} : Évapotranspiration de référence sur la période considérée [mm]
- k_c : Coefficient de culture [-] ($k_c = 0.5$)
- k_s : Coefficient de sécheresse [-] ($k_s = 1$)

En considérant une bonne irrigation, le coefficient k_s est mis hypothétiquement à 1. Cela donne donc l'Éq. (5) :

$$ETR = ETM = k_c \cdot ET_{ref} \quad (5)$$

Pour la suite, ce travail considérera donc ETR pour déterminer l'impact sur le bilan énergétique. Or, quantifier précisément l'ETR n'est pas une tâche aisée, car cela nécessite de prendre en compte les conditions de l'atmosphère et du sol et les caractéristiques de la végétation (Calanca et al., 2011). Ainsi, il faut donc déterminer le coefficient k_c et ET_{ref} . D'après Musy (2005), le k_c est en général déterminé expérimentalement. Dans le cadre de ce travail, aucune expérience n'a été menée afin de déterminer un k_c expérimental. De ce fait, le choix du coefficient est basé sur le document proposé par BRL Exploitation (2010). Pour le calcul d'évapotranspiration, un k_c de 0.5 est choisi. Cette valeur est applicable pour des plantes grimpantes comme de la bignone de la glycine ou encore de la clématite. Bien que les valeurs proposées dans ce document soient celles de la Corse, elles sont transposables pour d'autres régions, comme mentionné précédemment.

Ensuite, il est nécessaire de calculer l'évapotranspiration de référence (ET_{ref}) pour une culture de référence (le gazon). Il existe plusieurs méthodes proposées par différents auteurs. Dans leur travail, Calanca et al. (2011) mentionnent par exemple plusieurs méthodes dont deux seront présentées ci-dessous.

L'équation de Penman-Monteith (PM), recommandée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), est celle la plus souvent utilisée. À la suite de comparaisons avec des mesures, il s'est avéré qu'elle offre la plus grande précision parmi les méthodes existantes. Elle nécessite toutefois un grand nombre de variables d'entrée. La complexité de l'équation peut également amener à des erreurs lorsque le calcul est fait manuellement. C'est pourquoi, d'après Boudjelal (2007), la FAO propose même le logiciel Cropwat afin de faciliter le calcul de l'évapotranspiration.

La deuxième solution vient de Turc (1961). Cette approche empirique demeure très populaire dans la pratique en Suisse. Il existe aussi l'approche empirique proposée par Primault (1962 et 1981), mais celle-ci ne sera pas présentée ici. Les équations de Turc et Primault sont toujours utilisées par MétéoSuisse et AGROMETEO. D'après Lecarpentier (1975), pour des zones arides et semi-arides, la formule proposée par Blaney et Criddle (1945) est plus appropriée. En effet, le fait d'utiliser ces deux dernières équations hors de leurs conditions climatiques engendre des imprécisions.

Ainsi, dans le cadre de ce travail, ce sera l'équation de Turc qui sera utilisée. En effet, elle est adaptée pour des climats tempérés. De plus, elle offre une précision satisfaisante pour la Suisse et elle nécessite moins de variables d'entrée (Calanca et al., 2011).

Équation de Turc

Alexandris (2008) donne les Éq. (6-7) pour déterminer l'évapotranspiration de référence ($ET_{ref-jour}$) par jour avec la méthode de Turc. La culture de référence considérée est le gazon. Il distingue entre le cas où l'humidité relative est supérieure à 50 % et le cas où elle est inférieure de 50 %. Pour le cas de ce travail, soit pour Visp, l'humidité relative (H_r) se situe généralement en dessus de 50 % (voir annexe 5). De ce fait, l'Éq. (6) sera considérée pour le calcul de l'évapotranspiration. Il est également important de noter que l'équation de Turc ne considère pas les températures négatives. Lorsque c'est le cas, l'évapotranspiration est considérée à 0 [mm].

Si $Hr > 50\%$:

$$ET_{ref-jour} = 0.0133 \cdot (R_{g_{cal}} + 50) \cdot \frac{T}{T+15} \quad (6)$$

Si $Hr < 50\%$:

$$ET_{ref-jour} = 0.0133 \cdot (R_{g_{cal}} + 50) \cdot \frac{T}{T+15} \cdot \left(1 + \frac{50 - Hr}{70}\right) \quad (7)$$

$ET_{ref-jour}$: Évapotranspiration de référence par jour [mm]

$R_{g_{cal}}$: Rayonnement global [$\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$]

T : Température moyenne journalière [$^{\circ}\text{C}$]

Hr : Humidité relative [%]

Étant donné que les données de rayonnement $R_{g_{Watt}}$ sont en [W/m^2], un changement d'unité s'applique. Il suffit donc de multiplier $R_{g_{cal}}$ par 2.065 pour obtenir l'Éq. (8) :

$$ET_{ref-jour} = 0.0133 \cdot (2.065 \cdot R_{g_{Watt}} + 50) \cdot \frac{T}{T+15} \quad (8)$$

Ensuite, le calcul sera considéré pour des pas de temps horaires pour un calcul d'évapotranspiration horaire [mm/heure]. Cela permet de simplifier l'implémentation dans le logiciel bSol, car les fichiers climatiques à y insérer sont en pas de temps horaire. Pour ce faire, $ET_{ref-jour}$ est simplement divisé par 24 pour donner $ET_{ref-heure}$ comme le montre l'Éq. (9). Cela permettra de déterminer la variation d'évapotranspiration pour chaque heure en fonction de la température et du rayonnement global. Ainsi, l'Éq. (9) sera utilisée pour le calcul final d'évapotranspiration par heure.

$$ET_{ref-heure} = \frac{0.0133}{24} \cdot (2.065 \cdot R_{g_{Watt}} + 50) \cdot \frac{T}{T+15} \quad (9)$$

Le calcul de $ET_{ref-heure}$ permettra donc de calculer ETR par heure qui lui sera essentielle pour déterminer l'impact sur la température environnante des plantes et donc du bâtiment.

6.3 Calcul de l'impact de l'évapotranspiration sur la température environnante

Le calcul de l'évapotranspiration maximale ETR permet donc de déterminer l'impact sur la température ambiante. Les ETR suivants seront calculés pour chaque heure. En effet, le pas de temps a été défini par le calcul de $ET_{ref-heure}$.

Pour ce faire, il faut tout d'abord modifier les unités de l'ETR qui sont en [mm] ou [L/m²] pour obtenir ETR_{masse} en [kg/m²] en le multipliant par la masse volumique de la vapeur d'eau comme le montre l'Éq. (10) :

$$ETR_{masse} = \rho_{vapeur\ d'eau} \cdot ETR \quad (10)$$

ETR_{masse} : Évapotranspiration en [kg/m²]

$\rho_{vapeur\ d'eau}$: masse volumique de la vapeur d'eau (0.59 x 10⁻³ [kg/L] à 1 bar)

Ensuite, pour obtenir ETR_{masse} sous forme d'énergie (E_{lat_surfacique}), il suffit de la multiplier par la chaleur latente de vaporisation comme montré dans l'Éq. (11). Cette énergie correspond à l'énergie latente liée à l'évapotranspiration. De plus, un coefficient de refroidissement (K_{refroidissement}) est également appliqué. Ce dernier considère que seulement une partie de l'énergie de l'ETR_{masse} participe au refroidissement de l'air environnant. Dans le cadre des calculs, K_{refroidissement} vaudra 0.5. L'hypothèse émise sur le choix de ce coefficient peut passablement impacter les résultats finaux.

$$E_{lat_surfacique} = ETR_{masse} \cdot k_{refroidissement} \cdot \Delta H_{vap} \quad (11)$$

E_{lat_surfacique} : Énergie latente surfacique liée à l'évapotranspiration en [MJ/m²]

K_{refroidissement} : Coefficient de refroidissement [-] (k_{refroidissement} = 0.5 [-])

ΔH_{vap} : Chaleur latente de vaporisation [J/kg/K] (ΔH_{vap} = 2.257 MJ/kg)

Ensuite, pour retrouver l'énergie latente totale, il reste à multiplier E_{lat_surfacique} par la surface de végétation comme dans l'Éq. (12).

$$E_{lat_totale} = E_{lat_surfacique} \cdot S_{veg} \quad (12)$$

E_{lat_totale} : Énergie latente totale liée l'évapotranspiration [MJ]

S_{veg} : Surface végétalisée [m²]

L'Éq. (12) permet donc de déterminer l'énergie latente totale en lien avec l'évapotranspiration. Il reste donc à définir l'influence de l'évapotranspiration sur la variation de la température environnante de la végétation. Pour ce faire, l'Éq. (13) sera utilisée. Elle prend en compte la chaleur calorifique de l'air. Cette dernière représente l'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C un kilogramme d'air. Pour ce calcul, il est également nécessaire de lui fournir la masse d'air qui change de température ainsi que l'énergie à disposition (E_{lat_totale}). À noter que l'équation est multipliée par 10⁶ car l'équation nécessite des [J] alors que E_{lat_totale} est en [MJ]. Finalement, ΔT représente la différence de température de l'air ambiant proche de la façade avec et sans évapotranspiration.

$$E_{lat_totale} \cdot 10^6 = m_{air} \cdot c_{air} \cdot \Delta T \quad (13)$$

m_{air} : Masse d'air [kg]

c_{air} : Capacité calorifique de l'air [J/kg/K] (c_{air} = 1005 [J/kg/K])

ΔT : Différence de température entre l'air ambiant sans et avec évapotranspiration [°C]

Pour effectuer l'Éq. (13), il est encore nécessaire de préciser la masse d'air à considérer avec l'Éq. (14). Pour ce faire, il faut prendre en compte l'épaisseur de la végétalisation permettant de déterminer le volume total de la façade végétalisée. La couche végétale est composée d'air et de plantes et sera considérée comme étant un parallélépipède rectangle. Ce volume sera ensuite multiplié par la masse volumique ρ_{air} pour retrouver la masse. Cependant, ce volume est composé principalement de végétation. De ce fait, un taux représentant le pourcentage de plante et d'air ($K_{air-plante}$) est à définir. Si $K_{air-plante}$ vaut 0.1, alors cela signifie que dans le volume donné, il y a 1% d'air.

$$m_{air} = k_{air-plante} \cdot S_{veg} \cdot e \cdot \rho_{air} \quad (14)$$

$k_{air-plante}$: Taux d'air dans le volume de la façade végétalisée [-] ($k_{air-plante} = 0.1$)

e : Épaisseur de la couche de végétation [m] ($e = 0.25$ m)

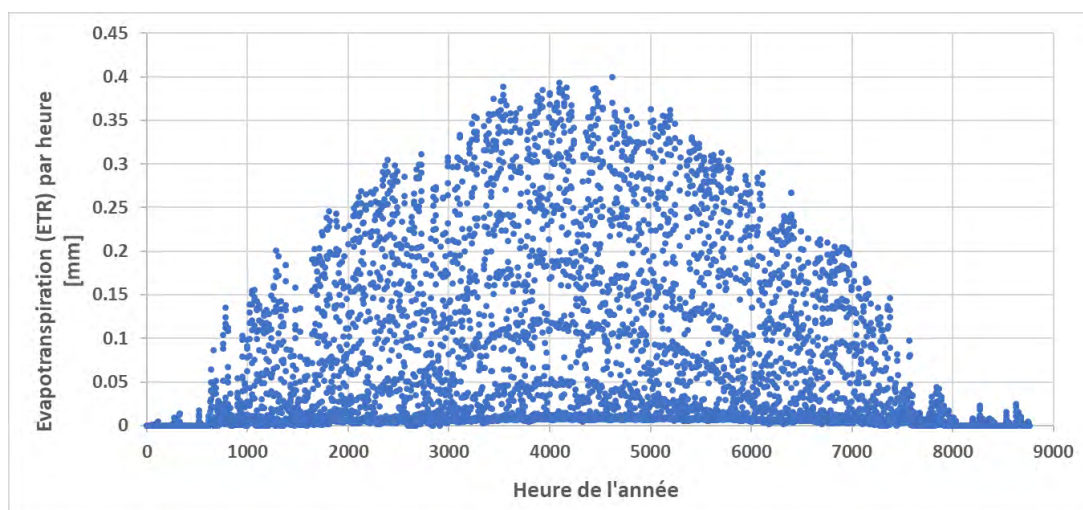
ρ_{air} : Masse volumique de l'air [kg/m³] ($\rho_{air} = 1.204$ [kg/m³] à 20°C)

L'Éq. (15) correspond à l'équation finale permettant de déterminer la différence de température à partir d'un ET_{ref} en combinant l'Éq. (5) et les Éq. (10-14). Le calcul de ET_{ref} déterminera le pas de temps (horaire ou journalière) de l'Éq. (15).

$$\Delta T = \frac{ET_{ref} \cdot kc \cdot \rho_{vapeur\ d'eau} \cdot \Delta H_{vap} \cdot k_{refroidissement} \cdot S_{veg} \cdot 10^6}{k_{air-plante} \cdot S_{veg} \cdot e \cdot \rho_{air} \cdot c_{air}} \quad (15)$$

Il est intéressant de noter que S_{veg} s'annule et n'intervient plus dans l'équation. En effet, l'évapotranspiration s'effectue de manière homogène sur toute la surface végétalisée. De ce fait, la réduction de température s'effectue partout de la même manière.

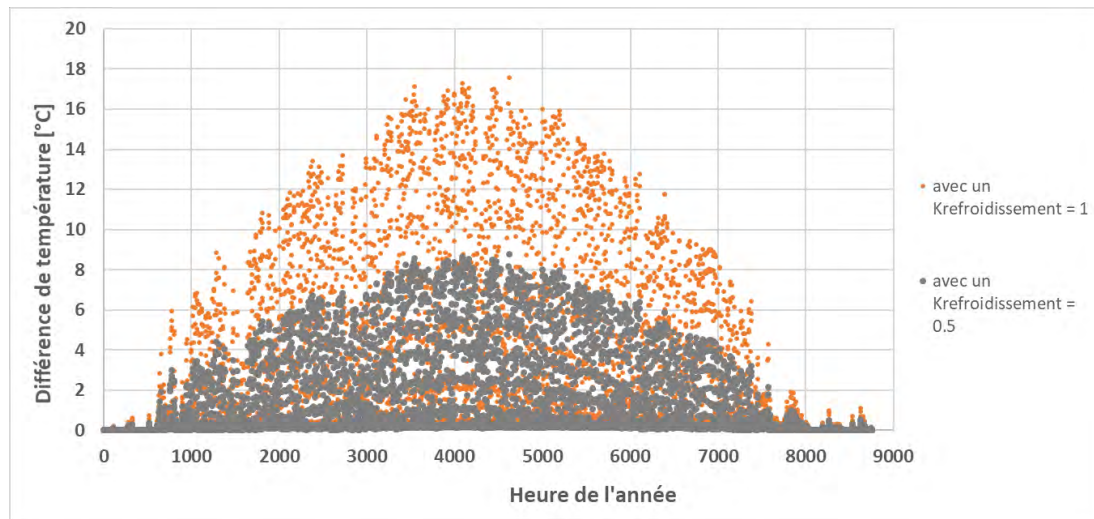
6.4 Résultats de l'évapotranspiration et de son impact



Graphique 1 Variation de l'évapotranspiration durant l'année

Le Graphique 1 présente l'évolution de l'évapotranspiration réelle (ETR) durant toute l'année. L'ETR augmente jusqu'à atteindre des pics durant les périodes chaudes pour ensuite chuter lorsque les mois

plus froids approchent. Elle se retrouve même très proche de zéro durant les mois de janvier, novembre et décembre. Une « bande » importante est observable proche de zéro.



Graphique 2 Variation de la différence de température extérieure durant l'année

Le Graphique 2 présente l'évolution de la différence de température extérieure (ΔT) par heure durant toute l'année grâce à l'évapotranspiration. L'évolution a exactement la même tendance que pour l'évapotranspiration. La différence de température peut beaucoup varier en fonction du choix du $K_{\text{refroidissement}}$. En effet, elle double lorsque le coefficient passe de 0.5 à 1.

6.5 Analyse et résumé des résultats de l'évapotranspiration et de son impact

Le Graphique 1 et le Graphique 2 montrent bien la même tendance annuelle pour l'évapotranspiration réelle (ETR) et pour la différence de températures. En effet, les deux augmentent progressivement en s'approchant des mois chauds pour ensuite diminuer progressivement durant les mois froids. Cela s'explique par le fait que l'évapotranspiration dépend directement du rayonnement solaire global et de la température ambiante. Ces deux derniers augmentent durant les mois chauds, ce qui a pour conséquence d'augmenter également l'évapotranspiration. L'ETR annuelle est de 478 mm. L'ordre de grandeur de cette valeur peut être validé grâce à des mesures effectuées par Calanca et al. (2011) qui ont réalisé des mesures à Oensingen (465m d'altitude, commune de Soleure) et ont obtenu un ETR de 501 [mm]. Quant à l'ETR maximale journalière, elle est de 3.5 [mm]. BRL Exploitation (2010) mentionne que l'ETR varie entre 1 et 7 [mm] en fonction de la période de l'année. Bien que la région analysée soit la Corse, cela permet de confirmer l'ordre de grandeur. Il est également intéressant de noter qu'une alternance jour et nuit n'est pas observable alors que durant la nuit le rayonnement est à 0. Cela est dû au fait que même lorsque le rayonnement vaut 0, si la température est positive, il y aura toujours une faible évapotranspiration comme le montre l'Éq. (9).

Quant à l'évolution de la température, elle suit exactement la même tendance que celle de l'évapotranspiration. Cela s'explique par l'Éq. (14). Le calcul de ΔT dépend de différents éléments. Cependant, lors de son calcul d'une heure à l'autre, seule ET_{ref} est variable alors que les autres éléments restent constants. De ce fait, ΔT peut être simplement exprimé comme étant ET_{ref} multiplié par une constante qui englobe le reste de l'équation. ETR est également à son tour directement

proportionnel à ET_{ref} , car il y a seulement le coefficient de culture qui relie ces deux derniers. Ainsi, ΔT est directement proportionnelle à ETR, ce qui explique leur même comportement sur le Graphique 1 et le Graphique 2. Pour un $k_{refroidissement}$ de 0.5 et un $k_{air-plante}$ de 0.1, la différence de température maximale s'élève à 8.8 [°C]. Cette dernière correspond donc à la capacité maximale de refroidissement offerte par l'évapotranspiration. La moyenne annuelle et la moyenne sur la période chaude (avril à octobre y compris) sont respectivement de 1.2 [°C] et 1.9 [°C]. Cette grande diminution vient des heures avec peu d'ensoleillement ou encore de faibles températures. De plus, la méthode de Turc ne considère pas les températures négatives. De ce fait, pour les jours où la température est négative, l'ETR est de 0 [mm] et donc ΔT également.

Si l'ETR peut être considérée comme validée, ΔT peut cependant passablement varier en fonction des choix de $k_{refroidissement}$ et de $k_{air-plante}$. Ces deux derniers ont été choisis arbitrairement. Ainsi, si la capacité de refroidissement est considérée à 1 au lieu de 0.5, les différences de températures peuvent doubler comme le montre le Graphique 2. Cependant, le calcul resterait facilement réalisable en cas de modifications de ces coefficients, car la variation de ces deux coefficients engendre un impact directement proportionnel à ΔT . Le même raisonnement est également valable pour une modification du $k_{air-plante}$.

7 Simulation sur bSol

Le logiciel bSol permet de modéliser différents types d'ouvrage (habitat individuel, habitat collectif, administration ou encore des commerces) et d'en simuler les consommations énergétiques et le confort thermique. En revanche, il ne permet pas de prendre directement en compte la présence d'une façade ou d'une toiture végétalisée. Mais, grâce au calcul d'évapotranspiration et de son impact sur la température, il est possible de simuler l'effet de refroidissement en modifiant les fichiers climatiques. Cela permettra finalement de déterminer l'impact sur le bilan énergétique ou encore le confort thermique en prenant en compte l'effet d'évapotranspiration. Le logiciel contient trois onglets qui doivent être paramétrés pour les simulations : les données climatiques/géographiques, la modélisation des éléments de la structure du bâtiment et les paramètres d'exploitation.

7.1 Paramètres de simulation dans bSol

7.1.1 Paramètres climatiques

Les simulations réalisées dans le cadre de ce travail ont été faites pour la ville de Viège en Suisse avec les données climatiques de l'année 2017. Le choix de cette ville repose simplement sur la disponibilité des différentes données climatiques. Les fichiers climatiques doivent en effet contenir un certain nombre d'éléments afin qu'ils soient transférables sur le logiciel bSol : rayonnement global et diffus, températures, azimuth et hauteur du soleil. Ces éléments sont donnés heure par heure. En complément, un fichier d'horizon est également nécessaire afin de pouvoir représenter la situation réelle avec l'horizon lointain. L'horizon, la hauteur du soleil, la température ambiante extérieure et l'irradiance peuvent être consultés dans les annexes 6, 7 et 8.

7.1.2 Paramètres des bâtiments

Avec bSol, il est possible de déterminer précisément la structure de bâtiment voulue. En effet, il permet de détailler les différentes couches des façades, du toit et du plancher, mais aussi de définir la surface vitrée ou encore le nombre de portes. Les dimensions du bâtiment sont les suivantes : longueur 14 m (sud et nord), largeur 10 m (est et ouest). Pour la hauteur, elle varie en fonction de l'étude qui est considérée. La surface énergétique est de 120 m² par étage. Pour les surfaces vitrées totales, elles sont réparties ainsi : 15 m² par étage au sud (10 m² pour la baie vitrée et 5 m² pour la fenêtre de la chambre) et 3 m² par étage (deux fenêtres de 1.5 m²) pour chacune des trois autres orientations. Le coefficient de transmission thermique (valeur U) choisi pour ces vitres est de 1.5 [W/m²/K]. Les surfaces vitrées sur la face sud possèdent également des balcons au-dessus (facteur d'ombrage dynamique). Le dimensionnement du facteur d'ombrage est consultable en annexe 9. Les surfaces opaques (toit, murs et sol) n'ont pas été réalisées en considérant précisément les différentes couches qui les composent habituellement (isolation, pare-vapeur, etc.). En effet, la valeur U a été fixée à 0.22 [W/m²/K] pour le toit, les murs et le sol. Quant à la masse du bâtiment, ce sont essentiellement les éléments porteurs comme le bois, le béton armé ou encore la brique de terre. Trois types de bâtiments ont également été réalisés sur bSol en fonction de leur capacité thermique. Plus la capacité thermique est élevée, plus le bâtiment sera « lourd ». Le premier bâtiment (structure légère) est composé essentiellement de bois. Le deuxième représente une structure moyenne avec des façades et le plancher en brique et un toit en bois. Le dernier est constitué essentiellement de béton armé (structure lourde). Les détails concernant les bâtiments étudiés peuvent être consultés en annexe 10,11 et 12.

7.1.3 Paramètres d'exploitation

En plus de la structure du bâtiment et des conditions climatiques et géographiques, des paramètres d'exploitation doivent être définis. Ils comprennent les charges internes, l'aération, la récupération de chaleur ou encore l'occultation des fenêtres. Ils seront identiques pour toutes les simulations réalisées. La quantification de ces différents éléments a été réalisée sur la base de la norme SIA 2024 (2015). Le détail du paramétrage peut être consulté en annexe 13. La climatisation sera seulement considérée dans les chapitres étudiant les bilans énergétiques. Dans les chapitres analysant le confort thermique, elle ne sera pas prise en compte.

7.2 Méthode de simulation des façades végétalisées

Pour réaliser les différentes simulations qui prennent en compte l'évapotranspiration, il est donc essentiel de d'abord la calculer. Il est ensuite possible de déterminer sa capacité de refroidissement (ΔT [°C]). Finalement, il restera à déduire ce ΔT aux températures extérieures réelles dans les fichiers climatiques et d'introduire ces fichiers dans bSol pour les simulations. Une première étude sera effectuée afin d'évaluer l'impact de l'évapotranspiration sur le bilan énergétique. La deuxième étude déterminera l'impact de l'évapotranspiration sur le confort thermique. Des bâtiments d'inertie thermique différente seront finalement considérés pour voir l'impact de l'évapotranspiration.

La méthodologie choisie ici est seulement applicable pour des façades végétalisées composées de plantes grimpantes persistantes. Dans le cadre de ce travail, les quatre façades du bâtiment seront végétalisées. Le choix des plantes grimpantes repose sur le fait que ce type d'installation est plus facile à mettre en place, coûte moins cher et nécessite moins d'entretien. Pour une toiture végétalisée ou un mur vivant, il est nécessaire d'identifier l'impact de l'inertie du substrat. La simulation de l'impact de la végétalisation se fera seulement par le biais de l'évapotranspiration dans le cadre de ce travail.

En effet, l'ombrage solaire n'est pas pris en compte dans le cadre de ces simulations, les gains solaires se produisant principalement par le biais des surfaces vitrées. Or, ces dernières ne sont pas couvertes de végétation. Quant au réchauffement par rayonnement solaire des surfaces opaques, il n'est pas pris en compte par le logiciel bSol. Cependant, son impact est négligeable par rapport aux rayonnements passant par les vitres. Le rayonnement provenant de l'augmentation de la température des surfaces ne sera pas considéré. Ce travail ne considère pas la détermination des températures de surface. De ce fait, il n'est pas possible de calculer cette puissance de rayonnement.

7.2.1 Impact sur le bilan énergétique

Une première étude est donc réalisée pour déterminer l'impact des façades végétalisées sur le bilan énergétique pour des bâtiments d'inertie thermique moyenne. Elle comprend trois simulations différentes :

- Impact de l'évapotranspiration sur un bâtiment de trois étages sans climatisation
- Impact de l'évapotranspiration sur un bâtiment de trois étages avec climatisation
- Impact de l'évapotranspiration sur des bâtiments en fonction du nombre d'étages

7.2.2 Impact sur le confort thermique en été

Il est également intéressant de prendre en compte l'impact des façades végétalisées sur le confort thermique en été. Pour ce faire, un des éléments centraux à observer est la température intérieure. En effet, bSol calcule une température intérieure en fonction des différents paramètres expliqués dans le chapitre 7.1 *Paramètres de simulation dans bSol*. Il donne aussi le nombre d'heures de surchauffe durant l'été. La norme SIA 382/1 (2014) mentionne qu'en cas de dépassement de 100 heures de surchauffe, un refroidissement est nécessaire. Or, dans le cas d'un habitat collectif, l'utilisation d'une climatisation fixe n'est pas autorisée. Ainsi, cette analyse permettra de déterminer l'impact des façades végétalisées sur la température intérieure et les heures de surchauffe. L'impact de la façade végétalisée en hiver est négligeable dans le cadre de ce travail en raison de l'isolation quasi nulle offerte par les plantes grimpantes. Dans ce chapitre, un bâtiment de trois étages et de capacité thermique moyenne est considéré. La climatisation n'est donc également pas prise en compte.

7.2.3 Impact par rapport à l'inertie thermique

Comme mentionné précédemment, trois types de bâtiments différents sont considérés pour cette analyse en fonction de leur inertie thermique, comme le montre le Tableau 5 :

	Mur	Toit	Sol	Cr/Ae [kWh/m ² /K]
Légère	Bois	Bois	Bois	0.034
Moyenne	Brique de terre	Bois	Brique de terre	0.085
Lourde	Béton armé	Béton armé	Béton armé	0.13

Tableau 5 Composition des trois bâtiments pour l'analyse par rapport à l'inertie thermique

Le but est donc de définir l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique en fonction du type de bâtiment lorsque ce dernier est équipé d'une façade végétalisée. De plus, cette étude portera également sur le confort thermique pour ces différentes inerties thermiques. Les surfaces opaques de ces trois bâtiments considéreront toutes une valeur U de 0.22 [W/m²/K]. Ainsi, l'impact sur le bilan énergétique et le confort thermique ne prendra en compte que l'influence de la masse thermique du bâtiment. Cette étude portera sur des bâtiments de trois étages. L'analyse du bilan énergétique prendra en compte la climatisation alors que pour le confort thermique le bâtiment ne comprendra pas de climatisation.

8 Présentation des résultats de simulation

8.1 Impact sur le bilan énergétique

	Sans climatisation		Avec climatisation	
	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé
Énergie chauffage [kWh]	9164	9320	9164	9320
Énergie climatisation [kWh]	0	0	215	0
Total [kWh]	9164	9320	9379	9320

Tableau 6 Consommation énergétique annuelle du bâtiment simulé avec et sans climatisation

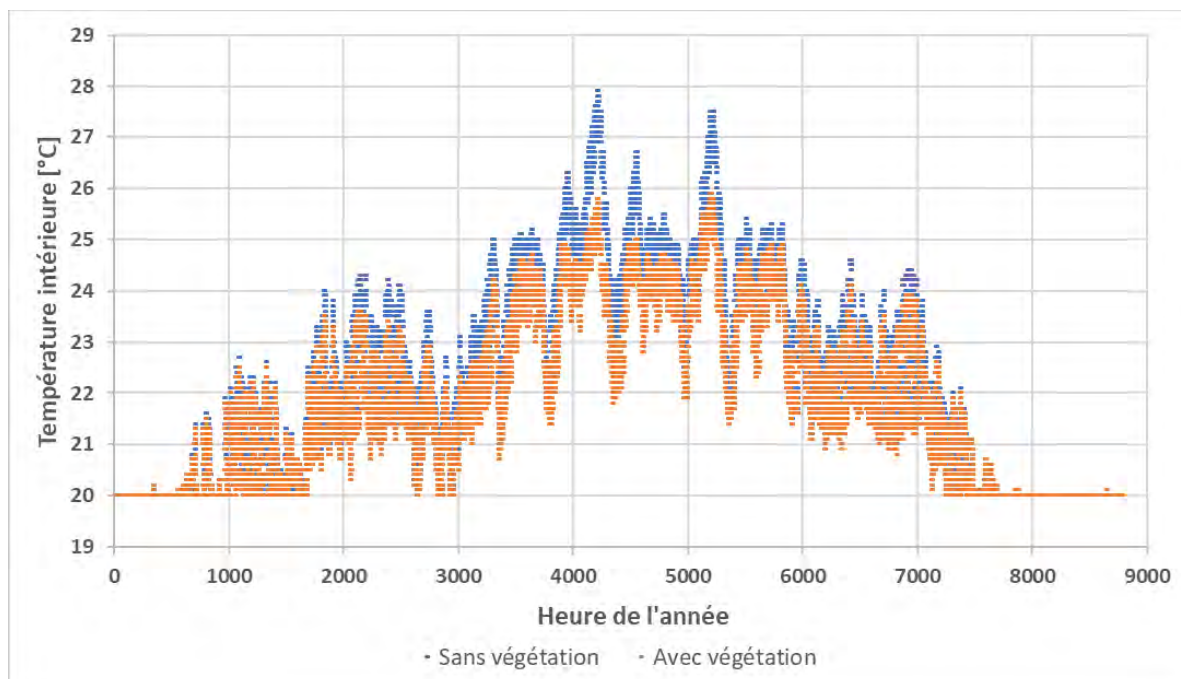
Le Tableau 6 présente les consommations énergétiques de chauffage et de climatisation pour le bâtiment simulé. Les deux colonnes de gauche comparent les consommations lorsqu'il n'y pas de climatisation. L'énergie en lien avec la climatisation est donc nulle. La consommation d'énergie de chauffage est pour sa part de 9164 kWh pour le bâtiment sans végétation et de 9320 kWh pour le bâtiment avec végétation. Le bilan annuel montre donc que la consommation est plus élevée avec la végétation. Les deux colonnes de droite comparent les consommations énergétiques avec l'utilisation d'une climatisation. Les consommations d'énergie de chauffage sont les mêmes que celles pour le cas sans climatisation. L'énergie de climatisation s'élève pour sa part à 215 kWh lorsqu'il n'y a pas de végétation. En présence de cette dernière, elle est de 0 kWh. Sur le bilan annuel, pour un bâtiment possédant une climatisation, la végétalisation des façades permet donc de diminuer la consommation énergétique.

	Part d'énergie de clim. (sans végé) [%]	Économie d'énergie de clim. [%]	Économie d'énergie de clim. [kWh]	Économie annuelle [%]
3 étages	2.3	100.0	215.3	0.6
6 étages	2.1	100.0	360.0	0.5
10 étages	1.8	100.0	608.0	0.2
15 étages	2.4	100.0	993.0	1.1

Tableau 7 Impact de la végétalisation sur le bilan énergétique annuelle en fonction du nombre d'étages

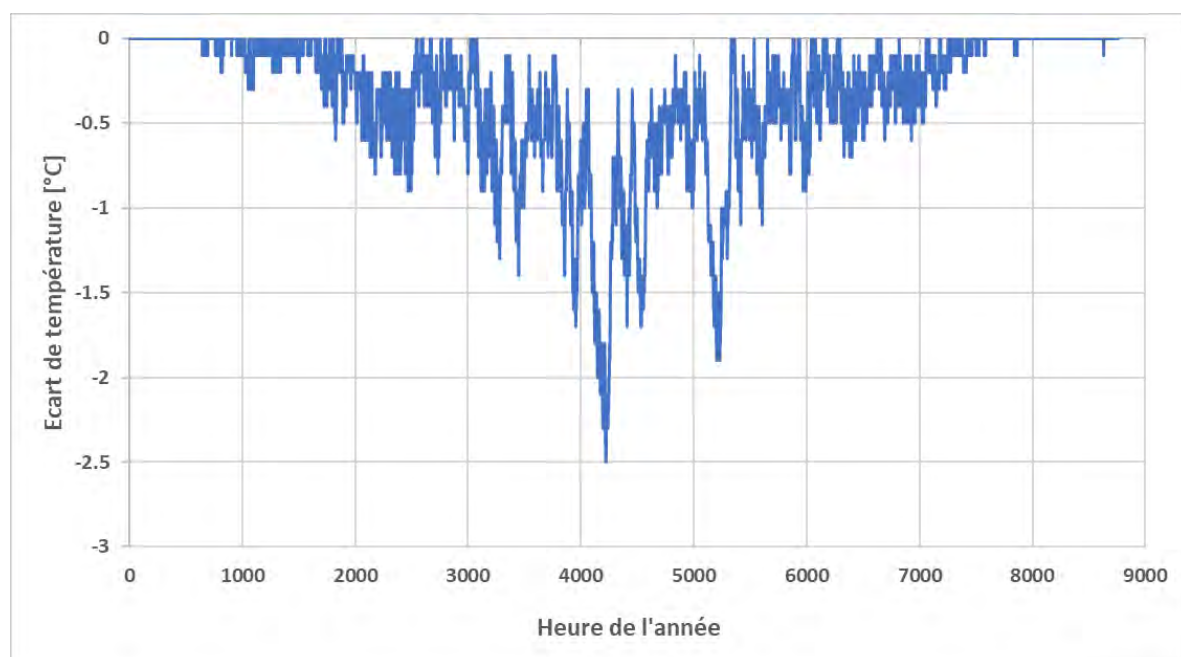
Le Tableau 7 présente l'impact de la végétalisation sur le bilan énergétique annuel lorsque le nombre d'étages du bâtiment augmente. Cette analyse est réalisée pour un bâtiment de 3, 6, 10 et 15 étages. Afin d'en définir l'influence, trois éléments vont être étudiés. La *part d'énergie de clim. (Sans végé) [%]* correspond au pourcentage d'énergie de climatisation par rapport à la consommation totale (incluant le chauffage) pour un bâtiment sans végétalisation. L'*économie d'énergie de clim.* représente l'énergie en climatisation qui a pu être économisée grâce à la façade végétalisée, en [%] et en [kWh]. L'économie annuelle correspond à l'énergie pouvant être économisée par rapport à la consommation totale (chauffage et climatisation). La part d'énergie de climatisation se situe autour des 2 %. L'économie annuelle atteint un maximum de 1.1 %. Dans les quatre cas, il est en revanche possible de réaliser 100 % d'économie d'énergie de climatisation. Les bilans énergétiques en [kWh] pour chaque bâtiment peuvent être consultés en annexe 14.

8.2 Impact sur le confort thermique en été



Graphique 3 Comparaison des températures intérieures avec la végétalisation

Le Graphique 3 montre les températures intérieures de l'immeuble avec et sans végétation. La courbe bleue représente les températures intérieures lorsque l'immeuble n'est pas végétalisé alors que la courbe rouge considère un bâtiment végétalisé. En été, la température peut atteindre 27.9 °C pour le bâtiment sans végétation, le maximum se situant à 25.9 °C pour le bâtiment avec végétation. Durant les périodes plus froides, peu de variations sont observables entre les deux bâtiments. Cependant, plus on s'approche du centre du Graphique 3 et donc des mois chauds, plus la végétalisation a un impact important sur la température intérieure.



Graphique 4 Écart de température intérieure

Le Graphique 4 montre la différence de température à l'intérieur de l'immeuble lorsque ce dernier est végétalisé. Un écart de température négatif signifie donc que la température intérieure diminue. Les plus grands écarts de température se situent en été. Ces écarts augmentent pour les périodes estivales et diminuent pour les périodes plus froides. En effet, ils peuvent monter jusqu'à environ 2.5 °C durant le mois de juin.

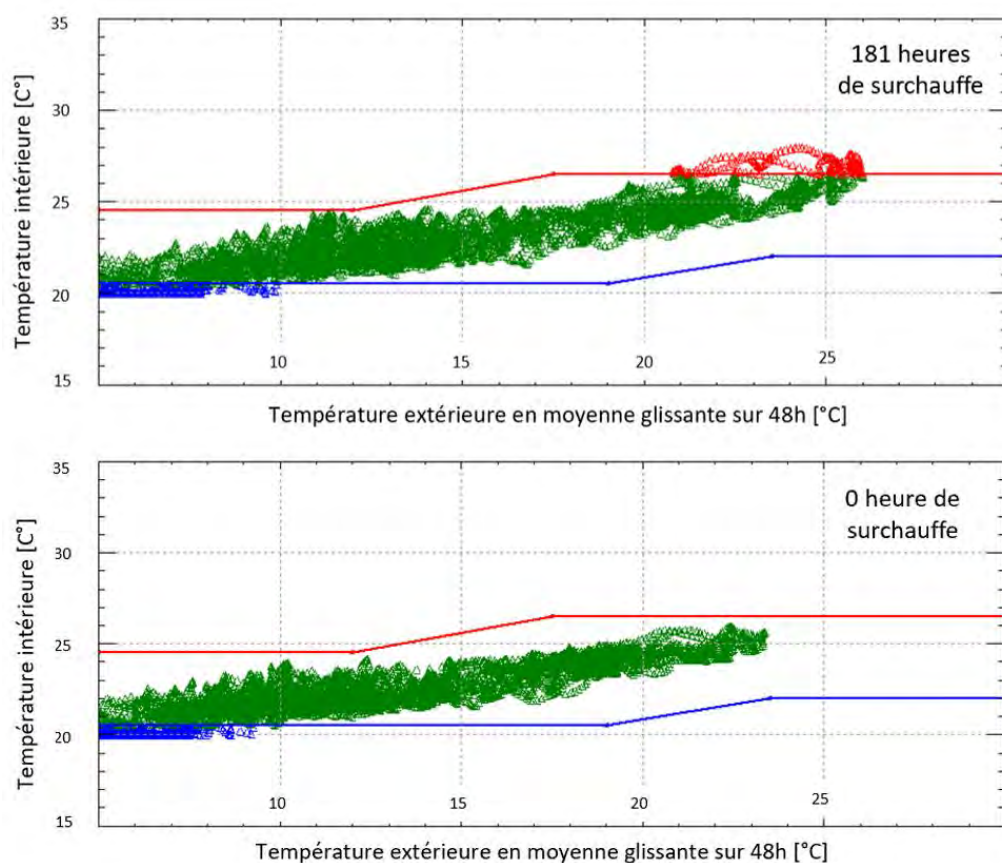


Figure 5 Comparaison des heures de surchauffe (en haut : sans végétalisation, en bas : avec végétalisation)

La Figure 5 montre l'évolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure en moyenne glissante sur 48h. Le graphique du haut correspond au bâtiment sans végétation alors que celui du bas correspond au bâtiment avec végétation. Les droites rouge et bleue correspondent respectivement aux limites supérieures et inférieures de température autorisée par la norme (SIA 382/1, 2014). Ces deux limites varient en fonction de la température extérieure. Sur le graphique du haut, des heures de surchauffe peuvent être observées. Elles sont représentées par les triangles rouges lorsqu'elles dépassent la limite supérieure. Les triangles en bleu représentent les heures où la température intérieure est en dessous de la limite inférieure. Sur le graphique du bas, les heures de surchauffe sont toutes en dessous de la limite supérieure. Des triangles bleus sont également présents pour le bâtiment végétalisé. Les triangles verts sont les heures durant lesquelles la température intérieure est comprise entre les limites supérieures et inférieures et respecte donc les exigences de la norme SIA 382/1 (2014). Il est donc constaté que la façade végétalisée permet de diminuer les heures de surchauffe en passant de 181 heures à 0 heure.

8.3 Impact de l'inertie thermique

	Bâtiment léger		Bâtiment moyen		Bâtiment lourd	
	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé
Énergie chauffage [kWh]	9967	10198	9164	9320	8844	8986
Énergie climatisation [kWh]	545	52	215	0	138	0
Énergie totale [kWh]	10512	10250	9379	9320	8982	8986

Tableau 8 Comparaison des bilans énergétiques d'un bâtiment végétalisé et d'un bâtiment non végétalisé pour différentes inerties

Le Tableau 8 présente la consommation énergétique en chauffage et en climatisation pour des bâtiments d'inertie thermique différente (légère, moyenne et lourde). Sans végétalisation, le bâtiment avec une inertie légère consomme 9967 kWh pour le chauffage et 545 kWh pour la climatisation, soit une consommation annuelle de 10512 kWh. La végétalisation augmente l'énergie de chauffage à 10198 kWh et diminue l'énergie de climatisation à 52 kWh. Au bilan annuel, la végétalisation permet de diminuer la consommation à 10250 kWh.

Sans végétalisation, le bâtiment avec une inertie moyenne consomme 9164 kWh de chauffage et 215 kWh de climatisation, soit un total annuel de 9379 kWh. En présence de végétalisation, l'énergie de chauffage augmente à 9320 kWh et l'énergie de climatisation diminue à 0 kWh. Quant à la consommation annuelle, elle descend à 9320 kWh.

Sans végétalisation, le bâtiment avec une inertie lourde consomme 8844 kWh de chauffage et 138 kWh de climatisation, soit une consommation annuelle de 8982 kWh. La façade végétalisée augmente la consommation de chauffage à 8986 kWh et diminue celle en climatisation à 0 kWh. Au niveau du bilan annuel, les besoins en énergie s'élèvent à 8986 kWh.

	Léger		Moyen		Lourd	
	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé
Heures de surchauffe	486	0	181	0	100	0
Température intérieure maximale [°C]	29.2	26.9	27.9	25.9	27.3	25.5
Écart maximal de la température intérieure [°C]	3.1		2.5		2.2	

Tableau 9 Comparaison des températures, des écarts de température et des heures de surchauffe (confort thermique) d'un bâtiment végétalisé et d'un bâtiment non végétalisé pour différentes inerties thermiques

Le Tableau 9 permet de comparer les températures intérieures maximales et les heures de surchauffe entre différentes inerties thermiques lorsque le bâtiment est végétalisé et lorsqu'il ne l'est pas. De plus, il présente également les écarts maximaux de température observés d'un type de bâtiment à l'autre.

Pour le bâtiment léger, la végétalisation permet de faire passer les heures de surchauffe de 486 heures à 0 heure. La température maximale dans le bâtiment est de 29.2 °C. Cette dernière descend à 26.9 °C en présence de végétation. L'écart maximal de la température intérieure durant l'année est de 3.1 °C.

Pour le bâtiment moyen, les heures de surchauffe passent de 181 heures à 0 heure grâce à la végétalisation des façades. Les températures intérieures maximales sont de 27.9 °C pour un bâtiment sans végétation et de 25.9 °C pour un bâtiment avec végétation. L'écart maximal s'élève à 2.5 °C.

Pour le bâtiment lourd, les heures de surchauffe sont de 100 heures. Equipé d'une façade végétalisée, les heures de surchauffe disparaissent. Quant aux températures intérieures maximales, elles sont de 27.3 °C (avec végétation) et de 25.5 °C (sans végétation). L'écart maximal est de 2.2 °C.

9 Analyse et résumé des résultats de simulation

9.1 Impact sur le bilan énergétique

Impact sur bâtiment avec et sans climatisation

Comme le montre le Tableau 6, dans le cas où le bâtiment n'est pas équipé de climatisation, toute l'énergie consommée concerne le chauffage. La consommation augmente légèrement, soit de 1.7 % en présence de végétation. Cela est dû au fait que l'évapotranspiration déduit la température ambiante extérieure à des moments où il ne fait pas nécessairement très chaud. Pour rappel, l'évapotranspiration a lieu lorsque la température et le rayonnement sont supérieurs à 0. Même en cas de faible température et/ou faible rayonnement, l'évapotranspiration n'est pas nulle et donc la diminution de température également. Ainsi, durant les périodes nécessitant le chauffage (température et rayonnement supérieurs à 0), une diminution de la température va entraîner une plus grande consommation d'énergie. Dans le cadre de cette analyse avec des plantes grimpantes, l'isolation par la façade végétale est très faible en raison de l'absence de substrat. L'isolation offerte par les feuilles reste très faible, et même négligeable (**Nobel, 2005 cité par Djedjig, 2013**). Ainsi, lorsque le bâtiment étudié n'est pas équipé de climatisation, la façade végétalisée ne permet pas d'économiser de l'énergie. En effet, il n'est pas possible d'économiser de l'énergie en été si aucune énergie n'est consommée.

Pour le cas où le bâtiment est équipé d'une climatisation, cette dernière consomme 215 kWh. En ajoutant une façade végétalisée, il est possible de diminuer cette énergie de 100%. Il n'y aurait donc plus d'énergie de climatisation à fournir. Cependant, pour la même raison que le cas sans la climatisation, l'énergie de chauffage augmente avec la végétalisation des façades. L'économie en climatisation est certes très haute. Cependant, à l'échelle de la consommation annuelle d'un bâtiment climatisé, la façade végétalisée permet d'économiser que 0.6 %. Cela s'explique par le fait que l'énergie de climatisation ne représente que 2.3 % de la consommation totale du bâtiment sans végétation. Finalement, cela semble assez logique en raison des conditions climatiques suisses. En effet, en hiver, la consommation d'énergie pour le chauffage est très élevée en raison des basses températures. En revanche, en été, la température extérieure n'est pas si haute et nécessite que peu de climatisation. En 2017, les plus hautes températures extérieures se situaient autour des 35°C. Ces résultats montrent que les économies liées aux façades végétalisées sont possibles uniquement en été. Avec le réchauffement climatique, les températures vont augmenter et les températures extrêmes seront plus fréquentes. Cela pourrait donc engendrer des besoins en climatisation plus importants. Ainsi, les économies réalisables seraient également plus intéressantes.

Impact de l'augmentation de la hauteur du bâtiment

L'impact de l'augmentation du nombre d'étages a été analysé. Le Tableau 7 montre que la part d'énergie liée à la climatisation a tendance à stagner autour des 2 % malgré l'augmentation du nombre d'étages. Elle reste donc très faible par rapport à la consommation totale d'énergie (chauffage et climatisation). Quant à l'énergie de climatisation, elle augmente logiquement avec l'augmentation de

la hauteur du bâtiment. Cependant, dans tous les cas, la façade végétalisée permet d'économiser 100 % de l'énergie de climatisation. Au niveau annuel, le bilan énergétique ne s'améliore guère avec l'augmentation de la hauteur du bâtiment. Même pour un bâtiment de 15 étages, l'économie annuelle ne monte qu'à 1.1 %.

Ainsi, la façade végétalisée permet d'économiser de l'énergie essentiellement sur la climatisation. La climatisation ne représentant qu'un faible pourcentage de la consommation annuelle, l'impact de la façade est bas sur l'année. Dans d'autres pays comme Hong-Kong, où il fait plus chaud et pendant plus longtemps, la part d'énergie pour la climatisation représente 30% à 60 % de l'énergie électrique consommée par la ville (Metta, 2015) ; l'impact de façades végétalisées pourrait donc être intéressant, les besoins de climatisation représentant une plus grande part de la consommation annuelle. Pour ce qui est des bâtiments de cette étude, il est tout de même intéressant de constater que des façades végétalisées permettraient d'enlever la climatisation dans tous les immeubles.

9.2 Impact sur le confort thermique en été

Impact sur la température intérieure

Le Graphique 3 permet de montrer l'impact d'une végétalisation sur la température intérieure (T_{int}). L'évapotranspiration provenant des plantes permet de réduire la température extérieure (T_{ext}), ce qui engendre une diminution de la température intérieure de l'immeuble. Cependant, cette variation de T_{ext} et donc de T_{int} grâce à l'évapotranspiration dépend également du rayonnement solaire global. Ainsi, une grande température ne signifie pas nécessairement de grandes réductions de température. C'est la raison pour laquelle, à certains moments, les températures sont plus élevées, mais l'écart est plus petit. Lorsque le bâtiment n'est pas végétalisé, la température intérieure maximale monte jusqu'à 27.9 °C, alors qu'elle atteint un maximum de 25.9 °C avec végétalisation. Cette dernière est inférieure à la valeur limite supérieure de surchauffe indiquée par la norme SIA 382/1 (2014), soit 26.5 °C.

Impact sur les écarts de température

Comme le montre le Graphique 4, les écarts de températures peuvent aller jusqu'à 2.5 °C en juin en raison d'une évapotranspiration plus importante. En effet, durant cette période, la température extérieure et le rayonnement sont plus importants. En revanche, un faible rayonnement et un faible T_{ext} expliquent des écarts quasi nuls durant certains mois d'hiver. La diminution des écarts de températures à certains moments durant la période estivale peut être imputée soit à une diminution de la température soit à une diminution du rayonnement solaire global. Cela explique donc pourquoi l'écart moyen annuel est seulement de 0.35 °C. En considérant la moyenne pour les mois chauds (juin, juillet et août), l'écart moyen est de 0.8 °C. Cela montre donc que la façade végétalisée a son importance lors de fortes températures. Il est aussi intéressant de noter que l'écart de température ne vaut jamais zéro en été alors que durant la nuit, le rayonnement est nul. Cela vient de l'Éq. (9) qui ne vaudra jamais zéro malgré un rayonnement nul. Le seul moment où l'écart de température vaut zéro se trouve durant la période d'hiver où les températures sont négatives. Cela explique donc la raison pour laquelle une alternance nuit-jour n'est pas observable.

Impact sur les heures de surchauffe

Comme vu précédemment, la façade végétalisée permet de réduire les températures intérieures du bâtiment. La prise en compte des heures de surchauffe est également utile pour en étudier l'impact sur le confort thermique. Comme le montre la Figure 5, la végétalisation des façades permet de réduire les heures de surchauffe. La température intérieure sur l'axe en y de la Figure 5 correspond à une température opérative. Cette dernière est essentielle pour déterminer les heures de surchauffe. Elle correspond à la température ressentie par les occupants. Elle prend en compte la température de l'air et celle des surfaces environnantes. Quant à l'axe en x, il représente la température extérieure en moyenne glissante sur 48h. Ainsi, sans végétation, le bâtiment possède 181 heures de surchauffe selon bSol. En ajoutant une végétalisation, les heures de surchauffe sont réduites à zéro. En diminuant les heures de surchauffe, cela permet également au bâtiment d'être dans les règles. En effet, au-delà de 100 heures de surchauffe, la norme SIA 382/1 (2014) mentionne qu'une climatisation est nécessaire. Or, les habitats collectifs ne sont pas autorisés à avoir une installation de climatisation fixe.

Ainsi, une façade végétalisée permet de réduire les températures intérieures de l'immeuble, mais également les heures de surchauffe durant la période estivale. Cela permet donc d'améliorer le confort thermique pour les occupants en été.

9.3 Impact de l'inertie thermique

Impact sur le bilan énergétique

Le Tableau 8 montre donc des bilans énergétiques variables en fonction de la présence des façades végétalisées, mais également en fonction de l'inertie thermique du bâtiment. Lorsque l'inertie thermique augmente – que le bâtiment soit végétalisé ou pas – non seulement l'énergie de chauffage, mais aussi celle de la climatisation diminuent, et par la même la consommation totale annuelle. Cela s'explique par la capacité des bâtiments à grande inertie à amortir les variations de température intérieure par déphasage et amortissement lorsque la température extérieure varie. Au contraire d'un bâtiment léger, un bâtiment lourd permet d'emmagasiner plus de chaleur dans le toit, le sol ou encore les façades. Cette chaleur est ensuite restituée progressivement vers l'intérieur du bâtiment. Ainsi, la température est sujette à de moins grands écarts, permettant ainsi de diminuer la consommation énergétique.

Le bâtiment léger permet de diminuer l'énergie de climatisation de 90% alors que pour les deux autres, l'économie est de 100 %. Ainsi, il est possible de se passer de climatisation pour les bâtiments moyen et lourd lorsque ces derniers sont végétalisés. Cependant, lorsque l'inertie est grande, la consommation d'énergie de climatisation est diminuée. Ainsi, l'impact d'une végétalisation sera plus faible bien qu'il soit possible de se passer de climatisation.

Au niveau de la consommation totale annuelle, une augmentation de l'inertie thermique amène à une diminution des économies réalisables. En effet, la végétalisation permet de réduire cette consommation de 2.5 % pour un bâtiment léger, de 0.6 % pour un bâtiment moyen et de 0.5 % pour un bâtiment lourd. Ainsi, lorsque l'inertie augmente, l'impact de la végétalisation est plus faible et les économies d'énergie les plus petites. En matière de consommation énergétique, il serait donc plus avantageux de végétaliser des bâtiments à faible inertie thermique. Cependant, les économies resteraient encore bien faibles en raison de la faible part de l'énergie de la climatisation par rapport au bilan total.

Impact sur le confort thermique

Le Tableau 9 montre la variation des heures de surchauffe, de la température intérieure maximale et des écarts maximaux de température pour différentes inerties thermiques lorsque le bâtiment possède une façade végétalisée ou non.

Pour ce qui est des heures de surchauffe, elles diminuent lorsque l'inertie thermique augmente. Dans les trois cas, la façade végétalisée permet d'atteindre 0 heure de surchauffe. Pour un bâtiment léger, avec 486 heures de surchauffe, la façade végétalisée a incontestablement plus d'impact et permet de diminuer les heures de surchauffe de manière plus importante. Ainsi, plus l'inertie est haute, plus les heures de surchauffe sont basses et plus l'impact de la façade végétalisée est faible.

Au niveau de la température intérieure maximale, elle diminue lorsque l'inertie thermique augmente. En effet, entre le bâtiment lourd et le bâtiment léger, il est possible de diminuer cette température de 1.9 °C lorsqu'ils ne sont pas végétalisés et de 1.4 °C lorsqu'ils sont végétalisés. Les températures seront donc plus basses lorsque l'inertie est importante. Cela s'explique par le fait qu'une grande inertie thermique permet de mieux amortir les variations de température intérieure lorsque la température extérieure varie. Au niveau de l'impact de la végétalisation sur la différence entre les températures maximales, ces dernières diminuent lorsque l'inertie thermique augmente. En effet, ces différences sont de 2.3 °C pour un bâtiment léger, de 2 °C pour un bâtiment moyen et de 1.8 °C pour un bâtiment lourd. Ainsi, plus l'inertie thermique est importante, plus la différence sera faible dans le cas où une façade végétalisée serait ajoutée.

Les écarts maximaux de température intérieure diminuent également avec l'augmentation de l'inertie thermique. Alors qu'un bâtiment léger possède un écart maximal de 3.1 °C, un bâtiment lourd possède un écart inférieur de 2.2 °C environ. Cela montre donc que la façade aura moins d'impact sur les écarts maximaux de températures intérieures lorsque l'inertie thermique est importante.

Ainsi, par rapport à un bâtiment avec une faible inertie thermique, un bâtiment avec une importante inertie thermique diminuera l'impact d'une façade végétalisée sur le bilan énergétique. De plus, plus l'inertie est importante, moins la nécessité d'une climatisation se fera sentir. En effet, les heures de surchauffe, les températures maximales intérieures et les écarts maximaux de température sont tous diminués grâce à la façade végétalisée. Cependant, l'amélioration du confort thermique reste intéressante pour le bâtiment lourd, car il est possible de baisser la température maximale de 2.2 °C.

9.4 Limite de la méthode proposée

La méthode de simulation utilisée lors de ce travail contient des limites pour la simulation des couvertures végétalisées. Tout d'abord, les simulations prennent en compte le fait que les 4 façades du bâtiment sont végétalisées. La méthode proposée ici ne permet pas de végétaliser qu'un seul mur par exemple. En effet, la réduction de la température ambiante extérieure due à l'évapotranspiration s'applique sur les quatre façades. Cela entraîne aussi des imprécisions au niveau de la température ambiante extérieure au niveau du toit, car elle se trouve également diminuée. La méthode ne permet pas non plus de simuler des murs vivants ou des toits végétalisés, car elle ne prend pas en compte l'inertie supplémentaire qu'apporterait le substrat. En outre, dans le cas d'une étude de l'impact d'un arbre, cela nécessiterait de considérer une diminution du rayonnement arrivant sur la surface vitrée située à l'arrière de l'arbre. De plus, la couche de végétation est considérée comme étant homogène sur toutes les surfaces végétalisées. Dans la réalité, elle est probablement différente d'un endroit à

l'autre de la façade végétalisée. Finalement, le rayonnement des surfaces opaques lorsqu'elles chauffent n'est pas pris en compte, car la méthode proposée n'utilise pas la température de surface des murs. Il serait nécessaire de développer des calculs ou alors des mesures pouvant déterminer cette température.

Les résultats obtenus dans ce travail peuvent passablement varier en fonction des hypothèses qui sont considérées. Bien que l'équation de Turc permette des précisions acceptables, la considération de l'équation de Penman-Monteith permettrait d'optimiser la précision du calcul d'évapotranspiration. De plus, d'après Boudjelal (2007), il serait préférable de déterminer le coefficient de culture par expérimentation afin d'avoir un k_c plus représentatif de la situation. Quant au coefficient de refroidissement, il a été choisi de manière arbitraire à 0.5. Une variation de ce coefficient peut amener à une quantité d'évapotranspiration plus importante et donc un impact plus important sur la température ambiante extérieure. En outre, l'équation d'évapotranspiration considère une humidité toujours supérieure à 50 %. Dans un cas d'étude future, il serait nécessaire de contrôler la fluctuation des valeurs d'humidité afin de déterminer la nécessité d'utiliser l'équation d'évapotranspiration dans le cas où l'humidité serait inférieure à 50 %. L'horizon proche pourrait également affecter les valeurs d'évapotranspiration sachant que celle-ci dépend du rayonnement solaire.

10 Conclusions

Conclusion des résultats

Ce travail a donc permis d'analyser l'impact d'une façade végétalisée composée de plantes grimpantes persistantes sur le bilan énergétique et le confort thermique d'un bâtiment situé à Viège.

Grâce à la méthode de Turc, il a été possible de calculer une évapotranspiration annuelle de 478 mm. Cette dernière permet de refroidir l'air ambiant jusqu'à 8.8 °C dans le meilleur des cas. La capacité de refroidissement est très variable durant l'année, car elle dépend du rayonnement solaire et de la température ambiante extérieure. Ensuite, il a fallu implémenter l'évapotranspiration dans le logiciel bSol. Pour ce faire, il a simplement fallu soustraire la capacité de refroidissement aux températures extérieures ambiantes. Ensuite, les nouvelles températures ont été introduites dans bSol afin de réaliser les simulations sur le bilan énergétique, le confort thermique et l'impact de l'inertie thermique.

En l'absence de climatisation, le bilan énergétique annuel est plus défavorable, car l'énergie de chauffage se trouve augmentée de 1.7 % alors que l'énergie de climatisation ne voit aucune différence. En revanche, en présence d'une climatisation, l'économie en lien avec celle-ci se trouve diminuée à hauteur de 100 % pour le bâtiment étudié (inertie moyenne et 3 étages). Cela montre donc que les façades végétalisées composées de plantes grimpantes ont seulement un impact durant l'été pour du rafraîchissement. Cependant, par rapport au bilan énergétique annuel, la part de climatisation est seulement de 2.3 % et reste donc très faible. De ce fait, les économies réalisables à l'année sont seulement de 0.6 %. De plus, l'augmentation de la hauteur du bâtiment (inertie moyenne) ne permet pas d'améliorer grandement les économies sur le bilan énergétique annuel. En effet, parmi les bâtiments étudiés de différents étages, celui qui permet d'économiser le plus d'énergie est celui de 15 étages. Cependant, cela ne représente que 1.1 % au bilan annuel. Ainsi, pour les conditions suisses, les façades végétalisées n'ont que très peu d'impact sur le bilan énergétique annuel dans la mesure où la part d'énergie de climatisation est faible. En vue du réchauffement climatique, des températures plus élevées seront observées et les températures extrêmes seront plus fréquentes dans les années à venir.

Cela pourrait amener à un usage plus fréquent des systèmes de climatisation. Ainsi, l'impact sur le bilan énergétique pourrait se révéler être plus important à l'avenir.

Concernant le confort thermique, les façades végétalisées diminuent les températures intérieures du bâtiment (inertie moyenne et 3 étages) et le nombre d'heures de surchauffe. Elles permettent de faire passer la température intérieure maximale de 27.9 °C à 25.9 °C. Quant aux écarts de températures entre le bâtiment avec végétation et sans végétation, ils peuvent se monter jusqu'à 2.5 °C. Pour ce qui est des heures de surchauffe, elles passent de 181 heures à 0 heure grâce à la façade végétalisée. Ainsi, ces dernières améliorent sans aucun doute le confort thermique à l'intérieur du bâtiment et permettraient de se passer de climatisation.

De plus, une façade végétalisée aura plus d'impact sur le bilan énergétique (surtout la climatisation) du bâtiment lorsque ce dernier possède une faible inertie. En effet, plus l'inertie est importante, moins l'impact des façades végétalisées sera conséquent. De ce fait, l'économie en énergie sera également plus faible. Au niveau du bilan énergétique annuel, il est possible d'économiser 2.5 %, 0.6 % et 0.5 %, respectivement pour le bâtiment léger, le bâtiment moyen et le bâtiment lourd. Le constat est semblable au niveau du confort thermique. Lorsque l'inertie thermique augmente, les diminutions de la température intérieure (différence entre les températures intérieures maximales et écarts de températures maximales) et le nombre d'heures de surchauffe sont moins conséquents. De ce fait, l'impact de la façade sera plus faible pour de plus grandes inerties thermiques. Ainsi, l'impact de la végétalisation des façades peut être très variable d'un bâtiment à l'autre. Une analyse au cas par cas permettrait d'optimiser la précision des simulations.

Perspectives

Afin d'avoir une méthode plus précise pour déterminer l'impact des façades végétalisées, une solution envisageable serait de déterminer la température de surface des murs. En effet, avec cette dernière, il serait possible de calculer le coefficient de transmission thermique (valeur U) du mur en considérant la végétalisation. La valeur U sera variable durant l'année, car elle dépend de l'état de la couche végétale (teneur en eau et la qualité de la couche foliaire). Cependant, le logiciel bSol ne permet pas de considérer une valeur U variable. De ce fait, il serait nécessaire de rechercher un autre logiciel de simulation qui permettrait d'entrer soit des températures de surface variables soit des valeurs U variables. Cette nouvelle valeur U permettrait de prendre en compte l'inertie thermique offerte par le substrat pour un toit végétalisé ou un mur vivant. De plus, il serait également possible de simuler une seule façade végétalisée. En outre, l'obtention de mesures permettrait également de valider les résultats obtenus.

11 Liste de références bibliographiques

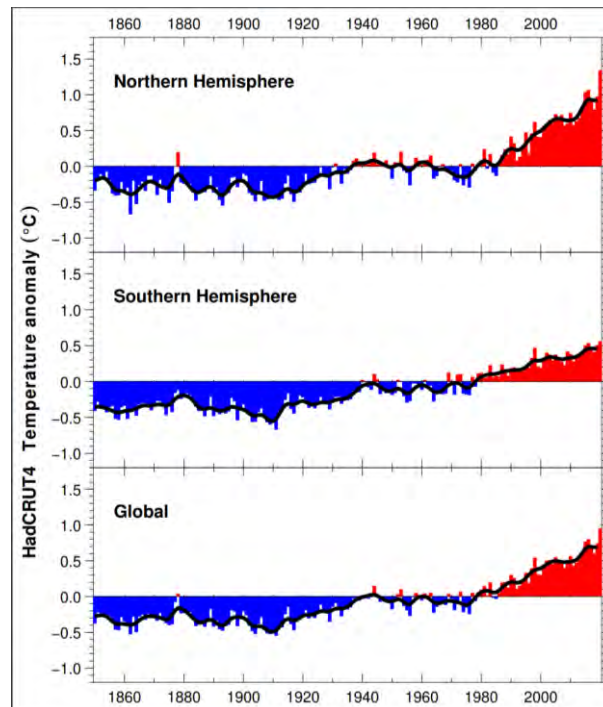
- Alexandris, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. 12.
- Apur. (2016). Recensement des murs végétaux parisiens : Cartographie et typologies. https://www.apur.org/sites/default/files/documents/recensement_murs_vegetaux_avancement_2016.pdf
- Arborera, A. (2004). Evapotranspiration—Concepts. 24.
- Bernier, A.-M. (2011). Végétalisation du bâtiment en milieu urbain : Bénéfices et perspectives. 127.
- Bernier, A.-M., & Centre d'écologie urbaine (Montréal), Q. (2011). Les plantes grimpantes : Une solution rafraîchissante.
- Bouattour, M., & Fuchs, A. (2009). LA VEGETALISATION DES BATIMENTS. 46.
- Boudjelal, A. (2007). Memoire Online—Détermination des besion en eau des cultures à l'aide de logiciel cropwat 4.3 dans la wilaya de tipaza—Anahr Ammar boudjelal. Memoire Online. https://www.memoireonline.com/12/09/3003/m_Determination-des-besion-en-eau-des-cultures-a-laide-de-logiciel-cropwat-43-dans-l3.html
- BRL Exploitation. (2010). Mémento technique Irrigation des espaces verts.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., & Ammann, C. (2011). L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie.
- climate-data. (s. d.-e). Climat Hongkong. <https://fr.climate-data.org/asia/china/hong-kong/hong-kong-977986/>
- climate-data. (s. d.-a). Climat La Rochelle. <https://fr.climate-data.org/europe/france/la-rochelle/la-rochelle-7783/>
- climate-data. (s. d.-b). Climat Lérida. <https://fr.climate-data.org/europe/espagne/catalogne/lerida-1325/>
- climate-data. (s. d.-c). Climat Montréal. <https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/canada/quebec/montreal-3704/>
- climate-data. (s. d.-d). Climat Sousse. <https://fr.climate-data.org/afrique/tunisie/sousse/sousse-3548/>
- Coffman, R. R. (2007). Vegetated roof systems : Design, productivity, retention, habitat, and sustainability in green roof and ecoroof technology [PhD Thesis]. The Ohio State University.
- Dessus, B., Laponche, B., & Le Treut, H. (2008). Réchauffement climatique : Importance du méthane. La Recherche, 417, 46–49.
- DETEC, D. fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication. (s. d.). Stratégie énergétique 2050. Consulté 15 juin 2020, à l'adresse <https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/energie/energiestrategie-2050.html>
- Djedjig, R. (2013). Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain [Phdthesis, Université de La Rochelle]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01141046>
- ECOVEGETAL. (2019, novembre 4). Définition : Qu'est-ce que l'évapotranspiration ? ECOVEGETAL. <https://www.ecovegetal.com/evapotranspiration-definition/>
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. Energy and Buildings, 42(6), 959-965. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>

- GIEC, Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (2015). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC.
- Hui, C. M. (2009). Study of thermal and energy performance of green roof systems. Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong.
- Inertie thermique. (2007, septembre 25). Énergie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/>
- IPCC. (2018). Global Warming of 1.5 °C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf
- Jacquet, S. (2010). Étude de la performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal [Masters, École de technologie supérieure]. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/647/>
- Jancovici, J.-M. (2003). Qu'est-ce que l'effet de serre ? – Jean-Marc Jancovici. <https://jancovici.com/changement-climatique/aspects-physiques/quest-ce-que-leffet-de-serre/>
- Karima, B., & Saliha, A. (2010). Evaluation des transferts thermiques à travers la paroi végétalisée. 8.
- Lecarpentier, C. (1975). L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. Annales de géographie, 84(464), 385-414. <https://doi.org/10.3406/geo.1975.18972>
- MétéoSuisse. (s. d.). Swiss Geoportal. geo.admin.ch. Consulté 25 juillet 2020, à l'adresse <https://map.geo.admin.ch>
- MétéoSuisse. (2020). Indices de sécheresse. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail/indicateurs-de-climat/indices-de-secheresse.html?param=rainanomaly>
- Metta, J. (2015, juillet 28). Hong Kong : Consommation et efficacité énergétique des bâtiments. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique-et-universitaire/veille-scientifique-et-technologique/hong-kong/article/hong-kong-consommation-et-efficacite-energetique-des-batiments>
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., & Jones, P. D. (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates : The HadCRUT4 data set: THE HADCRUT4 DATASET. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D8), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JD017187>
- Morlon, P., & Itier, B. (2020). Évaporation, transpiration végétale, évapotranspiration : Les mots—Les Mots de l'agronomie. https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/%C3%89vaporation,_transpiration_v%C3%A9g%C3%A9tale,_%C3%A9vapotranspiration_:_les_mots
- Musy, A. (2005). Cours « Hydrologie générale » (EPFL).
- NCCS, N. C. for C. S. (s. d.). Évolution du climat observée en Suisse. Consulté 12 juin 2020, à l'adresse <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/klimawandel-und-auswirkungen/beobachtete-klimaentwicklung-in-der-schweiz.html>
- Pajani, D. (2012). La thermographie du bâtiment principes et applications du diagnostic thermographique. Eyrolles.

- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., Arch, B., & Bass, B. (1999). ON BENEFITS, BARRIERS AND OPPORTUNITIES FOR GREEN ROOF AND VERTICAL GARDEN TECHNOLOGY DIFFUSION Prepared by:
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1861-1867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>
- SDES. (2019). Chiffres clés de l'énergie. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-09/datalab-59-chiffres-cles-energie-edition-2019-septembre2019.pdf>
- SIA 382/1. (2014). Installations de ventilation et de climatisation—Bases générales et performance requises.
- SIA 2024. (2015). Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment.
- Spala, A., Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., & Mihalakakou, G. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 33(1), 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.022>
- suisseEnergie. (s. d.). Consommation d'énergie dans le monde et en Suisse.
- Trottier, P. A. (2007). Toitures végétales : Implantation de toits verts en milieu institutionnel. 84.

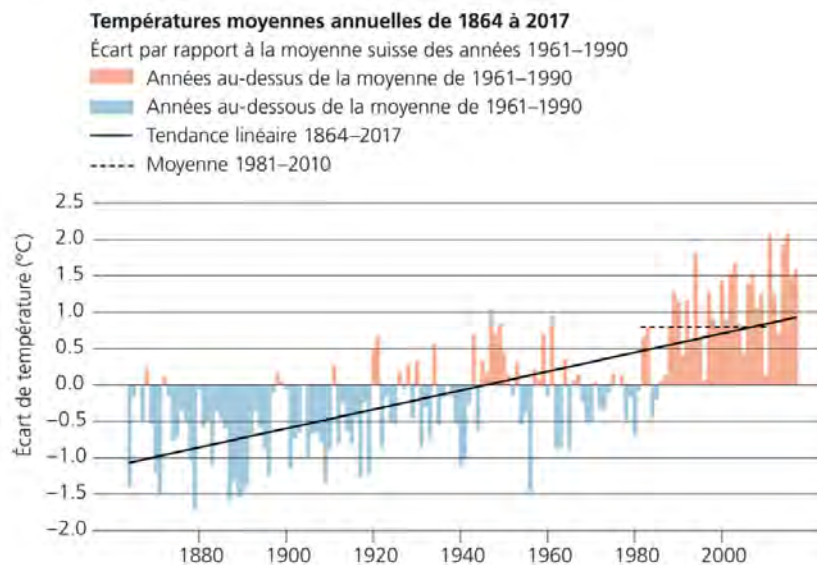
12 Annexes

Annexe 1 Évolution de l'écart de la température mondiale



Évolution de l'écart de la température mondiale par rapport à la moyenne de référence effectué entre 1961-1990 (Morice et al., 2012)

Annexe 2 Évolution de l'écart de la température en Suisse



Évolution de l'écart de la température en Suisse par rapport à la moyenne de référence effectuée entre 1961 et 1990 (NCCS, s. d.)

Annexe 3 Comparaison du cas de Montréal avec d'autres cas au Canada de la température maximale annuelle au niveau de la membrane d'étanchéité

Température maximale annuelle au niveau de la membrane d'étanchéité					
Localisation	Nom	Extérieur	Toiture de Référence	Toit Vert	
		°C	°C	°C	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit Vert	35.0	70.0	25.0	64%
ENCC, Toronto, ON	Toit vert "System S"	non mentionné	66.0	38.0	42%
	Toit vert "System G"	non mentionné	66.0	36.0	45%
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	24.7	70.0	30.0	57%
	Toit vert GR2	24.7	70.0	30.0	57%
CEU, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	33.6	46.6	34.4	26%
	Toit Vert Irrigué	33.6	46.6	31.4	33%

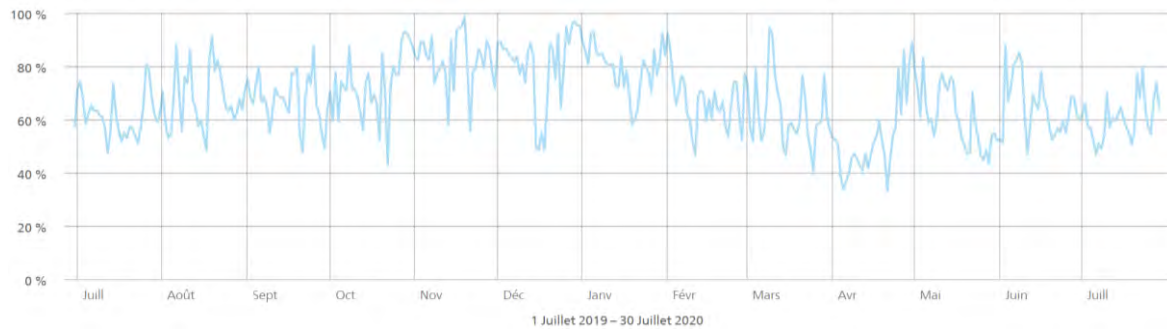
Tiré de Jacquet (2010, p.103)

Annexe 4 Caractéristiques majeures des quatre toits étudiés par Hui (2009)

Green roof site	Description
Ngau Tau Kok Municipal Office Building	- On top of a public library, at 3/F - Extensive green roof, area: 112 m² - Divided into 3 sections and three types of plants - Soil thickness: 150 to 200 mm
APB Centre	- At 10/F (above office) and 4/F (above carpark) - Extensive green roof, area: 206 m² (10/F) and 147 m² (4/F) - Hardy plants (sedum) are used - Soil thickness: 100 mm
Yuen Long Government Primary School	- On top of classrooms, at 6/F - Roof garden (extensive + semi-intensive), area: 280 m² - Grass pavement and planters are used - Soil thickness: 100 mm and 350 mm
St. Bonaventure Catholic Primary School	- On top of an assembly hall - Extensive green roof (modular and built-in, very light weight), 240 m² - Hardy plants (sedum) are used; soil thickness: 50 mm - A small area of urban farming (for herb and vegetation) is also set up; the soil thickness is 150 mm and the canopy layer is taller

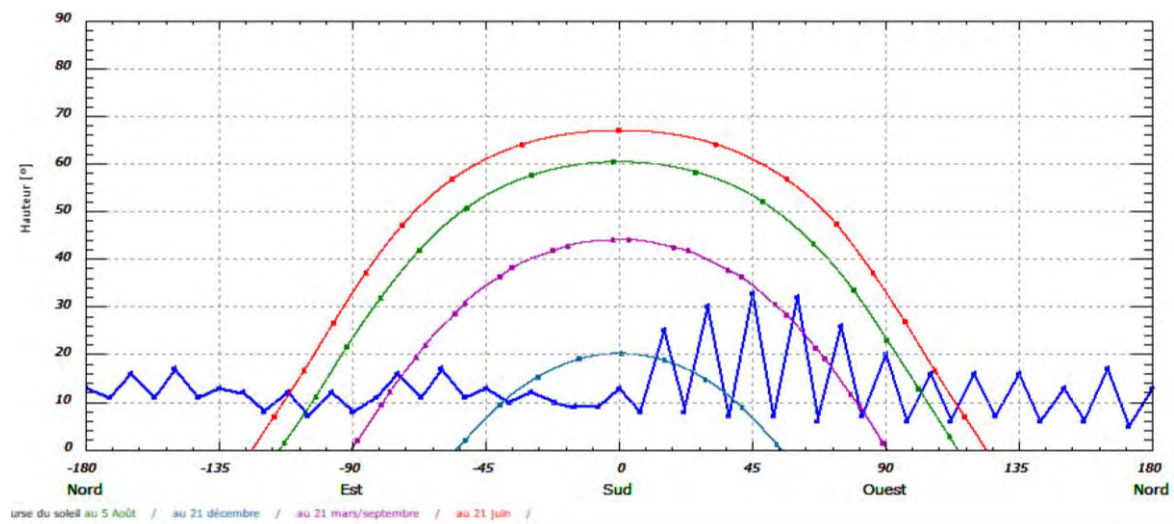
Tiré de Hui (2009, p. 17)

Annexe 5 Variation de l'humidité relative à Viège

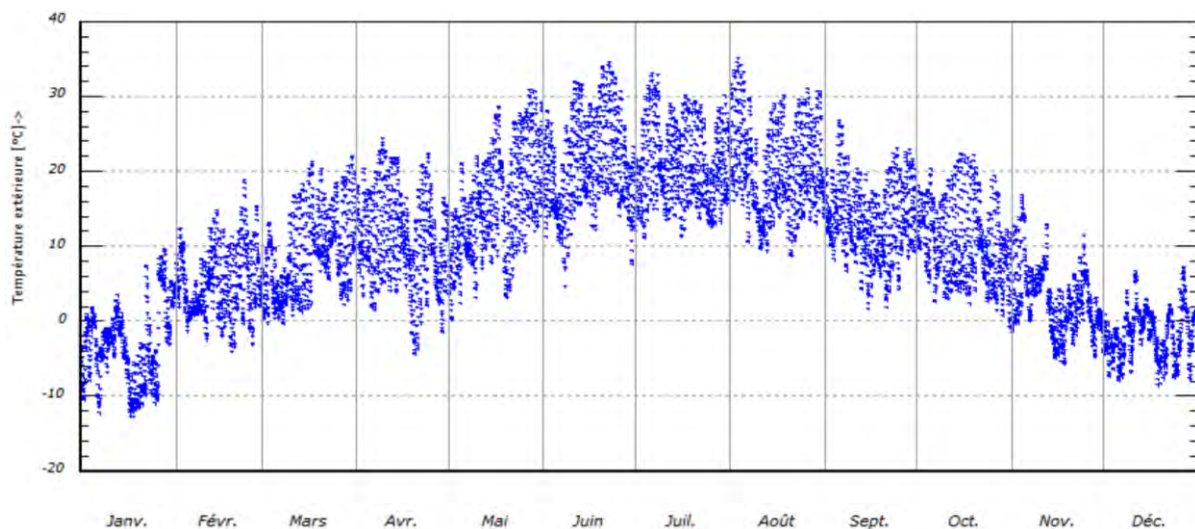


Tiré de Météosuisse (s. d.)

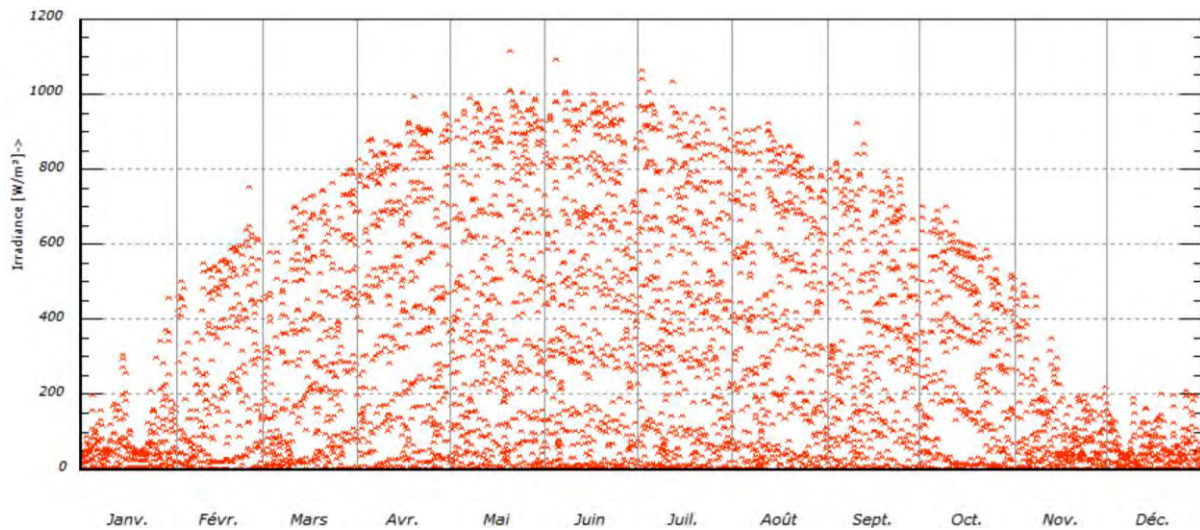
Annexe 6 Hauteur du soleil et horizon (en bleu) pour Viège



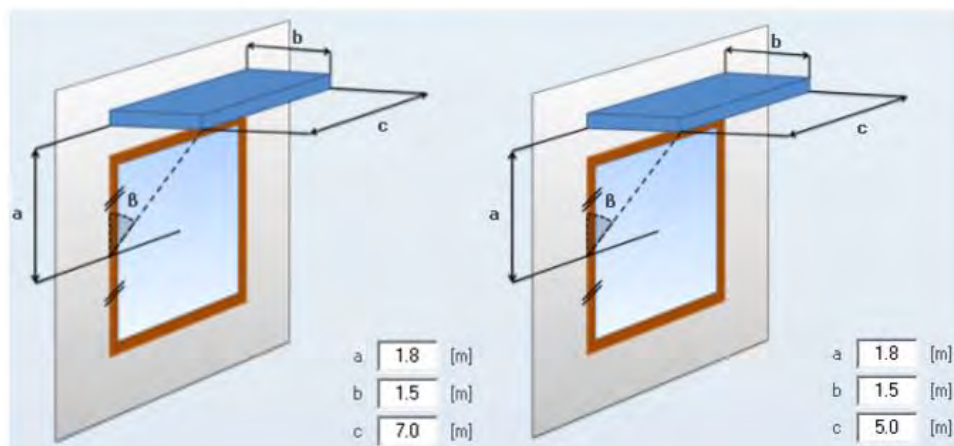
Annexe 7 Température ambiante extérieure à Viège



Annexe 8 Irradiance pour Viège



Annexe 9 Dimensionnement du facteur d'ombrage dynamique



À gauche pour la baie vitrée et à droite pour la fenêtre de la chambre

Annexe 10 Composition des murs, du toit et du sol

Bâtiment léger	Toit	Murs	Sol
Type	Bois	Bois	Bois
Épaisseur [cm]	3	10	20
Bâtiment moyen	Toit	Murs	Sol
Type	Bois	Brique de terre	Brique de terre
Épaisseur [cm]	3	17.5	20
Bâtiment lourd	Toit	Murs	Sol
Type	Béton armé	Béton armé	Béton armé
Épaisseur [cm]	20	20	20

Annexe 11 Dimensions des surfaces vitrées par étage

Surface vitrée par étage	Largeur [m]	Hauteur [m]	Quantité	Orientation	Valeur U [W/m²/K]	Valeur g [-]
Baie vitrée	4	2.5	1	Sud	1.5	0.65
Fenêtre porte	2	2.5	1	Sud	1.5	0.65
Fenêtres	1.5	1	6	2 Nord, 2 Est, 2 Ouest	1.5	0.65

Annexe 12 Dimensions des façades, du toit et du sol

Surface opaques	Largeur [m]	Hauteur [m]	Valeur U [W/m²/K]
Façade nord (par étage)	14	3	0.22
Façade sud (par étage)	14	3	0.22
Façade est (par étage)	10	3	0.22
Façade ouest (par étage)	10	3	0.22
Sol (par étage)	14	10	0.22
Toit	14	10	0.22

Annexe 13 Valeurs pour les paramètres d'exploitation dans le logiciel bSol

Charges internes (personnes)		2.3	[W/m²]
Charges internes (appareils)		4.0	[W/m²]
Aération avec l'extérieur		0.8	[m³/h·m²]
☒ Récupérateur de chaleur sur l'air extrait		80	[%]
☒ Rafraîchissement par aération	θ_v 22 [°C]	$\Delta\theta$ 2 [°C]	2.4 [m³/h·m²]

Occultation des fenêtres

☒ En fonction de la température (surchauffe)		24	[°C]
☐ En fonction du rayonnement (éblouissement)			

☒ Chauffage		20	[°C]
Limitation Puissance		100.0	[W/m²]

Annexe 14 Bilans énergétiques pour les bâtiments de différents étages

	3 étages		6 étages		10 étages		15 étages	
	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé	Sans végé	Avec végé
Énergie chauffage [kWh]	9164	9320	17173	17449	32828	33375	39977	40506
Énergie climatisation [kWh]	215.3	0	360	0	608	0	993	0
Total [kWh]	9379.3	9320	17533	17449	33436	33375	40970	40506

Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de bachelor Diplôme 2022

Nils Rod

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

-  Professeur
Klaus Kreher
-  Expert
Andreas Luible
-  Date de la remise du rapport
19.08.2022

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2021-22	No TB / Nr. BA ER/2022/51
Mandant / Auftraggeber ☒ HES— SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Nils Rod Professeur / Dozent Klaus Kreher	Lieu d'exécution / Ausführungsort ☒ HES— SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit ☐ oui / ja ☒ non / nein	Expert / Experte (données complètes) Prof. Dr Andreas Luible, Technikumstrasse 21, 6048 Horw; andreas.luible@hslu.ch	

Titre / Titel

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

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, de lire et d'analyser les travaux existants sur le sujet afin de les classer en fonction de leur pertinence.
- Pour la simulation de bâtiments à l'aide de bSol, les paramètres d'influence (température de surface, température ambiante, facteurs d'ombrage, capacité d'évaporation 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. L'objectif est de pouvoir évaluer la pertinence des facteurs d'influence.
- Pour la simulation à l'aide de bSol, il s'agit d'étudier comment les paramètres d'influence peuvent être implémentés pour le calcul du bilan énergétique d'un bâtiment, afin que la végétalisation de l'enveloppe du bâtiment puisse être effectuée à l'aide de bSol pour simuler le bilan énergétique d'un bâtiment.

Tous les travaux doivent faire l'objet d'un examen critique et être évalués dans l'esprit d'un ingénieur.

Signature ou visa / <i>Unterschrift oder Visum</i> Responsable de l'orientation / <i>Leiter der Vertiefungsrichtung:</i> <i>Cécile Münch-Alligné</i> ¹ Etudiant / Student : <i>[Signature]</i> 	Délais / <i>Termine</i> Attribution du thème / <i>Ausgabe des Auftrags:</i> 16.05.2022 Présentation intermédiaire / <i>Zwischenpräsentation:</i> 20-21.06.2022 Remise du rapport final / <i>Abgabe des Schlussberichts:</i> 19.08.22, 12:00 Expositions / <i>Ausstellungen der Diplomarbeiten:</i> 24-26.08.2022 Défense orale / <i>Mündliche Verfechtung:</i> Semaine/Woche 36 (5-9.09.2022)
--	---

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.



Handwerk+Bau (2021)

Travail de diplôme
| édition 2022 |



Filière
*Énergie et techniques
environnementales*

Domaine d'application
Énergies renouvelables

Professeur responsable
Kreher Klaus
klaus.kreher@hevs.ch

Simulation énergétique bâtiment végétalisé

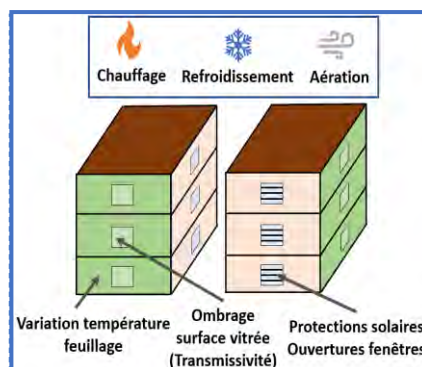
Diplômant/e Nils Rod

Objectif du projet

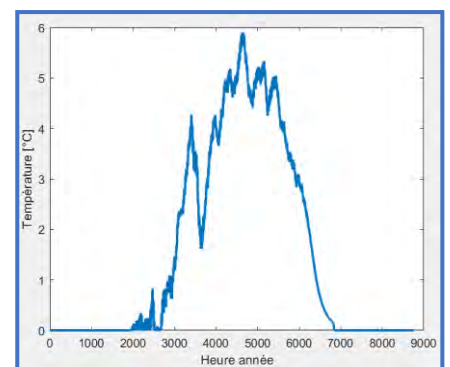
Cette étude a pour objectif d'étudier l'influence de l'évaporation et de l'ombrage des plantes sur la consommation d'énergie des bâtiments. Une modélisation doit permettre de simuler l'influence de la végétalisation sur le bilan d'énergie.

Méthodes | Expériences | Résultats

Les structures végétales concernant toitures et façades sont d'abord introduites. Un état de l'art est alors réalisé sur les performances énergétiques liées aux façades végétales directes et indirectes. La végétalisation des bâtiments est capable de réduire les températures ainsi que les besoins de climatisation par deux effets essentiels : l'ombrage et l'évapotranspiration. Afin d'évaluer ces effets, une simulation bSol est réalisée en modélisant un bâtiment type à inertie légère à Zurich. L'ombrage est intégré en calculant la diminution du rayonnement des surfaces vitrées selon la transmissivité, tandis que la réduction de température extérieure par la végétation est basée sur deux approches concernant l'évapotranspiration et la température de feuille. Les résultats montrent la réduction des besoins de climatisation et l'amélioration du confort thermique. D'autres paramètres d'influence comme la température extérieure, la gestion des stores sont aussi étudiés. Enfin, une partie de l'algorithme de bSol est recalculé sous Matlab et inclut désormais l'ensemble des effets de la végétation permettant de modéliser l'influence de la végétalisation sur le bilan d'énergie.



Intégration de la végétalisation et des paramètres d'influence au sein d'une simulation d'un bilan énergétique.



Impact de la végétalisation sur la température intérieure en considérant l'ombrage et la réduction de température extérieure (façade et aération).

Remerciements

Je tiens à remercier toute ma famille pour le soutien apporté durant ce travail de Bachelor, ainsi que tous mes amis avec lesquels j'ai pu profiter.

Un grand merci également à Baljeet pour sa disponibilité et pour les informations fournies tout au long de ce projet.

Je remercie aussi Gilbert Morand pour son accompagnement, son expertise et les nombreux conseils apportés durant ce travail de Bachelor.

Merci également à Klaus Kreher pour la supervision du projet.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Table des figures	v
Table des graphiques	v
Table des tableaux	vii
Glossaire	ix
1. Contexte	1
2. Cahier des charges	3
3. Méthodologie	3
4. Historique	4
5. Définitions des types de paroi végétale	5
5.1. Toitures végétalisées	5
5.2. Façades végétalisées	8
6. État de l'art	11
6.1. Performances énergétiques	11
6.1.1. Climat tempéré	12
6.1.2. Climat méditerranéen	14
6.1.3. Climat continental	14
6.1.4. Climat subtropical	15
6.2. Modèles de simulations	16
6.3. Résumé des études précédentes	18
7. Bilan énergétique et paramètres d'influence	19
7.1. Évapotranspiration selon Penman-Monteith	20
7.1.1. Définition	20
7.1.2. Analyse de sensibilité évapotranspiration	25
7.1.3. Comparaison calcul et mesure évapotranspiration	27
7.2. Réduction de température par évapotranspiration	30
7.2.1. Méthode développée lors des précédents travaux de bachelor	30
7.2.2. Nouvelle méthode de réduction de température	31
7.2.3. Comparaison mesures réalisées à Zurich	35
7.3. Mesures de température	36
7.3.1. Appareils de mesures et site d'acquisition	36
7.3.2. Résultats des mesures	37
7.3.3. Comparaison mesures avec équations développées	38
7.3.4. Équation empirique de réduction de température	40

8.	Températures de surface et conduction	42
9.	bSol.....	43
9.1.	Caractéristiques du bâtiment	44
9.2.	Évapotranspiration dans le bilan énergétique.....	45
9.3.	Ombrage dans le bilan énergétique	49
9.4.	Température extérieure dans le bilan énergétique.....	54
9.5.	Gains internes dans le bilan énergétique	55
9.6.	Gestion de la climatisation dans le bilan énergétique du bâtiment.....	56
9.7.	Aération et gestion des protections solaires	57
10.	Bilan énergétique d'un bâtiment sous bSol	58
10.1.	Équation bSol	60
10.2.	Puissance chauffage et refroidissement.....	61
10.3.	Adaptation sous Matlab.....	62
10.4.	Fermeture des stores.....	62
10.5.	Ouverture des fenêtres.....	62
10.6.	Intégration de la végétation	62
10.7.	LAI et transmissivité	63
10.8.	Variation de température (feuillage).....	64
10.9.	Aération.....	67
10.10.	Bilan d'énergie	69
11.	Simulation énergétique du bâtiment avec végétalisation	71
11.1.	Cas du bâtiment à faible inertie.....	71
11.1.1.	Bâtiment à faible inertie (sans stores ni refroidissement par aération).....	72
11.1.2.	Bâtiment à faible inertie (avec stores et refroidissement par aération).....	75
11.2.	Cas de bâtiments à moyenne et grande inertie	78
12.	Conclusion.....	80
13.	Limites de l'étude et proposition d'amélioration	82
	Liste de références bibliographiques	83
14.	Annexes.....	86
	Annexe 1 : Horizon Zurich.....	86
	Annexe 2 : Irradiance Zurich.....	86
	Annexe 3 : Température Zurich	86
	Annexe 4 : Conditions d'exploitation bâtiment.....	87
	Annexe 5 : Paramètres des fenêtres.....	87
	Annexe 6 : Facteurs d'ombrage.....	88
	Annexe 7 : Résultats réduction température feuille largeur = 1 cm bSol.....	88

Annexe 8 : Résultats réduction température feuille largeur = 10 cm bSol	88
Annexe 9 : Résultats ombrage transmissivité = 0.75 bSol	88
Annexe 10 : Résultats ombrage transmissivité = 0.5 bSol	89
Annexe 11 : Résultats ombrage transmissivité = 0.25 bSol	89
Annexe 12 : Résultats augmentation température estivale bSol.....	89
Annexe 13 : Résultats augmentation gains internes bSol.....	89
Annexe 14 : Résultats gestion aération et stores bSol	89
Annexe 15 : Résultats variation température de consigne climatisation bSol.....	89
Annexe 16 : Résultats bilan énergétique total réduction température feuille et évapotranspiration murale (inertie faible) Matlab (sans protection solaire et refroidissement par aération).....	90
Annexe 17 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale et vitrage, et ombrage (inertie faible) Matlab (sans protection solaire et refroidissement par aération).....	90
Annexe 18 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale (inertie faible) Matlab (avec protection solaire et refroidissement par aération)	90
Annexe 19 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale et vitrage, et ombrage (inertie faible) Matlab (avec protection solaire et refroidissement par aération)	90
Annexe 20 : Code Matlab sensibilité évapotranspiration	91
Annexe 21 : Code Matlab bilan énergétique	92

Table des figures

Figure 1: Phénomène d'îlot de chaleur urbain et bienfaits de la végétalisation.....	2
Figure 2: Jardins de Babylone à gauche et chalet norvégien à droite.....	4
Figure 3 : Exemple de façade végétalisée en Suisse à Lausanne, située à la gare du Flon	5
Figure 4: Exemple de toiture végétalisée à Lausanne, située à Grand-Vennes à gauche ; Composition détaillée d'une toiture végétalisée à droite	7
Figure 5: Les différentes typologies de toiture végétale.....	8
Figure 6: Systèmes de végétalisation : a) végétalisation directe enracinée dans le sol, b) végétalisation directe plantée dans des bacs/jardinières, c) végétalisation indirecte enracinée dans le sol, d) végétalisation indirecte plantée dans des bacs/jardinières. Adapté de (Palermo, 2020)	9
Figure 7: Résumé des espèces de plantes grimpantes, adapté de (Bernier, 2011).....	9
Figure 8 : Mur végétal développé par Patrick Blanc à gauche ; mur végétal monobloc à droite (Bouattour, 2009)	10
Figure 9: Transfert d'énergie au sein d'une plante	20
Figure 10 : Valeurs utilisées pour le calcul d'évapotranspiration de référence (Calanca, 2011)	21
Figure 11: Représentation de l'évapotranspiration potentielle et de culture (Allen, 1998)	21
Figure 12: Coefficient de culture et évolution annuelle (Allen, 1998).....	24
Figure 13 : Sites de mesure à Zurich A=Pépinière B=Parc MFO (zhaw, 2021)	28
Figure 14: Imagerie thermique d'un mur vivant et d'une façade nue (zhaw, 2021)	35
Figure 15: Data Logger Hioki LR 5001, LR 9504, LR 5091	36
Figure 16 : Emplacement de mesure et disposition des appareils (à gauche), Hioki dans le feuillage (à droite)	36
Figure 17: Interpolation de la température dans le feuillage selon l'humidité relative et le rayonnement global.....	40
Figure 18: Représentation du bâtiment complet simulé sous bSol.....	45
Figure 19: Bâtiment modélisé sous bSol pour représenter l'impact de la variation de température en lien avec le feuillage.....	46
Figure 20: LAI pour différentes situations de feuillage de lierre (Susorova, 2013).....	50
Figure 21: Bâtiment modélisé sous bSol pour représenter l'impact de l'ombrage en lien avec le feuillage.....	51
Figure 22: Modélisation de l'ensemble des effets de la végétation (ombrage + réduction de température).....	59
Figure 23: Exemple du fichier résultat disponible sous bSol après simulation.....	59
Figure 24: Méthode de séparation développée pour le calcul du bilan énergétique d'un bâtiment	60
Figure 25: Fichier météo à introduire pour le calcul des effets de la végétation.....	63
Figure 26: Architecture du programme et étapes de calcul du bilan d'énergie avec végétalisation	70
Figure 27: Caractéristiques des bâtiments à différentes inerties	78

Table des graphiques

Graphique 1: Distribution d'énergie au sein d'une plante (Allen, 1998)	20
Graphique 2: Analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de rayonnement important	25
Graphique 3: Analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de faible rayonnement	26
Graphique 4: Calcul d'évapotranspiration et mesures débit de sève pour la période 30.06.2020 au 12.07.2020.....	28
Graphique 5: Calcul d'évapotranspiration et mesures débit de sève pour la période 14.07.2020 au 31.07.2020.....	29

Graphique 6: Refroidissement induit par la végétation sans intégration du rayonnement	33
Graphique 7: Refroidissement induit par la végétation avec intégration du rayonnement.....	34
Graphique 8: Différence de température entre l'extérieur et le feuillage avec une largeur de feuille de 10cm	34
Graphique 9: Différence de PET mesurée à Zurich avec et sans végétalisation	35
Graphique 10: Différence de température entre l'extérieur du feuillage et l'intérieur calculée sur cinq jours	37
Graphique 11: Variation de température et d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du feuillage sur la journée du 24.07.2022	37
Graphique 12: Variation de température et d'humidité absolue à l'intérieur et à l'extérieur du feuillage sur la journée du 24.07.2022	38
Graphique 13: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 24.07.2022	39
Graphique 14: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 25.07.2022	39
Graphique 15: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 27.07.2022	39
Graphique 16: Erreurs relatives calculs températures correspondantes sur la journée du 24.07.2022..	41
Graphique 17: Erreurs relatives calculs températures correspondantes sur la journée du 27.07.2022..	41
Graphique 18: Transfert thermique selon la température extérieure et la performance de composition (valeur U)	43
Graphique 19: heures de surchauffe pour différentes largeurs de feuillage	46
Graphique 20: Température intérieure maximale pour différentes largeurs de feuillage.....	47
Graphique 21: Différence de température intérieure sans et avec température feuillage lf=10cm	47
Graphique 22: Heures de climatisation potentielles pour différentes largeurs de feuillage	48
Graphique 23: Énergie de climatisation pour différentes largeurs de feuillage	48
Graphique 24: Bilan énergétique pour différentes largeurs de feuillage.....	49
Graphique 25: Transmissivité en fonction du LAI pour différents coefficients d'extinction	51
Graphique 26: Heure de surchauffe en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité.....	52
Graphique 27: Évolution de la différence de température intérieure sans et avec un ombrage sur l'ensemble des façades et une transmissivité de 0.25	52
Graphique 28: Heure de climatisation en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité.....	53
Graphique 29: Énergie de climatisation en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité.....	54
Graphique 30: Heure de climatisation en fonction de l'augmentation de température estivale.....	54
Graphique 31: Relation entre l'augmentation de la température estivale et l'énergie de la climatisation	55
Graphique 32: Évolution des heures d'utilisation de la climatisation en fonction de l'augmentation des gains internes (personnes)	55
Graphique 33: Évolution des heures de climatisation en fonction de la température maximale intérieure	56
Graphique 34: Évolution des heures d'utilisation de la climatisation selon la température de consigne de climatisation.....	56
Graphique 35: Heures de climatisation selon des conditions d'aération et de protections solaires	57
Graphique 36: Évolution du LAI durant l'année	64
Graphique 37: Évolution de la transmissivité correspondante durant l'année.....	64
Graphique 38: Évolution de la largeur de feuille annuelle.....	66

Graphique 39: Différence de température (extérieure-feuille) durant l'année selon la méthode de température de feuille	66
Graphique 40: Humidité relative annuelle au sein du bâtiment pour le bâtiment d'étude à faible inertie	68
Graphique 41: Réduction de température extérieure sur la façade est, en tenant compte de la méthode de température de feuille	71
Graphique 42: Réduction de température extérieure sur la façade est, en tenant compte de la méthode d'évapotranspiration	72
Graphique 43: Différence de température intérieure avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale selon la méthode de température avec feuille	72
Graphique 44: Différence de température intérieure avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale selon la méthode de température avec évapotranspiration	72
Graphique 45: Heures de climatisation selon les deux approches de réduction de température	73
Graphique 46: Énergie de climatisation selon les deux approches de réduction de température	73
Graphique 47: Heures potentielles de climatisation avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale et au niveau des vitrages	74
Graphique 48: Différence de température avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale et au niveau des vitrages	74
Graphique 49: Effets de la végétalisation séparés sur les heures de climatisation potentielles	74
Graphique 50: Température intérieure maximale en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	75
Graphique 51: Heures de climatisation en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	75
Graphique 52: Température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	76
Graphique 53: Différence de température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	76
Graphique 54: Température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs et vitrages associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	76
Graphique 55: Différence de température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs et vitrages associés à une gestion de l'aération et des protections solaires	77
Graphique 56: Effets de la végétalisation séparés sur les heures de climatisation potentielles (avec gestion des stores et refroidissement par aération)	77
Graphique 57: Heure de climatisation selon végétalisation totale murs et vitrages inertie moyenne ...	78
Graphique 58: Heure de climatisation selon végétalisation totale murs et vitrages bâtiment lourd	79
Graphique 59: Heures de climatisation potentielles avec végétalisation sur les murs et vitrages en est et ouest et ouverture des fenêtres pour un bâtiment lourd	79

Table des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des toits verts extensifs et intensifs, adapté de (Oberndorfer, 2007)	8
Tableau 2: Résumé des coûts selon la méthode de végétalisation adoptée (directe ou indirecte) (Bouattour, 2009)	11
Tableau 3: Résumé des modèles de simulation par (Pérez G. C., 2014), 32 = McPherson et al. (1988); 33 = Holm (1989); 34 = Alexandri and Jones (2008); 12 = Di and Wang (1999); 18 = Stec et al. (2005); 7 = Kontoleon and Eumorfopoulou (2010); 17 = Susorova et al. (2013)	17
Tableau 4: Paramètres pour l'analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de rayonnement important	26

Tableau 5: Paramètres pour l'analyse de contribution pour l'évapotranspiration dans une situation de faible rayonnement	26
Tableau 6: Coefficients de cultures multipliant l'évapotranspiration potentielle pour être adaptés aux mesures	29

Glossaire

Abréviation	Définition
cm	Centimètre
CO₂	Dioxyde de carbone
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DGF	Direct Green Facade
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur le climat
GWh	Gigawattheure
HES-SO	Haute école spécialisée de Suisse occidentale
IGF	Indirect Green Facade
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISA	International Standard Atmosphere
K	Kelvin
Kc	Coefficient de culture
kg	Kilogramme
kWh	Kilowattheure
LAI	Indice de surface foliaire
lf	Largeur de feuille
m	Mètre
m²	Mètre carré
m³	Mètre cube
MFO	Maschinenfabrik Oerlikon
MJ	Mégajoule
mm	Millimètre
nm	Nanomètre
OFEN	Office fédérale de l'énergie
PET	Physiological equivalent temperature
PVC	Polychlorure de vinyle
W	Watt
Wh	Wattheure

Variable	Unité	Définition
H_{r_i}	[%]	Humidité relative intérieure
$\frac{R_s}{R_{so}}$	[-]	Rayonnement relatif de courtes longueurs d'onde
q_{cond}''	$[W \cdot m^{-2}]$	Flux de chaleur par conduction
C_{cal}	$[J \cdot K^{-1}]$	Capacité calorifique
C_{pa}	$[J \cdot mol^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Chaleur spécifique à pression constante
G_i	$[W \cdot m^{-2}]$	Gains internes (appareils + personnes)
H_r	[%]	Humidité relative
$I_{irradiance}$	[W]	Irradiance solaire
I_{vege}	$[W \cdot m^{-2}]$	Rayonnement perçu par la végétation selon orientation

K_c	$[-]$	Coefficient de culture
K_s	$[-]$	Coefficient de stress hydrique
M_w	$[g.mol^{-1}]$	Masse molaire de l'eau
Q_g	$[kg.h^{-1}]$	Apport en humidité absolue des personnes
Q_{leaf}	$[W.m^{-2}]$	Rayonnement isothermale net appliqué à une façade végétale
Q_{vi}	$[-]$	Quote part vitrée
R_s	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Irradiation solaire reçue
R_a	$[-]$	Renouvellement d'air
R_n	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Rayonnement net
R_{nl}	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Rayonnement net de grande longueur d'onde
R_{ns}	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Rayonnement solaire net courte longueur d'onde
R_p	$[-]$	Ratio de la proportion d'air par rapport à la végétation
R_{so}	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Irradiation solaire avec un ciel dégagé
S_{fen}	$[m^2]$	Surface des fenêtres selon orientation
T_{air}	$[K]$	Température de l'air
T_{dew}	$[K]$	Température de rosée
T_{ext}	$[^{\circ}C]$	Température extérieure
T_f	$[^{\circ}C]$	Température de feuille
T_{fen}	$[^{\circ}C]$	Température extérieure au niveau de la fenêtre
T_{in}	$[^{\circ}C]$	Température intérieure
T_{mean}	$[^{\circ}C]$	Température moyenne de l'air
T_{mur}	$[^{\circ}C]$	Température extérieure au niveau du mur
T_{sky}	$[K]$	Température du ciel
U_s	$[W.m^{-2}K^{-1}]$	Coefficient de transfert thermique structure
c_e	$[J.kg^{-1}]$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 20°C
c_p	$[MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}]$	Chaleur spécifique à pression constante
c_{rayo}	$[-]$	Coefficient de rayonnement appliqué
c_s	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$	Capacité thermique calorifique de l'air
d_{bat}	$[W.K^{-1}]$	Transmissions vers extérieur
d_{fen}	$[W.K^{-1}]$	Déperdition de la fenêtre
d_{lc}	$[W.K^{-1}]$	Transmissions vers local chauffé
d_{lnc}	$[W.K^{-1}]$	Transmissions vers local non chauffé
d_{mur}	$[W.K^{-1}]$	Déperdition du mur
$d_{terrain}$	$[W.K^{-1}]$	Transmissions vers terrain
d_{tot}	$[W.K^{-1}]$	Transmissions vers extérieur + terrain + local chauffé + local non chauffé
e_a	$[kPa]$	Pression de vapeur actuelle
e_f	$[m]$	Épaisseur de la végétation
e_s	$[kPa]$	Pression de vapeur saturante à la température de l'air
e_{st}	$[m]$	Épaisseur structure

g_{Ha}	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$	Conductance pour la couche limite concernant le transfert de chaleur
g_v	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$	Conductance pour le transfert de vapeur
g_{va}	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$	Conductance pour la couche limite concernant le transfert de vapeur
g_{vi}	$[-]$	Valeur g vitrage
h_w	$[m]$	Hauteur de prise de mesure de la vitesse du vent
l_f	$[m]$	Largeur des feuilles
u_h	$[m.s^{-1}]$	Vitesse de vent mesurée à une hauteur h
u_2	$[m.s^{-1}]$	Vitesse moyenne du vent à 2m du sol
α_f	$[-]$	Albédo ou coefficient de réflexion de la couverture végétale
γ'	$[^{\circ}C^{-1}]$	Constante psychrométrique apparente
ε_f	$[-]$	Émissivité feuille
λ_s	$[W.m^{-1}K^{-1}]$	Conductivité thermique structure
ρ_a	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique de l'air
ρ_e	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique de l'eau
ρ_{ext}	$[kg.m^{-3}]$	Humidité absolue à l'extérieur du bâtiment
ρ_{in}	$[kg.m^{-3}]$	Humidité absolue dans le bâtiment
ρ_v	$[kg.m^{-3}]$	Humidité absolue
σ_2	$[W.m^{-2}K^{-4}]$	Constante de Stephan Boltzmann
D	$[m^3.h^{-1}.m^{-2}]$	Débit d'air
ET_C	$[mm.h^{-1}]$	Taux d'évapotranspiration de culture horaire
ET_R	$[mm.h^{-1}]$	Taux d'évapotranspiration réel horaire
ET_0	$[mm.h^{-1}]$	Taux d'évapotranspiration de référence horaire
F	$[-]$	Facteur de vision
G	$[MJ.m^{-2}.h^{-1}]$	Flux de chaleur du sol
LAI	$[-]$	Indice surface foliaire
P	$[kPa]$	Pression atmosphérique
R	$[J.mol^{-1}.K^{-1}]$	Constante universelle des gaz parfaits
V	$[m^3]$	Volume du bâtiment
a	$[h^{-2}]$	Coefficient feuillage LAI
ab_f	$[-]$	Absorptivité de feuille
b	$[h^{-2}]$	Coefficient feuillage largeur feuille
c	$[J.kg^{-1}K^{-1}]$	Capacité calorifique de l'air
d	$[m]$	Dimension caractéristique des feuilles
$debutf$	$[h]$	Début du feuillage
f	$[-]$	Taux d'évapotranspiration
$finf$	$[h]$	Fin du feuillage
h	$[kJ.kg^{-1} air sec]$	Enthalpie de l'air humide
k	$[-]$	Coefficient d'extinction
n	$[h^{-1}]$	Renouvellement horaire de l'air intérieur

x	$[kg\ d'eau.kg\ d'air^{-1}]$	Humidité spécifique
z	$[m]$	Hauteur sur mer
Δ	$[kPa.^{\circ}C^{-1}]$	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température de l'air
ΔT	$[^{\circ}C]$	Différence de température
γ	$[KPa.^{\circ}C^{-1}]$	Constante psychrométrique
ε	$[-]$	Ratio poids moléculaire vapeur d'eau / air sec
λ	$[MJ.kg^{-1}]$	Chaleur latente de vaporisation
λ_{ET}	$[W.m^{-2}]$	Chaleur latente liée à l'évapotranspiration
σ	$[MJ.m^{-2}.h.K^{-4}]$	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	$[-]$	Transmissivité

1. Contexte

Le réchauffement climatique est aujourd'hui démontré à l'échelle mondiale par les nombreux travaux des scientifiques. Ce phénomène est actuellement mis en lumière par le sixième rapport publié par le GIEC en 2022 (IPCC, 2022). Comme le déclare le président du groupe d'experts, « Ce rapport lance un avertissement très sérieux sur les conséquences de l'inaction », « Il montre que le changement climatique fait peser une menace grave et grandissante sur notre bien-être et la santé de la planète. Les mesures prises aujourd'hui façonneront l'adaptation de l'humanité et la réponse de la nature aux risques croissants. » Comme l'est également expliqué par l' (académie des sciences naturelles, 2022), le changement climatique et la perte de la biodiversité sont causés par l'Homme. Le changement climatique est principalement lié à la combustion des énergies fossiles tandis que la perte de la biodiversité s'explique par l'utilisation non durable des ressources naturelles. Afin d'atténuer le changement climatique et éviter la disparition d'un nombre conséquent d'espèces animales et végétales, il est primordial d'atteindre la neutralité carbone et de restreindre ce réchauffement planétaire à 1.5°C. D'ailleurs, si les émissions de CO₂ en Suisse ne sont pas abaissées, le climat en sera fortement changé, puisque les jours les plus chauds auront une température supplémentaire de 4 à 8°C en comparaison à la période 1981 à 2010. Ces conséquences engendreront des événements météorologiques et climatiques extrêmes se caractérisant par des vagues de chaleur, de la sécheresse et des inondations.

En 2007, en Suisse, le conseil fédéral a élaboré la stratégie énergétique 2050 s'appuyant sur quatre piliers : l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, le remplacement et la construction de grandes centrales électriques (y compris les centrales nucléaires) et la politique énergétique extérieure. (Office fédéral de l'énergie, 2020) Bien évidemment, l'amélioration de l'efficacité énergétique passe par les bâtiments. Avec près de 2.3 millions de bâtiments en Suisse, ces derniers sont responsables de la consommation de 45% de l'énergie finale et de 33% des émissions de CO₂ (suisseénergie). En 2013, la consommation d'électricité issue des systèmes de réfrigération en Suisse est estimée à 8000 GWh par année, ce qui correspond à 14% de la consommation électrique nationale. Il est également estimé que chaque année l'électricité utilisée pour les appareils de climatisation coûte 200 millions de CHF et que durant la période estivale, la consommation issue de ces appareils peut atteindre 1200 GWh. (OFEN, 2013) L'amélioration des performances énergétiques et de l'empreinte environnementale des bâtiments doit ainsi passer par l'optimisation de l'enveloppe thermique, du système de chauffage, de la ventilation, de la climatisation et l'utilisation d'énergie renouvelable.

Alors que depuis 2012, en Suisse, la surface des zones à bâtir est restée constante, la population suisse est passée en seulement 5 ans de 7.4 à 8 millions d'habitants (soit une augmentation de 8.1%). Cette situation représente une densification, puisque la surface de zones à bâtir par habitant est considérablement réduite, variant de 309 à 291 m² (soit une diminution de 6% pour cette même période). (DETEC, 2017) Cette densification pose des questions quant à l'évolution de la qualité de vie et de la santé des habitants, puisqu'avec l'urbanisation et l'augmentation des températures, le confort de ces derniers en est grandement dégradé.

La végétalisation des bâtiments apparaît aujourd'hui comme une solution où les avantages sont multiples en matière d'économie d'énergie, de valorisation de surface, de microclimat urbain, de rétention des eaux, d'isolation acoustique, de qualité de l'air ou encore de bien-être.

En matière de performance d'énergie, les parois végétalisées peuvent être utilisées afin de réduire la température environnante ainsi que la température de contact. Comme il a pu être démontré (Akbari, 2001), pour chaque élévation de température de 1°C dans 6 grandes villes américaines, pour une température environnante maximale comprise entre 15 et 20°C, s'en suit une augmentation du pic de demande électrique de 2 à 4%. La température extérieure est donc directement reliée à la consommation électrique. Ces parois végétalisées agissent à partir de quatre mécanismes : l'ombrage produit par la végétation, l'isolation apportée par l'association de la végétation et du substrat (dépendant du type de structure), le refroidissement issu de l'évapotranspiration, et enfin ces parois assurent une protection contre le vent. (Coma, 2017) Une partie de ces effets permet de réduire le phénomène d'îlots de chaleur urbain, qui, découvert par Luke Howard en 1818, correspond à l'apparition de températures plus élevées en ville que dans les zones rurales voisines (voir *figure 1*). Ces phénomènes peuvent être expliqués par la composition de la zone urbaine qui est aujourd'hui capable de stocker une importante quantité de rayonnement solaire sans pouvoir l'évacuer engendrant une augmentation de la température. (Djedjig, 2013) Le changement des vents liés à la modification du paysage urbain et la combustion des énergies fossiles exercée par l'activité humaine sont également des facteurs d'influence.

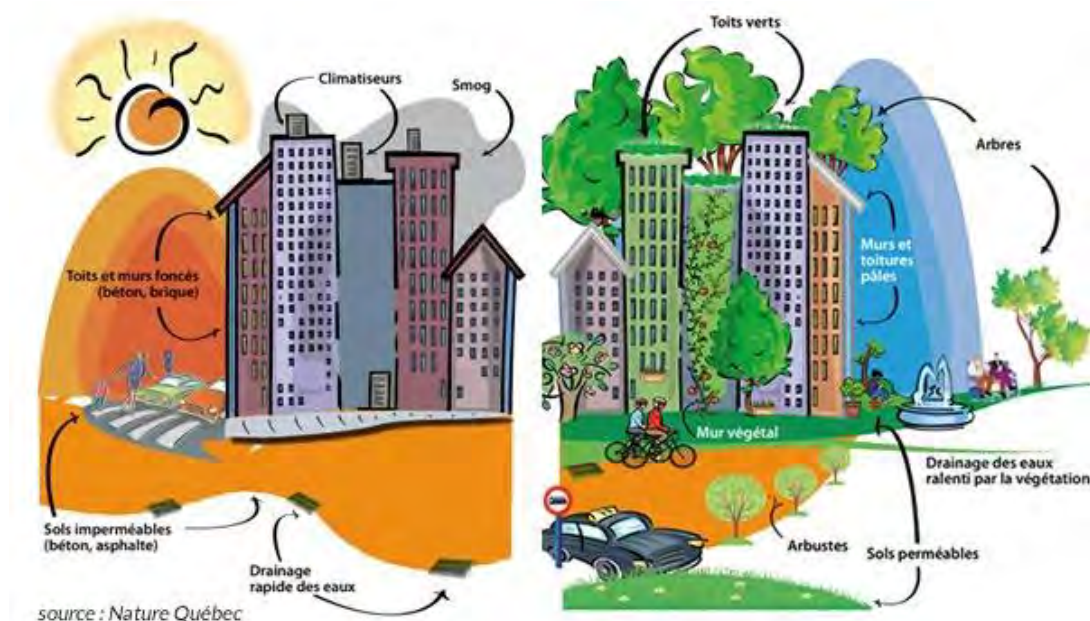


Figure 1: Phénomène d'îlot de chaleur urbain et bienfaits de la végétalisation

Source : Nature Quebec (o2d-environnement.com)

Plusieurs autres études ont aussi prouvé l'impact critique des hautes températures sur la population et l'accroissement de la mortalité, notamment sur les personnes âgées (≥ 65 ans). Avec une diminution de la température liée à la végétalisation, les conséquences sont moindres. Elles concernent aussi le sommeil qui est naturellement moins impacté, ce qui conduit à une amélioration de la santé et du bien-être. (Hoelscher, 2016)

L'enjeu de ce travail peut ainsi être compris et décrit par la problématique suivante : « *Quelles sont les influences de l'évapotranspiration et de l'ombrage issues de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments et comment les quantifier ?* »

2. Cahier des charges

Cette présente étude vise à répondre au cahier des charges défini ci-dessous :

- Une recherche bibliographique doit permettre de trouver, de lire et d'analyser les travaux existants sur le sujet afin de les classer en fonction de leur pertinence.
- Pour la simulation de bâtiments à l'aide de bSol, les paramètres d'influence (température de surface, température ambiante, facteurs d'ombrage, capacité d'évaporation 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. L'objectif est de pouvoir évaluer la pertinence des facteurs d'influence.
- Pour la simulation à l'aide de bSol, il s'agit d'étudier comment les paramètres d'influence peuvent être implémentés pour le calcul du bilan énergétique d'un bâtiment, afin que la végétalisation de l'enveloppe du bâtiment puisse être effectuée à l'aide de bSol pour simuler le bilan énergétique d'un bâtiment.

3. Méthodologie

Dans un premier temps, une contextualisation et une définition du sujet sont réalisées. L'historique de la végétalisation des bâtiments est énoncé et un aperçu des différentes structures existantes sur les façades et les toitures est donné. Cette description permet de donner une vision d'ensemble sur les types de structures faisant clairement apparaître les nuances entre celles-ci. Une recherche bibliographique est également menée afin d'établir un bilan des différentes études réalisées jusqu'aujourd'hui décrivant les performances des types de structures végétalisées sur les bâtiments. Une classification est alors mise en œuvre selon la situation géographique de l'étude et la pertinence des résultats obtenus. L'intérêt est ici de pouvoir obtenir des résultats fiables avec lesquels il est possible de s'appuyer et de comparer lors des différentes simulations. Une brève présentation des différents modèles de simulation est également donnée.

Ensuite, les multiples paramètres d'influence sont déterminés, premièrement en ce qui concerne le phénomène d'évapotranspiration. L'objectif est, à partir d'une analyse de sensibilité, de comprendre la sensibilité des différents paramètres selon des situations variées (humidité, rayonnement). Le calcul d'évapotranspiration, établi par Penman-Monteith est également comparé à des mesures de débits de sève et permet de donner un ordre de grandeur de la capacité de refroidissement des plantes. L'impact de la variation de température lié à la végétalisation est ensuite analysé en suivant deux approches, l'une basée essentiellement sur l'évapotranspiration et l'autre sur le bilan énergétique d'une feuille. Ces équations sont ensuite comparées selon des mesures réalisées à Zurich et des données acquises personnellement. L'intérêt est de mettre en évidence les forces et faiblesses des équations, basées sur la théorie, en étant comparées à un cas pratique, permettant de donner un ordre de grandeur de leur fiabilité.

Également, les paramètres ayant un lien avec la consommation énergétique des bâtiments sont identifiés et quantifiés sous bSol (influence des températures extérieures, intérieures, température de consigne, gains internes). Ces études de contribution donnent la possibilité d'observer quelles sont les influences majeures pour mettre en évidence les leviers de manœuvre afin de diminuer la consommation énergétique.

Enfin, l'objectif final est de pouvoir intégrer les calculs des différents paramètres d'influence au sein du logiciel bSol. C'est ainsi qu'un nouvel algorithme, basé sur le calcul de bSol sera mis en place et permettra d'intégrer et de visualiser directement le bilan énergétique d'un bâtiment avec la végétalisation en tenant compte de la saisonnalité et des effets liés à la température, l'ombrage et l'aération.

4. Historique

Le principe de végétaliser les toits n'est pas une tendance moderne. Les jardins suspendus de Babylone datant du IV^e siècle avant Jésus-Christ en témoignent. Selon Philon, les jardins disposaient déjà d'une architecture exceptionnelle : « Des fleurs de tous genres parsèment les jardins. Tout ce qu'il y a de plus charmant, de plus agréable et de plus ravissant s'offre à nos yeux » (National Geographic, 2020). Des exemples de toitures végétales ont aussi été observés dans différents pays comme en Scandinavie à partir de 1000 ans apr. J.-C. avec les maisons traditionnelles appelées « chalet norvégien ». Les toitures étant généralement composées de tourbes, d'algues ou encore de couches de sol afin de permettre une isolation mais aussi de rafraîchir l'air intérieur en été (voir *figure 2*).



Figure 2: Jardins de Babylone à gauche et chalet norvégien à droite
 Source : Kais Jacob (nationalgeographic.fr) à gauche et (enfant-en-voyage.com) à droite

C'est au 19^e siècle avec le développement des matériaux et des diverses techniques de construction que les bâtiments à toit plat se sont illustrés. Au 20^e siècle, dans les années 1970, l'Allemagne et la Suisse réalisent des recherches visant à optimiser les structures de végétalisation. Dans les années 1980, la végétalisation s'immisce dans l'architecture des villes, même si elle reste réservée à une élite en raison d'un coût important. Initialement, dans un objectif de limiter les eaux de ruissèlement, l'Allemagne met en place une large politique de végétalisation des toitures instaurant des subventions et intégrant « l'esprit environnemental » dans la société allemande. Fort, de cette politique, dans les années 1990, c'est près de 15% des toitures-terrasses nouvellement créées qui sont végétalisées dans le pays. En 1996, 10 millions de m² de toit ont été recouverts par des jardins. (Bass, 2001)

Ce programme a aussi contribué à l'essor des façades végétalisées puisqu'entre 1983 et 1997, l'Allemagne accueille plus de 245'000 m² de façade verte. (Köhler, 2008) Désormais, en Allemagne de nombreuses villes prennent en charge une partie de l'investissement, avec l'exemple de Berlin qui assure 60% des dépenses liées aux toitures végétalisées et à l'installation de traitement de l'eau de pluie. (Bouattour, 2009) Une aide financière visant à réduire la taxe sur l'évacuation des eaux pluviales est aussi mise à disposition.



Figure 3 : Exemple de façade végétalisée en Suisse à Lausanne, située à la gare du Flon
Source : Jean-Luc Bertrand-Krajewski

La Suisse adopte aujourd'hui une politique de sensibilisation visant à informer l'ensemble des métiers de la technique du bâtiment. De plus en plus de mesures sont ainsi introduites dans les différents cantons afin de promouvoir la végétalisation des bâtiments. Par exemple, Bâle impose l'obligation de végétalisation de tout toit plat, où désormais 25% des toitures sont végétalisées, ce qui en fait un record mondial. La Suisse romande est aussi pionnière où la ville de Lausanne compte 7% des toitures végétalisées concernant ainsi 321 bâtiments sur un potentiel de 4750. (Canton de Genève, 2019) Des façades végétalisées peuvent être également aperçues dans cette même ville, comme c'est le cas notamment à la gare du Flon (voir figure 3). Par ailleurs, à Genève, des mesures plus drastiques cherchent à être mises en place, notamment avec la proposition d'une modification de la loi sur les constructions et les installations diverses. Celle-ci propose d'obliger la végétalisation de tout toit plat non utilisé, de toute nouvelle toiture plate ainsi que lors de chaque rénovation ou entretien sur l'étanchéité d'une toiture plate. (Canton de Genève, 2020)

5. Définitions des types de paroi végétale

5.1. Toitures végétalisées

La notion de « toiture végétalisée » est aujourd'hui reliée à la mise en place de végétation sur un toit. Cependant, il existe des termes plus précis permettant de définir chacune des structures. Les termes « éco-toit » et « toit vivant » sont représentés par des systèmes qui accomplissent un cycle de vie saisonnier comme la dormance liée à la chaleur ou au froid. Le terme « toit marron » est notamment utilisé au Royaume-Uni pour qualifier le substrat de culture issu d'une récupération d'aménagement de sites urbains. Le « toit vert » peut désigner de façon générale l'ensemble des toitures végétalisées mais peut aussi être spécifique aux toitures extensives.

Enfin, les « toit-terrasse » correspondent à un jardin aménagé sur le toit d'un bâtiment. (Djedjig, 2013)

Les toitures végétalisées présentent en général une même composition de structure (voir *figure 4*) :

- La structure porteuse désigne la structure du toit du bâtiment visant à accueillir la végétalisation. Cette structure se constitue de tous les matériaux généralement retrouvés dans les bâtiments tels que le béton, l'acier ou encore le bois. Cette structure doit être dimensionnée pour supporter un poids important, pouvant varier en fonction de la saturation du substrat, selon l'apport de pluie et la fonte des neiges. Selon l'épaisseur du substrat, le surpoids d'une toiture extensive est compris pour un mètre carré entre 72.6 et 169.4 kg et pour une toiture intensive entre 290 et 967.7 kg. (Peck, 1999)
- Un complexe isolant constituant une phase primordiale lors de la réalisation d'une construction ou d'une rénovation d'un bâtiment. L'isolant de toiture doit conserver la chaleur à l'intérieur et limiter les déperditions thermiques liées aux transferts de chaleur.
- Une membrane d'étanchéité dont le rôle est d'assurer la continuité de l'étanchéité de l'air tout en évitant les fuites d'air et infiltrations non désirées. Celle-ci se distingue du pare-vapeur qui permet d'empêcher l'infiltration de vapeur d'eau dans les parois menant à des problèmes de condensation. Aujourd'hui, plusieurs types de membrane sont disponibles sur le marché tels qu'en PVC, bitume modifié ou encore asphalte caoutchouté (pour les toitures extensives).
- Une barrière anti-racine visant à protéger la membrane d'étanchéité pouvant être dégradée par les racines. Certaines membranes d'étanchéité ne nécessitent pas de protection contre les racines.
- Une couche de drainage gérant l'aération et conférant une rétention d'eau supplémentaire. Elle doit garantir des conditions optimales pour la végétation et leur développement tout en évitant la stagnation de l'eau. Dans des situations de sécheresse, l'eau stockée dans la couche peut aussi être puisée par les racines des plantes. Plusieurs matériaux peuvent composer la couche de drainage : agrégat minéral, matériaux recyclés, polystyrène alvéolé. Dans tous les cas, les propriétés de légèreté et de durabilité doivent être garanties.
- Un filtre géotextile évitant le colmatage du système de drainage par des particules du sol/substrat. Ce géotextile peut aussi avoir le rôle supplémentaire d'absorber l'eau et d'offrir un milieu humide pour les racines des plantes.
- Un substrat de culture visant à apporter l'ensemble des besoins nutritifs de la végétation. Celui-ci doit être léger, résistant et permettre la rétention des eaux pluviales et l'infiltration. Le substrat est généralement composé de mélange de terre, de compost végétal ou encore d'écorces associées à des agrégats de pierres légères et absorbantes.
- Une végétation dont le choix dépend de plusieurs critères comme le climat, la hauteur souhaitée, la période de floraison ou encore la compatibilité selon le substrat choisi.



Figure 4: Exemple de toiture végétalisée à Lausanne, située à Grand-Vennes à gauche ; Composition détaillée d'une toiture végétalisée à droite

Source : (lausanne.ch) à gauche et (Atelier-celsius.ch) à droite

Parmi les toitures végétalisées, deux typologies sont généralement retrouvées. Les toitures extensive et intensive. Celles-ci se distinguent notamment par l'épaisseur de la couche de substrat, ce qui confère des propriétés différentes en matière d'isolation et de poids de la structure. Les conditions de vie des plantes sont aussi variées, ce qui admet des espèces diversifiées selon la typologie adoptée.

Tout d'abord, dans la toiture extensive, le substrat sur lequel se repose la végétation varie de 2 à 20 cm d'épaisseur. Les espèces mises en place doivent résister à des conditions extrêmes, presque désertiques telles que la sécheresse, c'est pourquoi, en général, les couvre-sols, robustes sont adoptés. Les toits verts extensifs se distinguent par un poids plus léger, ainsi que des coûts et entretiens minimaux. Également, en général, cette typologie ne nécessite pas de système d'irrigation ou de drainage spécifiques. (Djedjig, 2013), (Bernier A. M., 2011)

À la différence des toitures extensives, les toitures intensives sont caractérisées par un poids plus élevé et des coûts d'entretiens plus conséquents. Le substrat sur lequel se repose la végétation est supérieur à 20 cm et l'irrigation est souvent nécessaire. En revanche, elles accueillent une diversité plus grande de végétaux, pouvant inclure des arbres et des buissons. Les toits verts intensifs admettent également un écosystème plus important, développant une biodiversité accrue. Les « toitures-jardin », « toitures-jardin légères » et « terrasses plantées » font partie de cette typologie. Plusieurs avantages peuvent être relevés comme l'intégration d'une isolation plus performante liée à un substrat plus épais. Ces toitures sont aussi plus attractives et accessibles, considérant la possibilité de multiples usages. Sans compter l'amélioration de la rétention d'eau due une fois de plus à l'épaisseur plus importante du substrat. (Djedjig, 2013), (Bernier A. M., 2011) Un schéma est disponible ci-dessous et représente ces deux typologies (voir figure 5).



Figure 5: Les différentes typologies de toiture végétale
 Source : vegetage.brussel

Les caractéristiques des toits verts extensifs et intensifs sont également présentées dans le tableau suivant (voir *tableau 1*) :

Caractéristique	Toit vert extensif	Toit vert intensif
Objectif	Fonctionnel; gestion des eaux de ruissellement, isolation, protection contre les incendies.	Fonctionnel et esthétique; espace de vie additionnel.
Capacité structurelle	Toit standard; 70 à 170 kg/m ² .	Planification requise lors de la conception ou amélioration structurelle nécessaire; 290 à 970 kg/m ² .
Type de substrat	Léger	Léger à lourd
Profondeur de substrat moyenne	2 à 20 cm	20 cm et plus
Communautés végétales	Plantes à croissance lente et mousses sélectionnées pour leur tolérance au stress.	Aucunes restrictions autres que celles dictées par la profondeur du substrat, le climat, la hauteur du bâtiment, la visibilité et le type d'irrigation.
Irrigation	Peu ou pas d'irrigation.	Nécessite souvent une forme d'irrigation.
Entretien	Peu ou pas d'entretien; désherbage ou taille si nécessaire.	Mêmes exigences que les jardins au sol.
Coût (au-dessus de la membrane d'étanchéité)	100 à 300 \$/m ²	200 \$ et plus/m ²
Accessibilité	Généralement fonctionnelle pour l'entretien, rarement accessible au public.	Généralement accessible selon les exigences légales.

Tableau 1: Caractéristiques des toits verts extensifs et intensifs, adapté de (Oberndorfer, 2007)

5.2. Façades végétalisées

La végétalisation des façades est universelle et les raisons liées à l'implémentation de ces structures sont diverses. Elles concernent l'esthétique, l'isolation ou encore la protection des bâtiments.

Les formes de végétalisation sont aussi variées et avec le développement de la recherche, il est possible de s'attendre dans les prochaines années à de plus en plus de créations novatrices.

Les façades végétalisées peuvent être présentées sous plusieurs formes : végétalisation directe, indirecte ou mur vivant. Ces différences de structure impliquent des comportements thermiques et aérauliques variés. Dans le cas de végétalisation directe ou indirecte, les façades végétales emploient des plantes grimpantes. Ces dernières peuvent être plantées directement au sol ou introduites dans des bacs sur le bas ou le haut du mur. On parle de végétalisation directe (Direct Green Facade (DGF)) pour qualifier des plantes directement accrochées au mur possédant des racines spécialisées pour l'ancrage (crampons ou ventouses). Tandis que la végétalisation indirecte (Indirect Green Facade (IGF)) fait intervenir des supports généralement sous la forme de treillis, de câbles et/ou barres en acier inoxydable. Avec une séparation de la façade, les supports assurent une protection contre la détérioration de l'enveloppe du bâtiment. Les végétaux sont aussi davantage maintenus face aux événements météorologiques comme la pluie, le vent ou encore la neige. La couche d'air également présente et plus épaisse contribue à une isolation supplémentaire. (Vandersmissen, 2021) Une illustration des différents cas de végétalisation directe et indirecte des façades est présentée ci-dessous (voir *figure 6*) :

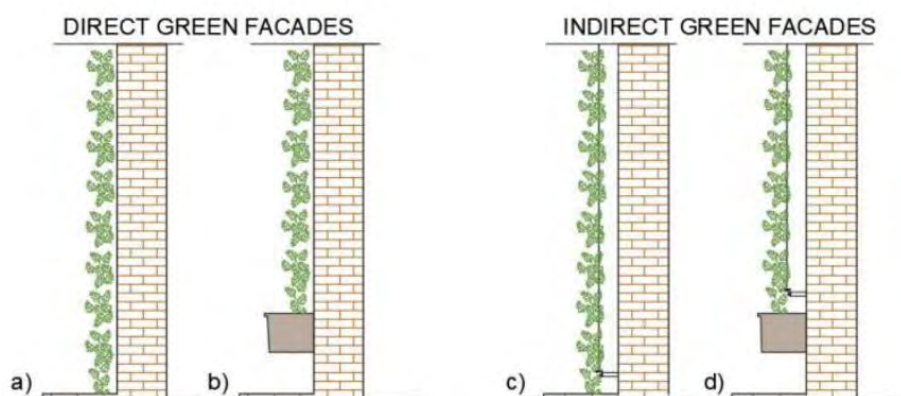


Figure 6: Systèmes de végétalisation : a) végétalisation directe enracinée dans le sol, b) végétalisation directe plantée dans des bacs/jardinières, c) végétalisation indirecte enracinée dans le sol, d) végétalisation indirecte plantée dans des bacs/jardinières. Adapté de (Palermo, 2020)

Les espèces végétales introduites au sein des végétalisations directes et indirectes sont diverses. Il peut s'agir de plantes grimpantes à ventouses, tiges volubiles, à palisser ou encore à pétioles volubiles. Une illustration des variétés utilisées selon les types de structure est présentée ci-dessous (voir *figure 7*) :

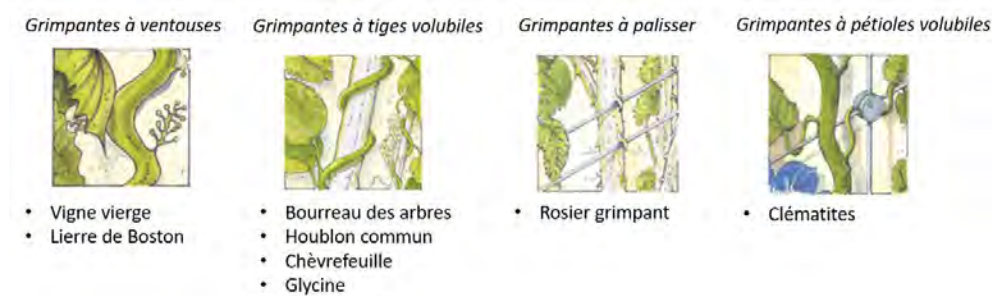


Figure 7: Résumé des espèces de plantes grimpantes, adapté de (Bernier, 2011)

Les murs vivants appartiennent à la deuxième catégorie de façade végétalisée. Cette fois, les plantes sont enracinées dans un substrat joint à la façade. Ces modules peuvent être composés de matériaux divers comme le plastique, le polystyrène expansé, l'argile, le métal ou le béton (voir *figure 8*). À la différence des végétalisations directe et indirecte, les murs vivants admettent une plus grande diversité d'espèces végétales, nécessitant un entretien plus fréquent. Le volume du substrat est aussi limité, ce qui réduit les ressources en eau et nutriment. Il est alors indispensable de mettre en place un système d'irrigation à travers une solution nutritive visant à répondre à l'ensemble des besoins de la végétation. Des capteurs d'humidité sont aussi généralement introduits dans le substrat afin d'optimiser la consommation d'énergie et des ressources. (Vandersmissen, 2021)

Il existe plusieurs types de murs vivants. Tout d'abord, les murs vivants modulaires ou monoblocs contenant des modules indépendants avec chacun un substrat léger et composé de multiples matières organiques et minérales. La croissance des plantes est d'abord réalisée à l'horizontale, puis les modules sont insérés à la verticale sur un maillage en acier. Le second type de mur végétal est développé par Patrick Blanc. Celui-ci est directement inspiré des végétaux retrouvés aux abords des falaises. (Bernier A. M., 2011) Ce mur végétal est constitué d'une structure solide verticale laissant traverser une lame d'air entre la façade et le mur du bâtiment. Des plaques de PVC expansés sont introduites afin de garantir une certaine rigidité et une étanchéité à la structure. Une membrane imperméable, dont la fonction est similaire pour les toitures végétalisées, est mise en place. Des plaques de feutre sont aussi utilisées pour permettre aux plantes de fixer leurs racines et de faire circuler une certaine quantité d'eau. Ce système correspond à une culture hydroponique, étant donné que les plantes grandissent exclusivement sur un substrat inerte et neutre. Toutefois, ce système reste encore très coûteux et se retrouve généralement hors des constructions privées comme les institutions et commerces. (Bernier A. M., 2011) (Bouattour, 2009)



Figure 8 : Mur végétal développé par Patrick Blanc à gauche ; mur végétal monobloc à droite (Bouattour, 2009)

Bien évidemment, ces deux types de structures végétales ne génèrent pas le même impact énergétique et impliquent des transferts hygrothermiques variés. En effet, avec la présence de substrat, les échanges thermiques diffèrent entre la paroi végétale et le mur. Il en est de même pour la lame d'air qui modifie la nature de transfert entre la végétation et la façade. Dans les études, il faudra veiller à préciser la composition du support et de la végétalisation pouvant avoir un impact énergétique différent selon leurs propriétés. En ce qui concerne les coûts, en fonction de la méthode de végétalisation adoptée, ceux-ci sont également variés. La méthode de végétalisation directe se retrouve la moins onéreuse et est suivie par la végétalisation indirecte. Un résumé des coûts est illustré dans le tableau ci-dessous (voir *tableau 2*) :

Coûts (€/ m2 hors TVA)	Revêtement végétal apposé directement sur le mur	Paroi végétale séparée
Végétaux	0,16 - 1,60	0,16 - 1,60
Support linéaire	4,00 - 8,00	9,00 - 18,00
Support bidimensionnel	10,00 - 25,00	25,00 - 55,00
Support tridimensionnel		100,00 - 200,00

Tableau 2: Résumé des coûts selon la méthode de végétalisation adoptée (directe ou indirecte) (Bouattour, 2009)

Le coût des murs vivants est quant à lui beaucoup plus élevé et variable selon les situations (entre 500 et 1500 euros hors taxe par mètre carré pour un mur sur mesure horticole, et entre 300 et 600 euros pour un mur modulaire) (Bouattour, 2009)

6. État de l'art

6.1. Performances énergétiques

Depuis quelques années, les potentiels thermique et énergétique des parois végétalisées sont traités dans des études. Selon (Coma, 2017), il est nécessaire de considérer quatre facteurs clés qui influencent leur performance en tant que système passif dans le cadre d'économie d'énergie dans les bâtiments.

- Le premier point concerne la nature des structures végétalisées et il convient de tenir compte des différences autour du type de construction comme les plantes grimpantes ou les murs vivants, ce qui exerce une influence directe sur le comportement thermique final du bâtiment.
- L'influence climatique qui joue un rôle sur le comportement du bâtiment mais aussi sur les choix des différentes espèces végétales qui se doivent adaptées au climat.
- Le troisième point faisant référence au type de végétation utilisé (caduque, persistante, arbuste ou plantes grimpantes).
- Enfin, l'intégration des quatre paramètres clés que sont l'ombrage, l'isolation, l'évapotranspiration ou encore les effets pare-vents.

La comparaison et la pertinence des diverses études sur le sujet se révèle délicate, tant par les différences qui existent entre les systèmes de construction, le climat, les espèces utilisées ou encore les paramètres considérés (orientation, épaisseur des feuilles, etc.). Afin d'avoir la vision la plus précise possible, il est difficilement réalisable d'entreprendre une revue de l'entièreté des façades et toitures végétalisées.

Ainsi, seules les façades végétalisées seront étudiées avec un accent principal porté sur les végétations directe et indirecte de par leur facilité de mise en œuvre et leur coût économique relativement faible.

(Pérez G. C., 2014) ont réalisé une synthèse visant à résumer la littérature sur les systèmes de végétalisation verticale. Dans leur recherche, seulement 7 articles qui concernent les façades végétalisées directes ont été trouvés. Pour les façades végétalisées indirectes, 10 articles ont été identifiés tandis que 8 études ont été mises en évidence pour les murs vivants. Dans cet état de l'art, les travaux de recherches seront ainsi résumés en reprenant le bilan de (Pérez G. C., 2014) et complétés par des études plus récentes. Elles sont présentées par ordre de pertinence avec un intérêt jugé majeur pour la localisation (Europe et environ) et la qualité de présentation de l'influence des différents paramètres. Ainsi, les études présentées suivent l'ordre de climat suivant : tempéré, méditerranéen, continental et subtropical.

6.1.1. Climat tempéré

Dans l'étude menée par (Hoelscher, 2016), les effets de refroidissement de la végétalisation directe des bâtiments ont cherché à être quantifiés en distinguant les effets de transpiration et d'ombrage. Trois plantes grimpantes sont utilisées au sein du campus de l'Université Technique de Berlin : *Parthenocis porc tricuspidata* sur une façade exposée sud/sud-ouest, *Hedera helix* sur une façade exposée est et *Fallopia baldschuanica* sur une façade exposée ouest. Sur une journée chaude en été, la température moyenne de surface avec *P.Tricuspidata* a été réduite de 0.1 à 11.3°C (moyenne de 3.3°C) par rapport à la surface du mur extérieur nu. Des résultats similaires ont pu être observés avec *H.Helix* avec une différence de 0 à 12.3°C (moyenne de 3.7°C), à la différence de *F.baldschuanica* qui présente une plus faible variation de 0.8 à 6.6°C (moyenne de 2.4°C). En ce qui concerne la part d'ombrage et de transpiration respective dans le refroidissement pour *P.Tricuspidata*, pour une journée chaude en été, avec un rayonnement solaire élevé, l'ombrage représentait au maximum 87% du refroidissement total (avec un pic de refroidissement de 585.6 W.m⁻²). Pour cette même journée, en moyenne l'ombrage avait une contribution à hauteur de 81.5% et s'est retrouvée semblable à une journée froide avec moins de rayonnement. Pour l'espèce *F.baldschuanica*, sur une journée ensoleillée, un pic de refroidissement a été atteint à 755.8 W.m⁻² où l'ombrage participait à près de 80% du refroidissement. Cependant pour la même espèce, sur une période de mesure de 13 jours, en fin d'été, la transpiration a contribué en moyenne à presque dans la même mesure que l'ombrage (évapotranspiration = 47.5%). Sur cette même période de mesure, avec une journée nuageuse, la transpiration a affiché une contribution de 73% du refroidissement. Ainsi, ces résultats témoignent du caractère rafraichissant des plantes où elles participent à une réduction de la température de surface. Il est possible de comprendre que lors de journées chaudes en été avec un grand rayonnement, les effets de refroidissement semblent essentiellement liés à l'ombrage mais que la tendance peut s'inverser, où l'effet de l'évapotranspiration peut être prédominant dans le cas de période nuageuse.

Dans le cadre de l'étude traitée par (Sternberg, 2011), des données sont recueillies pendant un an sur la température et l'humidité relative dans cinq façades vertes traditionnelles recouvertes de lierre (*Hereda helix*) dans divers endroits en Angleterre.

L'objectif était de mettre en évidence les performances des murs végétalisés selon l'exposition ou encore l'épaisseur du feuillage. Les résultats montrent qu'en moyenne sur une journée les températures minimales sont 36% plus grandes et les températures maximales 15% plus faibles pour un mur recouvert de lierre que face à un mur exposé directement. Plus précisément, ils ont observé que la canopée de lierre a réduit significativement les températures de surface maximales quotidiennes de 1.7°C pour la couverture de 10cm d'épaisseur et de 9.5°C pour la couverture de 45cm d'épaisseur. La végétation permet donc un refroidissement et il est d'autant plus important que l'épaisseur de feuillage est grande. En ce qui concerne les températures de surface minimales quotidiennes, la végétation a maintenu une température de 0.64°C (10cm d'épaisseur) et 3.88°C (20cm d'épaisseur) plus élevée que la température de la surface du mur exposée, ce qui témoigne également d'un caractère isolant proportionnel à l'épaisseur de la canopée végétale. Par ailleurs, une autre étude réalisée par (Köhler, 2008) renforce aussi ces capacités de refroidissement et isolation des plantes où les différences de température sous une façade en lierre à Berlin (*Hedera helix*) peuvent atteindre jusqu'à 3°C en été (effet lié à l'ombrage et l'évapotranspiration) et 3°C lors des nuits froides en hiver (traduisant un effet isolant).

Dans l'étude réalisée par (Ip, 2010), l'influence de l'ombrage généré par la végétalisation indirecte a été observée. Celle-ci est constituée de vigne vierge (*Parthenocissus quinquefolia*) accrochée à un treillis et est disposée devant une fenêtre d'un bureau situé à Brinhton au Royaume-Uni selon une orientation sud-ouest. À partir des paramètres mesurés (température et humidité relative à l'intérieur de la pièce), des réductions de température intérieure ont pu être observées avec un maximum de 5.6°C pendant la journée et 3.5°C pendant la nuit en comparaison à une façade sans végétalisation. Les auteurs ont également cherché à caractériser l'effet d'ombrage en définissant des coefficients d'ombrage et en calculant la transmissivité selon le nombre de couches de feuillage. Les conclusions montrent que ces coefficients varient en fonction du cycle de croissance annuel et que les valeurs de transmissivité sont d'autant plus faibles que le nombre de couches est grand, étant égales à 0.45, 0.31, 0.27, 0.22 et 0.12 pour respectivement 1 à 5 couches.

Dans le cadre d'un projet de recherche géré par (Perini, 2011), a été étudié l'effet du débit d'air pour évaluer l'influence de la vitesse du vent sur la résistance thermique des façades végétalisées aux Pays-Bas. L'objectif est de savoir si une faible vitesse de vent peut engendrer la présence d'une couche d'air isolante. Parmi les murs végétalisés, une façade en lierre de 20cm d'épaisseur orientée nord-ouest a été étudiée. Les paramètres mesurés étaient la vitesse de vent, la température de surface et la température de l'air. En ce qui concerne la vitesse de vent, la végétalisation directe permet une réduction notable de cette vitesse d'environ 0.43 m/s entre une distance du mur de 30cm et 10cm, la rendant quasiment nulle. À la différence, dans la végétalisation indirecte, la vitesse de vent a subi une réduction de 0.55m/s à l'intérieur du feuillage, mais de seulement 0.29 m/s dans la couche d'air (20cm). Ils montrent également que lorsque la vitesse de vent est inférieure à 0.2 m/s, la résistance extérieure ($R_e = 0.04 \text{ m}^2\text{K.W}^{-1}$) peut être égalisée à la résistance intérieure ($R_i = 0.13 \text{ m}^2\text{K.W}^{-1}$). Concernant les températures de surface extérieures, une diminution de 1.2°C due à l'effet de la végétation a été mesurée pour la végétalisation directe et 2.7°C pour la végétalisation indirecte.

Ces valeurs de résultats semblent relativement faibles au vu des autres études. Seulement, les auteurs se justifient par le fait que les mesures ont été réalisées en automne sans soleil direct et avec des températures de surface extérieures inférieures à 18°C. Cette étude montre donc que les façades végétalisées permettent de réduire la température de surface ainsi que la vitesse de vent (apportant une isolation supplémentaire) conférant un gain d'énergie pour les bâtiments.

6.1.2. Climat méditerranéen

Le projet de recherche mené par (Eumorfopoulou, 2009) consiste à évaluer si les murs végétalisés peuvent améliorer le comportement thermique des bâtiments. Les données ont été enregistrées dans une façade de végétalisation directe de 25cm d'épaisseur (*Parthenocissus tricuspidata*) orientée vers l'est en Grèce. Les paramètres mesurés étaient les températures de surface extérieure et intérieure, la température du feuillage et les températures de l'environnement intérieures et extérieures. Les principaux résultats ont montré qu'en raison de la couverture végétale, la réduction de température quotidienne maximale sur le mur orienté est du bâtiment était en moyenne de 5.7°C sur la surface extérieure avec une variation comprise entre 1.9 et 8.3°C durant la durée de mesure. La surface intérieure du mur a subi quant à elle une baisse maximale moyenne de 0.9 °C. Quant à la température à l'intérieur du feuillage, celle-ci est en moyenne généralement inférieure à la température extérieure d'un ou deux °C. Par ailleurs, l'effet de refroidissement a aussi été simulé selon les différentes orientations montrant une réduction de la charge de refroidissement de 4.65% pour le nord, 18.17% pour l'est, 7.60% pour le sud et 20.08% pour l'ouest. Ainsi, cette étude montre également que la végétation permet de diminuer de manière notable les températures de surface intérieure et extérieure ainsi que la charge de refroidissement, dont l'impact est variable selon les orientations.

Par ailleurs, une autre étude menée par (Pérez G. R., 2011) en Espagne a permis de montrer qu'avec une végétalisation indirecte orientée sud, l'ombrage apporté par celle-ci est aussi efficace que les meilleures valeurs de protections solaires. En effet, les valeurs de facteurs de transmission lumineuse trouvées sont 0.15 pour la vigne vierge, 0.18 pour le chèvrefeuille, 0.14 pour la clématite et 0.2 pour le lierre. Ces résultats permettent de montrer que l'ombrage issu de la végétation peut apporter une protection solaire conséquente et non négligeable, ce qui renforce l'importance du choix des espèces végétales.

6.1.3. Climat continental

Dans l'étude réalisée par (Susorova, 2013), des données enregistrées sur une façade végétalisée directe (*Parthenocissus tricuspidata*) sont utilisées dans le but de valider un modèle mathématique visant à simuler les performances thermiques des façades extérieures végétalisées. Les données ont été collectées sur 4 jours sur une façade exposée au sud de l'Institut Technologique de Chicago. Les paramètres mesurés étaient les températures : extérieures, de surface extérieure du mur, de surface des feuilles, de surface du mur intérieur et à l'intérieur du feuillage. L'humidité relative, la vitesse de vent ainsi que le rayonnement solaire horizontal total ont aussi été mesurés. Les mesures ont montré que la différence la plus élevée entre les températures de surface extérieure sans végétation et végétalisée était atteinte (variation entre 1.3 et 7.9°C) lorsque le rayonnement était le plus important.

Les résultats montrent que durant les jours ensoleillés, la température de surface extérieure végétalisée est toujours inférieure à celle de la façade nue (différence moyenne de 1.6 à 1.1°C), alors que durant la nuit, les températures sont plus ou moins équivalentes. À l'aide de l'algorithme développé et de la simulation, les conclusions sont que les paramètres les plus impactant par ordre d'importance sont : le rayonnement solaire, la vitesse de vent, l'humidité relative, la température extérieure. En ce qui concerne l'orientation des façades, la végétalisation est particulièrement efficace pour refroidir les façades est et ouest principalement exposées au rayonnement solaire. Par ailleurs, les résultats montrent que l'augmentation de la température de l'air rend le refroidissement moins efficace de la part de la couche végétale. Aussi, l'augmentation de l'humidité relative a pour conséquence d'augmenter la réduction des températures de surface en raison de l'évapotranspiration, tandis qu'avec l'augmentation de la vitesse de vent la capacité de refroidissement est plus faible en raison de l'effet de convection. D'autres paramètres relatifs aux plantes ont été évalués et parmi les plus influents figurent l'indice de surface foliaire (LAI) et la conductance stomacale. Une couche végétale avec un feuillage dense (LAI élevé) et avec des feuilles parallèles au mur est extrêmement efficace pour réduire les températures de surface de la façade ainsi que le flux de chaleur traversant.

6.1.4. Climat subtropical

Dans l'expérience menée par (Hoyano, 1988) à l'université de Kyushu au Japon, un des objectifs principaux a été de mesurer l'effet de l'ombrage au sein d'une véranda orientée sud-ouest avec une végétalisation indirecte. Les différents paramètres mesurés étaient le rayonnement solaire incident, la température de l'air, l'humidité relative, la température des feuilles ainsi que la température de surface de la véranda. Il a pu être observé que l'ombrage réalisé par la vigne a permis une protection très efficace contre le soleil réduisant jusqu'à 60% du rayonnement solaire (lorsque le soleil est bas après 15h00). Cet effet d'ombre a eu un impact direct sur les températures de l'air de la véranda qui étaient inférieures de 1 à 3°C avec l'écran solaire. Cette étude met ainsi en avant l'impact notable de l'ombrage végétal sur la réduction des températures.

Dans l'étude menée par (Hsieh, 2018), l'objectif est de pouvoir quantifier l'effet de refroidissement des arbres autour du bâtiment en se concentrant sur deux facteurs principaux, l'ombrage et la transpiration. La zone d'étude est située sur le campus principal de l'Université forestière de Nanjing en Chine. 4 scénarios sont mis en place : le premier sans ombrage, le deuxième avec des arbres éloignés du bâtiment, le troisième avec des arbres identiques au deuxième scénario mais rapprochés à 2m du bâtiment, et enfin le scénario 4 avec une situation similaire au scénario 2, mais avec des arbres possédant un taux de transpiration plus élevé. Les résultats de la simulation montrent qu'avec le scénario 2, la charge énergétique totale de refroidissement pendant la journée a diminué de 10.3% en comparaison au scénario 1. Avec un ombrage plus conséquent, le scénario 3 affiche une réduction plus importante que le scénario 2 avec une réduction de la charge de refroidissement de 15.2% durant la journée. Enfin, le scénario 4 représente une baisse de 12.4% de la charge de refroidissement pendant la journée, même si celui-ci était composé d'arbres affichant davantage de transpiration. Cette étude met donc en évidence l'impact positif de la réduction de consommation énergétique liée à la climatisation grâce à l'ombrage et la transpiration issue de la végétalisation.

En conclusion, ces études montrent que les façades végétalisées offrent un grand potentiel dans la réduction de consommation énergétique des bâtiments en agissant essentiellement par l'ombrage et l'évapotranspiration. La végétation permet de réduire les températures de surface ainsi que la température intérieure. L'impact est également variable en fonction des orientations, où l'est et l'ouest semblent donner les meilleurs résultats.

Par ailleurs, il n'y a pas toujours une différenciation claire entre l'impact de l'évapotranspiration et de l'ombrage sur le bilan énergétique, même si l'effet d'ombrage semble être le facteur d'influence prédominant sur l'économie d'énergie. La comparaison de l'efficacité des différentes façades repose également la majeure partie du temps sur la réduction de la température du mur extérieur, donnant rarement un aspect quantitatif en termes de kWh de climatisation économisés. Par ailleurs, il a été possible d'observer que les performances sont liées à des paramètres multiples, comme la météo (température, rayonnement, humidité) ou encore, dépendent des propriétés des plantes (épaisseur de feuille, espèce, indice de surface foliaire), ce qui rend difficile la généralisation des études. L'origine des études montre aussi qu'au global, les enquêtes ne sont pas réparties équitablement dans le monde, étant essentiellement situées en Europe et Asie, et concentrées dans des zones avec un climat chaud. Celles-ci sont aussi principalement réalisées en été sur des durées de mesure courtes ne laissant pas la possibilité de voir clairement apparaître les différences saisonnières.

Ainsi, mon étude se veut innovante, où l'objectif est de pouvoir analyser au mieux les deux effets d'ombrage et d'évapotranspiration pour ensuite les intégrer au sein d'un bilan énergétique annuel (avec d'autres paramètres de contribution), ce qui permettra de mettre en évidence de manière quantitative la réduction potentielle de climatisation.

6.2. Modèles de simulations

Par ailleurs, de plus en plus de modèles sont développés afin de faciliter la prise de décision concernant la mise en place des typologies de toitures et façades végétalisées. Aujourd'hui, il existe plusieurs travaux de recherche qui ont tenté de modéliser ces enveloppes végétalisées en établissant un bilan d'énergie pour les éléments constitutifs des parois. Comme il a été possible de le comprendre précédemment, les phénomènes de transferts d'énergie varient selon des critères météorologiques, mais dépendent aussi de propriétés thermo-physiques liées à la composition des structures. Ainsi, la modélisation de ces enveloppes est complexe et est souvent séparée en deux parties avec une distinction pour le substrat (si présente) et la végétation. Les modèles développés aujourd'hui se distinguent notamment par l'approche utilisée et les hypothèses considérées. Dans l'étude menée par (Pérez G. C., 2014) sont résumés les principaux modèles d'enveloppes végétalisées. Parmi les neuf études identifiées, 4 font référence à des murs vivants, 3 à des façades végétales directes et 1 à une façade verte indirecte. Un résumé des études et hypothèses est décrit dans les tableaux ci-dessous (voir *tableau 3*) :

Table 9
 Simulations: Related papers; Main characteristics and findings.

Reference	Green vertical system		Plant species	Model/software	Parameters	Validation	Main assumptions
[32]	–		None	MICROPAS – SPS Shadow Pattern Simulation	Solar irradiance reductions/ Wind reductions/Energy performance of the building	No	Windows shading coefficient/air change rate/occupancy/uniform shade from plants
[33]	None	–	None	DEROB – Dynamic energy response of buildings	Indoor temperatures	4 days	Plants properties were not considered
[34]	None	–	None	Two-dimensional prognostic (dynamic) micro-scale model C++	Temperatures and energy savings	No	Properties of the plant
[12]	Green facade	Traditional	<i>Hereda sp.</i>	Mathematical model	Conductive heat transfer/ energy use reduction	2 summers	No overlap of the leaf layers/ Uniform leaf temperature/The ivy had negligible thermal capacity
[18]	Green facade	Double skin	<i>Hereda helix</i>	Simulink	Heat exchange between layers	Lab experiment	Properties of the plant
[7]	Green facade	Traditional	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	PCW – thermal-network model	Temperatures and energy savings	No	Plant thermal conductance
[17]	Green facade	Traditional	Boston ivy <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Mathematical model	Surface temperatures/Heat flux through the exterior wall	4 days	Leaf absorptivity coefficient, radiation attenuation coefficient, typical stomatal conductance, etc.
[22]	Green wall	Panels	<i>Nephrolepis exaltat/Urechites lutea/Ophiopogon japonicus/ Tradescantia spathacea</i>	TAS simulations	Temperatures and energy savings	No	Shading coefficient, greenery coverage
[29]	Green wall	–	<i>Euphorbia x lomi "salmon"</i>	Thermodynamics transmission model (TIM)	Heat flux transmission/ Temperature variations	12 days	Not explained
Reference	Main conclusions						
[32]	21% increment for heating in cold climates (great influence of South and East orientations)			53% reduction for cooling in warm climates (great influence of West orientation)		–	–
[33]	Indoor temperature: Maximum lowered by 4 K for arid climates			Indoor temperature: Minimum raised by 5 K for Mediterranean climates		–	–
[34]	The hotter and drier a climate is, the greater the effect of vegetation on urban temperatures			The larger amounts of solar radiation a surface receives, the larger its temperature decreases are when it is covered with vegetation		In hot climates, energy savings from 32% to 100% for cooling were calculated	–
[12]	Summer day peak-cooling load transferred through the wall was reduced by 28%			Heat gains reduction by solar radiation absorption: 40% of the energy absorbed by leaves is lost by convection, 42% by transpiration, and the rest by long-wave radiation to the environment		–	–
[18]	Temperature of each layer of the double skin façade was much lower for the case with plants than with blinds			For the same solar radiation, the temperature raise of the plant was about twice lower than for the blinds		Temperature of the plant never exceeded the temperature of 35 °C, when blinds could exceed 55 °C	Moreover, installation of plants in the double skin façade allows for reduction of the cooling capacity by almost 20%. A similar result was noticed for the energy consumption of the cooling system.
[7]	The exterior/interior surface reductions calculated were 1.73/0.65 °C for the North façade, 10.53/2.04 °C for the East façade, 6.46/1.06 °C for the South façade and 16.85/3.27 °C for the West façade			This effect implied cooling load reductions of 4.65% for the North, 18.17% for the East, 7.60% for the South and 20.08% for the West		–	–
[17]	On summer sunny days, a plant layer on a brick façade was estimated to reduce its exterior surface temperature by 0.7–13.1 °C			Heat flux through the exterior wall was reduced by 2–33 W/m ²		An effective R-value of 0.0–0.71 m ² K/W was provided	–
[22]	The key behind shading is thicker greenery			Reductions between 10–31% energy cooling load were calculated due to the effect of greenery		–	–
[29]	South green walls had recorded reductions up to 8.83 °C			–		–	–

Tableau 3: Résumé des modèles de simulation par (Pérez G. C., 2014), 32 = McPherson et al. (1988); 33 = Holm (1989); 34 = Alexandri and Jones (2008); 12 = Di and Wang (1999); 18 = Stec et al. (2005); 7 = Kontoleon and Eumorfopoulou (2010); 17 = Susorova et al. (2013)

Cette étude met en évidence le fait que les modèles mathématiques et les logiciels utilisés sont tous très différents et qu'il n'y a pas de réelle continuité. Ces modèles présentent pour la plupart un grand nombre d'hypothèses nécessaires aux auteurs pour réaliser les simulations en raison de la difficulté à caractériser la végétation. Ces hypothèses utilisées posent des questions quant à leur contribution aux résultats et la précision souhaitable. Par ailleurs, étant donné que les simulations sont directement reliées aux mesures, elles dépendent donc de la durée généralement courte des études, ce qui peut causer des différences en matière de résultats sur une généralisation annuelle.

Les principales conclusions des simulations rejoignent les résultats des études précédentes, où les façades végétalisées garantissent un effet de refroidissement très efficace lors d'une période chaude. Il est ainsi possible de comprendre la difficulté de mise en place d'une telle modélisation énergétique, où la volonté d'avoir un modèle se rapprochant le plus possible de la réalité nécessite l'intégration de l'ensemble des phénomènes physiques se déroulant à l'intérieur des plantes et réagissant avec les éléments environnants (air, bâtiments). Ici, l'objectif sera de réaliser un modèle simplifié en cherchant à intégrer au mieux les interactions des plantes.

6.3. Résumé des études précédentes

Étant donné qu'il s'agit à la HES-SO Valais-Wallis, du troisième travail de Bachelor sur la végétalisation des bâtiments, il est également nécessaire de résumer les travaux précédents. Celui-ci permet de donner un aperçu global sur les résultats et sur les limites des approches utilisées jusqu'à présent.

Dans l'étude réalisée par (Tran, 2020), il est montré, par simulation sous le logiciel bSol, sur un bâtiment standard situé à Viège, que la végétalisation permet de réduire la consommation énergétique des bâtiments. Dans l'ensemble des cas étudiés (sauf bâtiment léger), la part de climatisation a été réduite de 100%, ce qui correspond dans la situation la plus favorable à une économie annuelle de 1.1%. L'auteur a aussi justifié par les résultats l'abaissement de la température intérieure grâce à la végétalisation qui peut monter jusqu'à 2.5°C (entre les scénarios avec et sans végétation) pour un bâtiment d'inertie moyenne. Dans son étude, il montre également que plus le nombre d'étages est important, plus l'énergie liée à la climatisation est grande. L'inertie thermique du bâtiment a aussi un impact considérable puisque plus celui-ci est léger, plus la surchauffe est grande et l'énergie de climatisation conséquente. Plusieurs limites concernent la méthode proposée. Tout d'abord, la simulation de l'effet de l'évapotranspiration a été réalisée en modifiant la température au niveau du fichier météorologique, ce qui a pour conséquence de simuler la végétalisation des 4 façades et du toit. Cette méthode ne permet donc pas d'observer l'impact selon les orientations et relève des imprécisions au niveau du toit, qui, constitué du substrat, doit tenir compte d'une inertie supplémentaire et de phénomènes physiques additionnels. Aussi, la méthode utilisée pour calculer la variation de température contient une erreur, étant donné que l'énergie latente liée à l'évapotranspiration a été calculée avec la masse volumique de la vapeur d'eau au lieu de la masse volumique de l'eau liquide. Le phénomène d'ombrage pouvant également apporter une plus-value concernant la végétation n'a pas été pris en compte dans l'analyse. Sans oublier que l'équation de Turc qui a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration est souvent considérée comme imprécise et qu'il est conseillé généralement d'utiliser l'équation de Penman-Monteith.

Dans l'étude suivante menée par (Merz, 2021), le même bâtiment que (Tran, 2020) a été simulé avec une inertie légère et trois étages. La méthode développée par (Tran, 2020) pour calculer les effets de refroidissement lié à l'évapotranspiration a été conservée. Cependant, une partie de la méthode a été corrigée en utilisant cette fois-ci la masse volumique de l'eau dans le calcul de la chaleur latente liée à l'évapotranspiration.

Afin de corriger et se rapprocher des résultats de l'étude précédente, les facteurs de proportion d'air par rapport à la végétation ont été modifiés et un facteur de correction correspondant à un taux de renouvellement de l'air (2 fois par minute) a été appliqué. Cependant, ce coefficient pose des questions quant à sa définition et la justification de sa valeur sachant son importante influence sur les résultats (ce qui les rendent imprécis). L'équation de Turc a également été remplacée par l'équation de Penman-Monteith pour le calcul de l'évapotranspiration. Cette dernière étude a permis de confirmer les résultats de la première étude où il est possible d'observer que la végétalisation réduit l'énergie liée à la climatisation (partiellement avec un K_c de 0.16 et complètement avec un K_c de 0.5). D'autre part, une comparaison a été réalisée entre la méthode de calcul de l'évapotranspiration et des mesures qui ont été effectuées à Zurich. Celle-ci témoigne d'une différence entre la réalité et la pratique conduisant à faire des hypothèses quant à la précision des données météorologiques ou à la pertinence de l'équation d'évapotranspiration de Penman-Monteith. Également, les mêmes conclusions sont tirées quant à la réduction de la température intérieure et des heures de surchauffe conduisant à une amélioration du confort thermique. Par ailleurs, cette méthode contient des limites similaires à la première étude où la diminution de la température extérieure a été généralisée sur l'ensemble des surfaces et où seul le phénomène d'évapotranspiration a été pris en considération (sans le phénomène d'ombrage).

7. Bilan énergétique et paramètres d'influence

Dans l'objectif d'analyser le comportement de systèmes biophysiques, il est nécessaire de se pencher sur le bilan énergétique et considérer une conservation de la masse et de l'énergie. Ce bilan prend en compte tous les flux du système reçus, cédés ou stockés. D'après (Djedjig, 2013), dans le cadre d'une canopée végétale, le bilan des flux peut être décrit comme suit [W/m^2] :

$$R_n + M - H - \lambda E = G \quad (1)$$

Le rayonnement net absorbé correspond aux échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde absorbées par la canopée végétale et est décrit par le terme R_n . L'énergie nécessaire pour la photosynthèse et l'apport énergétique du métabolisme est représenté par le terme M . L'impact de ce processus sur les résultats est souvent négligé, contribuant en règle générale à 1 à 2% du rayonnement net absorbé. Cependant, il faut veiller à ne pas généraliser puisque dans certains cas où le LAI (Leaf Average Index) est conséquent et l'irradiation est faible, ce flux peut atteindre 5%. Également, le terme G est aussi souvent négligé correspondant au stockage thermique des plantes. (Jean, 2015) Le terme λE représente les phénomènes latents faisant intervenir l'évaporation et la transpiration. Il comprend le taux massique d'évapotranspiration E [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] ainsi que la chaleur latente de vaporisation λ [$J \cdot kg^{-1}$]. Enfin, le flux H , représente la chaleur sensible. Les flux intervenants au sein du bilan énergétique et leur contribution peuvent être observés sur les illustrations suivantes (voir *figure 9* et *graphique 1*) :

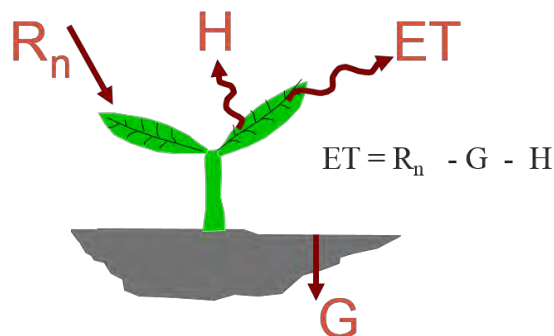
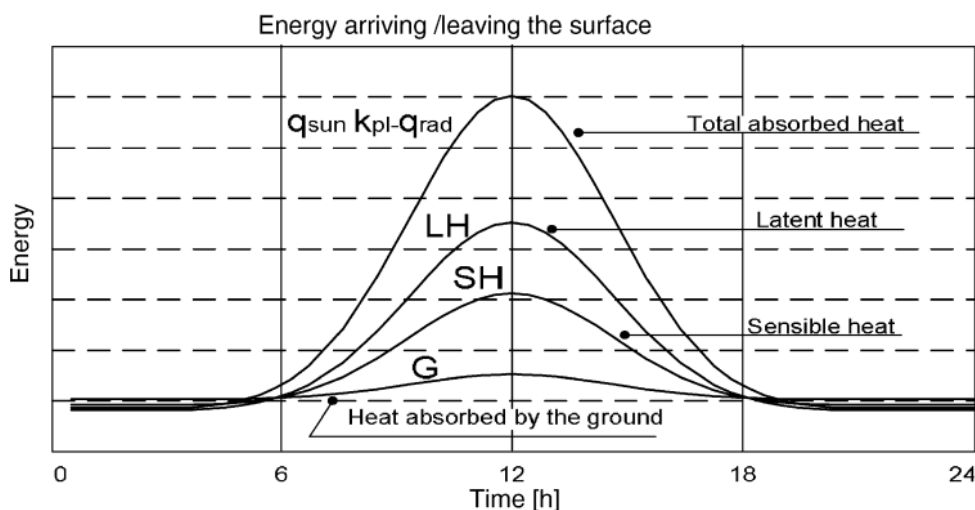


Figure 9: Transfert d'énergie au sein d'une plante
 Source : Wikipédia



Graphique 1: Distribution d'énergie au sein d'une plante (Allen, 1998)

7.1. Évapotranspiration selon Penman-Monteith

7.1.1. Définition

Dans le bilan énergétique de la plante, la chaleur latente liée à l'évapotranspiration représente une part importante (environ 60%). Le terme d'évapotranspiration intègre les deux processus, évaporation et transpiration. L'évaporation désigne un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux, nécessitant une certaine quantité d'énergie. Ce phénomène peut avoir à lieu à n'importe quelle température sans nécessairement atteindre la température d'ébullition. Ainsi, c'est essentiellement par l'évapotranspiration, qui entraîne une augmentation locale de vapeur d'eau que les plantes rafraichissent l'air ambiant. Ces deux phénomènes, évaporation et transpiration dépendent de l'irradiation solaire, de la température de l'air, de l'humidité relative ou encore de la vitesse du vent. Le taux de transpiration est aussi influencé par les pratiques agricoles appliquées. Il convient donc de ne pas considérer uniquement la végétation mais également son environnement de croissance.

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a introduit dans le rapport 56 le concept d'évapotranspiration de référence E_{t0} , qualifiant le taux d'eau vaporisé par des surfaces végétalisées idéales disposant d'eau à volonté. Le calcul de l'évapotranspiration de référence est généralement effectué à partir de l'équation de Penman-Monteith qui est aujourd'hui une méthode reconnue et recommandée par la FAO.

D'autres méthodes de calcul restent encore employées comme c'est le cas avec MétéoSuisse ou encore AGRO-METEO utilisant les formules empiriques de Primault (1962 et 1981) et de Turc (1961). (Calanca, 2011) La formule développée par la FAO détermine le taux d'évapotranspiration (E_0) en $[mm.jour^{-1}]$, pour un gazon selon une hauteur de peuplement, un indice de surface foliaire, un albédo et des résistances superficielle et aérodynamique définies (voir figure 10). La résistance aérodynamique correspond ici à la couche limite générée par l'écoulement de l'air tandis que la résistance superficielle est propre aux stomates et caractérise la résistance au transfert de vapeur.

Hauteur du peuplement, h :	12 cm $\equiv$ 0,12 m
Indice de surface foliaire, LAI:	24 h, avec h en m $\equiv$ 2,88 $m^2 m^{-2}$
Albédo, α :	0,23 $\equiv$ 23 %
Résistance stomatique r_i :	100 $s m^{-1}$
Résistance superficielle r_s :	$2r_i / LAI \equiv 70 s m^{-1}$
Résistance aérodynamique r_a :	$208 / u_2 s m^{-1}$

Figure 10 : Valeurs utilisées pour le calcul d'évapotranspiration de référence (Calanca, 2011)

Afin de déterminer l'évapotranspiration de la culture, il convient de multiplier l'évapotranspiration de référence par les coefficients cultural K_c et de stress hydrique K_s (voir figure 11). L'équation pour le calcul de l'évapotranspiration de la culture est la suivante :

$$ET_R = K_s * K_c * ET_0 \quad (2)$$

ET_R = Taux d'évapotranspiration réel horaire $[mm.h^{-1}]$

K_s = Coefficient de stress hydrique $[-]$

K_c = Coefficient de culture $[-]$

ET_0 = Taux d'évapotranspiration de référence horaire $[mm.h^{-1}]$

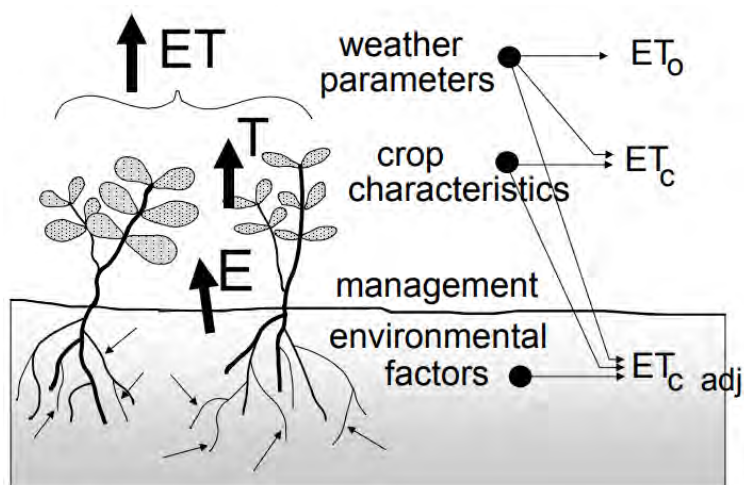


Figure 11: Représentation de l'évapotranspiration potentielle et de culture (Allen, 1998)

Les équations utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration sont extraites ici de (Allen, 1998) et les étapes de calculs sont détaillées et expliquées :

$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

R_n = Rayonnement net [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$] (Différence entre les radiations de faibles longueurs d'onde reçues et les radiations de grande longueur d'onde sortante).

G = Flux de chaleur du sol [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$]

γ = Constante psychrométrique [$KPa.^{\circ}C^{-1}$]

u_2 = Vitesse moyenne du vent à 2m du sol [$m.s^{-1}$]

T_{mean} = Température moyenne de l'air [$^{\circ}C$]

Δ = Pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température de l'air [$kPa.^{\circ}C^{-1}$]

e_s = Pression de vapeur saturante à la température de l'air [kPa]

e_a = Pression de vapeur actuelle [kPa]

Il est nécessaire de tenir compte de la vitesse du vent. Si celle-ci n'est pas mesurée à 2 m du sol, il convient de la corriger en utilisant l'équation suivante :

$$u_2 = u_h * \frac{4.87}{\ln(67.8h_w - 5.42)} \quad (4)$$

u_h = Vitesse de vent mesurée à une hauteur h [$m.s^{-1}$]

h_w = Hauteur de prise de mesure de la vitesse du vent [m]

Pour le calcul de l'évapotranspiration, il est également nécessaire de connaître la pente de la relation entre la pression de vapeur saturante et la température. Celle-ci se calcule comme suit :

$$\Delta = \frac{4098 [0.6108 * \exp(\frac{17.27 * T_{mean}}{T_{mean} + 237.3})]}{(T_{mean} + 237.3)^2} \quad (5)$$

La constante psychométrique est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} * P \quad (6)$$

P = Pression atmosphérique [kPa]

λ = Chaleur latente de vaporisation, $2.45 [MJ.kg^{-1}]$

c_p = Chaleur spécifique à pression constante, $1.013 * 10^{-3} [MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}]$

ε = Ratio poids moléculaire vapeur d'eau / air sec = $0.622 [-]$

En fonction de l'altitude, la pression est variable et peut être calculée ainsi :

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

z = Hauteur sur mer [m]

La pression de vapeur de saturation est directement reliée à la température de l'air, elle peut donc être calculée à partir de celle-ci :

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right) \quad (8)$$

La pression actuelle de vapeur peut alors être calculée à partir de l'humidité relative et la pression de vapeur de saturation :

$$e_a = \frac{H_r}{100} * e_s \quad (9)$$

H_r = Humidité relative [%]

En ce qui concerne le rayonnement, une part est réfléchi par la végétation. La différence entre le rayonnement reçu et réfléchi est appelée le rayonnement net de courte longueur d'onde et est donné par la relation suivante :

$$R_{ns} = (1 - \alpha_f) R_s \quad (10)$$

R_{ns} = Irradiation solaire net courte longueur d'onde [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$]

α_f = Albedo ou coefficient de réflexion de la couverture végétale [-]

R_s = Irradiation solaire reçue [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$]

Par ailleurs, le rayonnement net de grande longueur d'onde dépend de la température extérieure élevée à la puissance 4. Il correspond à la différence entre le rayonnement de grande longueur sortant et entrant. Il se calcule comme suit :

$$R_{nl} = \sigma * (T_{mean} + 273.16)^4 * (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left[1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right] \quad (11)$$

R_{nl} = Rayonnement net de grande longueur d'onde [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$]

σ = Constante de Stefan – Boltzmann, $2.0413 * 10^{-10}$ [$MJ.m^{-2}.h^{-1}.K^{-4}$]

R_{so} = Irradiation solaire avec un ciel dégagé [$MJ.m^{-2}.h^{-1}$]

$\frac{R_s}{R_{so}}$ = Rayonnement relatif de courtes longueurs d'onde (≤ 1), fixé à 0.5 [-]

Le rayonnement net correspond alors à la différence entre le rayonnement de courte et grande longueur d'onde. En règle générale, le rayonnement net est positif durant la journée et négatif pendant la nuit.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (12)$$

Toujours selon (Allen, 1998), le flux de chaleur du sol peut être approximé lorsque les calculs sont réalisés pour des périodes de faibles durées. Celui-ci est souvent négligé étant donné qu'il est bien plus faible que le rayonnement net.

$$\text{Durant la journée : } G = 0.1 R_n \quad (13)$$

$$\text{Durant la nuit : } G = 0.5 R_n$$

Enfin, une fois l'ensemble des paramètres réunis et le calcul de l'évapotranspiration de référence réalisé, l'évapotranspiration de la culture est obtenue par multiplication avec le coefficient de culture et de stress hydrique. À partir de l'évapotranspiration, il est possible de déterminer la chaleur latente. Celle-ci est calculée en utilisant la masse volumique de l'eau liquide et la chaleur latente de vaporisation.

$$\lambda ET = \frac{\rho_e c_e ET_R}{3.6 * 10^6} \quad (14)$$

λET = Chaleur latente liée à l'évapotranspiration [$W.m^{-2}$]

ρ_e = Masse volumique de l'eau, 1000 [$kg.m^{-3}$]

c_e = Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 20°C, $2.45 * 10^6$ [$J.kg^{-1}$]

Afin d'estimer le potentiel de refroidissement lié à l'évapotranspiration, il est essentiel de procéder aux diverses étapes de calcul présentées. Toutefois, les données nécessaires ne sont pas forcément toutes acquises et certaines peuvent présenter des imprécisions. Dans l'objectif de définir quels sont les paramètres les plus sensibles, une analyse de sensibilité est mise au point. Avant d'observer leur influence sur les résultats, il est aussi primordial de connaître l'origine de ces derniers.

Le coefficient de culture K_c , comme précisé auparavant, permet de distinguer l'évapotranspiration de référence et intègre quatre caractéristiques primaires : la hauteur de la végétation, l'albédo, la résistance stomatique et l'évaporation du sol. Ainsi, chaque culture a une valeur de coefficient différent, celui-ci variant également durant les saisons et selon les climats météorologiques. Par exemple, avec un climat plus aride et un vent plus conséquent, la valeur de K_c sera d'autant plus grande. En revanche, avec un climat davantage humide et des vents de plus faibles intensités, la valeur de K_c sera plus petite. Des valeurs de K_c peuvent être mesurées sur le terrain, mais certaines sont définies par (Allen, 1998) pour des conditions climatiques standardisées correspondant à une humidité relative journalière d'au minimum supérieure à 45% associée à un vent calme à modéré approchant les 2 $m.s^{-1}$. Le K_c est ainsi séparé en quatre phases : initial, croissance des plantes, mi-saison et fin de saison (voir figure 12).

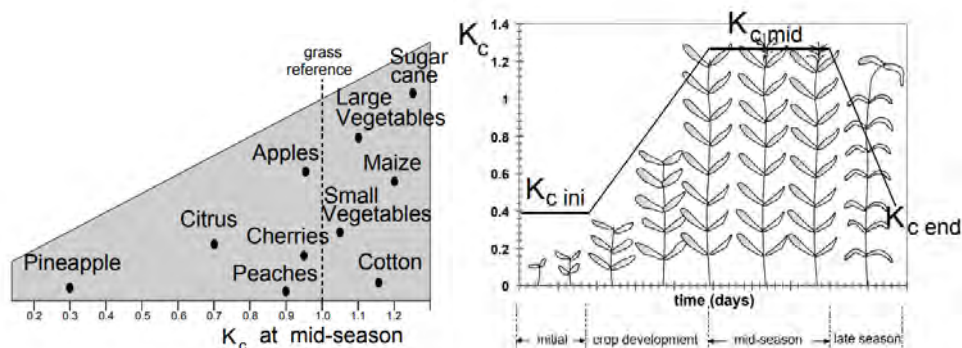


Figure 12: Coefficient de culture et évolution annuelle (Allen, 1998)

L'albédo représente la part de rayonnement solaire renvoyé vers l'atmosphère. Selon (Allen, 1998), une surface végétalisée a un albédo compris entre 0.2 et 0.25.

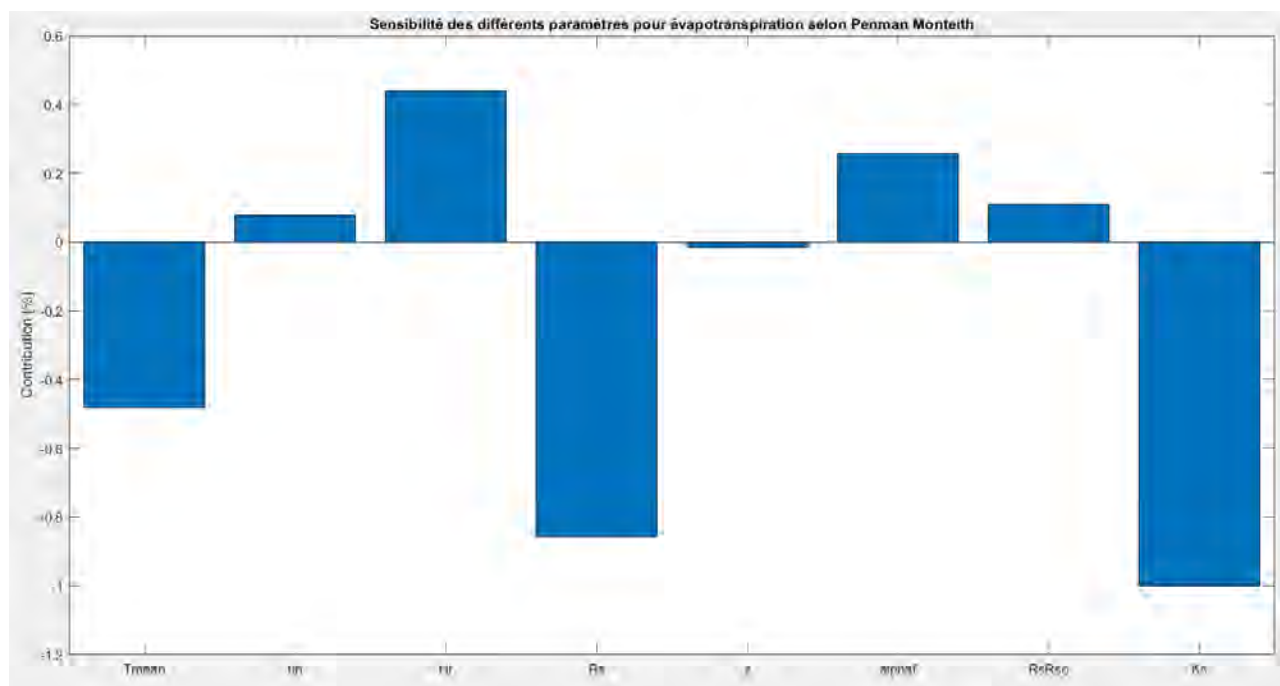
Le rayonnement relatif de courtes longueurs d'onde qui est intégré dans le calcul du rayonnement net de grande longueur d'onde. Ce dernier nécessitant des calculs laborieux considérant l'orientation du soleil, il ne sera pas calculé mais fixé constant, ce qui rend l'analyse de sensibilité d'autant plus pertinente.

7.1.2. Analyse de sensibilité évapotranspiration

Pour déterminer la sensibilité des paramètres sur l'évapotranspiration, une analyse de sensibilité est mise en place. Celle-ci consiste à proposer une situation de référence en fixant les paramètres des équations. Chacun de ceux-ci est alors varié de 1%. Ces opérations sont générées de manière automatique par un script Matlab (disponible en annexe 20), ce qui permet à l'utilisateur d'observer la sensibilité des paramètres selon diverses situations. L'écart relatif est ainsi calculé en évaluant la différence entre la situation de référence et la situation modifiée par la variation du paramètre. L'écart relatif se calcule comme suit :

$$\frac{\text{Évapotranspiration initiale} - \text{Évapotranspiration après modification}}{\text{Évapotranspiration initiale}} * 100 \quad (15)$$

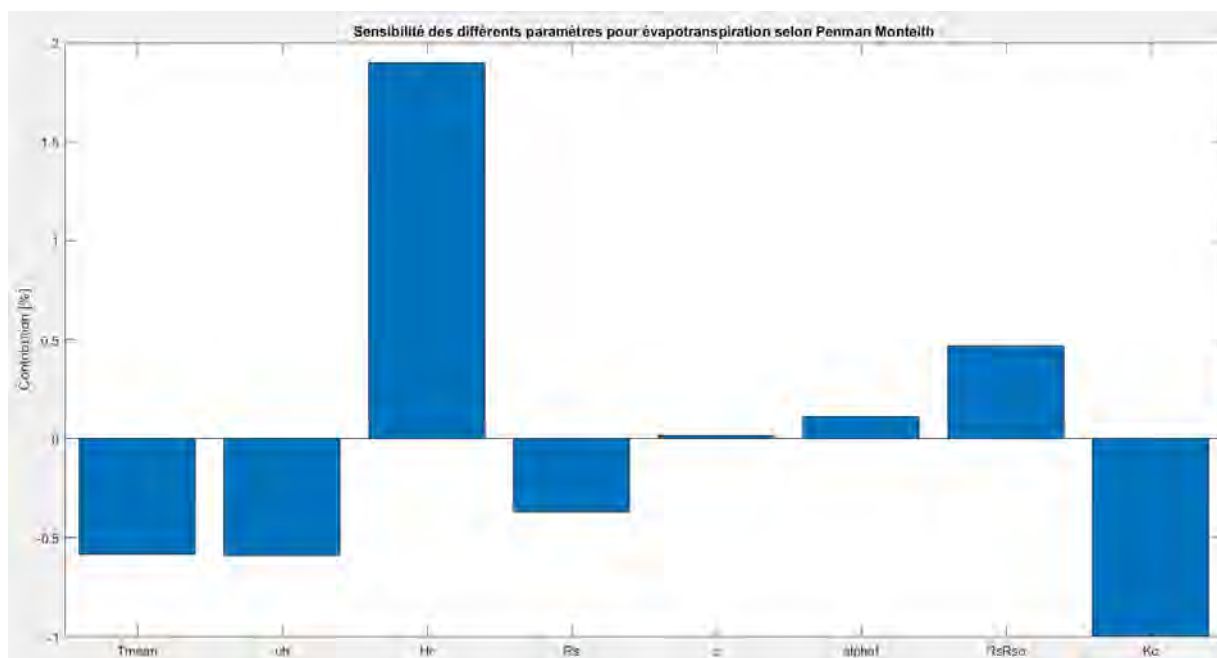
Pour cette analyse de sensibilité, l'impact observé concerne la quantité d'eau évapotranspirée. Dans l'ensemble de l'étude, le coefficient de stress hydrique est défini à 1, ce qui suppose que la végétation dispose d'une irrigation permanente. Avec une situation standard à Zurich de vent, température, rayonnement et humidité, les résultats obtenus sont les suivants. Ici, la première situation correspond au cas où le rayonnement est important (500 W.m^{-2}) durant la journée (voir graphique 2 et tableau 4), tandis que dans la deuxième situation le rayonnement est faible (50 W.m^{-2}) (voir graphique 3 et tableau 5).



Graphique 2: Analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de rayonnement important
 Source : Données des auteurs

Paramètres initiaux	Valeur	sensibilité [%]
Tmean [°C]	15	-0.48
Uh [m/s]	3	0.08
Hr [%]	70	0.43
Rs [W/m2]	500	-0.86
Z [m]	408	-0.02
Alphaf [-]	0.23	0.26
RsRso [-]	0.5	0.11
Kc [-]	0.5	-1
ETc [mm/h]	0.1373	-

Tableau 4: Paramètres pour l'analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de rayonnement important
 Source : Données des auteurs



Graphique 3: Analyse de sensibilité pour l'évapotranspiration dans une situation de faible rayonnement
 Source : Données des auteurs

Paramètres initiaux	Valeur	Sensibilité [%]
Tmean [°C]	15	-0.56
Uh [m/s]	3	-0.58
Hr [%]	70	1.90
Rs [W/m2]	50	-0.37
Z [m]	408	0.02
Alphaf [-]	0.23	0.11
RsRso [-]	0.5	0.48
Kc [-]	0.5	-1
ETc [mm/h]	0.0312	-

Tableau 5: Paramètres pour l'analyse de contribution pour l'évapotranspiration dans une situation de faible rayonnement
 Source : Données des auteurs

Par rapport aux graphiques de sensibilité, il est possible d'observer que le coefficient de culture a un impact direct sur l'évapotranspiration (sensibilité de 1%) étant donné qu'il multiplie l'évapotranspiration de référence. Au vu de son importante influence sur les résultats, il convient d'avoir une précision accrue et il peut se révéler pertinent d'intégrer la saisonnalité à ce coefficient pour le calcul de l'évapotranspiration. Par ailleurs, lors d'une situation avec un rayonnement important, le rayonnement est le paramètre qui a (après le coefficient de culture) le plus de sensibilité (0.86%) tandis que la température et l'humidité présentent une sensibilité semblable (0.48 et 0.43%). La vitesse de vent quant à elle présente le moins de sensibilité (0.08%).

En revanche, avec un faible rayonnement, la tendance s'inverse. Le rayonnement a une faible sensibilité, à la différence de l'humidité qui a une sensibilité conséquente et atteint 1.9%. Également, la vitesse de vent a cette fois-ci une sensibilité plus grande que la température. Cependant, même si les sensibilités sont différentes, l'évapotranspiration liée reste très faible par rapport à la première situation (0.0312 mm/h contre 0.1373 soit un facteur 4.5), ce qui montre que le rayonnement global semble être le paramètre majeur d'influence dans le cadre de l'évapotranspiration. Il est donc possible d'estimer dans les deux situations, la chaleur latente résultante (potentiel de refroidissement), soit 93 W.m⁻² pour la première situation et 21 W.m⁻² pour la deuxième.

Toutefois, dans les deux cas, en ce qui concerne les valeurs issues de la littérature comme l'albédo ou des valeurs approximées comme le rayonnement relatif de courtes longueurs d'onde, celles-ci semblent avoir relativement peu de sensibilité en comparaison avec les données météorologiques (qui nécessitent une grande précision). Cependant, des études supplémentaires doivent être réalisées pour comprendre qu'elle est l'impact de l'approximation du rayonnement relatif de courtes longueurs d'onde. Dans une prochaine étude, il pourrait se révéler pertinent de remplacer cette approximation par le calcul effectif.

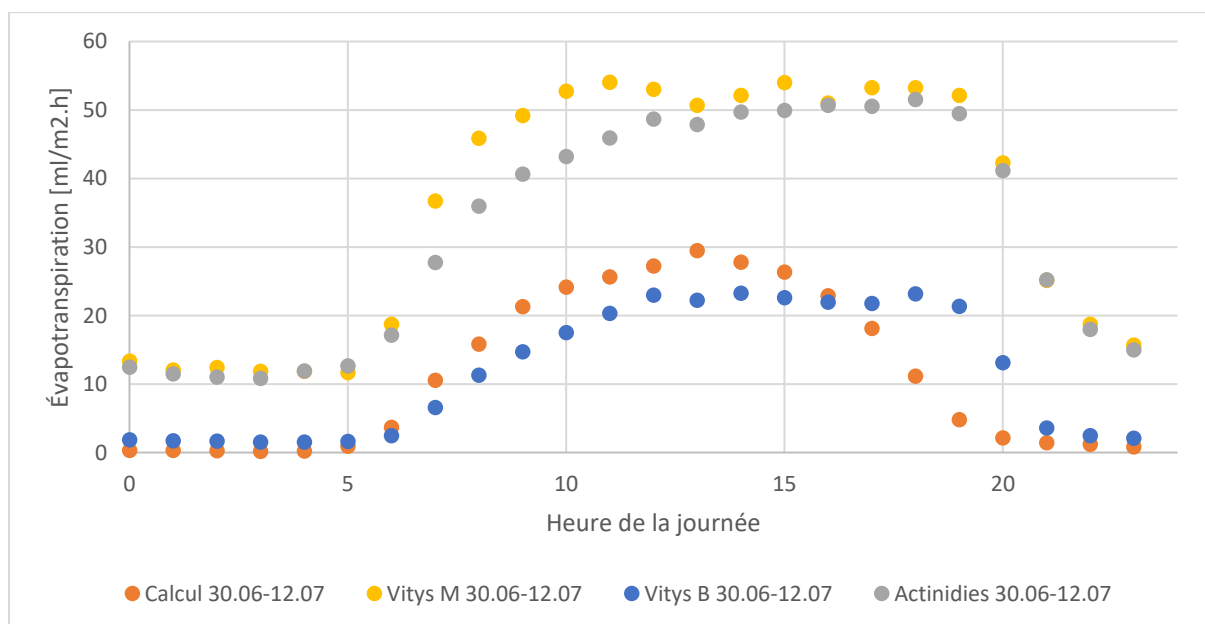
7.1.3. Comparaison calcul et mesure évapotranspiration

Afin de pouvoir évaluer la pertinence de l'équation de Penman-Monteith, il est primordial d'effectuer une comparaison entre des valeurs d'évapotranspiration calculées et mesurées. À cet effet, au sein d'une collaboration entre le département de conservation de la nature de Zurich et l'université des sciences appliquées, des mesures concernant le débit de sève ont été entreprises (zhaw, 2021). Celles-ci ont été réalisées à deux endroits distincts : la pépinière municipale (du 30.06.2020 au 12.07.2020) et au « MFO-Park » (du 14.07.2020 au 31.07.2020) (voir *figure 13*). La représentation des résultats comprend l'évolution du débit de sève journalier et repose sur la moyenne horaire de l'ensemble de la période de mesure. Les espèces concernées sont des plantes grimpantes dont *Actinidia arguta* « Issai », *Vitis* « Seyval Blanc » et *Vitis labrusca* « Magliasina » implantées à la pépinière et *Glycine sinensis*, Rose « Filipes Kifsgate » et Rose *Wichuraiana-Ramblerrose* « Albertine » au parc MFO.

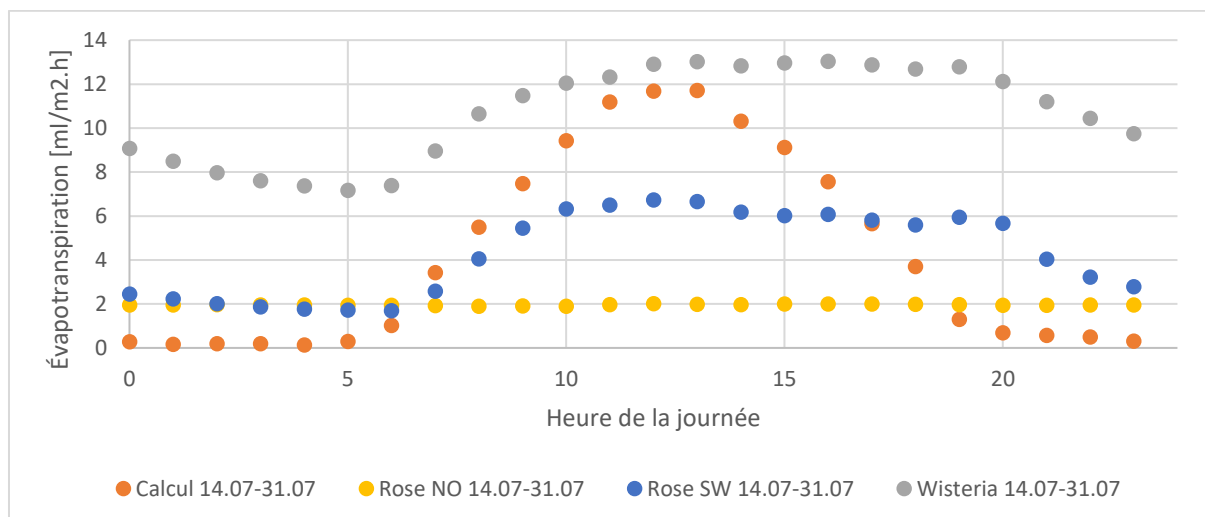


Figure 13 : Sites de mesure à Zurich A=Pépière B=Parc MFO (zhaw, 2021)

À l'aide d'un fichier de mesure à Zurich en 2020, il a été possible d'extraire les valeurs de rayonnement, de vitesse de vent, d'humidité relative et de température sur les périodes concernées, ce qui a permis de calculer l'évapotranspiration potentielle. Ici, il a été fait l'hypothèse que l'évapotranspiration correspond directement au débit de sève mesuré. Cette évapotranspiration est alors moyennée par heure sur les mêmes périodes de mesure et multipliée par une valeur de coefficient de culture pour y être comparée aux débits de sève mesurés. Les résultats obtenus sont les suivants avec un K_c de 0.055 pour la période 30.06.2020 au 12.07.2020 (voir graphique 4) et un K_c de 0.022 pour la période 14.07.2020 au 31.07.2020 (voir graphique 5).



Graphique 4: Calcul d'évapotranspiration et mesures débit de sève pour la période 30.06.2020 au 12.07.2020
 Source : Données des auteurs adaptées de (zhaw, 2021)



Graphique 5: Calcul d'évapotranspiration et mesures débit de sève pour la période 14.07.2020 au 31.07.2020
 Source : Données des auteurs adaptées de (zhaw, 2021)

Ces graphiques permettent de montrer que les résultats issus de l'équation de Penman-Monteith sont plutôt proches (au niveau du comportement journalier) des valeurs mesurées de débits de sève notamment pour le cas de la pépinière. En effet, l'équation semble donner une bonne approximation durant la journée, même si le soir l'évapotranspiration baisse plus rapidement que la mesure. Par ailleurs, l'évapotranspiration calculée est aussi souvent proche de 0 le matin et le soir, alors que ce n'est pas le cas des valeurs mesurées. Il faudrait également veiller à considérer les imprécisions liées aux mesures.

Par ailleurs, étant donné que les sites ne sont pas situés au même endroit, il est possible que les conditions météorologiques ne soient pas identiques, ce qui pourrait expliquer des différences entre les deux situations (pépinière et parc MFO). Ces résultats montrent aussi la différence de capacité d'évapotranspiration entre les espèces végétales où les plus productives sont Vitis M pour la pépinière et Wisteria (glycine) pour le parc MFO. Ces différences impliquent directement des capacités de refroidissement variées, où Vitis M assure un refroidissement moyen journalier de 22.1 W.m^{-2} contre 7.3 W.m^{-2} pour la glycine. Dans le cas de Vitis M, le refroidissement n'est pas négligeable, puisque sur une surface de 200 m^2 , la puissance de refroidissement équivalente est d'environ 4.5 kW . Également, la glycine est capable en une journée d'avoir un taux d'évaporation équivalent à 3.75 climatiseurs (3.5 kWh) de par sa superficie de 75 m^2 . Ceci met en évidence l'importance du choix des espèces végétales dans la mise en place d'une façade végétalisée lorsque des performances de refroidissement sont recherchées.

Il est alors aussi intéressant de se pencher sur les coefficients de culture. Ceux-ci sont déterminés comme étant le ratio entre les mesures de débit de sève et l'évapotranspiration potentielle journalière. Ces coefficients sont les suivants (voir *tableau 6*) :

Vitis M 30.06-12.07	Vitis B 30.06-12.07	Actinidies 30.06-12.07	Rose NO 14.07-31.07	Rose SW 14.07-31.07	Wisteria 14.07-31.07
Kc [-]	Kc [-]	Kc [-]	Kc [-]	Kc [-]	Kc [-]
0.17	0.055	0.15	0.01	0.022	0.055

Tableau 6: Coefficients de cultures multipliant l'évapotranspiration potentielle pour être adaptés aux mesures
 Source : Données des auteurs adaptées de (zhaw, 2021)

Ainsi, il est possible de remarquer que sur un même site, les coefficients de culture peuvent varier, puisque dans la situation étudiée, celui-ci vaut 0.17 pour Vity M, 0.15 pour Actinidies contre seulement 0.055 pour Vity B. Ces coefficients reflètent directement la capacité de refroidissement des espèces végétales. D'autre part, ces coefficients sont aussi différents selon les sites, ce qui peut être expliqué d'une part par la catégorie d'espèce végétale choisie, mais aussi par la qualité d'irrigation. En effet, dans la pépinière, l'irrigation est constante, tandis que dans le parc MFO, l'arrosage est irrégulier et est assuré par un gardien qui ouvre la vanne manuellement. Ainsi, il aurait pu être pertinent de réintégrer un coefficient de stress hydrique. Ces résultats montrent donc l'importance de l'irrigation, qui insuffisante, peut générer un stress hydrique et baisser considérablement les performances de refroidissement des plantes.

7.2. Réduction de température par évapotranspiration

7.2.1. Méthode développée lors des précédents travaux de bachelor

Afin de quantifier la variation de température liée à l'évapotranspiration, un transfert d'énergie est effectué entre l'air environnant (chaleur sensible) et la végétation (chaleur latente par évapotranspiration). Il s'agit de la méthode qui a été développée et employée dans les travaux de Bachelor précédents (Tran, 2020), (Merz, 2021). Cependant, il est possible d'observer que cette équation possède de nombreux facteurs multiplicatifs nécessitant d'être estimés. On peut citer les coefficients de culture [-] et de stress hydrique [-] permettant l'obtention de l'évapotranspiration réelle, le coefficient de proportion d'air [-] incluse dans la végétation, le taux d'évapotranspiration [-], ou encore le facteur de renouvellement d'air [-]. La présence de ces facteurs multiplicatifs montre que l'équation est sensible et peut rapidement être rendue imprécise si ces coefficients ne sont pas mesurés et justifiés.

$$\Delta T = \frac{\lambda ET * 3600}{f e_f \rho_a c_a R_p R_a} \quad (16)$$

ΔT = Différence de température [°C]

e_f = Épaisseur de la végétation [m]

ρ_a = Masse volumique de l'air, 1.204 [kg.m⁻³]

R_p = Ratio de la proportion d'air par rapport à la végétation [-]

f = Taux d'évapotranspiration [-]

R_a = Renouvellement d'air [h⁻¹]

D'autre part, cette équation tient compte uniquement de l'échange entre la végétation et l'air situé à l'intérieur de celle-ci. Or, le refroidissement de l'air se produit également aux alentours de la végétation notamment par phénomène de convection. L'air abaissé en température correspond ainsi à l'air inclus dans la végétation, ce qui signifie qu'avec une végétation infiniment petite, la réduction de température est infiniment grande, ce qui pose un problème de logique. Il est donc possible de constater que cette équation possède des limites. Cependant, elle ne sera pas pour autant délaissée, puisqu'elle sera par la suite comparée à des mesures et pourra toujours être employée dans le cadre du calcul d'un bilan énergétique.

Ainsi, dans l'objectif d'utiliser une équation alternative, la température extérieure d'un mur végétalisé est approximée en tant que température de feuille.

7.2.2. Nouvelle méthode de réduction de température

Cette équation intègre dans le calcul le bilan énergétique total de la feuille faisant intervenir le rayonnement absorbé ainsi que les phénomènes de convection et d'évapotranspiration (part importante du bilan d'énergie). Cette approximation peut sembler cohérente avec les façades végétalisées directes, ce qui est moins le cas avec la végétalisation indirecte, où la présence d'une couche d'air implique une température différente entre la végétation et le mur. Également, associer une même température de feuille à l'ensemble d'un mur n'est pas tout à fait exact, puisqu'il s'agit d'une part d'une canopée végétale impliquant des conductances différentes, et celle-ci se retrouvant aussi rarement uniforme sur une même surface. Ainsi, pour pouvoir évaluer la pertinence de cette équation, cette dernière (au même titre que la première équation développée (lors des précédents travaux de bachelor) sera par la suite comparée à des mesures de température. Le calcul de température reprend les travaux de (Campbell, 2000). Certains termes de cette équation peuvent être repris du calcul de l'évapotranspiration, c'est pourquoi ils ne sont pas détaillés. Cette équation permet ainsi de calculer la température surfacique de la feuille et ici l'objectif est d'obtenir la température de feuille à l'intérieur du feuillage. La différence essentielle avec une feuille située à l'extérieur du feuillage est le rayonnement, puisqu'une feuille située à l'extrémité de la végétation aura tendance à absorber davantage le rayonnement solaire, ce qui conduit à augmenter sa température. Les feuilles plus proches du mur absorbent alors un rayonnement plus faible. C'est ce qui est introduit dans le rayonnement net isothermal, où on suppose que seulement 20% du rayonnement global participe au bilan énergétique. Ce paramètre peut ainsi être adapté en fonction de la végétation et de son épaisseur. Pour être également plus précis, il faudrait intégrer les variations de conductances ainsi que la modification potentielle du vent pénétrant dans la végétation. Plusieurs limites apparaissent déjà à propos de cette équation. En effet, le rayonnement est un paramètre qui augmente ici la température, alors que par évapotranspiration, cette dernière devrait en être normalement diminuée. Les deux équations ainsi présentées ont donc des avantages et inconvénients, et il semble difficile d'obtenir une très grande précision par leur utilisation. À cet effet, dans cette étude, l'objectif fixé ne sera pas d'avoir une description très précise de la réduction de température, mais plutôt une représentation du comportement de la végétation donnant un ordre de grandeur. Le calcul de température de feuille est le suivant :

$$T_f = T_{mean} + \frac{\gamma'}{\frac{\Delta}{P} + \gamma'} \left[\frac{Q_{leaf}}{g_{Hr} c_{pa}} - \frac{e_s - e_a}{P * \gamma'} \right] \quad (17)$$

T_f = Température de feuille [°C]

γ' = Constante psychrométrique apparente [°C⁻¹]

c_{pa} = Chaleur spécifique à pression constante, 29.3 [J.mol⁻¹.°C⁻¹]

Q_{leaf} = Rayonnement isothermal net appliqué à une façade végétale [W.m⁻²]

g_{Hr} = Conductance convective – radiative [mol.m⁻².s⁻¹]

Le rayonnement net isothermal appliqué à une façade végétale peut être calculé comme suit :

$$Q_{leaf} = R_s * ab_f * c_{rayo} + \varepsilon_f * \sigma_2 * F * (T_{sky}^4 + T_{air}^4) - \varepsilon_f * \sigma_2 * T_{air}^4 \quad (18)$$

$ab_f = \text{Absorptivité de feuille}, 0.5 [-]$

$\sigma_2 = \text{Constante de Stephann Boltzmann}, 5.67 * 10^{-8} [W.m^{-2}K^{-4}]$

$\varepsilon_f = \text{Émissivité feuille}, 0.99 [-]$

$F = \text{Facteur de vision}, 0.5 [-]$

$c_{rayo} = \text{Coefficient de rayonnement appliqué, fixé à } 0.2 [-]$

$T_{air} = \text{Température de l'air } [K]$

$T_{sky} = \text{Température du ciel } [K]$

La température du ciel est alors calculée comme ceci :

$$T_{sky} = T_{air} * \left[0.8 + \frac{T_{dew} - 273}{250} \right]^{0.25} \quad (19)$$

$T_{dew} = \text{Température de rosée } [K]$

Il est alors nécessaire de déterminer la température de rosée, calculée ici selon la méthode Magnus-Tetens :

$$T_{dew} = \frac{243.04 * \left[\ln\left(\frac{Hr}{100}\right) + \frac{17.625 * (T_{air} - 273.15)}{243.04 + T_{air} - 273.15} \right]}{17.625 - \left[\ln\left(\frac{Hr}{100}\right) + \frac{17.625 * (T_{air} - 273.15)}{243.04 + T_{air} - 273.15} \right]} \quad (20)$$

À partir de la largeur des feuilles, il est possible de calculer la dimension caractéristique :

$$d = 0.7 * l_f \quad (21)$$

$d = \text{Dimension caractéristique des feuilles } [m]$

$l_f = \text{Largeur des feuilles } [m]$

Il est nécessaire de tenir compte des conductances relatives à la conduction pour le transfert de chaleur et de vapeur :

$$g_{Ha} = 1.4 * 0.135 \sqrt{\frac{u_2}{d}} \quad (22)$$

$$g_{va} = 1.4 * 0.147 \sqrt{\frac{u_2}{d}} \quad (23)$$

$g_{Ha} = \text{Conductance pour la couche limite concernant le transfert de chaleur } [mol.m^{-2}.s^{-1}]$

$g_{va} = \text{Conductance pour la couche limite concernant le transfert de vapeur } [mol.m^{-2}.s^{-1}]$

La conductance convective radiative peut être calculée comme suit :

$$g_{Hr} = g_{Ha} + g_r \quad (24)$$

$g_r = \text{Conductance radiative, estimée constante à } 0.18 [mol.m^{-2}.s^{-1}]$

Il est ici fait l'hypothèse que les feuilles présentent une conductance adaxiale nulle et une conductance abaxiale de $0.5 [mol.m^{-2}.s^{-1}]$

$$g_v = \frac{0.5 * 0.5 * g_{va}}{0.5 + g_{va}} \quad (25)$$

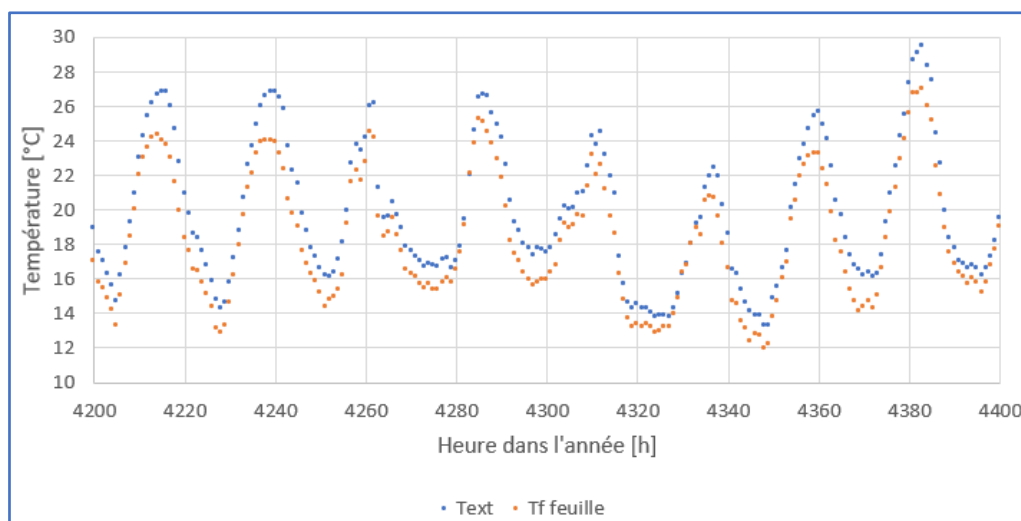
g_v = Conductance pour le transfert de vapeur [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

Enfin, la constante psychrométrique apparente est calculée ainsi :

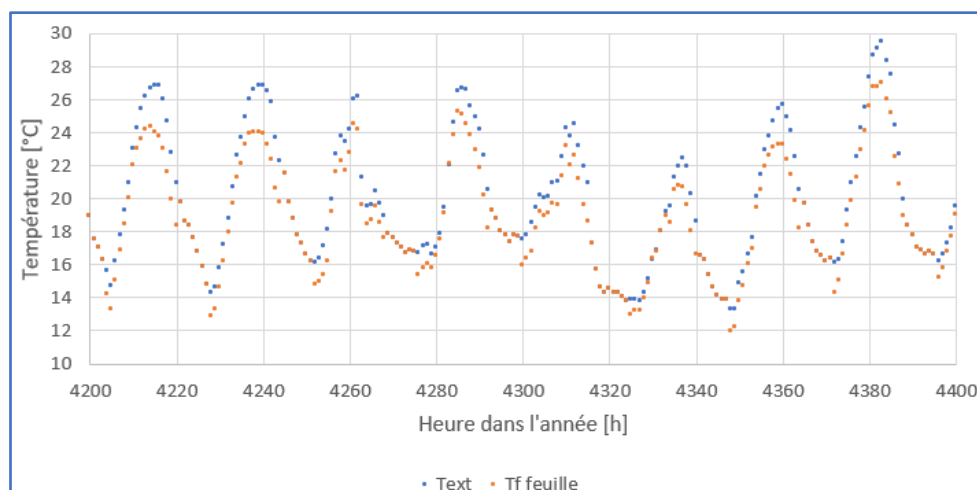
$$\gamma' = 6.66 * 10^{-4} * \frac{g_{Hr}}{g_v} \quad (26)$$

Ici, sont analysées essentiellement des plantes grimpantes à feuillage caduc permettant de garantir un refroidissement uniquement dans les périodes printanières et estivales tout en maximisant l'apport solaire en hiver et automne. À cet effet, à partir des données météorologiques (utilisées pour les calculs d'évapotranspiration à Zurich) et des équations précédentes, la température de feuille a pu être calculée. Ainsi, celle-ci est uniquement appliquée pour les périodes souhaitées (printemps/été), ce qui signifie qu'en dehors de ces saisons, la température correspond à la température extérieure. Par ailleurs, il a été donné l'hypothèse que la température du feuillage ne peut pas descendre en dessous de 0°C si la température extérieure n'est pas elle aussi en dessous de 0°C. Ainsi, si la température extérieure est inférieure à 0, alors la température de feuille sera égale à celle-ci.

Également, il a pu être observé que l'équation surestimait le refroidissement de la végétation durant la matinée et le soir (voir *graphique 6*). Ainsi, il a été choisi de mettre en relation l'équation avec le rayonnement, où à présent, lorsqu'un rayonnement sera présent ($>1\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), le calcul de température de feuille sera utilisé, tandis qu'avec un rayonnement nul, la température issue du feuillage sera définie comme étant égale à la température extérieure. Les graphiques suivants montrent la différence de baisse de température en fixant le rayonnement comme référence au refroidissement et en intégrant une largeur de feuille de 10cm. Ces graphiques mettent en évidence, que le rafraîchissement la nuit et la matinée est moins surestimé, mais qu'il n'est pas totalement effacé (voir *graphique 7*). Cependant, cette limitation est jugée suffisante selon la précision recherchée dans cette étude.

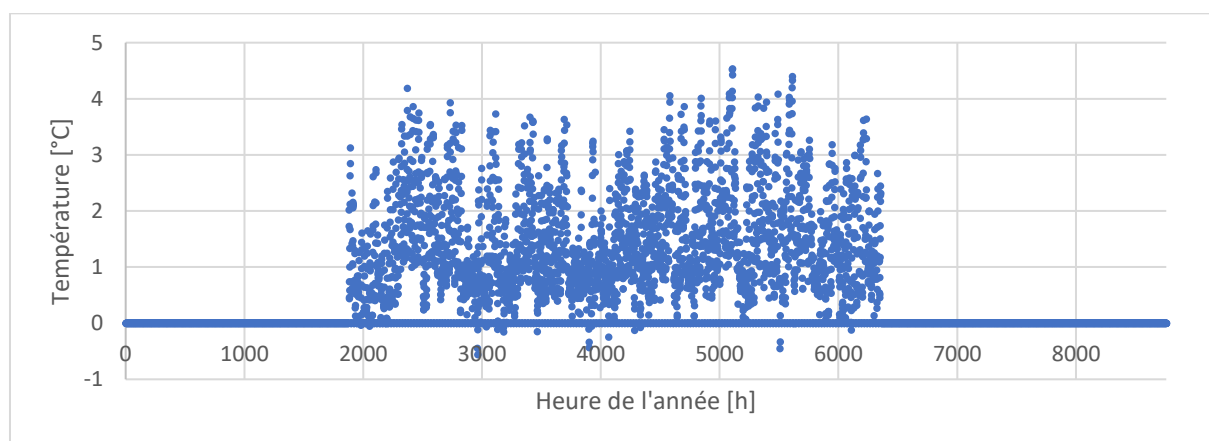


Graphique 6: Refroidissement induit par la végétation sans intégration du rayonnement
 Source : Données des auteurs



Graphique 7: Refroidissement induit par la végétation avec intégration du rayonnement
 Source : Données des auteurs

Une illustration de l'influence sur les températures annuelles pour la configuration similaire est présentée ci-dessous. Il s'agit ici de la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la végétation calculée à partir des mesures de Zurich 2020 (voir graphique 8).



Graphique 8: Différence de température entre l'extérieur et le feuillage avec une largeur de feuille de 10cm
 Source : Données des auteurs

Ainsi, il est possible d'observer que la température du feuillage est variable tout au long des saisons. Sur la période printemps/été, la moyenne équivaut à une différence d'environ 0.91°C tandis que la différence maximale est d'environ 4.53°C .

Pour avoir une idée de ce que représente cette variation de température, une analogie peut être effectuée avec la variation d'altitude. En effet, si l'on se trouve à Zurich (400m), en prenant une baisse de 1°C pour 150m d'altitude (selon ISA), c'est comme si l'on se trouvait en moyenne à 550 m d'altitude et au maximum à 1100m soit approximativement dans les hauts de Savièse (canton du Valais). La végétation présente donc l'avantage, en été d'avoir des conditions similaires à la montagne, tandis qu'en hiver, les conditions de plaine sont retrouvées. Ces baisses de température rejoignent les études citées dans l'état de l'art où la végétation est capable de réduire la température notamment par le biais de l'évapotranspiration.

Cette réduction de température peut tout de même être comparée avec les mesures effectuées à Zurich, même s'il s'agit d'un mur vivant impliquant un comportement thermique et aéraulique différent.

7.2.3. Comparaison mesures réalisées à Zurich

Ainsi, les températures ont été enregistrées sur plusieurs périodes durant une journée et une nuit d'été grâce à une caméra thermique (voir *figure 14*). Ces images permettent de montrer qu'en moyenne pendant la journée, la différence de température de surface entre le mur non couvert et couvert équivaut à 6.19 °C, 4.73°C, 3.25°C pour les heures respectives : 9h15, 13h45, 17h38.

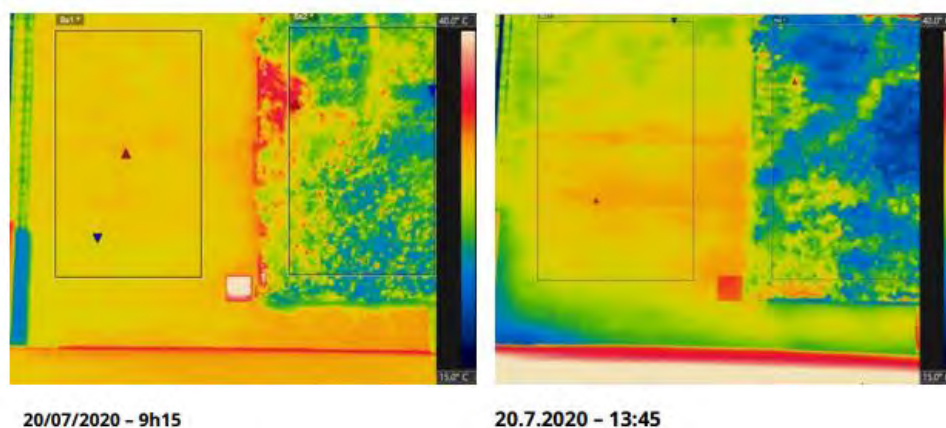
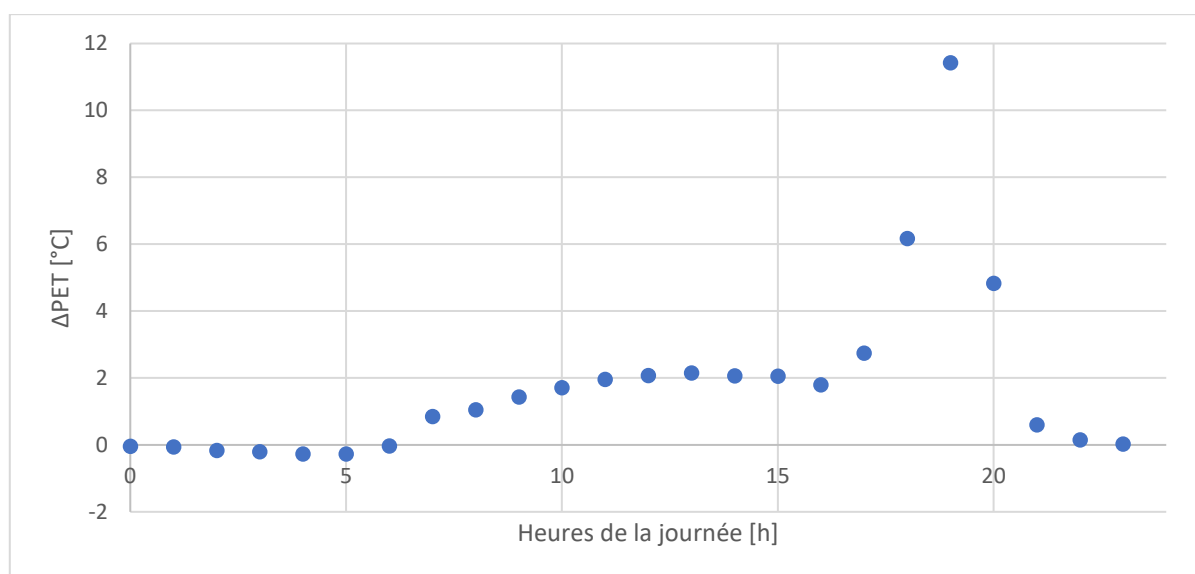


Figure 14: Imagerie thermique d'un mur vivant et d'une façade nue (zhaw, 2021)

Des mesures de PET ont également été menées au Zürich City Garden Center pour la période du 17 juillet 2020 au 31 juillet 2020. Cet indicateur signifiant « Température Équivalente Physiologique » est une température liée au bilan énergétique humain, donnant une indication sur le niveau de confort thermique d'un individu selon un environnement de référence. (Walther, 2018) Cette étude montre qu'en moyenne sur la journée, avec la végétalisation, le PET est réduit de 1.75 °C et atteint un maximum de 11.4°C, ce qui renforce l'impact de la végétalisation dans le refroidissement de la température environnante (voir *graphique 9*).



Graphique 9: Différence de PET mesurée à Zurich avec et sans végétalisation
 Source : Données des auteurs adaptées de (zhaw, 2021)

7.3. Mesures de température

7.3.1. Appareils de mesures et site d'acquisition

Dans l'objectif de comparer les résultats obtenus de manière théorique concernant la réduction de la température, il a été fait le choix de procéder à des mesures. À cet effet, des appareils de type Data Logger ont été utilisés (n°161128727 et n°161128726), de la marque HIOKI (LR 5001), couplés avec un capteur d'humidité LR9504 de 40 mm. Ceux-ci permettent l'acquisition de température et d'humidité relative. La plage de température maximale tolérée se situe entre -40°C et 85°C tandis que pour l'humidité relative, cette plage est comprise entre 0 et 100%. Cependant, afin de garantir une certaine précision dans la mesure de température et d'humidité (combinée), le fabricant préconise de se situer dans une plage de 10 à 50°C pour la température, et pour l'humidité avoir une valeur inférieure à 80% pour l'enregistrement et 90% pour le capteur. Également, en règle générale, dans une plage de mesure de température entre -40°C et 70°C, l'erreur est en dessous de 1 °C, tandis que pour l'humidité relative, l'imprécision peut atteindre jusqu'à 15%. Ces appareils ont ainsi été paramétrés pour enregistrer les données à intervalles de 1 minute. Après acquisition, ces données peuvent alors être récupérées dans un fichier CSV à partir du module LR 5091 et sa prise USB. Une illustration des appareils utilisés est présentée ci-dessous (voir *figure 15*) :



Figure 15: Data Logger Hioki LR 5001, LR 9504, LR 5091
 Source : Données des auteurs

Les données ont été enregistrées sur cinq jours (respectivement 22.07.2022, 24.07.2022, 25.07.2022, 27.07.2022 et 28.07.2022). Le site choisi pour les mesures est une villa située à Chens-sur-Léman (France). Comme il s'agit du lieu de résidence, il est ainsi plus facile de gérer les appareils (possibilité de rapidement les retirer en cas d'averse). L'emplacement étudié est situé sur la façade sud de la villa au niveau d'un jasmin grimpant (épaisseur = 60 cm, largeur de feuille = 1 cm). Le Hioki n°161128726 a été placé à 5-10 cm du mur, à 2m du sol, à l'intérieur de la végétation, tandis que le second Hioki n°161128727 a été positionné à l'extérieur à 30 cm de la végétation à 2m du sol (voir *figure 16*).

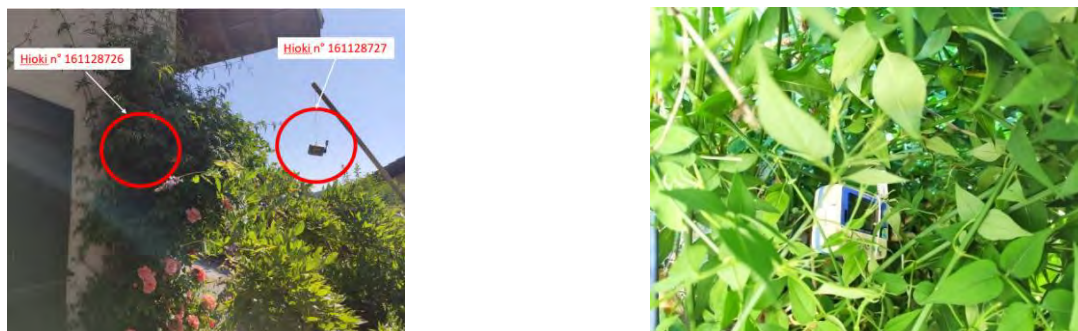
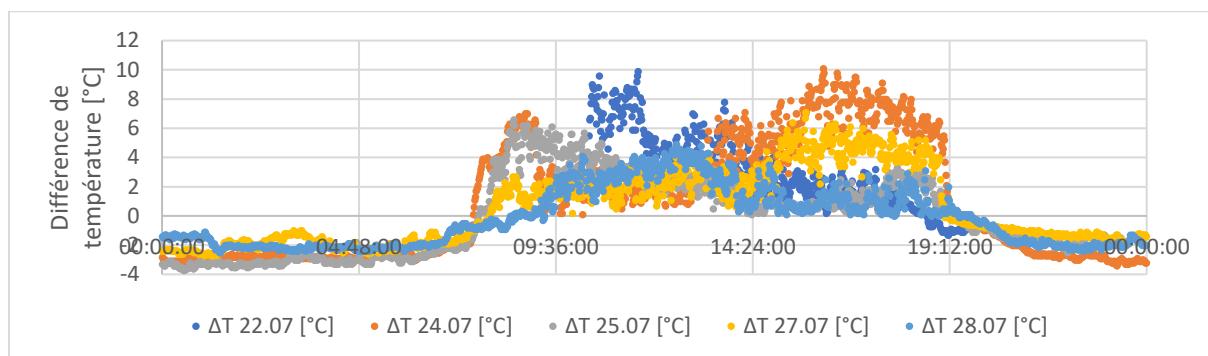


Figure 16 : Emplacement de mesure et disposition des appareils (à gauche), Hioki dans le feuillage (à droite)
 Source : Données des auteurs

7.3.2. Résultats des mesures

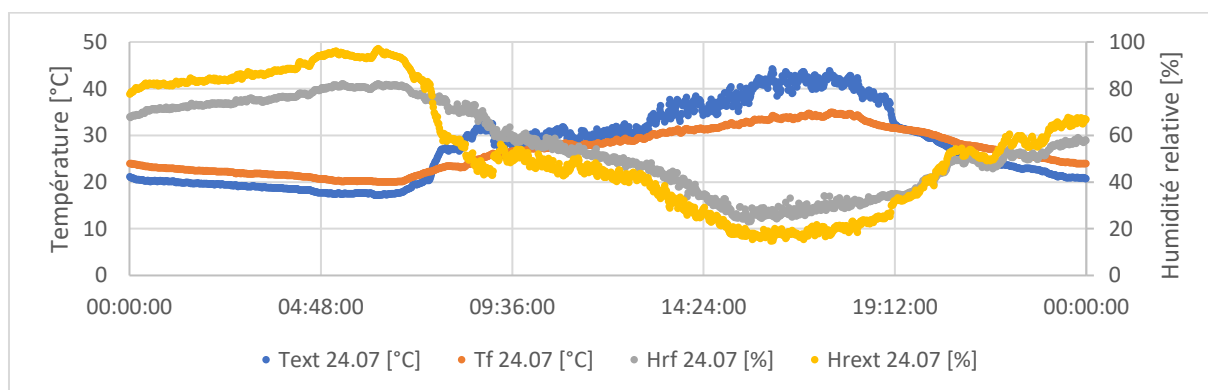
Les mesures de température et d'humidité relative ont été réalisées et la différence de température entre l'extérieur du feuillage et l'intérieur a pu être calculée pour les cinq jours (voir *graphique 10*) :



Graphique 10: Différence de température entre l'extérieur du feuillage et l'intérieur calculée sur cinq jours
 Source : Données des auteurs

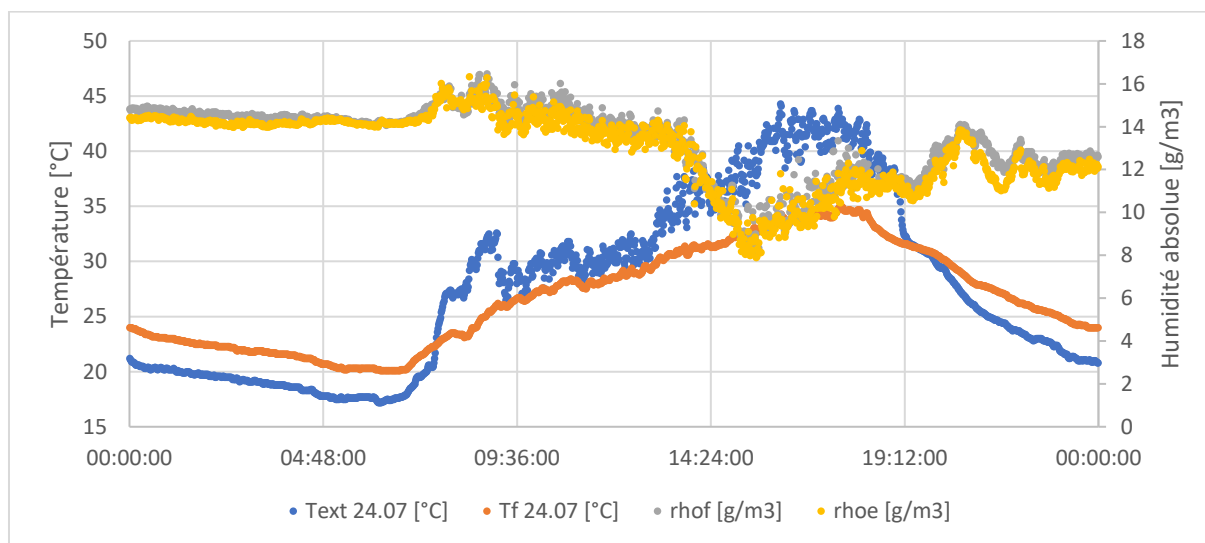
Les mesures permettent ainsi de montrer qu'en journée, la végétalisation est capable de réduire fortement la température (jusqu'à 10°C observé le 24.07 et 22.07). Seulement, ce n'est pas le cas du matin ou du soir, où la température extérieure est plus élevée que celle du feuillage (environ 3°C). Ainsi, sur la journée en moyenne, la température n'est pas forcément plus basse à l'intérieur du feuillage qu'à l'extérieur. En effet, la différence moyenne sur la journée du 24.07 est de 0.92°C, -0.04°C pour la journée du 25.07, 0.52°C pour la journée du 27.07.2022 et -0.09°C pour la journée du 28.09.2022. On peut expliquer ces phénomènes dans la mesure où durant la journée, l'évapotranspiration induit un rafraîchissement (visible également par l'augmentation de l'humidité relative), tandis que le soir, le mur restitue de la chaleur par son inertie.

Ainsi, on comprend qu'avec un matériau disposant d'une inertie plus faible (comme le bois par exemple), cette redistribution de chaleur, la nuit et le matin serait moins prononcée. D'autre part, la période de mesure s'est déroulée dans des conditions propices à l'évapotranspiration, avec de grandes températures extérieures et du rayonnement ce qui montre le plein potentiel de la végétation (transpiration maximale). Il est également intéressant de voir à quel point la température du feuillage est corrélée à la température extérieure, mais qu'elle reste moins sensible (voir *graphique 11*).



Graphique 11: Variation de température et d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du feuillage sur la journée du 24.07.2022
 Source : Données des auteurs

Par ailleurs, en ce qui concerne l'humidité relative, il peut être observé que celle-ci est plus importante dans le feuillage dans le milieu de la journée en comparaison à l'extérieur (voir *graphique 11*). Cependant, cette situation s'inverse dans la nuit. L'humidité absolue peut également être représentée au lieu de l'humidité relative, ne dépendant pas de la température (voir *graphique 12*). Sur la journée du 24.07.2022, les résultats obtenus sont les suivants. Ils montrent qu'en moyenne sur une journée la quantité d'eau contenue dans l'air est légèrement plus élevée dans le feuillage qu'à l'extérieur (0.4 g.m^{-3} supplémentaire en moyenne), mais cette différence reste minime. Ce résultat est un point extrêmement positif dans le cadre de la végétalisation d'un bâtiment, ce qui signifie que l'humidité intérieure et donc la qualité de vie n'est pas détériorée par la présence d'une humidité trop conséquente liée à cette végétalisation.

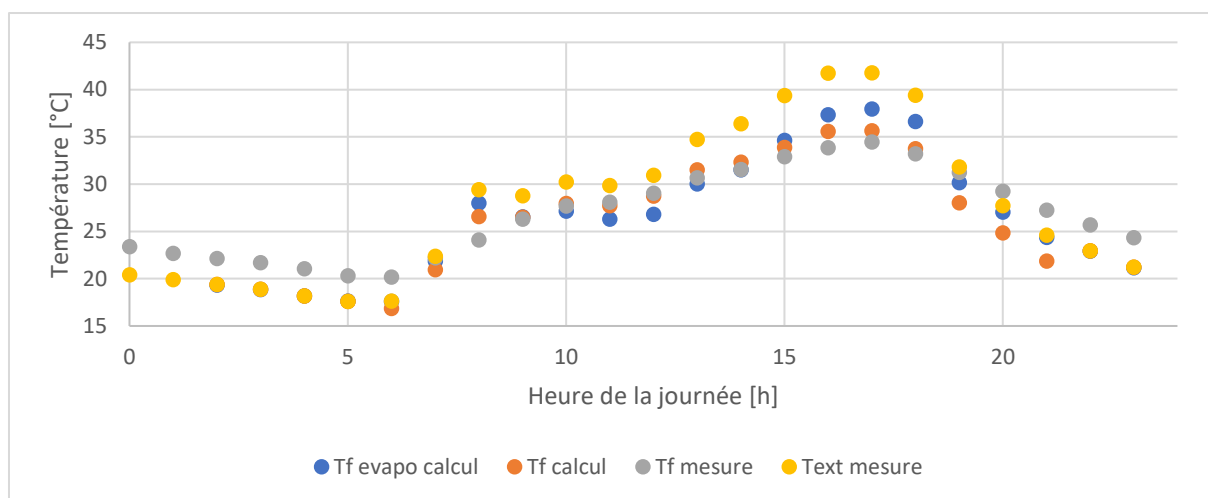


Graphique 12: Variation de température et d'humidité absolue à l'intérieur et à l'extérieur du feuillage sur la journée du 24.07.2022

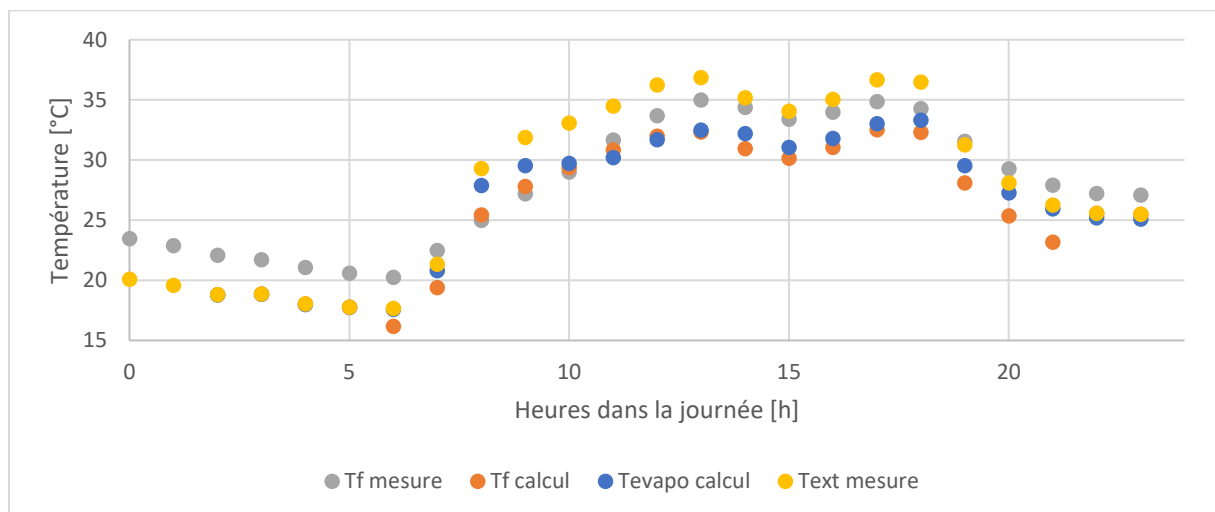
Source : Données des auteurs

7.3.3. Comparaison mesures avec équations développées

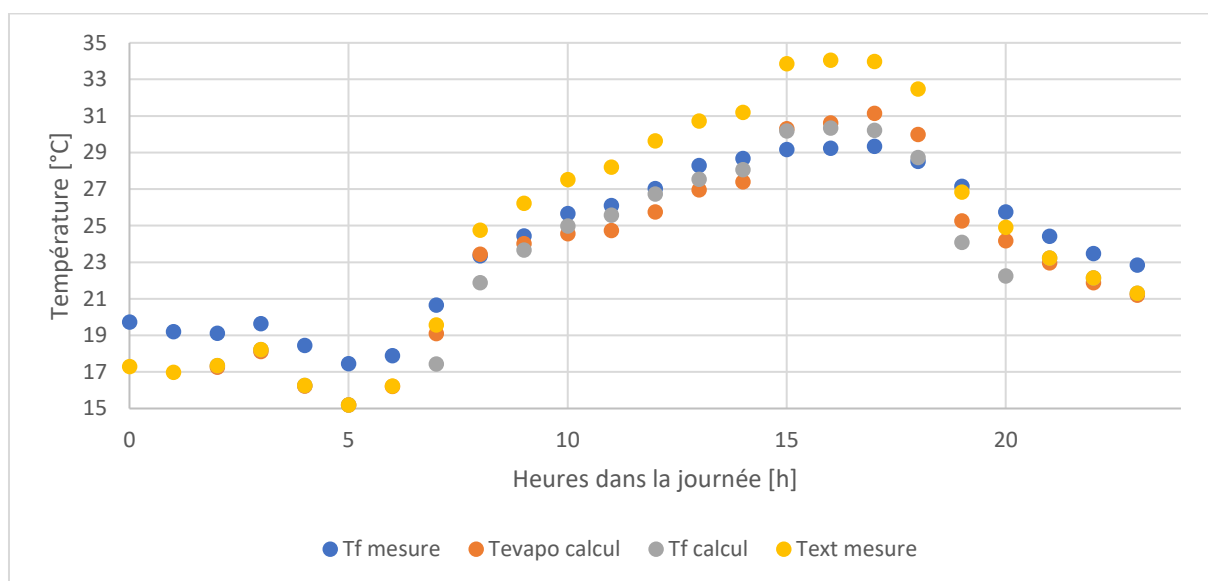
Pour comparer les méthodes de calcul de variation de température, la température sous le feuillage est calculée selon les deux approches (évapotranspiration et feuille) et inclut une moyenne horaire. À cet effet, pour les jours considérés (24.07.2022, 25.07.2022 et 27.07.2022), les données issues des instruments de mesure (température et humidité) ont été recueillies. Celles-ci ont été complétées par des données extraites de la station météorologique de l'Hepia (www.climacity.org) fournissant le rayonnement moyen et la vitesse moyenne de vent. Pour le calcul avec la méthode d'évapotranspiration, le coefficient de culture est fixé à 0.3 et l'épaisseur de feuillage à 0.6 m. Il a été fait le choix de regrouper le ratio d'air, le taux d'évapotranspiration, ainsi que le taux de renouvellement d'air pour mettre en place un coefficient unique valant 180. Pour le calcul avec variation du feuillage, la largeur de feuille est fixée à 5 cm et le coefficient de rayonnement appliqué à 0.2. Les résultats obtenus sur la journée 24.07.2022 (voir *graphique 13*), 25.07.2022 (voir *graphique 14*), et 27.07.2022 (voir *graphique 15*) sont les suivants :



Graphique 13: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 24.07.2022
 Source : Données des auteurs



Graphique 14: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 25.07.2022
 Source : Données des auteurs



Graphique 15: Calcul de température liée au feuillage selon les méthodes citées, à Chens-sur-Léman, le 27.07.2022
 Source : Données des auteurs

Ces graphiques permettent de montrer une fois de plus que les températures liées à la végétation sont corrélées avec la température extérieure. Également, les calculs de réduction de température se retrouvent proches des mesures de température à l'intérieur du feuillage, essentiellement pour les jours 24.07.2022 et 27.07.2022. En effet pour la journée du 24.07.2022, l'erreur relative pour le calcul de température de feuille est en moyenne à 7.99%, tandis que pour le calcul d'évapotranspiration l'écart est de 8.33%. Également pour la journée du 27.07.2022 l'erreur relative pour le calcul de température de feuille est en moyenne à 6.51 % alors que pour l'évapotranspiration la moyenne est de 6.64%. Les écarts importants sont essentiellement liés au matin et au soir, puisque les équations n'intègrent pas le réchauffement de l'air par le mur. Cependant, en comparaison aux mesures de la température dans le feuillage, il est possible de constater que le calcul de température par évapotranspiration en est plus proche notamment lorsqu'il y a peu de rayonnement (0 à 10h et 20h à 24h). Toutefois, en milieu de journée le calcul de température de feuille s'avère plus précis. Afin d'optimiser l'équation de température de feuillage, il serait nécessaire d'adapter plus précisément les conductances (liée à la végétation étudiée).

Ces résultats montrent que ces deux équations peuvent être utilisées pour le calcul de baisse de température, donnant un ordre de grandeur convenable selon les objectifs fixés dans cette étude. En effet, comme décrit précisément, la volonté n'est pas d'avoir une équation qui décrit précisément les effets de la végétalisation mais plutôt donnant un ordre de grandeur concernant la réduction de température. D'autre part, il reste à observer comment se comportent ces équations sur une période d'étude prolongée et à déterminer si celles-ci peuvent être transposées à d'autres types de végétation.

7.3.4. Équation empirique de réduction de température

De plus, il a été cherché à mettre au point une équation empirique, c'est-à-dire basée exclusivement sur l'expérience. À cet effet, la température à l'intérieur du feuillage a été exprimée selon l'humidité relative et le rayonnement, selon une relation linéaire de type :

$$T_f = a + b * H_r + c * R_s$$

L'outil curve fitting de Matlab a été utilisé pour réaliser une interpolation sur la journée du 27.07.2022, permettant de rechercher les coefficients (voir *figure 17*). La courbe se retrouve alors proche des différents points obtenus ou le R^2 est estimé à 0.97.

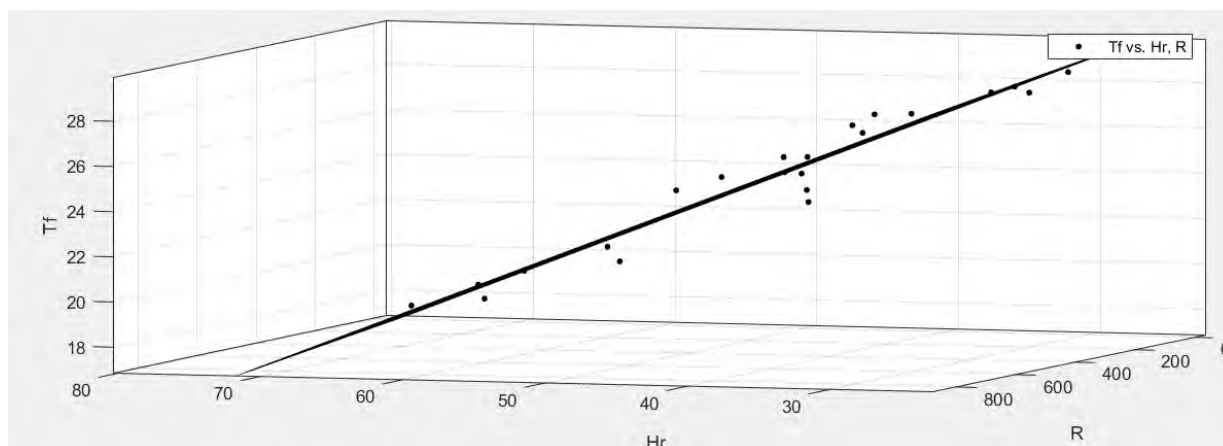
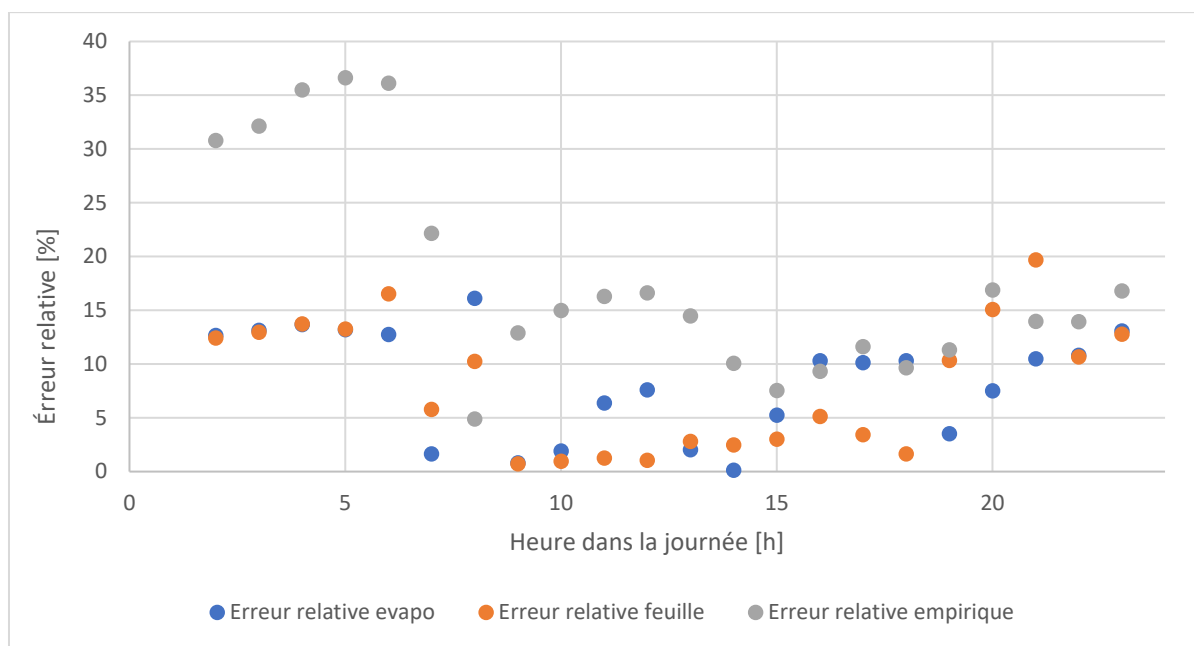
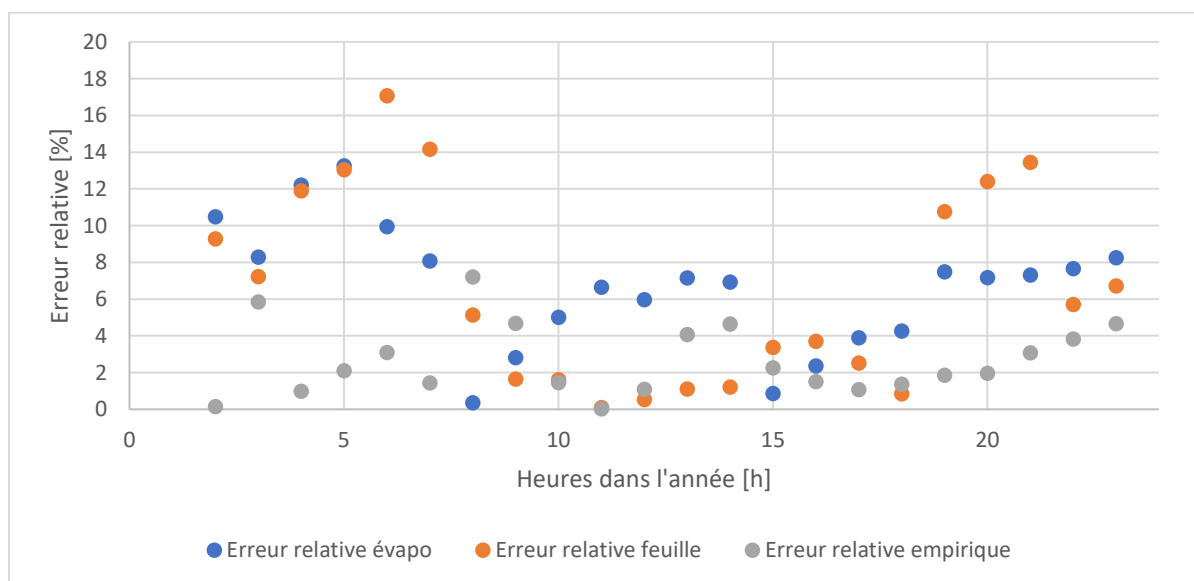


Figure 17: Interpolation de la température dans le feuillage selon l'humidité relative et le rayonnement global
 Source : Données des auteurs

Les coefficients a, b et c déterminés valent respectivement 36.58, -0.2509, -0.001966. Même si les résultats du calcul de température dans le feuillage semblent proches des valeurs mesurées pour la journée étudiée (27.07.2022, avec une erreur relative moyenne de 2.6%), ce n'est pas le cas pour les autres jours, où l'erreur moyenne peut atteindre 18% sur la journée du 24.07.2022 (voir *graphiques 16 et 17*). Ainsi, cette équation ne sera pas davantage utilisée, mais les résultats restent pertinents, ce qui avec potentiellement une meilleure définition de l'équation avec une adaptation en fonction des jours et des mesures sur site permettraient de rendre l'équation plus précise.



Graphique 16: Erreurs relatives calculs températures correspondantes sur la journée du 24.07.2022
 Source : Données des auteurs



Graphique 17: Erreurs relatives calculs températures correspondantes sur la journée du 27.07.2022
 Source : Données des auteurs

Ces écarts relatifs montrent qu'effectivement l'équation empirique est peu précise sur les jours sur lesquels elle n'a pas été paramétrée. Toutefois, il peut être noté la précision importante que peuvent atteindre les équations considérant l'évapotranspiration ou la température de feuille notamment en milieu de journée. Cependant, les mesures réalisées et comparaisons avec les calculs présentent quelques limites. En effet, n'ayant pas à disposition sur le site le rayonnement ainsi que la vitesse de vent, ceux-ci ont dû être recueillis à partir d'une station météorologique. Ceci implique inéluctablement des imprécisions, où l'idéal serait d'effectuer l'ensemble des mesures sur site, pour déterminer les conditions réelles auxquelles est soumise la végétation étudiée.

8. Températures de surface et conduction

Comme il a été possible de le comprendre précédemment, la végétation, grâce à l'évapotranspiration, permet de refroidir l'environnement, ce qui joue le rôle de climatiseur. À présent, il est nécessaire de comprendre comment les températures de surface des bâtiments influencées par la végétation peuvent réduire l'usage de la climatisation. La conduction thermique est définie comme étant un mode de transport thermique sans déplacement macroscopique de matière. Ce transfert s'effectue de proche en proche des parties chaudes vers les parties froides à travers l'agitation thermique. (femto physique, 2011)

Dans le bâtiment, il existe de multiples flux de chaleurs entrants et sortants, qui peuvent représenter l'énergie apportée par les gains solaires, ou encore les gains par ventilation ou de conduction avec l'environnement extérieur. Au sein d'un bâtiment, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur fait apparaître un flux de chaleur, qui peut chauffer en apportant de l'énergie quand la température extérieure est plus grande que la température intérieure, ou bien refroidir quand la température extérieure est plus basse que la température intérieure. Ce flux de chaleur existant sur les parois opaques ou vitrées est directement dépendant de la résistance thermique R , qui exprimée en $[m^2.K.W^{-1}]$ est liée à l'épaisseur et à la conductivité thermique $\lambda [W.m^{-1}K^{-1}]$.

Ces valeurs d'épaisseur et de conductivité thermique dépendent de la nature de la structure et de ses propriétés en termes d'isolation. Plus la structure est isolante, plus la valeur U sera petite. Le calcul de conductivité thermique s'effectue selon l'équation suivante :

$$q_{cond}'' = \frac{\lambda_s}{e_{st}} (T_{in} - T_{ext}) = U_s (T_{in} - T_{ext}) \quad (27)$$

q_{cond}'' = Flux de chaleur par conduction $[W.m^{-2}]$

U_s = Coefficient de transfert thermique structure $[W.m^{-2}K^{-1}]$

T_{in} = Température intérieure $[^{\circ}C]$

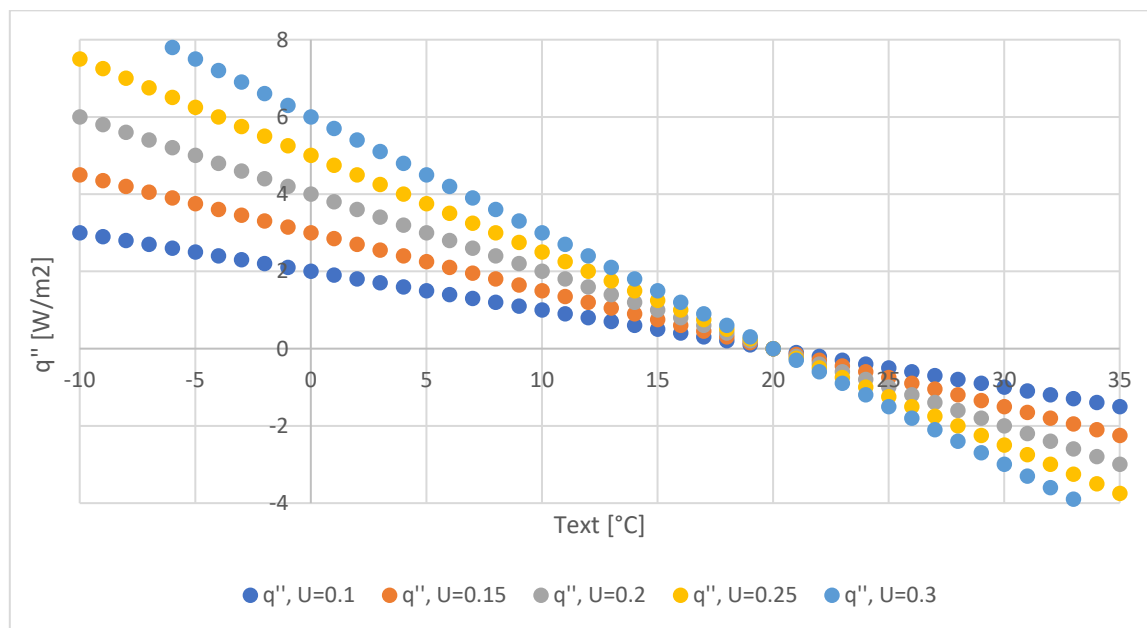
T_{ext} = Température extérieure $[^{\circ}C]$

e_{st} = Épaisseur structure $[m]$

λ_s = Conductivité thermique structure $[W.m^{-1}K^{-1}]$

À partir de cette équation, il peut être jugé utile de connaître l'impact des températures de surface sur les flux thermiques.

C'est pourquoi le flux de conductivité thermique est calculé pour différentes valeurs U selon plusieurs différences de températures entre l'intérieur (température de consigne = 20°C) et l'extérieur (voir *graphique 18*).



Graphique 18: Transfert thermique selon la température extérieure et la performance de composition (valeur U)
 Source : Données des auteurs

Ce graphique permet de montrer que les températures de surface ont un impact direct sur le transfert de chaleur. Plus la différence de température est grande, plus le flux est important. Celui-ci dépend aussi de la valeur U , où plus la valeur U est grande, plus le flux est réduit. Il est alors possible de faire l'analogie avec le refroidissement des surfaces lié à l'évapotranspiration. Avec une réduction de la température de surface extérieure, le flux de chaleur retire de la chaleur à l'environnement intérieur, ce qui pourra réduire l'utilisation de climatisation. Ce refroidissement est ainsi d'autant plus efficace que la quantité d'eau évapotranspirée est grande et que le mur dispose d'une mauvaise isolation.

On comprend donc qu'avec des façades végétalisées, le transfert de chaleur par la végétation est extrêmement intéressant pour des locaux mal isolés. Par exemple, avec une température de surface de 10°C et une température intérieure de 20°C, le refroidissement réalisé est d'environ $1 W \cdot m^{-2}$ pour un U de $0.1 W \cdot m^{-2} K^{-1}$ tandis qu'avec une valeur U de $0.3 W \cdot m^{-2} K^{-1}$ c'est un refroidissement d'environ $3 W \cdot m^{-2}$. D'autre part, ce graphique met aussi en évidence les avantages d'une bonne isolation. En effet, avec celle-ci, les transferts de chaleur sont réduits, ce qui permet de limiter l'augmentation de chaleur en intérieur (en cas de périodes chaudes), et à l'inverse réduire les pertes vers l'extérieur lors de périodes froides.

9. bSol

Dans l'objectif de visualiser plus clairement l'impact des paramètres d'influence sur la consommation énergétique des bâtiments, il a été fait le choix de modéliser et d'analyser un bâtiment sous bSol.

Il s'agit d'un logiciel de simulation énergétique des bâtiments développé par la HES-SO Valais-Wallis qui est utilisé pour donner la réponse thermique horaire d'un bâtiment sur une année selon des conditions météorologiques et climatiques définies. La simulation permet de tenir compte de 8 paramètres : protection thermique, grandeur des ouvertures vitrées, choix des vitrages, atténuation des stores, aération avec ou sans récupération de chaleur, inertie thermique. Un des intérêts majeurs du logiciel est qu'il calcule la température intérieure du bâtiment donnant des informations sur le confort thermique. Il met aussi en évidence les besoins annuels en matière de chauffage ou climatisation ainsi que les différents points d'amélioration au niveau du bâtiment. (Hevs, s.d.).

9.1. Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment étudié a été repris des travaux de (Merz, 2021) et (Tran, 2020), et a été modifié. Ce bâtiment représente un immeuble (habitat collectif) constitué de 3 étages avec une faible inertie (capacité calorifique de 62.179 MJ.K^{-1} , soit $17.272 \text{ kWh.K}^{-1}$, soit $33.867 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Le choix d'un bâtiment léger repose sur le fait qu'il est particulièrement sensible à la surchauffe et donc aux besoins de climatisation (Tran, 2020). Celui-ci reprend des caractéristiques semblables au niveau de la capacité thermique massique et des valeurs U des parois ($0.22 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et vitrages. Toutefois, les dimensions du bâtiment et des vitrages sont modifiées afin de mieux pouvoir observer l'impact selon les diverses orientations. En effet, si on considère un refroidissement de température sur une façade, celle qui aura la surface la plus grande aura tendance à fournir davantage de refroidissement. Il en est de même pour les vitrages où l'ombrage généré par les plantes aura un impact d'autant plus important que la surface vitrée est grande. Ainsi, le pavé droit de 14m (longueur) x 10m (largeur) x 9m (hauteur) a été transformé et uniformisé en 14m x 14m x 9m.

Désormais, chaque face dispose de 3 fenêtres de 2m x 2m. La surface de référence énergétique passe alors de 120 m^2 par étage à 170 m^2 (correspondant à une surface de référence énergétique totale de 510 m^2). Les charges internes introduites sont définies selon la SIA 2024 / 2015 (2.3 W.m^{-2} pour les personnes et 4 W.m^{-2} pour les appareils électriques). Il ne s'agit plus d'une ventilation double flux, mais seulement d'une ventilation simple flux (qui ne permet donc pas de récupération de chaleur, avec une aération standard de $0.8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, proche de la norme SIA 380/I 2016), ce qui permettra de voir au mieux le rôle et l'impact de la climatisation.

Aucun refroidissement lié à l'aération (ouverture des fenêtres) n'est mis en place et la climatisation peut être enclenchée pour faire face à la surchauffe avec une puissance limitée à 20 W.m^{-2} et une température de consigne de 26°C . Le chauffage quant à lui est laissé à une valeur standard limite de 50 W.m^{-2} pour une température de consigne de 20°C . Par ailleurs, les balcons ont été supprimés, modifiant les facteurs d'ombrage dynamiques. Ceux-ci ont été intégrés en considérant seulement un ombrage de 20 cm par le mur. Également, dans la situation initiale, le bâtiment ne dispose pas de protection solaire. Il est aussi simplifié dans la mesure où seuls les ponts thermiques des fenêtres sont pris en compte. L'ensemble des informations concernant le bâtiment sont disponibles en annexe, à savoir, l'horizon en annexe 1, l'irradiance en annexe 2, la température extérieure en annexe 3, les conditions d'exploitation du bâtiment en annexe 4, le paramétrage des fenêtres en annexe 5, les facteurs d'ombrage en annexe 6. Un exemple du bâtiment est présenté ci-dessous (voir *figure 18*) :

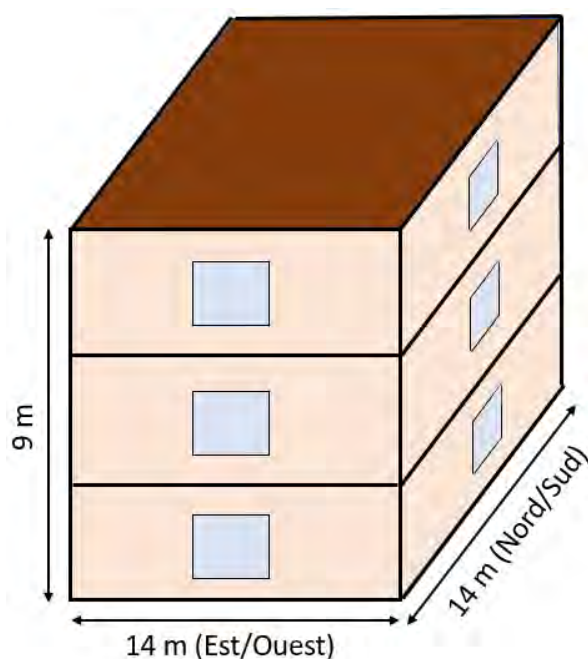


Figure 18: Représentation du bâtiment complet simulé sous bSol
 Source : Données des auteurs

Dans ce chapitre, plusieurs paramètres d'influence seront analysés. Cependant, ils seront introduits un par un, afin d'observer l'impact unique sur la consommation énergétique du bâtiment. Il a donc été volontaire de ne pas directement intégrer la régulation automatique du refroidissement par aération et des protections solaires afin de se sensibiliser sur l'impact indépendant des différents paramètres et voir au mieux le rôle de la végétalisation ainsi que des outils de gestion du bâtiment. L'association des différents paramètres sera réalisée dans la partie dédiée au bilan énergétique sous Matlab.

Premièrement, afin de pouvoir quantifier l'impact de la réduction de température liée à la végétation, il est d'abord nécessaire de la calculer. À cet effet, bSol contient plusieurs données de stations météorologiques de villes, cependant la plus récente est datée de 2017, ce qui peut laisser apparaître des différences avec la situation actuelle. Afin de faire un lien avec les mesures fournies par (zhaw, 2021), la station météo de Zurich a été choisie sous Meteonorm en tant que fichier compatible à bSol. Afin d'obtenir les données d'humidité relative et de vitesse de vent, celles-ci ont été reprises du fichier de mesure de Zurich pour l'année 2020.

9.2. Évapotranspiration dans le bilan énergétique

Pour la première situation, l'objectif est de mesurer l'influence de la végétalisation sur la réduction de température au niveau des différentes façades et ainsi déterminer la baisse potentielle de consommation énergétique liée à la climatisation. Dans ce premier cas, le bâtiment présenté est introduit dans bSol. Cependant, afin d'éviter de simuler l'impact énergétique sur l'ensemble des surfaces en même temps (murs et toiture), le choix a été de modifier la température extérieure sur chacune des façades désirées au lieu du fichier météorologique.

Ainsi, pour mettre en place sous bSol le refroidissement des façades, celles-ci n'ont pas été paramétrées comme étant situées contre l'extérieur, mais plutôt contre un local chauffé, ce qui permet d'y introduire un tableau de valeur correspondant à la baisse de température liée à la végétalisation. Cependant, en intégrant un local chauffé, il a été constaté que les apports solaires en sont retirés. Afin de pouvoir quantifier l'unique impact de la baisse de température, il a donc été choisi de supprimer au préalable l'ensemble des surfaces vitrées (ce qui dans le cas contraire compterait dans l'analyse l'effet de la température et une diminution de 100% du rayonnement lié au feuillage). Pour pouvoir réintégrer des gains solaires, les gains internes ont été élevés artificiellement (même si cela n'est en aucun cas équivalent à la situation initiale : gains liés aux personnes de $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et aux appareils de $9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). La simulation est alors lancée et le résultat de référence correspond au cas où toutes les façades sont contre l'air extérieur. Cette situation est ensuite comparée avec une façade contre un local chauffé où la baisse de température liée à la végétation est appliquée. Le cas d'étude peut être représenté par le schéma suivant où la paroi verte correspond à la végétalisation (voir *figure 19*) :

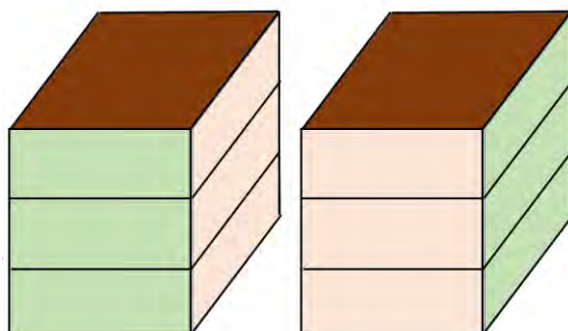
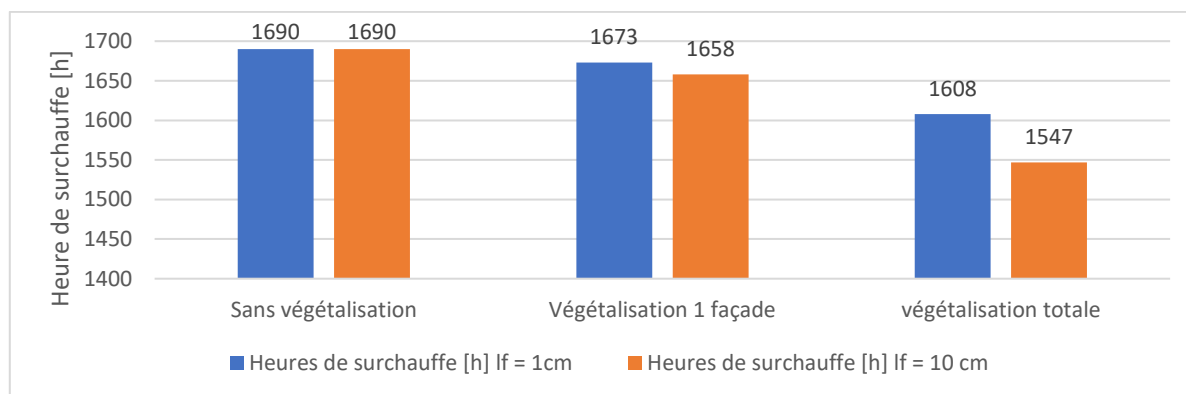


Figure 19: Bâtiment modélisé sous bSol pour représenter l'impact de la variation de température en lien avec le feuillage
 Source : Données des auteurs

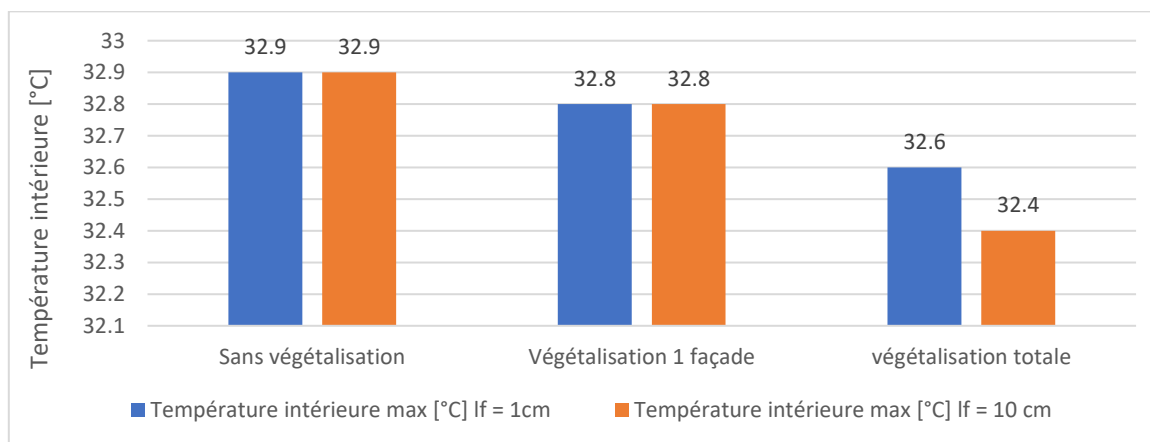
Les valeurs obtenues représentent alors les heures de surchauffe, l'évolution de la température intérieure, les heures de climatisation correspondantes et le bilan énergétique. Il a ici été fait le choix d'intégrer uniquement l'équation liée à la température de feuille, étant donné que l'effet lié à l'équation d'évapotranspiration a été déjà étudiée lors des précédentes études. Également, l'influence de la largeur du feuillage (l_f) est incluse au sein des analyses. Les résultats concernant les largeurs de feuille 1cm et 10cm sont disponibles en annexes respectives 7 et 8.



Graphique 19: heures de surchauffe pour différentes largeurs de feuillage
 Source : Données des auteurs

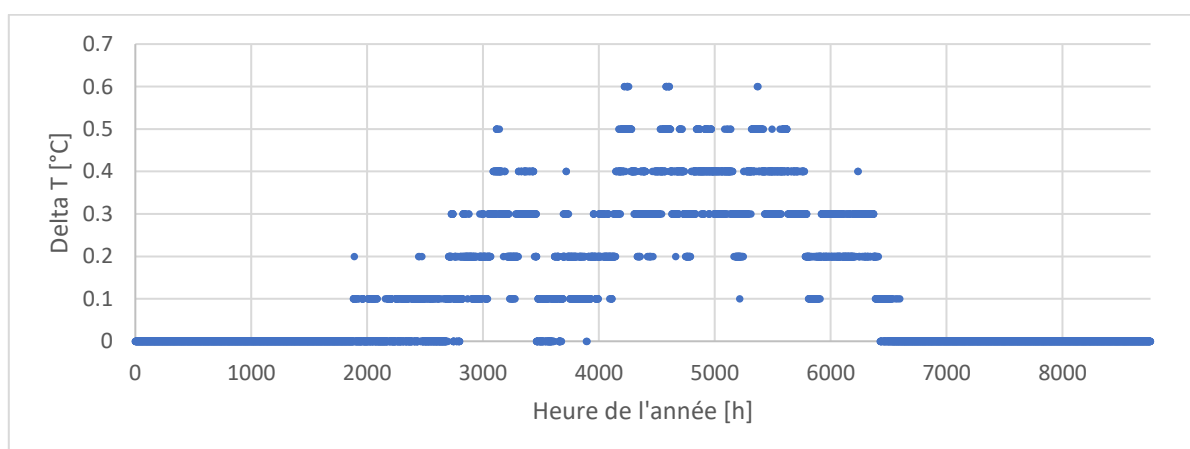
Les résultats permettent de montrer que la végétalisation réduit les heures de surchauffe par une variation de la température (voir *graphique 19*). Avec une végétation totale (sur l'ensemble des façades) dont la largeur des feuilles est égale à 10 cm, pour cette situation, les heures de surchauffes passent de 1690 heures à 1547 heures (-8.5%). Avec une façade seulement et la même végétation, les heures de surchauffe annuelles représentent 1658 heures (-1.9%). En ce qui concerne une végétalisation totale des façades avec largeur de feuille inférieure, soit 1 cm, les heures de surchauffe sont réduites à 1608 heures (-4.9%).

Par ailleurs, cette réduction des heures de surchauffe peut également être associée à la diminution de la température ambiante (voir *graphique 20*). En effet, la température intérieure maximale atteinte sans végétation était de 32.9°C, ce qui permet d'être réduite à 32.8 °C (-0.3%) pour une façade végétalisée ($l_f = 10\text{cm}$) et à 32.4 °C (-1.5%) pour la totalité des façades.



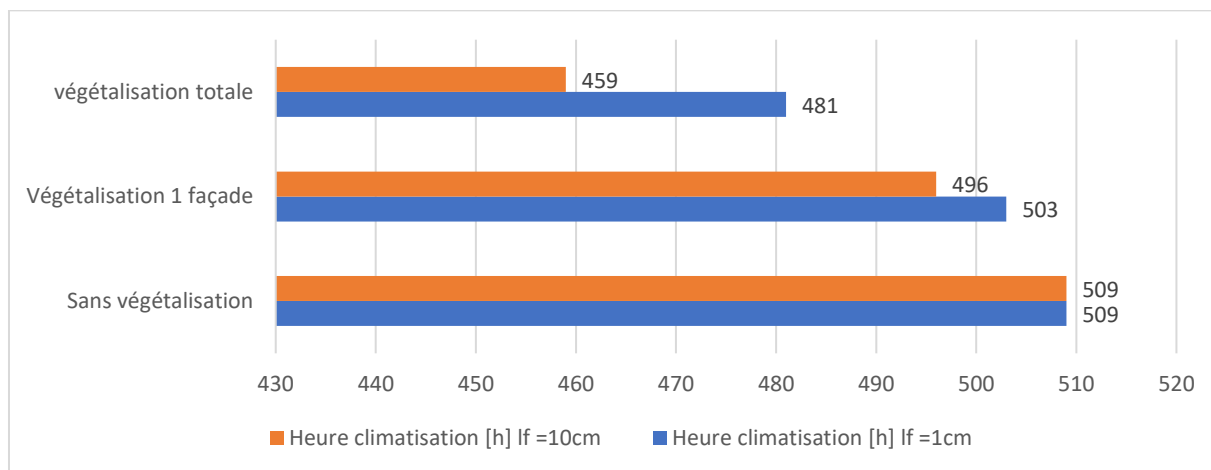
Graphique 20: Température intérieure maximale pour différents largeurs de feuillage
 Source : Données des auteurs

L'évolution annuelle de la température ambiante avec et sans végétalisation est également mise en évidence pour une végétalisation de l'ensemble des façades et une largeur de feuille de 10cm (voir *graphique 21*). Ce graphique montre que les températures estivales et maximales sont adoucies (température intérieure moyenne annuelle baissée d'environ 0.12°C, et réduction de 0.24°C pour la température moyenne intérieure sur la période printemps/été).



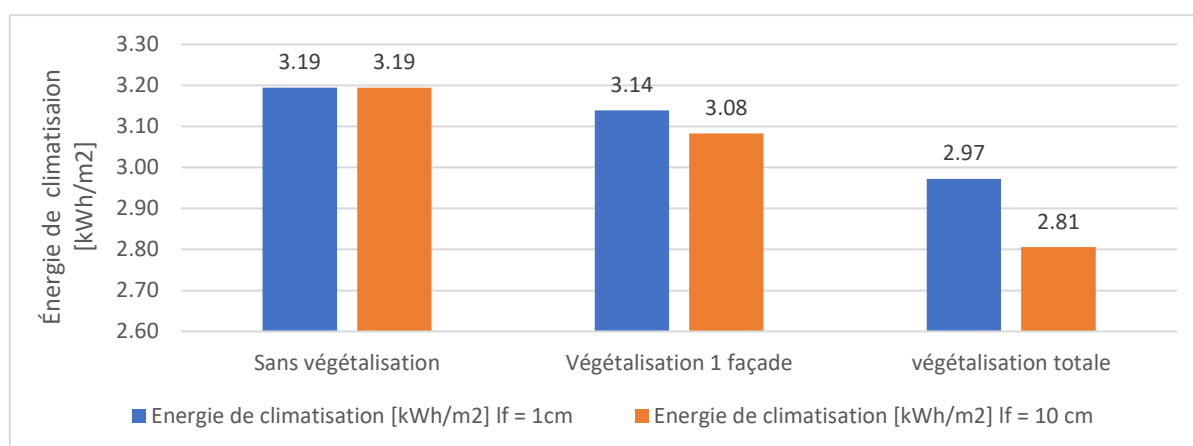
Graphique 21: Différence de température intérieure sans et avec température feuillage $l_f=10\text{cm}$
 Source : Données des auteurs

À partir de cette analyse, il est également possible d'estimer les heures de climatisation et l'énergie nécessaire pour atteindre une température intérieure inférieure ou égale à 26°C (voir *graphique 22*). De manière similaire aux heures de surchauffe, la réduction de la température extérieure permet de réduire l'usage de la climatisation. En effet, pour atteindre en permanence la température de consigne, sans végétalisation, il faudrait, pour ce bâtiment, avoir recours à 509 heures de climatisation, tandis qu'avec une végétalisation totale et une largeur de feuille de 10 cm, seraient nécessaires 459 heures de climatisation (-9.8%). Également, pour une façade unique avec une largeur de feuille de 10 cm, les heures de climatisation seraient abaissées à 496 (-2.55 %) contre 503 (-1.2%) pour une largeur de 1 cm.



Graphique 22: Heures de climatisation potentielles pour différentes largeurs de feuillage
 Source : Données des auteurs

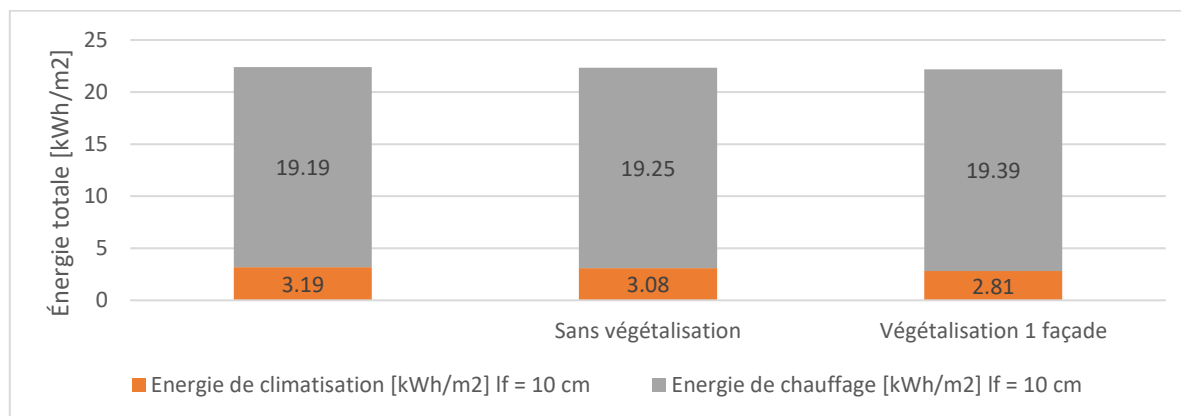
Pour avoir un ordre de grandeur du potentiel énergétique de réduction de climatisation, la végétalisation d'une façade (Lf = 10 cm) permettrait dans le cadre de ce bâtiment (si présence de climatisation) d'éviter 0.11 kWh.m⁻² (-3.4%) et pour une végétalisation complète près de 0.38 kWh.m⁻² (-11.9%, ce qui correspond à une économie potentielle de 194 kWh au total) (voir *graphique 23*).



Graphique 23: Énergie de climatisation pour différentes largeurs de feuillage
 Source : Données des auteurs

Toutefois, il ne faut pas non plus négliger le rôle de la végétalisation sur le bilan énergétique global, considérant à la fois les besoins en chauffage et en climatisation.

En effet, en diminuant la température extérieure, elle conduit également à refroidir la température intérieure, ce qui, en cas de température inférieure à la valeur de consigne (ici 20°C), entraîne une augmentation des besoins en chauffage (principalement en début de printemps et fin d'été). C'est cette situation qui se déroule ici, où avec une végétalisation totale et une largeur de feuille de 10 cm, les besoins en chauffage passent de 19.2 kWh.m⁻² à 19.4 kWh.m⁻² (+1%). Toutefois, même si au bilan, le gain énergétique est faible, il reste plus performant avec la végétalisation (22.4 kWh.m⁻² contre 22.2 kWh.m⁻²) (voir *graphique 24*).



Graphique 24: Bilan énergétique pour différentes largeurs de feuillage
 Source : Données des auteurs

Ces analyses montrent que l'action de la réduction de température par l'effet de l'évapotranspiration reste très limitée, notamment dans le cadre de la végétalisation d'une façade seulement. Ceci dit, même avec une végétalisation de l'ensemble des façades, il n'est pas possible d'éliminer totalement la climatisation pour assurer une température intérieure inférieure à 26°C et garantir un confort propice aux habitants. D'autre part, cette méthode de modélisation présente quelques limites. Tout d'abord, un refroidissement identique a été appliqué pour l'ensemble des façades. En réalité, les valeurs obtenues devraient être différentes, puisque l'évapotranspiration dépendant en grande partie du rayonnement n'est pas similaire durant la journée selon l'orientation des façades. Dans l'idéal, il faudrait associer à chacune des façades une température propre suivant le rayonnement effectivement perçu durant la journée. Par ailleurs, cette capacité de refroidissement ne tient pas non plus compte d'une évolution saisonnière, ou avec la présence d'un feuillage caduc, les performances dépendent aussi du feuillage qui évolue dans le temps. Également, l'abaissement de la température n'est pas non plus pris en compte au sein de l'aération, qui renouvelant de l'air frais devrait réduire davantage les heures potentielles de climatisation.

9.3. Ombrage dans le bilan énergétique

Comme il a été possible de l'observer dans le bilan énergétique, la végétalisation est capable d'absorber le rayonnement solaire, ce qui est indispensable pour permettre les activités physiques de la plante comme l'évapotranspiration ou la photosynthèse. Cette absorption, notamment de la lumière visible (longueur d'onde de 400 nm à 700 nm) (Djedjig, 2013), permet de générer un effet d'ombrage non négligeable en ce qui concerne les apports solaires (sur le bâti et les vitrages).

Ainsi, l'influence de l'ombrage a cherché à être quantifiée avec le logiciel bSol. Malheureusement avec celui-ci, cette tâche est rendue complexe étant donné que l'effet d'ombrage est uniquement pris en compte en tant que diminution du rayonnement au niveau des surfaces vitrées (et non pas au niveau des surfaces du bâtiment). À cet effet, il est inévitable de considérer l'impact de l'ombrage de la végétation sur l'apport solaire des surfaces vitrées, ce qui s'apparente plutôt à une végétalisation de type indirect. Comme précédemment évoqué, l'évapotranspiration des plantes repose sur l'absorption d'une partie du rayonnement reçu. Ainsi, parmi ce rayonnement, une certaine quantité est réfléchiée et une autre est transmise. C'est donc la partie transmise qui sera essentiellement quantifiée. On parle donc de transmissivité pour exprimer la capacité d'un matériau à laisser passer le rayonnement. Celle-ci peut être approximée en utilisant l'équation suivante issue de la loi de Beer-Lambert :

$$\tau = \exp(-k * LAI) \quad (28)$$

τ = Transmissivité [-]

k = Coefficient d'extinction [-]

LAI = Indice surface foliaire [-]

L'indice de surface foliaire correspond au ratio entre la surface totale supérieure des feuilles et la surface au sol. Il peut être mesuré, mais l'image suivante donne une indication visuelle en fonction de la densité du feuillage (voir *figure 20*). Le coefficient d'extinction représente quant à lui la perte d'énergie issue du rayonnement dépendant de l'orientation du soleil et des feuilles.

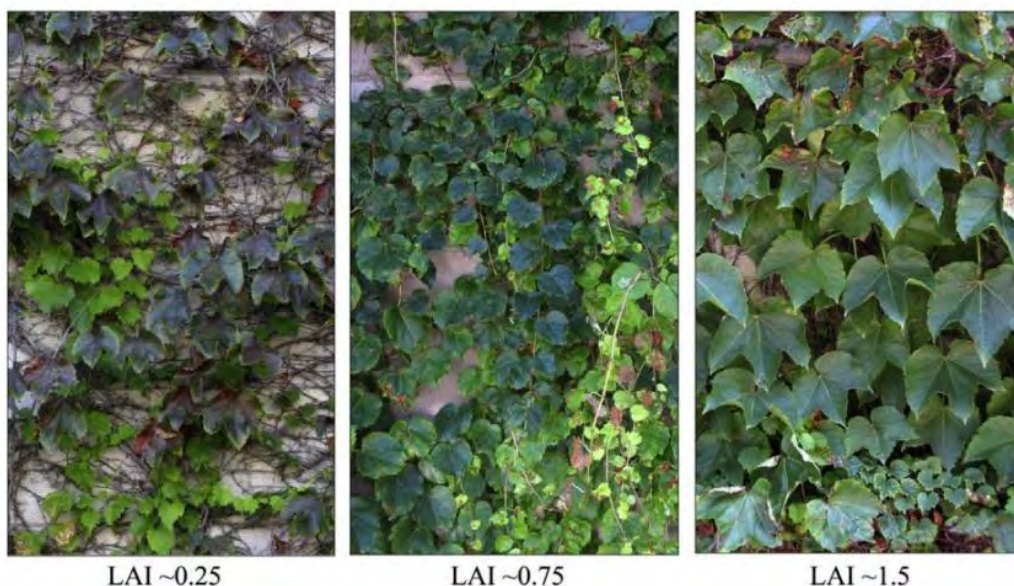
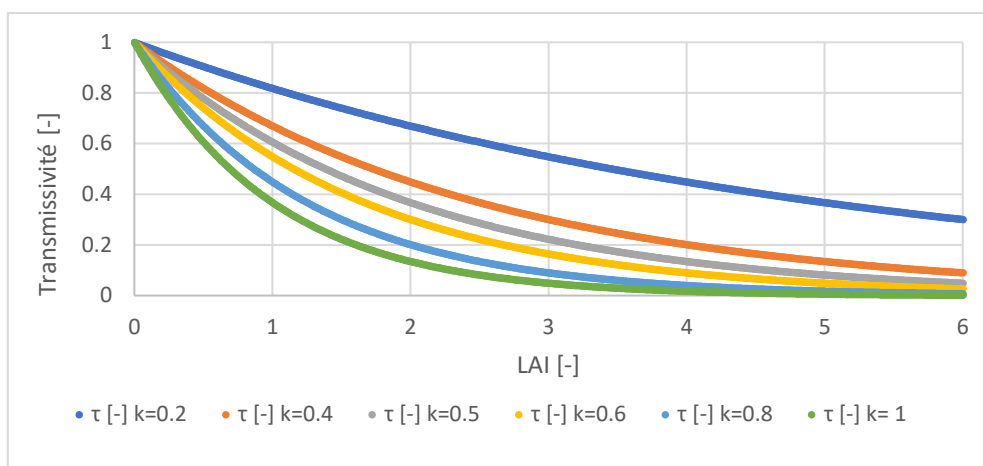


Figure 20: LAI pour différentes situations de feuillage de lierre (Susorova, 2013)

Ainsi, cette transmissivité a été représentée pour différentes valeurs de coefficients d'extinction en fonction de l'indice de surface foliaire (voir *graphique 25*) :



Graphique 25: Transmissivité en fonction du LAI pour différents coefficients d'extinction
 Source : Données des auteurs

Il est possible d'observer que la transmissivité décroît de manière exponentielle en fonction du LAI. Plus ce dernier est important, plus la transmissivité est faible. Il en est de même pour le coefficient d'extinction ou lorsque celui-ci augmente, la transmissivité diminue. Ces phénomènes peuvent être compris, où lorsque le feuillage est dense (LAI élevé), il sera plus difficile de transmettre la lumière. Également, lorsque le coefficient d'extinction est important, signifiant qu'une grande part de rayonnement est perdue, la quantité transmise y sera d'autant plus faible. Ainsi, pour quantifier l'effet de l'ombrage, seules les surfaces vitrées sont conservées. Les températures de surface des différentes orientations restent inchangées et sont maintenues contre l'air extérieur.

Dans cette situation, le phénomène simulé reprend les caractéristiques des protections solaires visant à empêcher le rayonnement de pénétrer à l'intérieur des vitrages. Celles-ci sont toujours représentées par une valeur g correspondant à la part d'énergie transmise. Dans ce cas, la végétation sera approximée comme possédant une valeur g associée à sa valeur de transmissivité. Cette situation peut être visualisée comme suit où les fenêtres vertes correspondent aux fenêtres végétalisées. Ici aucune protection solaire (autre que la végétation) n'est mise en place (voir figure 21) :

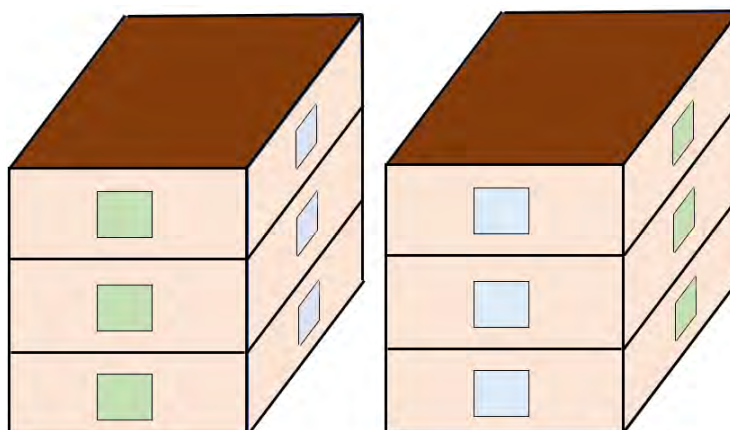
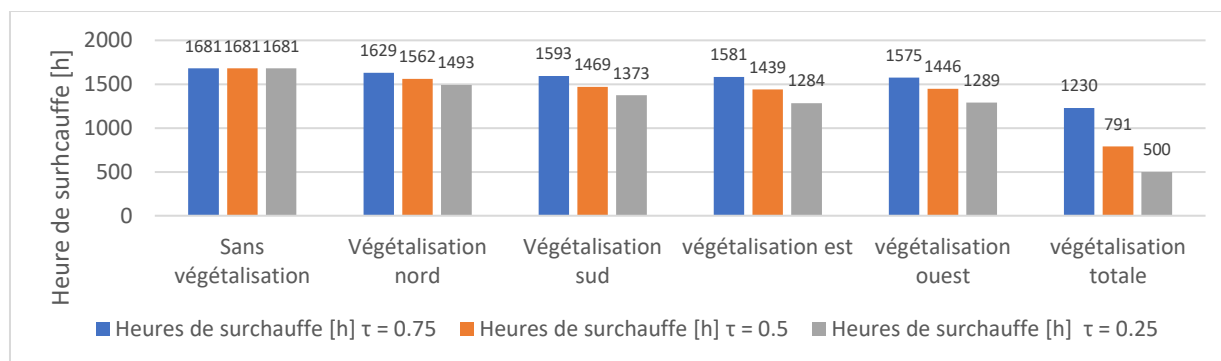


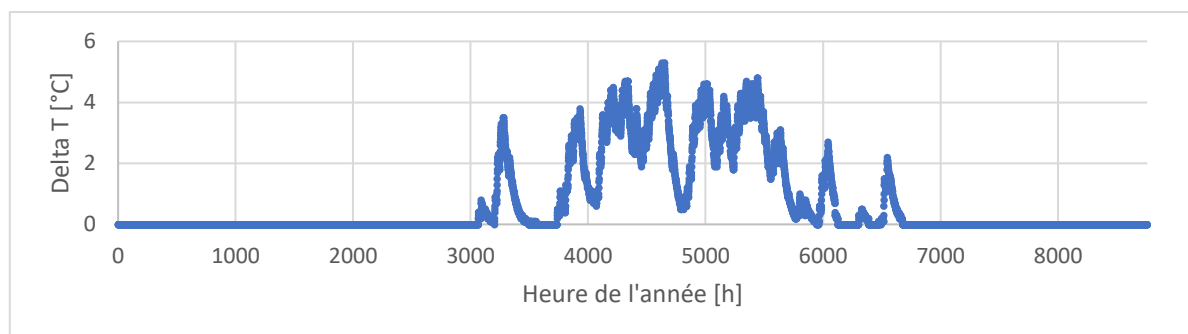
Figure 21: Bâtiment modélisé sous bSol pour représenter l'impact de l'ombrage en lien avec le feuillage
 Source : Données des auteurs

Afin de représenter l'impact de plantes grimpantes caduques, maximisant l'apport solaire en hiver et minimisant les gains en été, la couverture par la végétation est uniquement incluse lorsque la température intérieure dépasse 24°C. Ceci correspond à appliquer la valeur de transmissivité des plantes en tant que valeur g des stores et associer en condition d'exploitation l'occultation des fenêtres à partir de 24°C. Les heures de surchauffe sont alors représentées avec l'évolution de la température intérieure ainsi que les heures et l'énergie de climatisation correspondantes. Les résultats concernant les transmissivités 0.75, 0.5 et 0.25 sont disponibles dans les annexes respectives 9, 10 et 11.



Graphique 26: Heure de surchauffe en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité
 Source : Données des auteurs

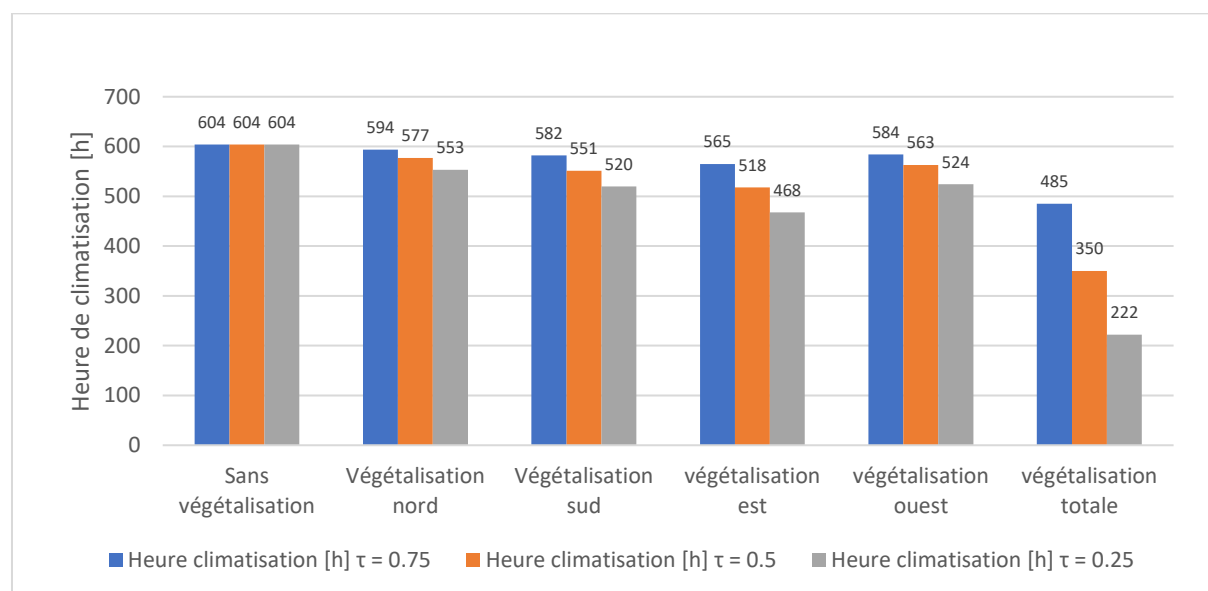
Les résultats permettent de montrer que l'ombrage lié à la végétation réduit les heures de surchauffe (voir *graphique 26*). En effet, avec une végétalisation totale associée à une valeur de transmissivité de 0.75, pour cette situation, les heures de surchauffe passent de 1681 à 1230 (-26.8%). Avec une transmissivité de 0.25, la réduction est encore plus flagrante, laissant seulement 500 heures de surchauffe (-70.3%). De manière relative au confort thermique des utilisateurs, l'évolution de la température intérieure est aussi représentée (voir *graphique 27*). Celle-ci permet de montrer que la végétalisation au niveau des vitrages réduit les températures maximales, passant de 34°C sans végétalisation à 32.7°C (-3.8%) pour une végétalisation est et 30.6°C (-10%) pour la totalité des façades associées à une transmissivité de 0.25. Les températures moyennes intérieures sont également abaissées de presque 0.74°C à l'année et réduites en moyenne de 1.4°C sur la période printemps/été. En comparaison à la première situation, il est possible de voir à quel point les gains solaires ont une importance sur l'augmentation de la température intérieure.



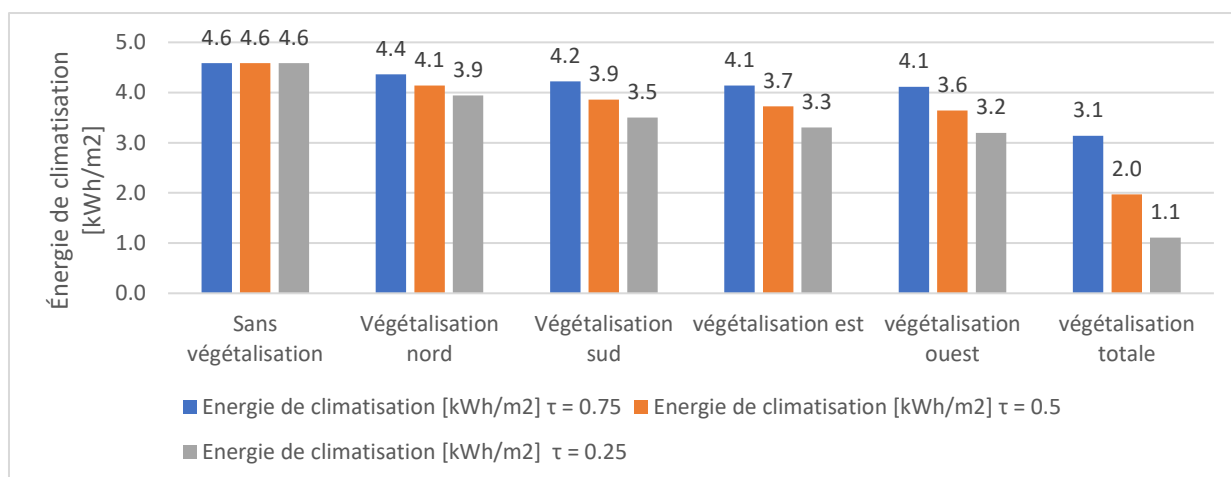
Graphique 27: Évolution de la différence de température intérieure sans et avec un ombrage sur l'ensemble des façades et une transmissivité de 0.25
 Source : Données des auteurs

En ce qui concerne la climatisation, si le bâtiment en était équipé et qu'il ne présentait aucune végétalisation, il faudrait 604 heures de climatisation pour avoir une température inférieure ou égale à 26°C (voir *graphique 28*). Avec une végétalisation de l'ensemble des façades et une transmissivité de 0.25, les heures de climatisation seraient abaissées à 222 heures (-63.2%) (passage de 4.6 kWh.m⁻² à 1.1 kWh.m⁻², soit une réduction de 1785 kWh, ce qui correspond à 76.1% de baisse). Avec une végétalisation totale et une transmissivité de 0.75, c'est une baisse d'environ 119 heures de climatisation (-19.7%), ce qui équivaut à une économie de 765 kWh (voir *graphique 29*). Ces différences de performance entre ces valeurs de transmissivité montrent à quel point il est important de bien choisir ses espèces végétales, où la différence de LAI entraîne de grandes influences sur les performances de refroidissement. Par ailleurs, il est possible d'observer que cette capacité de refroidissement n'est pas identique pour toutes les orientations et est la plus performante pour la façade ouest qui nécessiterait dans cette situation une énergie de 3.2 kWh.m⁻² (pour une transmissivité de 0.25, en comparaison à 4.6 kWh.m⁻² pour le bâtiment sans végétation). Seulement, il peut être intéressant d'observer que même si la façade ouest dispense au maximum l'énergie de climatisation, ce n'est pas sur cette façade que les heures de climatisation sont les plus faibles, mais la façade est (468 contre 524 pour l'ouest). Ceci montre que le choix d'orientation de la végétalisation n'a pas seulement un impact sur l'énergie de climatisation mais également sur la puissance de celle-ci. En effet, avec un nombre d'heures supplémentaires pour la façade ouest, l'énergie résultante étant plus faible, ceci signifie que la puissance moyenne de climatisation en est diminuée.

Ainsi, tout comme l'impact de la réduction de température, l'ombrage ne semble pas pouvoir remplacer la totalité de la climatisation ni les outils de gestion du bâtiment. Une question se pose alors sur la pertinence de l'association des deux effets évapotranspiration et ombrage.



Graphique 28: Heure de climatisation en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité
 Source : Données des auteurs

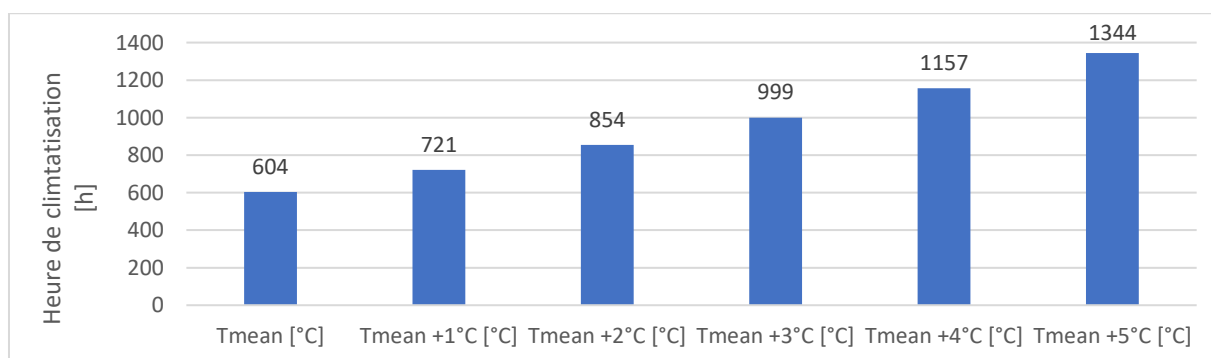


Graphique 29: Énergie de climatisation en fonction des orientations pour différentes valeurs de transmissivité
 Source : Données des auteurs

D'autre part, cette méthode de représentation présente certaines limites. En effet, en considérant l'impact de la végétation en cas de surchauffe, on sous-évalue l'influence au niveau du bilan énergétique puisqu'en réalité, il est possible d'empêcher le rayonnement au printemps en cas de faible température, ce qui peut conduire à accroître légèrement la demande de chauffage (gains solaires plus faibles). Ainsi, en pratique, le bilan énergétique ne devrait pas être constant avec la végétalisation, mais la part de chauffage devrait augmenter légèrement en relation avec la baisse de transmissivité. Également, en réalité, la transmissivité varie annuellement puisque l'indice de surface foliaire change en fonction des saisons. Naturellement, au début du printemps, le LAI sera beaucoup plus faible qu'en plein milieu de l'été, ce qui exerce une influence sur les performances de refroidissement. Ainsi, dans l'idéal il faudrait intégrer une valeur g variable, ce qui n'est pas proposé dans bSol.

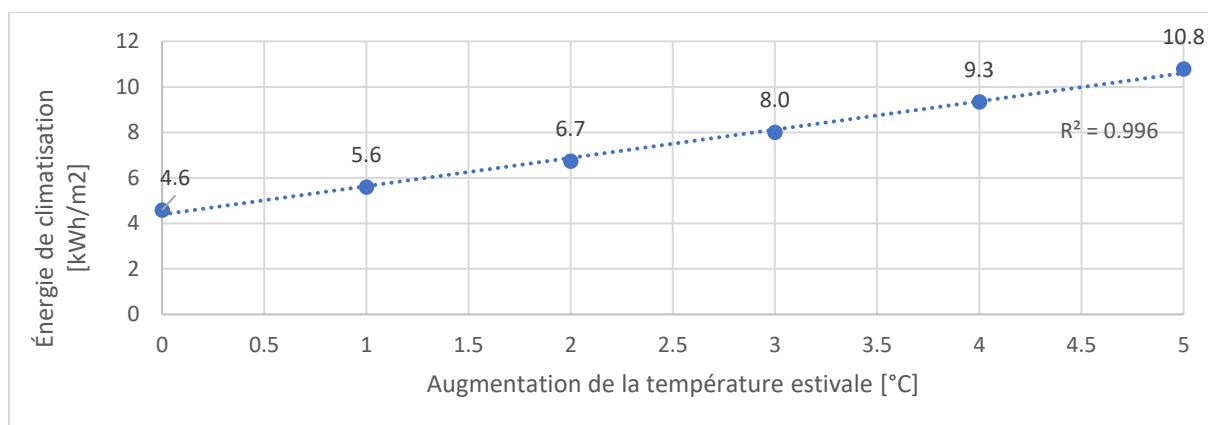
9.4. Température extérieure dans le bilan énergétique

Outre les influences de la végétation sur l'ombrage et la température extérieure, il a été fait le choix d'analyser la contribution d'autres paramètres sur la climatisation. C'est ainsi que l'influence de la température extérieure a été observée avec bSol (voir *graphique 30*). Le bâtiment sans végétalisation a été repris (toujours sans protection solaire et ouverture de fenêtre) et la température issue de la météo a été modifiée en l'augmentant durant la période estivale respectivement de 1°C jusqu'à 5°C. Les résultats obtenus sont les suivants



Graphique 30: Heure de climatisation en fonction de l'augmentation de température estivale
 Source : Données des auteurs

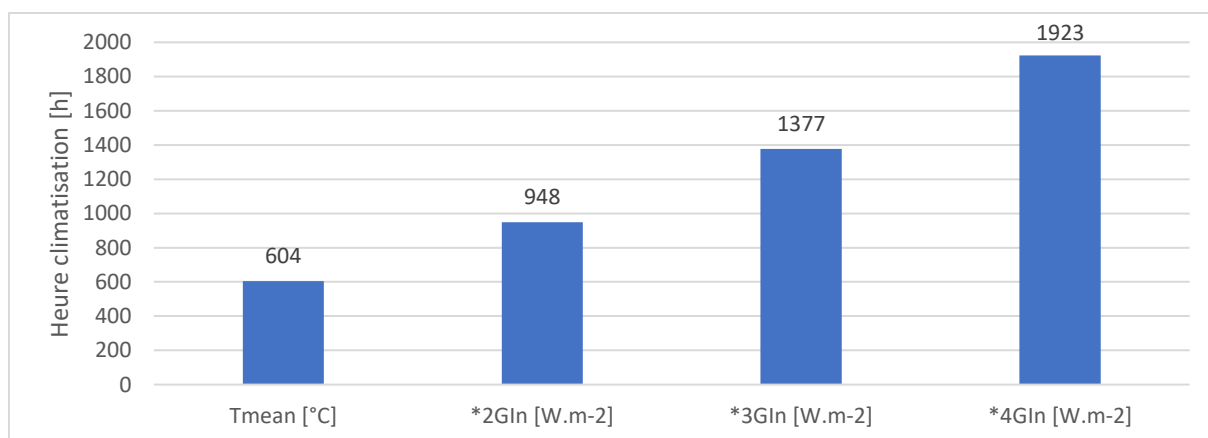
Les données relatives à l'étude de température extérieure sont disponibles en annexe 12. Il est possible de remarquer que la température a un grand impact sur l'usage de la climatisation, puisque pour atteindre la valeur de consigne, l'augmentation de 1°C en été, augmente de 117 heures l'utilisation de la climatisation (+19.4%). Également, avec une augmentation de 5°C, les heures de climatisation augmentent à 1344 (+122.5%). Cette évolution des températures pose des questions quant à l'influence du réchauffement climatique sur l'usage de la climatisation. Celle-ci étant très sensible à la température, donc avec un accroissement de la chaleur, l'impact sera d'autant plus important, ce qui renforcera le rôle de la végétation. Par ailleurs cette énergie de climatisation semble suivre une relation linéaire (R^2 proche de 1) avec l'augmentation de la température estivale comme il est possible de l'observer dans le graphique suivant (voir *graphique 31*) :



Graphique 31: Relation entre l'augmentation de la température estivale et l'énergie de la climatisation
 Source : Données des auteurs

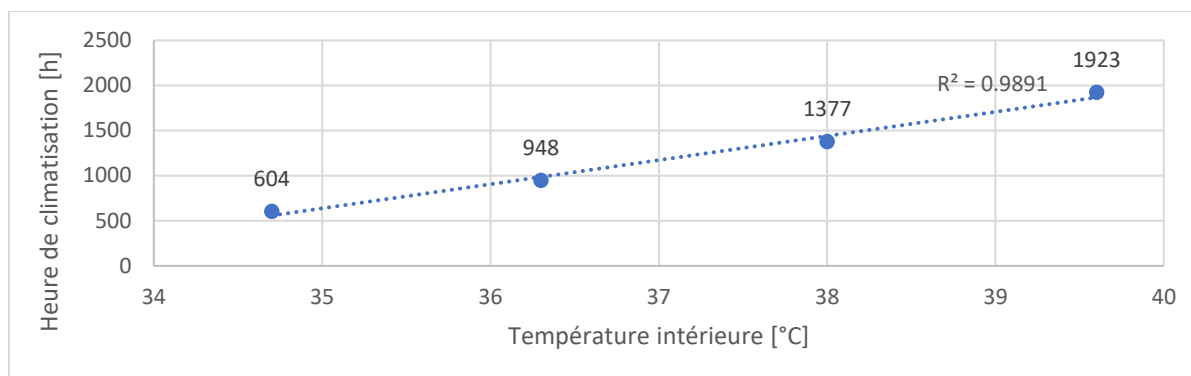
9.5. Gains internes dans le bilan énergétique

Tout comme la température extérieure, l'influence des gains internes sur les heures de climatisation est évaluée. Pour modéliser cet impact, la situation du bâtiment sans végétalisation est reprise en ne considérant toujours aucune protection solaire et déstockage lié aux ouvertures de fenêtres. Ainsi, les gains internes des personnes ($2.3W.m^{-2}$) sont variés en étant multipliés respectivement par 2, 3 et 4. Les résultats sont les suivants (voir *graphique 32*) :



Graphique 32: Évolution des heures d'utilisation de la climatisation en fonction de l'augmentation des gains internes (personnes)
 Source : Données des auteurs

Les heures de climatisation sont également représentées en fonction de la température intérieure maximale. (voir *graphique 33*)

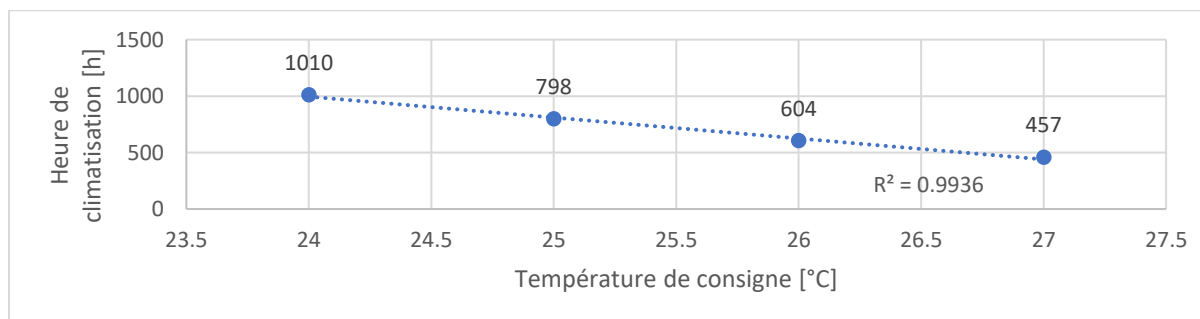


Graphique 33: Évolution des heures de climatisation en fonction de la température maximale intérieure
 Source : Données des auteurs

Les résultats concernant l'étude de l'influence des gains internes sont disponibles en annexe 13. Ces graphiques permettent d'observer que, dans cette situation, l'énergie de climatisation et les heures d'utilisation varient de manière linéaire avec l'augmentation des gains internes. En effet, en doublant les gains internes des personnes, s'en suit pour cette situation une augmentation de près de 344 heures de climatisation (+57%) (passage de 4.6 kWh.m⁻² à 7.1 kWh.m⁻² soit une augmentation de 54.3%). Il en est de même dans le cadre de la température intérieure maximale ($R^2 = 0.9939$), où, plus celle-ci est grande, plus les besoins en climatisation sont conséquents. Avec une température maximale intérieure qui s'élève de 1°C, les heures de climatisations augmentent d'environ 250 heures. Ainsi, les gains internes sont aussi un paramètre sensible dans le cadre de l'utilisation de la climatisation.

9.6. Gestion de la climatisation dans le bilan énergétique du bâtiment

L'impact de la climatisation est également étudié en faisant référence à la température de consigne. En effet, il semble sensé qu'une baisse de la température de consigne de climatisation nécessite davantage d'énergie pour l'atteindre. Ainsi, la température de consigne est abaissée à 25°C et 24°C. L'utilisation de la climatisation est alors représentée en fonction de la température de consigne (voir *graphique 34*).



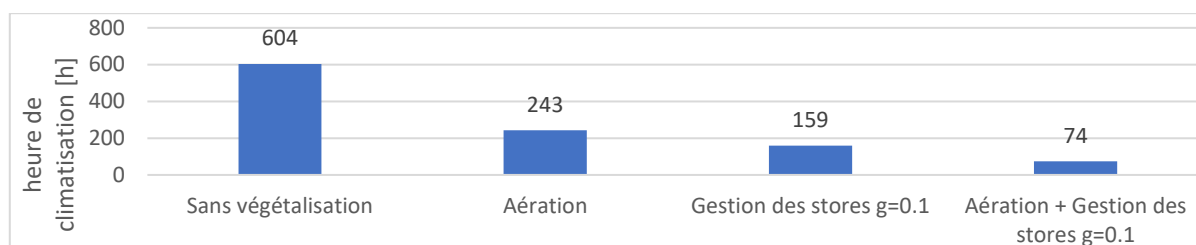
Graphique 34: Évolution des heures d'utilisation de la climatisation selon la température de consigne de climatisation
 Source : Données des auteurs

De manière similaire aux autres études, l'utilisation de la climatisation suit une tendance linéaire (R^2 proche de 1) avec la température de consigne.

Les résultats relatifs à cette étude de gestion de la climatisation sont disponibles en annexe 15. Il est ici possible d'observer que baisser la température de consigne de 1°C augmente la climatisation à 798 heures (+32.1%) tandis que baisser la température de consigne de 2°C induit une augmentation à 1010 heures (+67.2%). Ainsi, le choix de la température de consigne du bâtiment a un impact conséquent sur la consommation énergétique liée à la climatisation.

9.7. Aération et gestion des protections solaires

Les paramètres d'influence aération et protections solaires sont aussi analysés. Pour mettre en évidence le rôle de l'ouverture des fenêtres, la condition d'exploitation « rafraîchissement par aération » est choisie. Dans ce cas, il est spécifié qu'un déstockage de $2.4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ est effectué quand la température intérieure dépasse 22°C et qu'il y a une différence d'au minimum 2°C entre l'intérieur et l'extérieur. En ce qui concerne les protections solaires, les valeurs g ajoutées correspondent à des stores à lamelles performants, soit 0.10 et sont disposées pour chacune des orientations. Les stores sont programmés pour être baissés quand la température intérieure dépasse 24°C. Les heures de climatisation en fonction de ces paramètres d'influence sont présentées ci-dessous (voir *graphique 35*) :



Graphique 35: Heures de climatisation selon des conditions d'aération et de protections solaires
 Source : Données des auteurs

L'ensemble des résultats sont disponibles en annexe 14. Le graphique montre que dans cette situation, avec une aération par les fenêtres, les heures de climatisation sont abaissées à 243 heures (-59.8%). Avec une gestion des stores optimale, c'est une diminution à 159 heures (-73.7%). L'association des deux paramètres agit sur une baisse à 74 heures de climatisation (-87.7%). Ces résultats permettent de comprendre que l'utilisation de la climatisation n'est pas seulement dépendante des conditions extérieures (rayonnement, température) ou des apports internes (appareils électriques, personnes), mais également de la gestion de la part des utilisateurs, qui ici exerce une influence conséquente. Ainsi, la question qui se pose finalement est : « est-ce que l'association des effets de la végétalisation avec les outils de gestion du bâtiment peut permettre d'éliminer totalement l'usage de la climatisation ? »

En conclusion, ces études permettent de montrer qu'il est possible de réduire en partie l'usage de la climatisation à travers l'ombrage et la réduction des températures liée au feuillage. La réduction de température est d'autant plus importante que la largeur du feuillage est grande, tandis que le phénomène d'ombrage dépend essentiellement de la densité du feuillage, où un feuillage plus épais garantit une meilleure protection solaire. Ces analyses ont permis de montrer l'importance du choix de la végétation dans le cadre de performance de refroidissement. Les effets sont aussi différents selon les orientations où la végétalisation en est et ouest affiche les meilleures performances de réduction d'énergie liée à la climatisation. Cette situation rejoint alors les conclusions observées dans l'état de l'art.

Il a pu être mis en évidence que le choix de l'orientation avait à la fois un impact sur la réduction potentielle de l'énergie de climatisation mais aussi sur la puissance. D'autre part, l'ombrage semble avoir un plus grand impact que celui exercé par la température, puisqu'il permet d'atteindre une réduction potentielle plus importante de l'énergie de climatisation alors que la surface effective est plus faible. Cependant, encore une fois, il faut veiller à ne pas généraliser, puisque selon les situations de végétation ou bâtiment, la tendance peut s'inverser. Toutefois, selon les analyses réalisées, l'impact dissocié des deux phénomènes ombrage et évapotranspiration n'a pas permis de remplacer complètement l'usage de la climatisation. Ainsi, il reste à voir si ensemble, les performances de refroidissement sont augmentées.

Également, il a pu être mis en évidence que la végétation est très sensible à de multiples paramètres, d'abord non modulables, avec la température extérieure. C'est aussi le cas pour des paramètres qui ont des impacts conséquents et pourtant proportionnels à l'activité des utilisateurs (gains internes, gestion des stores, aération) et à leur confort thermique (température de consigne).

À partir de ces analyses, il est possible de comprendre que, pour minimiser les besoins en climatisation, le moyen le plus efficace est d'agir d'abord sur le comportement des utilisateurs en aérant régulièrement, en baissant les stores en cas de fortes chaleurs et en acceptant une température intérieure maximale plus grande (définie par la température de consigne de climatisation). Ces opérations peuvent par ailleurs être réalisées avec des moyens performants de régulation.

D'autre part, en ce qui concerne l'étude sur les paramètres d'influence réalisée, il faut être conscient que les résultats obtenus concernent un bâtiment type à Zurich. Ainsi, les influences peuvent grandement varier en fonction des situations (inertie différente, surface de vitrage variée...), ce qui nécessite une analyse au cas par cas.

Il est donc possible de comprendre l'importance de la réalisation d'un bilan énergétique, qui permet de manière simple et rapide de réunir l'ensemble de ces paramètres et contributions pour en déterminer une conclusion sur les performances de la végétalisation sur un bâtiment choisi. Ainsi, ce bilan énergétique permettrait de voir de manière simplifiée si la végétation est adaptée au bâtiment dans le cadre de la réduction ou remplacement de la climatisation.

10. Bilan énergétique d'un bâtiment sous bSol

Comme il a été possible de le constater précédemment, l'interface actuelle de bSol ne permet pas d'intégrer simplement l'impact énergétique lié à la végétation. Les modélisations réalisées pour le moment ont utilisé uniquement des options et conditions d'exploitation déjà présentes, ce qui amène à des simplifications. Par ailleurs, de par un manque de flexibilité, il a été nécessaire de mettre en place plusieurs situations (avec et sans fenêtre), rendant difficile le regroupement des résultats des analyses. C'est pourquoi les paramètres d'influence seront ici implémentés pour le calcul du bilan énergétique afin d'observer l'impact global de la végétation. Il sera donc possible d'associer à la fois les effets de la végétation sur la température des façades, de l'ombrage ainsi que les effets des autres contributions (gains internes, aération) comme illustré ci-dessous (voir *figure 22*) :

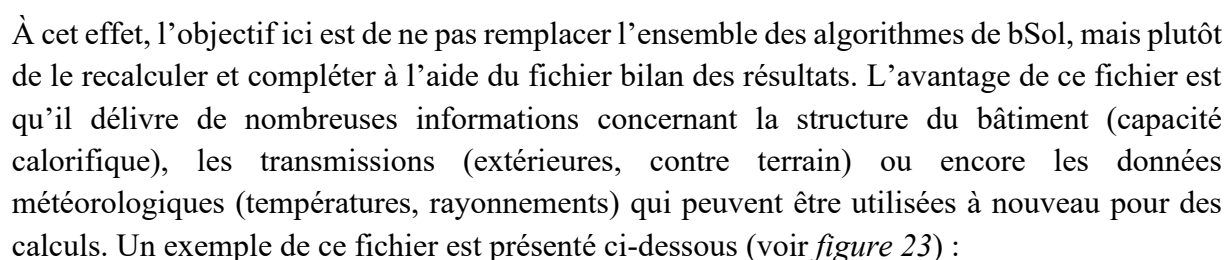


Figure 23: Exemple du fichier résultat disponible sous bSol après simulation
Source : Données des auteurs

Cependant, étant donné qu'il s'agit d'un bilan final, si le bâtiment complet est modélisé, il manquera les données sur les calculs des façades, comme notamment sur le rayonnement effectif entrant (généralisé en rayonnement total). Ceci pose problème si l'objectif est de mettre en avant des différences de performance entre les orientations. Ainsi pour intégrer l'impact selon les orientations, il a été fait le choix de séparer le fichier bSol en 5 fichiers distincts comprenant respectivement les façades sud, nord, est, ouest et toit/sol et d'en extraire les données utiles pour réaliser un bilan énergétique complet du bâtiment (en veillant à ce que la somme des capacités calorifiques de chaque fichier soit égale à la capacité calorifique totale du bâtiment). La situation est alors représentée par l'illustration suivante (voir *figure 24*) :

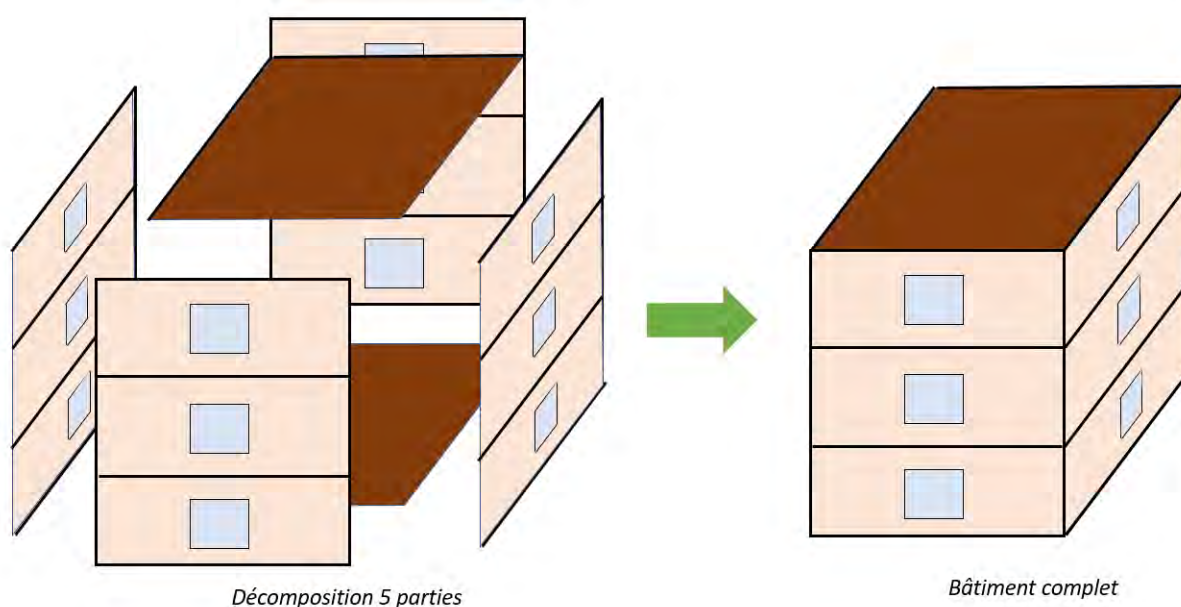


Figure 24: Méthode de séparation développée pour le calcul du bilan énergétique d'un bâtiment
 Source : Données des auteurs

10.1. Équation bSol

Avant de recalculer l'algorithme de bSol, il est d'abord nécessaire de comprendre comment celui-ci fonctionne. L'équation est basée sur un bilan des flux énergétiques entrants et sortants du bâtiment. Ainsi, tous les calculs sont effectués de manière dynamique afin de déterminer pour l'heure suivante la température intérieure.

Les pertes ou gains apparaissent comme des températures qui sont ajoutées ou soustraites à la température actuelle intérieure. Les flux énergétiques compris dans le bilan énergétique sont les transmissions des parois vers l'extérieur, contre les locaux chauffés, non chauffés et contre terrain, les gains internes, les gains solaires, les pertes/gains par aération ou encore les gains de chauffage et pertes de refroidissement. L'équation bilan est la suivante :

$$\begin{aligned}
 T_{in}(h) &= T_{in}(h-1) \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * d_{bat} * T_{ext}(h-1) \rightarrow T_{zone} \\
 &- \frac{3600}{cCal} * d_{tot} * T_{in}(h-1) \rightarrow T_{int} \\
 &+ \rho_a * c * D * (T_{ext}(h-1) - T_{in}(h-1)) * \frac{SRE}{cCal} \rightarrow T_{aer} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ terrain} d_{terrain} * T_{terrain}(h-1) \rightarrow T_{terrain} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * I_{irradiance}(h-1) \rightarrow T_{solaire} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * G_i(h-1) * SRE \rightarrow T_{interne} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * P_{chauffage}(h-1) \text{ ou } \frac{3600}{cCal} * P_{refroidissement}(h-1) \rightarrow T_c \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ local\ chauffé} d_{lc} * T_{lc}(h-1) \rightarrow T_{lc} \\
 &+ \frac{3600}{cCal} * \sum_{faces\ local\ non\ chauffé} d_{lnc} * T_{lnc}(h-1) \rightarrow T_{lnc}
 \end{aligned} \tag{29}$$

d_{bat} = Transmissions vers extérieur [$W.K^{-1}$]

d_{tot} = Transmissions vers extérieur + terrain + local chauffé + local non chauffé [$W.K^{-1}$]

$d_{terrain}$ = Transmissions vers terrain [$W.K^{-1}$]

d_{lc} = Transmissions vers local chauffé [$W.K^{-1}$]

d_{lnc} = Transmissions vers local non chauffé [$W.K^{-1}$]

G_i = Gains internes (appareils + personnes) [$W.m^{-2}$]

$I_{irradiance}$ = Irradiance solaire entrante [W]

C_{cal} = Capacité calorifique [$J.K^{-1}$]

D = Débit d'air [$m^3.h^{-1}.m^{-2}$]

c = Capacité calorifique de l'air [$J.kg^{-1}K^{-1}$]

10.2. Puissance chauffage et refroidissement

En connaissant les températures de consigne pour le chauffage et le refroidissement (climatisation), il est alors possible de calculer la température nécessaire pour atteindre ces valeurs, ce qui se traduit en puissance de chauffage et de refroidissement. Étant donné que les paramètres sont obtenus de manière horaire, il est aisé de déterminer l'énergie correspondante (produit de la puissance par le temps).

$$P_{chauffage}(h) = \frac{T_{consigne}(h) - (T_{in}(h-1) + T_{zone}(h) + T_{int}(h) + T_{terrain}(h) + T_{solaire}(h) + T_{interne}(h) + T_{lc}(h) + T_{lnc}(h) + T_{aer}(h))}{SRE * 3600} * C_{cal} \tag{30}$$

$$P_{\text{refroidissement}}(h) = \frac{T_{\text{consigne}}(h) - (T_{\text{in}}(h-1) + T_{\text{zone}}(h) + T_{\text{int}}(h) + T_{\text{terrain}}(h) + T_{\text{solaire}}(h) + T_{\text{interne}}(h) + T_{\text{ic}}(h) + T_{\text{inc}}(h) + T_{\text{aer}}(h))}{SRE * 3600} * C_{\text{cal}} \quad (31)$$

10.3. Adaptation sous Matlab

Après avoir identifié, l'ensemble des flux intervenant dans le bilan énergétique du bâtiment, ce bilan a pu être mis en place au sein du logiciel Matlab. Ainsi, les 5 fichiers résultats décomposant le bâtiment initial sont extraits et permettent de recalculer le bilan du bâtiment total. Tout comme le logiciel bSol, ce bilan détermine l'évolution horaire de la température intérieure ainsi que le nombre de kWh de chauffage, de climatisation annuelle et les puissances nécessaires (chauffage/refroidissement) selon les consignes données par l'utilisateur. Les calculs obtenus ont également été comparés à différents bâtiments modélisés sous bSol et sont très proches des valeurs issues du logiciel. Sur le bâtiment étudié, sans l'usage de climatisation, à l'année la température intérieure à un écart au maximum de 0.15 °C et en moyenne de 0.01 °C. Avec la climatisation, à l'année, l'écart maximum de température est de 0.08 °C et en moyenne de 0.002 °C. En ce qui concerne les calculs d'énergie annuelle, l'écart est en général inférieur à 1%, ce qui montre que l'algorithme peut être utilisé pour simuler un bilan énergétique annuel. D'autre part, dans l'objectif de mettre en place des paramètres d'influence, qui, comme il a été possible de le constater dans les précédentes analyses, ont un impact considérable sur l'usage de la climatisation, il a été fait le choix d'intégrer des conditions d'exploitation également disponibles dans bSol.

10.4. Fermeture des stores

La condition de fermeture des stores est alors mise en place. Selon une température de consigne intérieure définie par l'utilisateur ainsi qu'une valeur g , les stores peuvent se fermer, ce qui correspond à appliquer une valeur g_{store} en fonction des orientations. Ainsi, dans le cas où la température intérieure dépasse la valeur de consigne, le flux T_{solaire} devient :

$$+ \frac{3600}{c_{\text{Cal}}} * I_{\text{irradiance}}(h-1) * g_{\text{store}} \rightarrow T_{\text{solaire}} \quad (32)$$

10.5. Ouverture des fenêtres

En ce qui concerne l'aération par les fenêtres, cette option est aussi considérée. Avec une température de consigne définie et selon un écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, le débit d'aération est modifié. Le flux d'aération est donc transformé où D devient D_{fen} :

$$\rho_a * c * D_{\text{fen}} * (T_{\text{ext}}(h-1) - T_{\text{in}}(h-1)) * \frac{SRE}{C_{\text{cal}}} \rightarrow T_{\text{aer}} \quad (33)$$

10.6. Intégration de la végétation

Une fois le bilan introduit et les paramètres d'influence (relatif à l'utilisation du bâtiment) ajoutés, il est alors possible d'y intégrer la végétation.

À cet effet, pour calculer les effets liés, il est indispensable d'introduire un fichier météo contenant les heures, l'humidité relative et la vitesse de vent, sur une période de 8760 heures (voir figure 25) :

h [h]	HR [%]	u2 [m/s]
0	97.5	1.1
1	97.9	1.1
2	98.3	1.3
3	98.9	1.8
4	99.4	1.4
5	99.3	0.7

Figure 25: Fichier météo à introduire pour le calcul des effets de la végétation
 Source : Données des auteurs

L'influence de la végétalisation est mise en place dans le bilan énergétique en considérant d'abord les effets d'ombrage.

10.7. LAI et transmissivité

Tout comme l'analyse réalisée sur l'ombrage, les effets de la végétation sont représentés en tant que protection solaire. La transmissivité issue de la végétalisation est donc approximée en tant que valeur g et la relation utilisée est la suivante :

$$\tau = \exp(-k * LAI)$$

Afin de considérer une évolution dynamique et annuelle du feuillage, il a été fait le choix d'intégrer une variation du LAI. Comme l'étude se concentre sur des feuillages de type caduc, cette variation a été paramétrée pour respecter le temps de débourrement et la chute des feuilles respectivement situées au début du printemps et en début d'hiver. Cependant, dans le cas d'une autre étude, les paramètres peuvent être librement variés pour s'adapter aux conditions de la végétation. Ainsi, en spécifiant l'heure de débourrement, l'heure de chute et le LAI maximal, il est possible de dresser une équation de deuxième ordre, où :

$$LAI(h) = a(h - debutf)(h - finf) \quad (34)$$

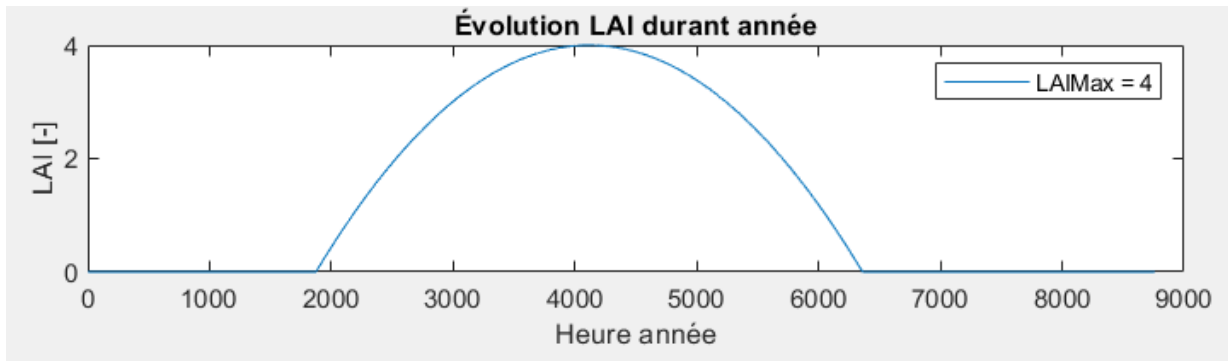
$debutf$ = Début du feuillage [h]

$finf$ = Fin du feuillage [h]

a = Coefficient feuillage LAI [h^{-2}]

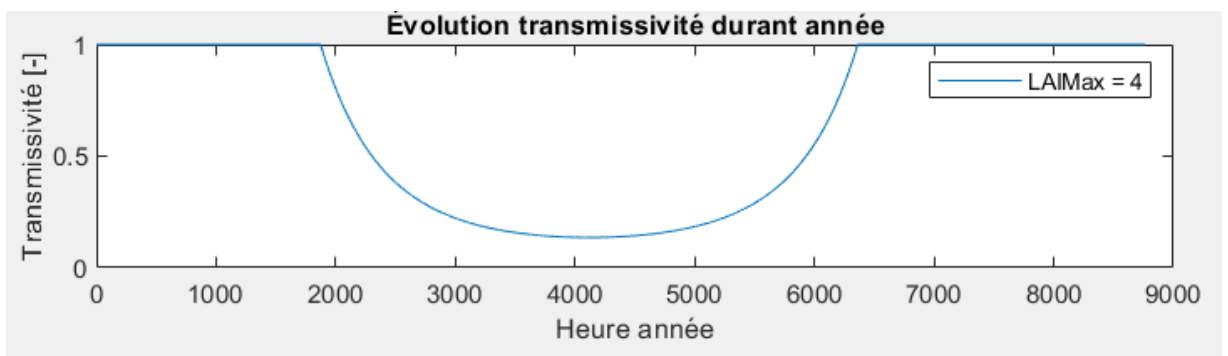
$$avec a = \frac{LAI_{max}}{\left(\frac{debutf + finf}{2} - debutf\right) * \left(\frac{debutf + finf}{2} - finf\right)} \quad (35)$$

L'exemple représenté ci-dessous comprend une apparition de feuillage en début de printemps et une chute des feuilles en début d'hiver avec un LAI maximal de 4 situé en symétrie entre les heures de débourrement et chutes définies (voir graphique 36).



Graphique 36: Évolution du LAI durant l'année
 Source : Données des auteurs

La transmissivité peut alors être déduite en connaissant le coefficient d'extinction (supposé ici constant à 0.5). Pour la même situation qu'énoncée précédemment, l'évolution de la transmissivité est la suivante (voir graphique 37) :



Graphique 37: Évolution de la transmissivité correspondante durant l'année
 Source : Données des auteurs

Ainsi, avec cette équation, il est possible d'associer un résultat dynamique, peu importe les façades correspondant à la transmissivité saisonnière de la végétation. Cette valeur de transmissivité peut également être couplée avec les protections solaires. le flux T_{solaire} devient ainsi :

$$+ \frac{3600}{cCal} * Irradiance(h - 1) * \tau_f \text{ ou } + \frac{3600}{cCal} * Irradiance(h - 1) * \tau_f * g_{store} \rightarrow T_{\text{solaire}} \quad (36)$$

10.8. Variation de température (feuillage)

Afin de représenter l'impact de la modification de la température par la végétation, de manière similaire à l'analyse, la température à l'intérieur du feuillage est assimilée à la température extérieure de la façade. L'équation suivante est utilisée et permet de préciser les façades sur lesquelles s'appliquent les effets de la végétation :

$$T_f = T_{mean} + \frac{\gamma'}{\frac{\Delta}{P} + \gamma'} \left[\frac{Q_{leaf}}{g_{Hr} c_{pa}} - \frac{e_s - e_a}{P * \gamma'} \right]$$

Auparavant, il n'était pas possible de mettre en évidence le rayonnement effectivement perçu par une façade, ce qui rendait difficile la distinction des températures des façades par orientation. D'autant plus que les calculs étaient réalisés à partir du rayonnement global, ce qui pouvait présenter de grandes imprécisions ne tenant pas compte de l'horizon proche et des orientations. À présent que les fichiers sont séparés, il est possible d'extraire l'irradiance totale pénétrant les fenêtres de chacune des orientations (exprimée en W). En divisant le rayonnement par la surface du vitrage et la valeur g de celui-ci, le rayonnement effectivement perçu en $W \cdot m^{-2}$ peut être calculé. Ce rayonnement est alors utilisé dans le calcul de la température de feuillage. Cependant, une limite apparaît concernant cette équation, puisque pour obtenir une irradiance dans le fichier résultat, il est nécessaire que la façade dispose d'un vitrage, ce qui dans le cas contraire afficherait un rayonnement nul. Également, dans cette étude, étant donné qu'un facteur d'ombrage dynamique a été introduit, il est nécessairement intégré dans le calcul d'irradiance. Ainsi pour une étude plus précise et en fonction des situations, il serait pertinent de supprimer ou modifier ce facteur d'ombrage dans le rayonnement incident sur la végétation.

$$I_{vege} = \frac{I_{irradiance}}{S_{fen} * g_{vi} * Q_{vi}} \quad (37)$$

I_{vege} = Rayonnement perçu par la végétation selon orientation [$W \cdot m^{-2}$]

S_{fen} = Surface des fenêtres selon orientation [m^2]

g_{vi} = Valeur g vitrage [–]

Q_{vi} = Quote part vitrée [–]

D'autre part, en raison de l'approche utilisée, à savoir la séparation du bâtiment en 5 fichiers, le calcul de variation de température peut, en apparence, uniquement être appliqué à l'ensemble de la façade et pas seulement à la surface opaque (étant donné que les fichiers bilans donnent les transmissions totales correspondant à la fois aux fenêtres et aux surfaces opaques). Dans l'objectif de pouvoir séparer les effets d'une végétalisation murale (prise en compte uniquement de la variation de température sur la surface opaque) et une végétalisation sur les murs et vitrages (incluant les effets de la température sur les surfaces vitrées et opaques, et de l'ombrage), les transmissions sont distinguées pour chacune des orientations. Ces transmissions peuvent par ailleurs être récupérées au sein du fichier « bâtiment » également disponible après simulation ou introduites de manière manuelle :

$$+ \frac{3600}{cCal} * (d_{mur} * T_{mur}(h - 1) + d_{fen} * T_{fen}(h - 1)) \rightarrow T_{zone_{paroi}} \quad (38)$$

d_{mur} = Déperdition du mur [$W \cdot K^{-1}$]

d_{fen} = Déperdition de la fenêtre [$W \cdot K^{-1}$]

T_{mur} = Température extérieure au niveau du mur [$^{\circ}C$]

T_{fen} = Température extérieure au niveau de la fenêtre [$^{\circ}C$]

Aussi, il a été fait le choix, tout comme l'effet d'ombrage d'intégrer l'impact de la saisonnalité. Ainsi, de manière similaire, ce n'est pas le LAI qui est varié, mais plutôt la largeur de la feuille,

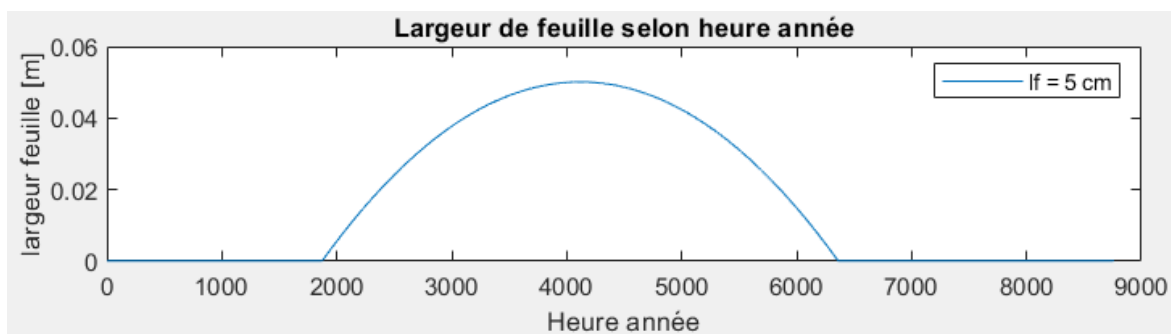
qui atteint son maximum entre l'été et le printemps. L'équation du calcul de la largeur de feuille est la suivante :

$$l_f(h) = b(h - debutf)(h - finf) \quad (39)$$

b = Coefficient feuillage largeur feuille [h^{-2}]

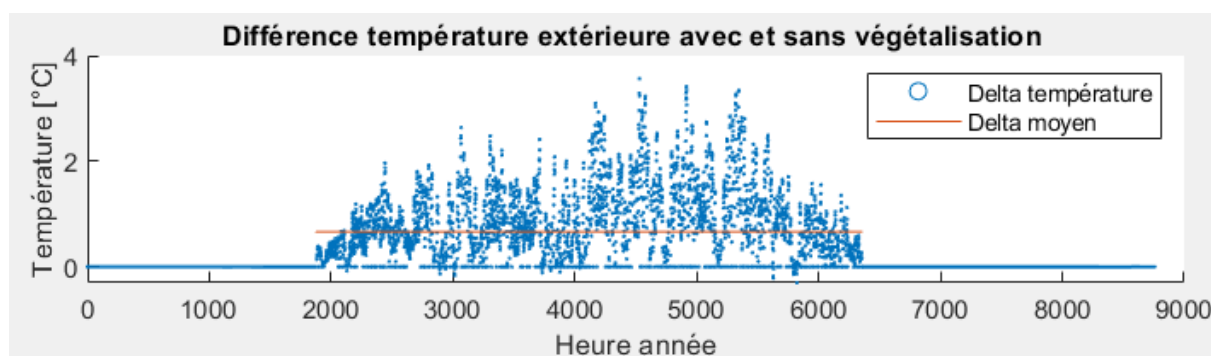
$$avec \ b = \frac{l_f \max}{\left(\frac{debutf + finf}{2} - debutf\right) * \left(\frac{debutf + finf}{2} - finf\right)} \quad (40)$$

Afin de ne pas avoir de valeur indéterminée, il a fallu fixer une largeur de feuille par défaut supérieure à 0. Ainsi, la valeur adoptée est de 0.1mm. Cette équation est d'autant plus pertinente qu'elle permet de limiter le refroidissement dans les périodes de transition (automne/hiver), ce qui a pour conséquence de moins marquer l'augmentation du chauffage. La variation de la largeur de feuille est ici illustrée avec un exemple comprenant une largeur de feuille maximale de 5 cm et un respect du temps de débourrement et de chute des feuilles (voir *graphique 38*) :



Graphique 38: Évolution de la largeur de feuille annuelle
 Source : Données des auteurs

La variation de température est ainsi moins uniforme tout au long de l'année, mais contient un pic entre les saisons printemps/été (voir *graphique 39*) :



Graphique 39: Différence de température (extérieure-feuille) durant l'année selon la méthode de température de feuille
 Source : Données des auteurs

Par ailleurs, afin d'intégrer à la simulation les travaux réalisés durant les précédents travaux de Bachelor, il a été fait le choix d'introduire l'équation de réduction de température utilisant

l'évapotranspiration développée. L'utilisateur peut donc choisir entre l'une ou l'autre méthode pour effectuer le bilan énergétique. La saisonnalité pourrait aussi être appliquée dans l'équation développée par les précédents auteurs en mettant en place des variations du coefficient de culture ainsi que de l'épaisseur du feuillage, ce qui n'est pas mis en œuvre dans cette étude. D'autre part, en raison de l'imprécision liée au calcul de l'équation empirique mis en œuvre, celle-ci n'est pas introduite dans l'algorithme.

10.9. Aération

La végétation des façades peut faire apparaître des variations d'humidité dans l'air. Ce changement entraîne donc des conséquences sur l'aération, sachant qu'elle peut agir en tant que gain ou perte. Aussi, avec une baisse de la température extérieure, le flux d'aération en est varié puisque de l'air frais est introduit dans le bâtiment. L'objectif ici est de pouvoir ajouter ces effets dans le bilan énergétique. La capacité calorifique de l'air intervenant dans le calcul du bilan d'énergie dépend directement de l'humidité présente dans l'air. Tout repose ici sur le principe de l'enthalpie de l'air humide, qui représente la quantité de chaleur emmagasinée dans celle-ci. Composé d'air humide et d'air sec, l'enthalpie de l'air humide est la somme des enthalpies de ces deux constituants, représentée ainsi par la chaleur sensible (dépendant de la température de l'air) et de la chaleur latente (fonction de l'énergie liée à la vapeur d'eau). Cette enthalpie peut être lue sur le diagramme de l'air humide ou calculé approximativement comme ceci :

$$h = 1.005 * T_{mean} + x * (2.501 + 1.82 * T_{mean}) \quad (41)$$

h = Enthalpie de l'air humide [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ air sec]

x = Humidité spécifique [$\text{kg d'eau} \cdot \text{kg d'air sec}^{-1}$]

À partir de cette équation, il est possible d'exprimer la capacité calorifique de l'air en fonction de l'humidité spécifique :

$$c_s = 1.005 + 1.82 * x \quad (42)$$

c_s = capacité thermique calorifique de l'air humide [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

En ce qui concerne l'humidité spécifique, celle-ci peut être calculée comme suit :

$$x = \frac{e_a * M_{w_i}}{(P - e_a) * M_{w_{dry}}} = \frac{e_a}{P - e_a} * 0.621 \quad (43)$$

M_{w_i} = Masse molaire de l'eau, 0.18 [$\text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{mol}^{-1}$]

$M_{w_{dry}}$ = Masse molaire de l'air, 0.29 [$\text{kgair} \cdot \text{mol}^{-1}$]

L'humidité absolue est quant à elle calculée en connaissant la constante des gaz parfaits, la température ainsi que la masse molaire de l'eau :

$$\rho_v = \frac{e_a * M_w}{R * T} \quad (44)$$

M_w = Masse molaire de l'eau, 18.02 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

$R = \text{Constante universelle des gaz parfaits}, 8.31 \text{ [J.mol}^{-1}.K^{-1}]$

$T = \text{Température [K]}$

$\rho_v = \text{Humidité absolue [kg.m}^{-3}]$

La variation d'humidité absolue dans le bâtiment peut alors être déterminée en spécifiant le taux de renouvellement horaire de la ventilation, le volume du bâtiment, l'apport des personnes ainsi que l'humidité absolue extérieure. Ici, l'humidité absorbée par les parois du bâtiment n'est pas considérée. En général, l'apport horaire en humidité absolue d'une personne est estimé à 50 g.h⁻¹.

$$V \frac{d\rho_{in}}{dt} = n * V(\rho_{ext}(t) - \rho_{in}(t)) + Q_g \quad (45)$$

$V = \text{Volume du bâtiment [m}^3]$

$\rho_{in} = \text{Humidité absolue dans le bâtiment [kg.m}^{-3}]$

$\rho_{ext} = \text{Humidité absolue à l'extérieur du bâtiment [kg.m}^{-3}]$

$n = \text{Renouvellement horaire de l'air intérieur [h}^{-1}]$

$Q_g = \text{Apport en humidité absolue des personnes [kg.h}^{-1}]$

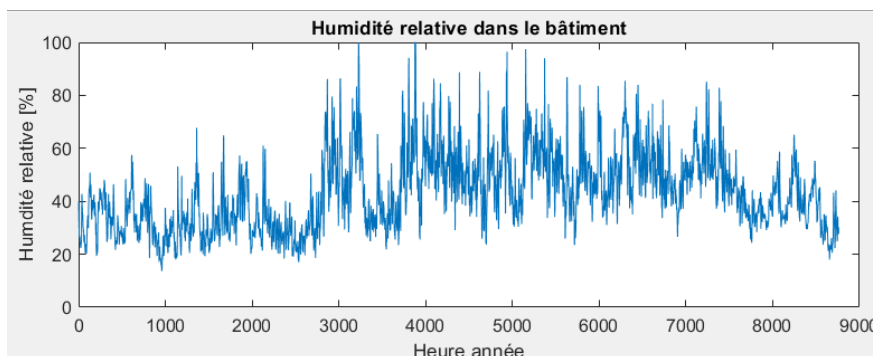
Il s'agit donc d'une équation différentielle de premier ordre, qui peut être résolue comme ci :

$$H_{r_i}(t) = \left(\rho_{ext}(t) + \frac{Q_g}{nV} + \left(\rho_{i_0} - \rho_{ext}(t) - \frac{Q_g}{nV} \right) * e^{-nt} \right) * \frac{R * T_{in} * 100}{M_w * e_s} \quad (46)$$

$H_{r_i} = \text{Humidité relative intérieure [%]}$

Où T_{in} est exprimée en [K] et e_s correspond ici à la pression de vapeur saturante intérieure.

Pour avoir une idée de l'humidité relative intérieure horaire, celle-ci est calculée sous Matlab pour le cas d'étude du bâtiment (voir *graphique 40*). Les résultats montrent qu'en moyenne sur l'année, avec une transpiration constante liée aux personnes de 500g par heure, l'activation de la climatisation et un taux de renouvellement horaire d'environ 0.3, l'humidité relative est située à 45%, ce qui est convenable pour le confort des habitants, mais peut parfois atteindre 100% pendant une courte période. Par ailleurs, étant donné que les mesures n'ont pas montré de différence importante dans l'humidité absolue extérieure avec la présence de végétation, son influence sera ici négligée, mais pourra toujours être ajoutée dans le cadre d'une étude ultérieure.



Graphique 40: Humidité relative annuelle au sein du bâtiment pour le bâtiment d'étude à faible inertie
 Source : Données des auteurs

L'humidité relative est donc utilisée pour communiquer une information sur le taux d'humidité dans le bâtiment et permet de déterminer l'humidité spécifique nécessaire au calcul de la capacité calorifique de l'air, modifiant ainsi les pertes par aération. D'autre part, étant donné que la végétalisation induit une variation de température, il est également nécessaire d'en tenir compte dans le flux relatif à l'aération. Cette association de la baisse de température liée au feuillage en tant que température extérieure dans l'aération fait apparaître toutefois quelques limites. En effet, il est possible de se rendre compte que ce cas est valable essentiellement dans une aération passive ou encore une installation de type simple flux, ce qui n'est pas le cas d'une ventilation double flux. Cet effet mériterait d'être davantage analysé dans une prochaine étude.

Ainsi, avec la présence de végétation, le flux T_{aer} , devient :

$$\rho * c_s * D * (T_f(h - 1) - T_{in}(h - 1)) * \frac{SRE}{C_{cal}} \rightarrow T_{aer} \quad (47)$$

10.10. Bilan d'énergie

Ainsi, l'ensemble des équations caractérisant les effets de la végétalisation sont intégrées au bilan énergétique du bâtiment. L'architecture du programme peut être visualisée comme suit :

1. Lecture et ouverture des données du bâtiment : 5 fichiers résultats et bâtiments, et météo
2. Extraction des données (fichier météo + bSol)
3. Définition des paramètres et constantes des plantes
4. Définition des paramètres et constantes du bâtiment
5. Choix du type de programme (Fermeture stores, ouverture fenêtres, enclenchement climatisation, choix du calcul de température végétation, inclusion changement capacité calorifique air végétation + calcul humidité intérieure, modification température aération végétation, modification température extérieure estivale)
6. Choix du type de végétalisation et des façades végétalisées
7. Calcul modification température ciel et température extérieure estivale (si option température estivale choisie)
8. Extraction caractéristiques bâtiments
9. Calcul rayonnement perçu par la végétation
10. Calcul variation de transmissivité
11. Calcul évapotranspiration et réduction température (si option calcul température végétation choisie : évapotranspiration)
12. Calcul évolution largeur feuillage, température feuillage et réduction température (si option calcul température végétation choisie : température feuille)
13. Bilan énergétique
14. Graphique et représentation

Le programme et les actions réalisables peuvent être résumés par l'illustration suivante. (voir *figure 26*) L'ensemble du programme est disponible en annexe 21.

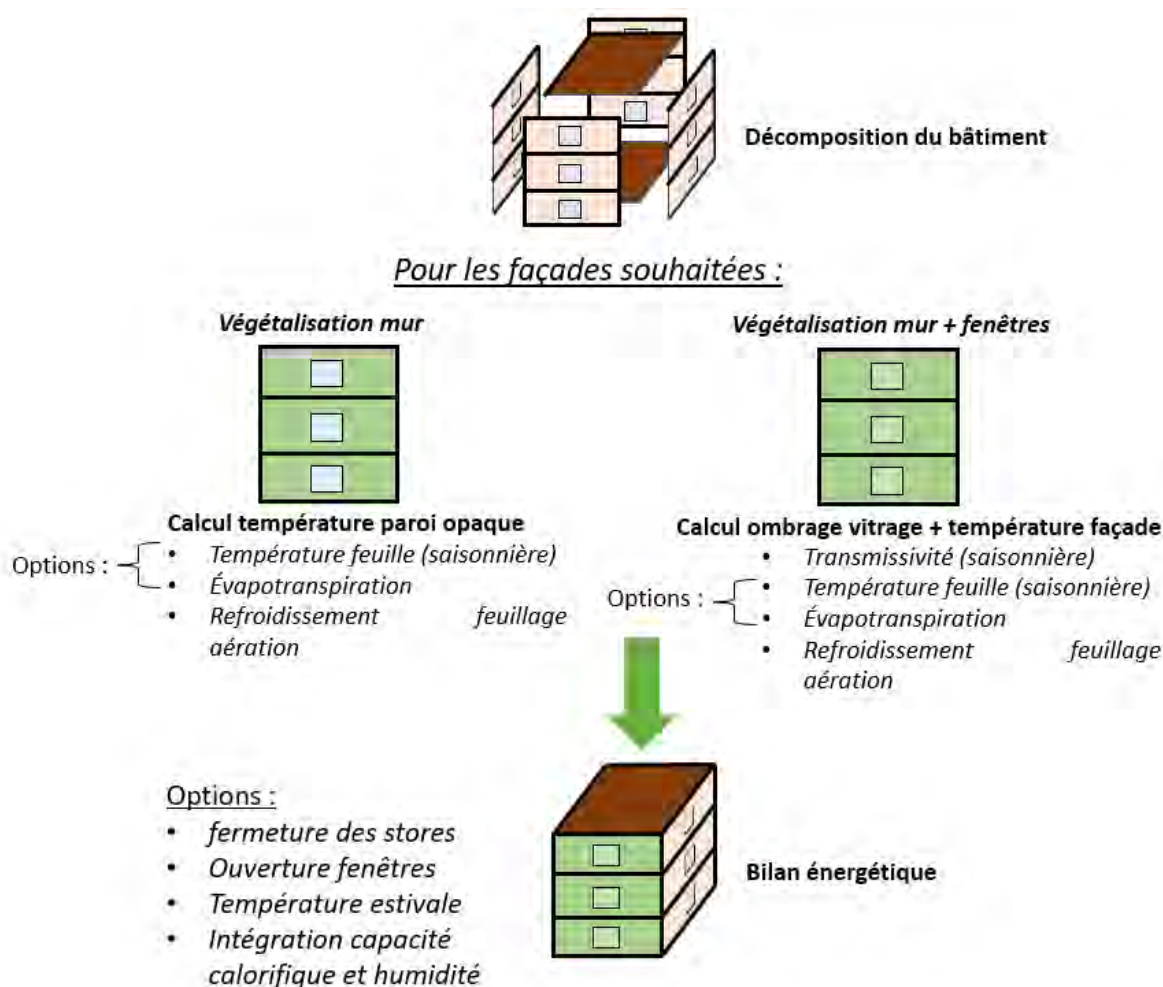


Figure 26: Architecture du programme et étapes de calcul du bilan d'énergie avec végétalisation
 Source : Données des auteurs

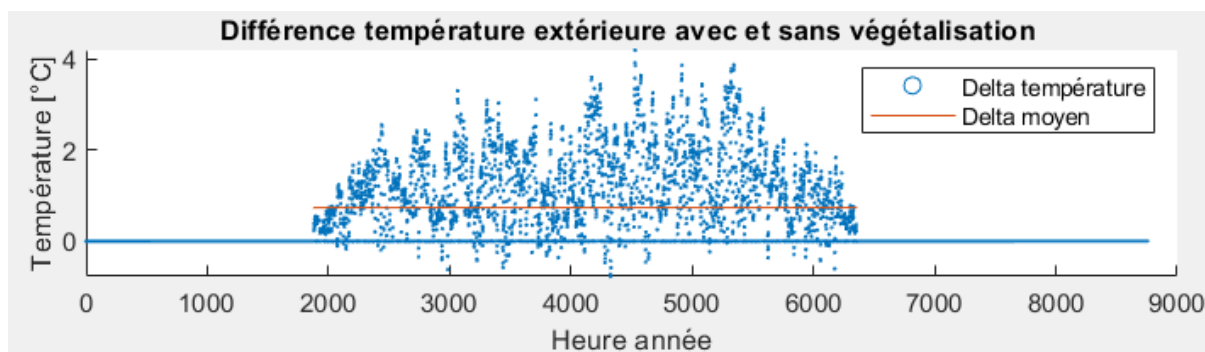
Il est donc possible de tenir compte de la saisonnalité de l'impact de la végétalisation tant au niveau de la variation de température extérieure que de l'ombrage, et ceci, peu importe l'orientation des façades. Les variations de la capacité calorifique de l'air, de l'humidité intérieure et l'impact de la modification de la température extérieure sur l'aération peuvent aussi être visualisés. Ces trois effets peuvent être séparés ou combinés, ce qui permet d'avoir une vision globale. Ils peuvent même être associés aux conditions d'exploitation, mettant en évidence leur complémentarité. Ce bilan d'énergie donne ainsi pour l'année, la consommation d'énergie en chauffage, climatisation pour une température de consigne, ainsi que les puissances des appareils. Il montre la possibilité de réduction des heures de climatisation, ainsi que l'abaissement potentiel de la puissance de refroidissement. Il est possible de comprendre la pertinence de ce type de simulation, qui peut être utilisée soit dans le cadre d'une transformation (dans l'objectif de réduire les dépenses en climatisation) ou dans une préétude pour dispenser la mise en place d'une climatisation. Elle permet également aux décideurs de choisir l'orientation la plus favorable d'un point de vue énergétique. À présent que le bilan énergétique est mis en place, il est possible de pleinement évaluer l'effet d'ombrage et de variation de température. Ces effets seront en partie aussi relevés sur deux autres bâtiments d'inertie différente (moyenne et lourde).

11. Simulation énergétique du bâtiment avec végétalisation

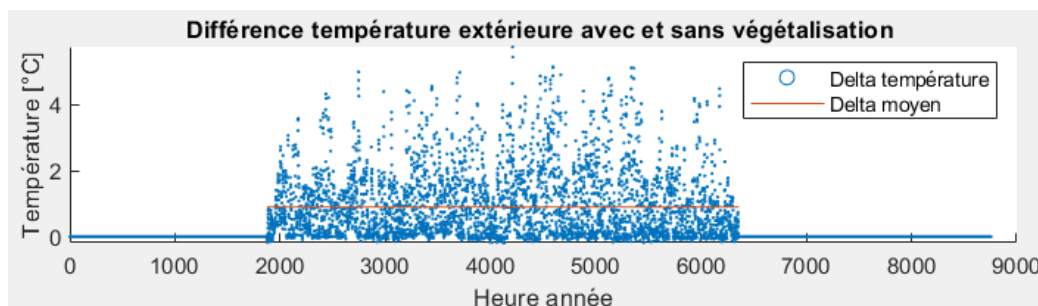
11.1. Cas du bâtiment à faible inertie

Le bâtiment initial à inertie légère a été repris et décomposé au sein de l'algorithme réalisé sous Matlab. La seule différence est que le chauffage au sol n'a pas été introduit, ce qui sera visible par des besoins de chauffage différents. Cette fois-ci les effets de la végétation sont rassemblés afin de mieux voir la performance de cette dernière. Les types de structures représentées sont des végétalisations recouvrant uniquement les murs ou à la fois les murs et les vitrages. La végétalisation murale est d'abord étudiée en tenant compte de la réduction de température extérieure du mur ainsi que la modification de la température dans l'aération du bâtiment. L'objectif de cette partie de l'étude est de pouvoir observer le potentiel maximum de la végétation, en y intégrant l'ensemble de ces effets. À noter que dans le calcul de réduction de température pour l'aération, la référence est fixée sur la façade est (pour une végétalisation de l'ensemble des façades). Ici, la modification de la capacité calorifique de l'air ainsi que le calcul d'humidité ne sont pas intégrés. La végétation utilisée est toujours à feuillage caduc et une largeur de feuille de 5 cm est utilisée. La méthode liée à l'évapotranspiration est aussi évaluée et un feuillage d'épaisseur de 30 cm est considéré avec un coefficient de culture de 0.3 et un facteur multiplicatif de 180. En effet, il est difficile d'appliquer les mêmes paramètres que lors des mesures étant donné qu'il ne s'agit plus du rayonnement global mais du rayonnement effectivement perçu par la végétation, ce qui implique des différences qui mériteraient d'être plus précisément analysées.

En prenant pour exemple, la réduction de température extérieure liée au feuillage est, avec la méthode de température de feuille, la réduction observée sur la période printemps/été est en moyenne de 0.74°C et peut atteindre au maximum 4.2°C (voir *graphique 41*). En ce qui concerne la méthode de calcul avec évapotranspiration, la réduction moyenne sur la période printemps/été est de 0.9°C et aboutit à une réduction maximale de 5.8 °C (voir *graphique 42*). Dans les deux situations, les résultats présentent un ordre de grandeur convenable, cohérent selon les mesures réalisées, sachant que les températures à Zurich prises en compte étaient moins importantes que celles mesurées à Chens-sur-Léman, elles traduisent donc une évaporation plus faible.



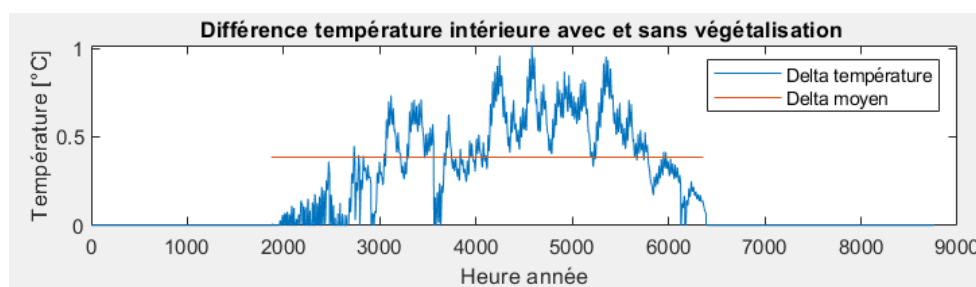
Graphique 41 : Réduction de température extérieure sur la façade est, en tenant compte de la méthode de température de feuille
 Source : Données des auteurs



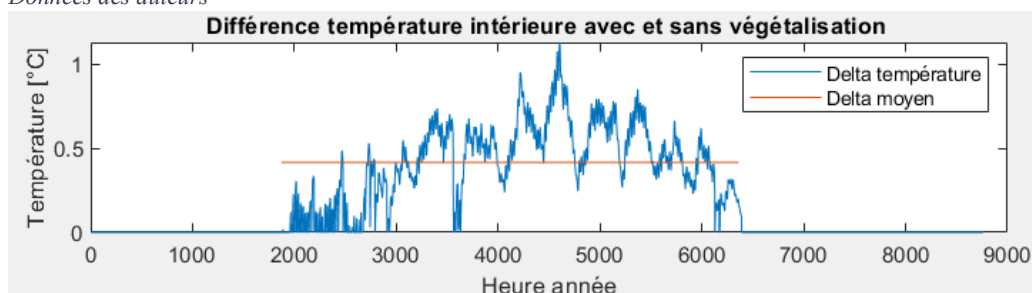
Graphique 42: Réduction de température extérieure sur la façade est, en tenant compte de la méthode d'évapotranspiration
 Source : Données des auteurs

11.1.1. Bâtiment à faible inertie (sans stores ni refroidissement par aération)

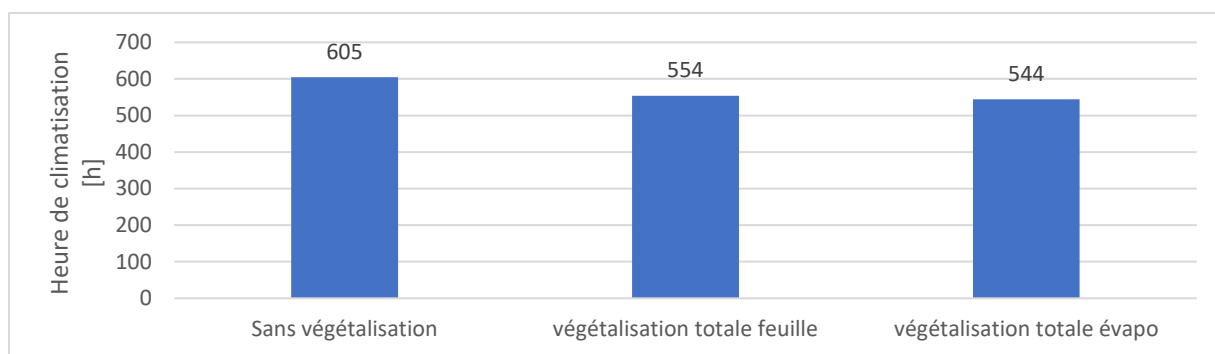
L'impact de la végétalisation est d'abord étudié sans la mise en place de stores ni de refroidissement par aération. Avec une végétalisation recouvrant l'ensemble des façades (uniquement au niveau des murs), en intégrant la méthode de température de feuille, les heures potentielles de climatisation pour atteindre une température de consigne de 26°C passent de 605 heures à 554 heures (-8.4%) (voir *graphique 45*) et la puissance de climatisation est abaissée de 1.7 kW. L'énergie potentielle de climatisation passe alors de 4.59 kWh.m⁻² à 3.85 kWh.m⁻² (-16.1%) (voir *graphique 46*). En ce qui concerne le confort thermique, la température intérieure de l'habitat est réduite en moyenne de 0.38°C (sans climatisation) (voir *graphique 43*). Avec la méthode de calcul basée sur l'évapotranspiration, les heures potentielles de climatisation sont réduites à 544 heures (-10.1%) (voir *graphique 45*) et la puissance de climatisation abaissée de 0.8 kW. Concernant l'énergie potentielle de climatisation, celle-ci est abaissée à 3.8 kWh.m⁻² (-17.2%) (voir *graphique 46*) et la température intérieure baissée en moyenne de 0.42°C (sans climatisation) (voir *graphique 44*). Dans les deux cas, l'énergie finale (chauffage + climatisation) est plus faible avec végétalisation que sans.



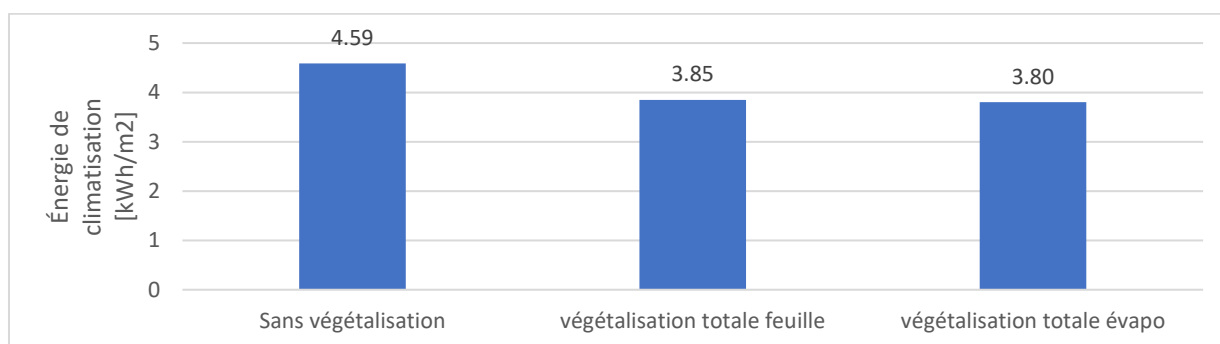
Graphique 43: Différence de température intérieure avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale selon la méthode de température avec feuille
 Source : Données des auteurs



Graphique 44: Différence de température intérieure avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale selon la méthode de température avec évapotranspiration
 Source : Données des auteurs



Graphique 45: Heures de climatisation selon les deux approches de réduction de température
 Source : Données des auteurs

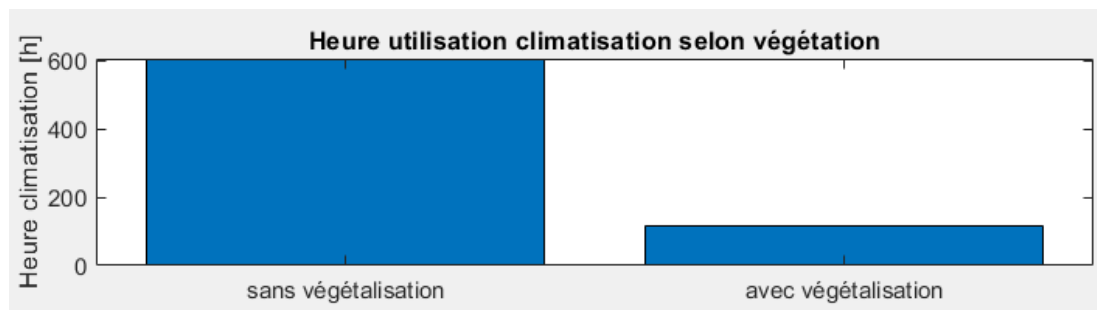


Graphique 46: Énergie de climatisation selon les deux approches de réduction de température
 Source : Données des auteurs

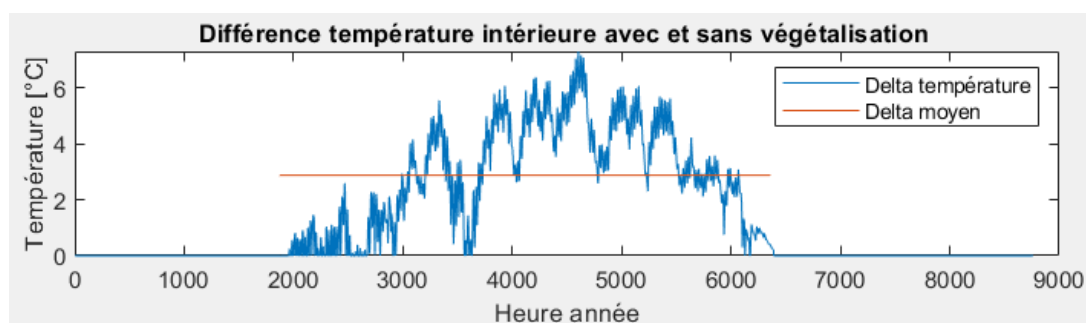
Les résultats ici obtenus sont disponibles en annexe 16. Ainsi, il est possible d'observer dans les deux situations que les résultats sont similaires. Ceci est le cas lors d'une étude de la totalité des façades, ce qui diffère lorsque les façades sont analysées selon chacune des orientations, étant donné que comme expliqué précédemment, les deux équations utilisées admettent un comportement différent selon le rayonnement perçu. La seule différence notable se retrouve dans la réduction de puissance liée au refroidissement. Toutefois, comme au global, les résultats sont proches, seulement une approche sera utilisée pour les calculs suivants, dont le choix est porté sur la réduction de température par évapotranspiration étant donné qu'elle intègre plus précisément les effets liés au rayonnement.

La situation initiale est alors comparée à une végétalisation totale recouvrant les murs et les vitrages comprenant les mêmes caractéristiques de bâtiment et feuillage (avec un LAI maximal de 4 correspondant ici à une transmissivité maximale d'environ 0.14, ce qui en fait un ombrage performant). Seulement, les effets appliqués de la végétation sont différents faisant intervenir la réduction de température extérieure du mur, du vitrage, la baisse de rayonnement pénétrant dans les vitrages ainsi que la modification de l'aération (rafraîchissement par les plantes). Ainsi, cette simulation permet de prendre en compte l'ensemble des effets potentiels de la végétalisation montrant sa performance maximale. En mettant en place une végétalisation totale, les heures potentielles de climatisation sont drastiquement réduites à 118 heures (-80.5%) (voir *graphique 47*) et la puissance de climatisation diminuée de 5.1 kW. L'énergie potentielle de climatisation est alors réduite à 0.51 kWh.m⁻² (-88.9%).

Au niveau du confort thermique, la température intérieure est réduite en moyenne de 2.87°C (sans climatisation) et peut atteindre jusqu'à 7.2°C (voir *graphique 48*). Le bilan (climatisation + chauffage) est aussi meilleur avec une végétalisation de l'ensemble des façades (32.91 kWh.m⁻² sans végétalisation et 31.84 kWh.m⁻² avec végétalisation). L'ensemble des résultats correspondants sont disponibles en annexe 17.

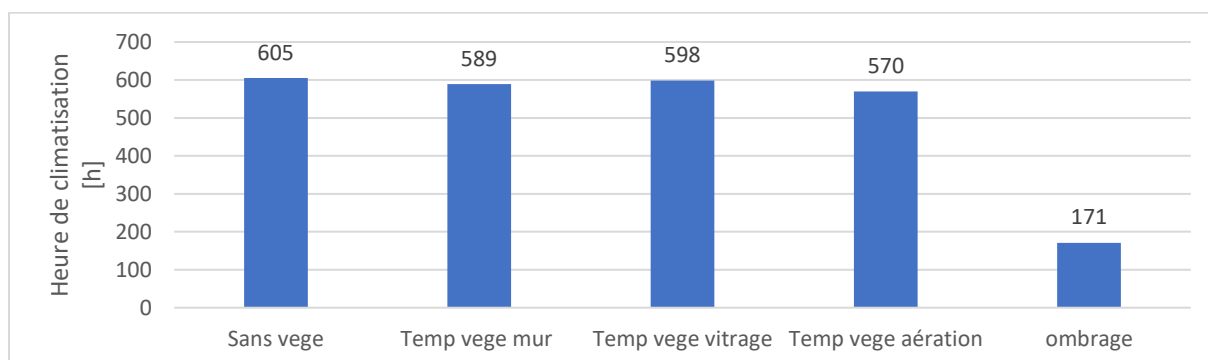


Graphique 47: Heures potentielles de climatisation avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale et au niveau des vitrages
 Source : Données des auteurs



Graphique 48: Différence de température avec et sans végétalisation, pour une végétalisation totale murale et au niveau des vitrages
 Source : Données des auteurs

Également, pour avoir une idée de l'influence des différents paramètres liés à la végétation dans le cadre du refroidissement, ceux-ci sont observés de manière unique (refroidissement parois opaques, vitrées, rafraîchissement aération, ombrage). Les résultats sont les suivants et permettent de montrer que la réduction de température semble avoir un effet semblable au niveau des parois et de l'aération. Cependant, l'ombrage est ici le paramètre majeur d'influence (voir *graphique 49*).

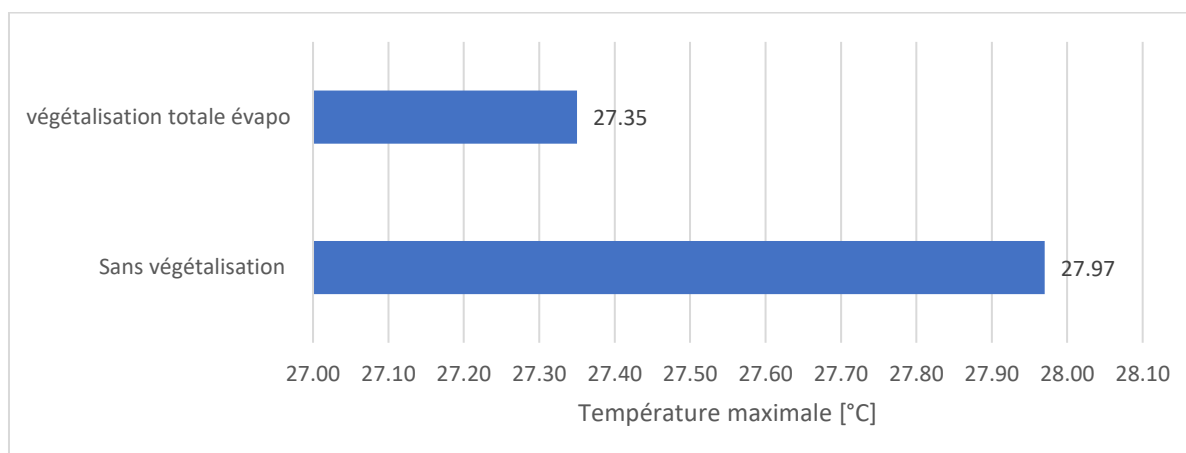


Graphique 49: Effets de la végétalisation séparés sur les heures de climatisation potentielles
 Source : Données des auteurs

11.1.2. Bâtiment à faible inertie (avec stores et refroidissement par aération)

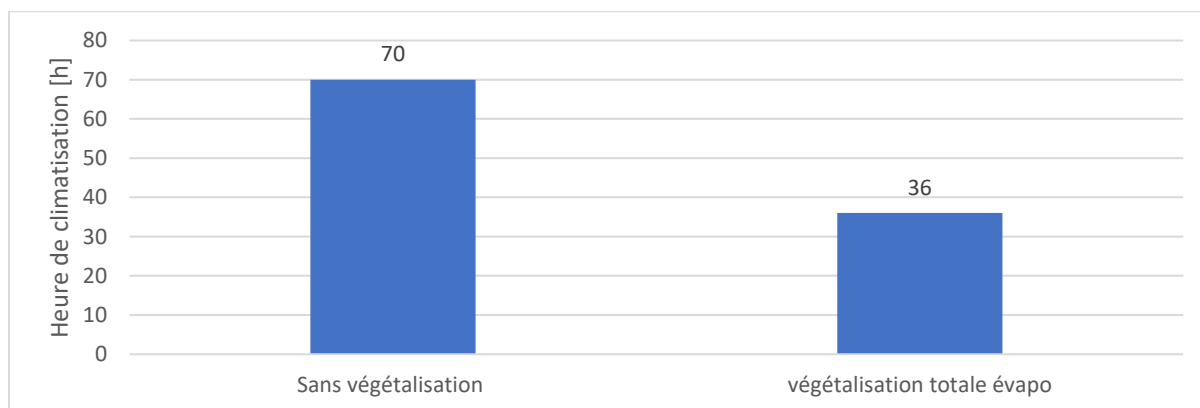
Également, l'impact associé de la gestion des stores, du refroidissement par aération (ouverture de fenêtre), et de la végétalisation est mis en évidence pour ces mêmes configurations (d'abord uniquement au niveau du mur). À cet effet, lorsqu'une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est supérieure à 2°C pour une température intérieure supérieure à 22°C, un débit d'aération de 2.4 m³.m⁻².h⁻¹ est appliqué. Également, lorsque la température intérieure dépasse 24°C, des stores à valeur g de 0.1 sont appliqués sur toutes les façades. Il est possible d'observer que la gestion des stores ainsi que de l'aération a un impact conséquent sur le confort thermique et le refroidissement du bâtiment. En effet, la température maximale intérieure atteinte (sans climatisation) est de seulement 27.97°C (voir *graphique 50*), tandis que les heures de climatisation potentielles sont estimées à 70 heures (voir *graphique 51*).

Ainsi, en mettant en parallèle les effets de la végétalisation, ceux-ci sont très peu marqués puisque les heures de climatisation restantes approchent les 36 (-48.6%) et la température intérieure maximale 27.35°C (sans climatisation) (-2.2%) (voir *graphiques 50, 51, 52 et 53*). Ces résultats montrent que dans les deux cas et essentiellement avec la présence de moyens de régulation intelligents, les effets liés à une végétalisation restent importants (selon l'écart relatif) mais faibles selon la réduction réalisée par la régulation. Ainsi, étant donné l'efficacité des moyens de régulation, la question, concernant la pertinence d'une végétalisation murale peut ici se poser. Les résultats correspondants sont disponibles en annexe 18.



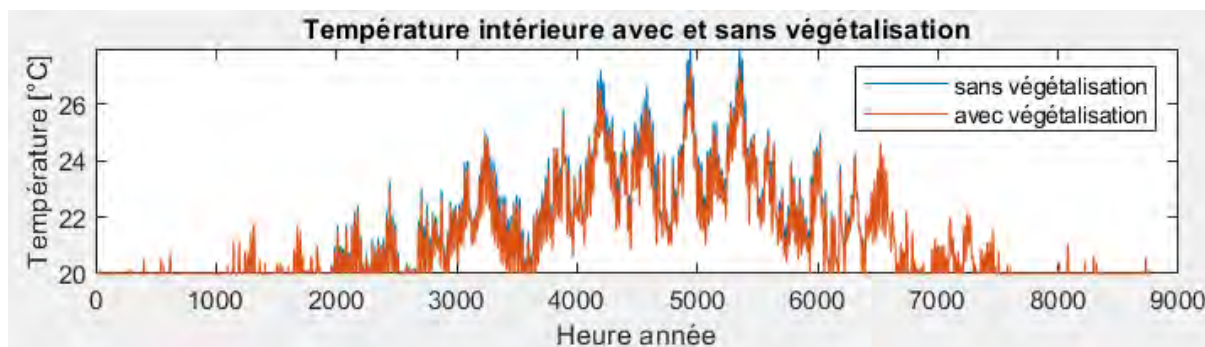
Graphique 50: Température intérieure maximale en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires

Source : Données des auteurs

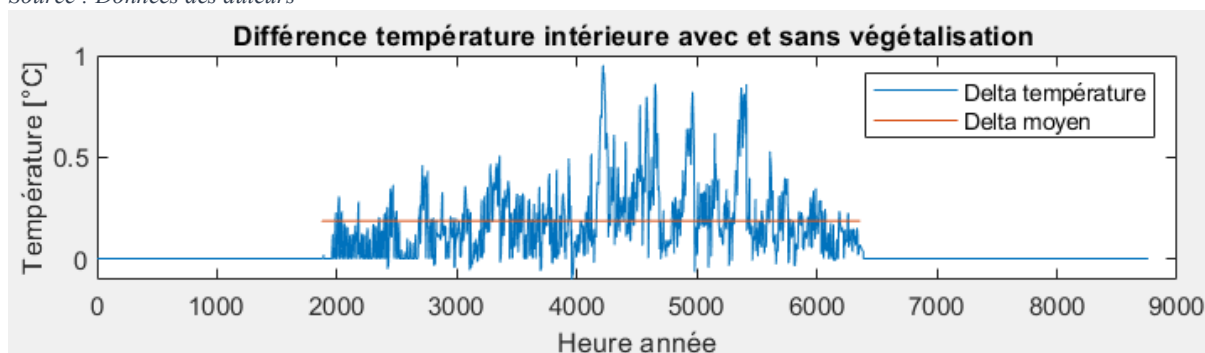


Graphique 51: Heures de climatisation en considérant l'ensemble des effets de la végétation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires

Source : Données des auteurs

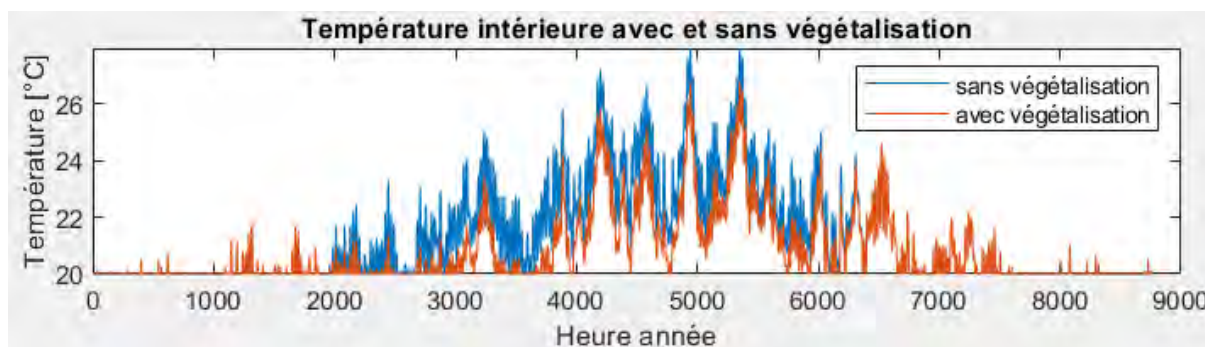


Graphique 52: Température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétalisation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires
 Source : Données des auteurs

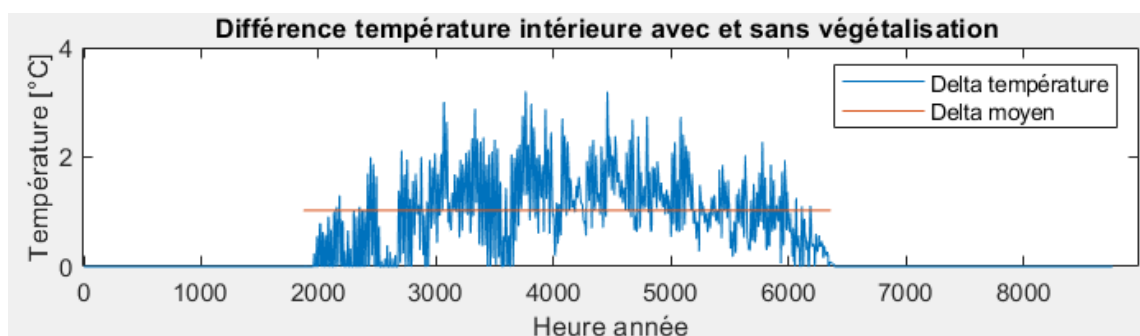


Graphique 53: Différence de température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétalisation sur les murs associés à une gestion de l'aération et des protections solaires
 Source : Données des auteurs

Le cas d'un bâtiment associant murs et vitrages est aussi étudié avec l'ajout de stores et de rafraîchissement par aération. Également, les effets de la végétalisation sont une fois de plus moins marqués étant donné que la régulation est un moyen efficace dans le refroidissement et la gestion du confort thermique. Les heures de climatisation potentielles sont abaissées à 15 (-78.6%) et la température intérieure maximale (sans climatisation) réduite à 26.78°C (-4.3%). Il peut être noté que la réduction de la température intérieure n'est pas négligeable, puisqu'en moyenne celle-ci est réduite de 1°C, avec un maximum approchant les 3.2°C (voir graphiques 54 et 55). Ces résultats permettent de montrer que même si en apparence, l'utilisation de la climatisation est limitée, la végétalisation de l'ensemble des murs et vitrages s'illustre dans l'amélioration du confort thermique. Les résultats associés à cette étude sont disponibles en annexe 19.



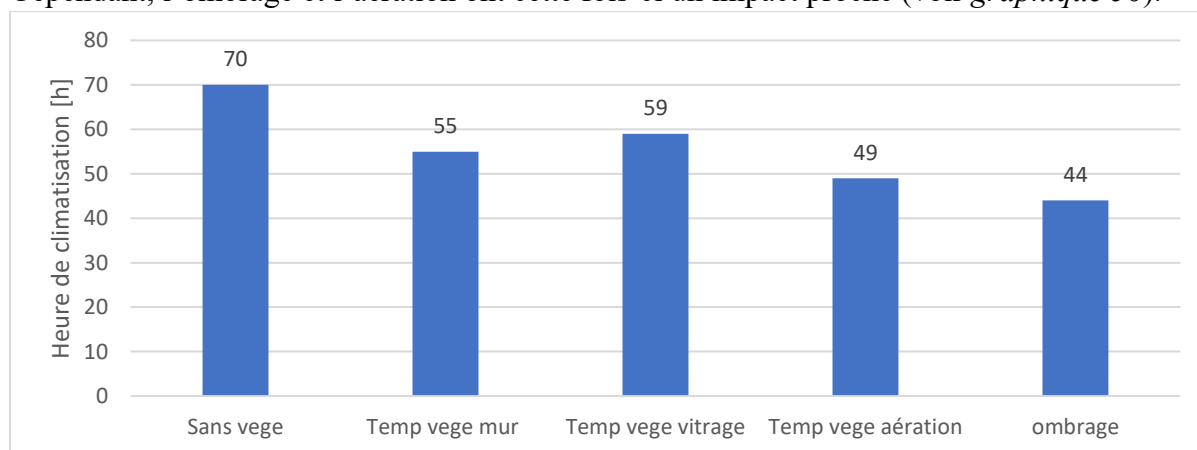
Graphique 54: Température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétalisation sur les murs et vitrages associés à une gestion de l'aération et des protections solaires
 Source : Données des auteurs



Graphique 55: Différence de température intérieure en considérant l'ensemble des effets de la végétalisation sur les murs et vitrages associés à une gestion de l'aération et des protections solaires

Source : Données des auteurs

Également, pour avoir une idée de l'influence des différents paramètres liés à la végétalisation dans le cadre du refroidissement avec l'ajout des stores et du refroidissement par aération, ceux-ci sont également observés de manière unique. Les résultats sont les suivants et permettent de montrer que la réduction de température semble avoir un effet semblable au niveau des parois. Cependant, l'ombrage et l'aération ont cette fois-ci un impact proche (voir graphique 56).



Graphique 56: Effets de la végétalisation séparés sur les heures de climatisation potentielles (avec gestion des stores et refroidissement par aération)

Source : Données des auteurs

Ces analyses permettent de montrer que parmi les effets de la végétalisation, l'interception des rayonnements au niveau des vitrages représente la part la plus importante. Également, il est possible de constater que même avec une végétalisation totale et l'association de l'ensemble des effets, dans le bâtiment à faible inertie étudié, la climatisation ne pourrait pas être totalement éliminée si la volonté était de ne pas dépasser 26°C. Par ailleurs, afin d'obtenir une température acceptable au sein du bâtiment, la végétalisation ne permet pas à elle seule d'atteindre ce confort sans être associée à des moyens de régulation. Cependant, dans l'ensemble des simulations, ne comprenant pas la gestion des stores et de l'aération, l'énergie totale nécessaire pour le chauffage et le refroidissement est inférieure à la situation sans végétalisation. Ce n'est pas le cas lorsque ces conditions d'exploitations sont ajoutées où le bilan total peut être largement défavorisé. Dans le cas de la végétalisation totale au niveau des murs et vitrages, par exemple, l'énergie totale a subi une augmentation de 7.8%. Un point fort de la végétalisation est donc le confort thermique, qui en est grandement amélioré.

Ces résultats montrent d'autant plus l'importance d'étudier précisément chaque bâtiment, puisqu'en fonction de sa nature et des conditions d'exploitations la végétalisation peut être favorable comme défavorable et dépend de l'objectif (amélioration du confort thermique ou amélioration du bilan énergétique global).

11.2. Cas de bâtiments à moyenne et grande inertie

Une réflexion est également entreprise concernant l'impact de la végétalisation selon le type d'inertie du bâtiment. À cet effet, deux autres bâtiments sont considérés dont un à inertie moyenne (45.65 kWh.m^{-2}) et un autre à inertie lourde (80.97 kWh.m^{-2}). Dans ces deux nouveaux cas, une végétalisation est mise en place avec les mêmes caractéristiques de bâtiment (sauf capacité calorifique) et de végétation (voir figure 27).

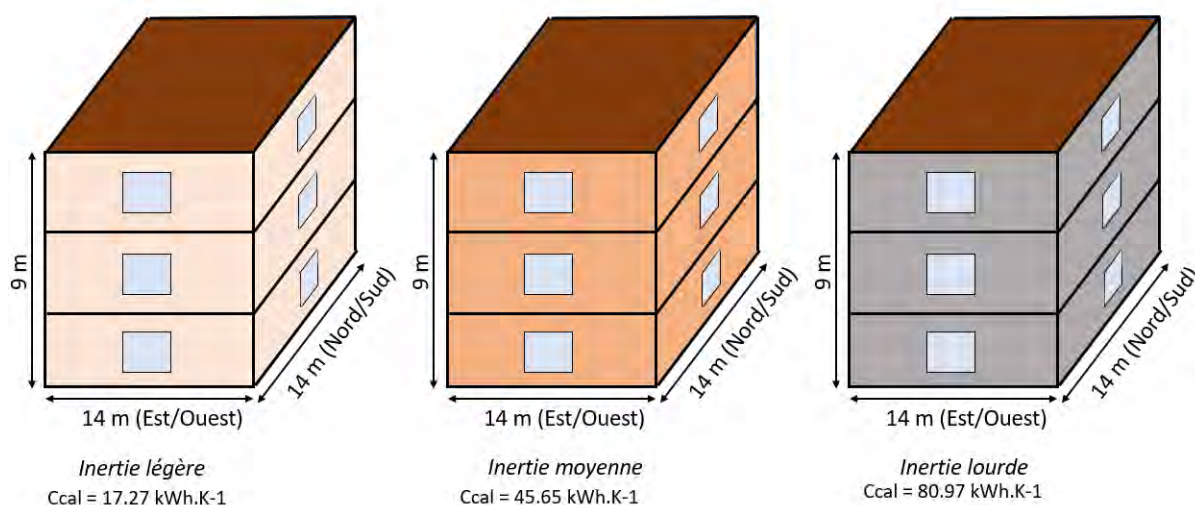
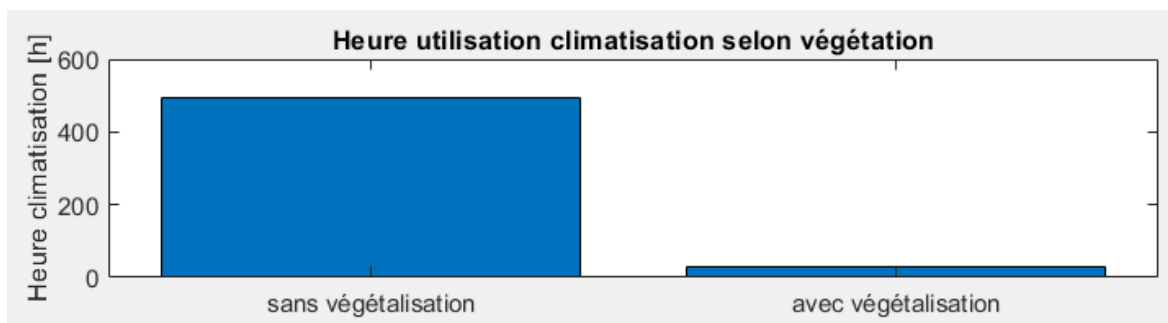
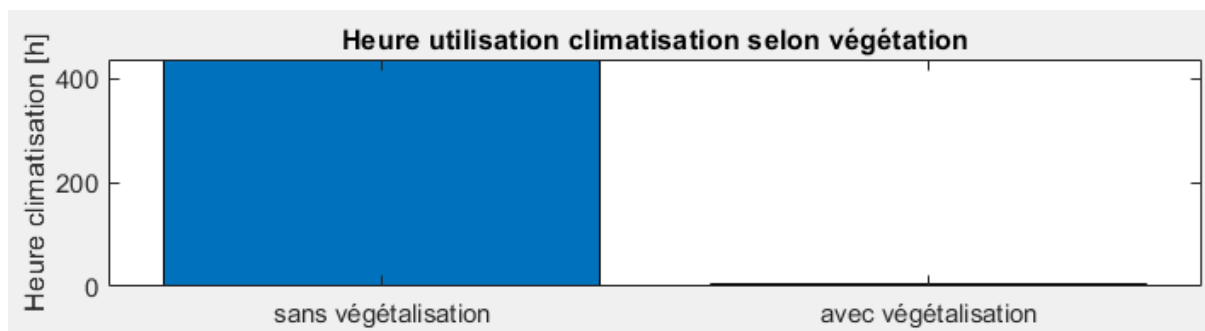


Figure 27: Caractéristiques des bâtiments à différentes inerties
 Source : Données des auteurs

Les résultats des simulations montrent qu'avec l'augmentation de l'inertie du bâtiment, sans végétalisation, les heures de climatisation potentielles sont moindres. Toutefois, le rôle de la végétation n'en est pas pour le moins négligeable, puisque dans le cas du bâtiment à inertie moyenne, avec une végétalisation totale et l'association de l'ensemble des effets, seulement 31 heures de climatisations potentielles sont restantes, tandis qu'avec une inertie lourde, les besoins de climatisation sont quasiment totalement effacés (4 heures de climatisation restantes, en restant toujours positif au niveau du bilan énergétique) (voir graphiques 57 et 58).

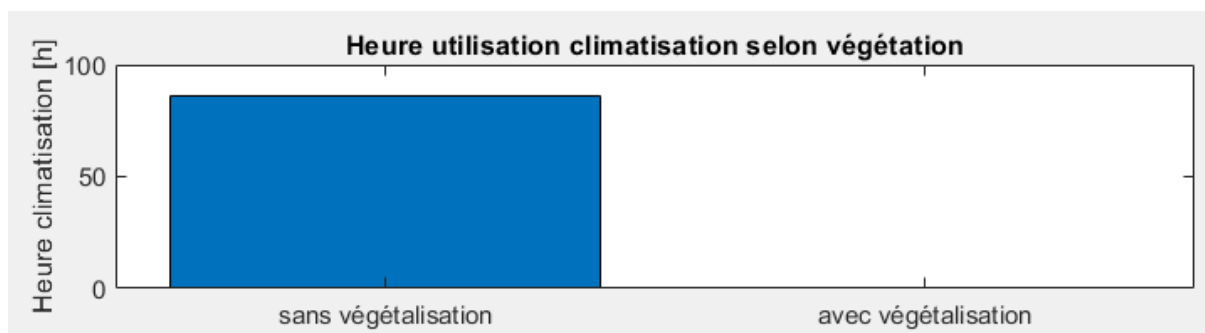


Graphique 57: Heure de climatisation selon végétalisation totale murs et vitrages inertie moyenne
 Source : Données des auteurs



Graphique 58: Heure de climatisation selon végétalisation totale murs et vitrages bâtiment lourd
 Source : Données des auteurs

Avec une végétalisation totale des façades, la climatisation peut juger être totalement dispensée sans même être associée à une gestion des stores ou de l'ouverture des fenêtres. Seulement, végétaliser la totalité du bâtiment a aussi un coût et nécessite de l'entretien. À cet effet, étant donné qu'aujourd'hui de plus en plus de bâtiment dispose de moyens intelligents de régulation (fermeture automatique des stores ou ouverture automatique des fenêtres), il peut être pertinent d'associer ces outils à la végétalisation, ce qui permettrait de réduire le nombre de façades végétales. Par exemple, en associant une ouverture automatique des fenêtres à partir de 22°C (quand la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur dépasse 2°C), avec une végétalisation sur les faces est et ouest, pour un bâtiment à inertie lourde les heures potentielles de climatisation sont éliminées (86 heures à 0 heure) (voir *graphique 59*) :



Graphique 59: Heures de climatisation potentielles avec végétalisation sur les murs et vitrages en est et ouest et ouverture des fenêtres pour un bâtiment lourd
 Source : Données des auteurs

Ainsi, ces résultats mettent en évidence qu'en réunissant l'ensemble des effets de la végétation, celle-ci peut avoir un impact important sur la réduction potentielle des heures de climatisation et l'amélioration du confort thermique. Celle-ci, combinée à des moyens de régulations intelligents permet de réduire la surface effective de végétation en garantissant un confort dans l'habitat. Cependant, une fois de plus, avec une bonne gestion des outils du bâtiment (stores, aération), il est possible de voir que l'énergie de climatisation peut être partiellement voire totalement effacée. Ainsi, l'introduction de la végétalisation doit se faire intelligemment et sa mise en place doit être réfléchi sur chaque bâtiment.

12. Conclusion

Pour conclure, cette étude a pu décrire comment la végétalisation des bâtiments a évolué au fur et à mesure des années. À l'aide de subventions ou encore de sensibilisation de la part des états, la végétalisation fait aujourd'hui de plus en plus partie intégrante de l'architecture des villes. Ces structures de végétalisation sont multiples tant au niveau des toitures que des façades, ce qui implique dans le bilan énergétique d'exercer des impacts hygrothermiques et aérodynamiques variés. L'état de l'art s'est focalisé sur les façades végétalisées directes et indirectes, ce qui a permis de mettre en évidence les performances énergétiques de ces méthodes de végétalisation, où elles sont capables de réduire fortement les températures de surface ainsi que les besoins de climatisation, en agissant essentiellement par deux moyens : l'ombrage et l'évapotranspiration. Les résultats observés sont différents, dépendant essentiellement du climat dans laquelle a été réalisée l'étude ainsi que les différents paramètres considérés. L'évapotranspiration, liée à la chaleur latente de vaporisation, représente une part importante du bilan énergétique de la plante. À l'aide de l'équation de Penman-Monteith, cette capacité de refroidissement a pu être mise en évidence. En comparaison aux mesures réalisées à Zurich, le calcul d'évapotranspiration a un comportement fidèle à ces dernières, et montre que pour certaines espèces, comme la glycine, son refroidissement est comparable au fonctionnement de 3.75 climatiseurs. Le choix de l'espèce, l'environnement de développement et l'irrigation des plantes ont aussi un impact considérable sur la qualité de refroidissement. La performance de refroidissement des plantes a cherché à être quantifiée en considérant un abaissement de température selon deux approches, l'une basée sur l'évapotranspiration et l'échange thermique lié à la chaleur latente, et l'autre introduisant le bilan énergétique d'une feuille. Ces équations ont été comparées, notamment à des mesures réalisées sur une plante grimpante, montrant que le comportement journalier des deux équations est jugé convenable selon les objectifs fixés dans cette étude (erreur relative journalière moyenne inférieure à 10%). Une équation a également été développée de manière empirique, mais celle-ci n'est pas convaincante en raison d'une trop grande imprécision (jusqu'à 18% d'erreur moyenne).

Afin de quantifier plus précisément, l'impact de la végétalisation sur le bâti, il a été choisi de mettre en place une modélisation sous bSol en simulant un bâtiment à Zurich à faible inertie. Les paramètres d'influences ont ainsi été étudiés séparément pour faire apparaître le rôle de chacun au sein du bilan énergétique. Pour cette première étude, il a été fait le choix d'assimiler la réduction de température extérieure en tant que température à l'intérieur d'un feuillage. Cette réduction de température extérieure, avec une végétalisation de l'ensemble des façades et une largeur de feuille de 10 cm participent au maximum, pour le bâtiment étudié à la réduction potentielle des heures de climatisation de 9.8%, à la diminution potentielle d'énergie de climatisation de 11.9%, et à la baisse moyenne (sur la période printemps/été) de la température intérieure de 0.24°C. Cette situation peut être comparée à la mise en place d'une végétalisation, exclusivement au niveau des vitrages en considérant un effet d'ombrage naturel lié à l'interception du rayonnement. Avec une transmissivité de 0.25 et une végétalisation sur l'ensemble des orientations, la température moyenne intérieure sur la période printemps/été a été réduite de 1.4°C, les heures de climatisation potentielles annuelles baissées de 63.2%, et l'énergie potentielle de climatisation diminuée de 76.1%. Le choix de l'orientation a aussi pu être mis en évidence, où la réduction potentielle d'énergie de climatisation est la plus performante sur les façades est et ouest, ce qui a également un impact sur la puissance de climatisation correspondante. L'ombrage au niveau des vitrages a dans cette situation un impact plus important que la réduction de la température extérieure.

Seulement, les deux effets séparés ne permettent pas d'abandonner totalement l'usage de la climatisation afin de respecter le confort thermique des utilisateurs. Par ailleurs, le rôle d'autres facteurs d'influence a pu être mis en évidence. Dans le cas du bâtiment étudié, l'augmentation de la température extérieure estivale, varie de manière linéaire à l'augmentation des besoins de climatisation, où 1°C supplémentaire accroît l'usage de la climatisation de 19.4%, ce qui pose des questions quant à l'impact futur du réchauffement climatique sur le bâtiment. Les gains internes ainsi que le choix de la température de consigne de refroidissement exercent également un grand impact sur les besoins d'énergie. Cette étude montre aussi qu'avec une bonne gestion des outils de la part des utilisateurs ou à l'aide de moyens de régulations avancés (fermeture automatique des stores ; ouvertures automatiques des stores), les besoins de climatisation peuvent être quasiment supprimés (réduction de 87.7% des heures de climatisation avec une gestion des stores et fenêtres).

Afin de mettre en place un outil simple de prise de décision concernant la réduction potentielle de climatisation ou sa suppression à l'aide de la végétalisation, l'algorithme de bSol a été recalculé sous Matlab et complété en intégrant les paramètres d'influences liés aux bâtiments et à la végétalisation. À partir d'un fichier simulé au préalable sous bSol, il est possible de visualiser l'impact annuel et saisonnier induit par la réduction de température extérieure liée à la végétation, la baisse du rayonnement entrant dans les vitrages, et considérer l'apport en air rafraîchi par la végétation dans le cadre de l'aération. En intégrant ces trois effets sur le bâtiment à faible inertie (méthode évapotranspiration et LAI maximal à 4) sans gestion des stores et refroidissement par aération, et en les appliquant sur la totalité des façades, l'énergie potentielle de climatisation est réduite de 88.9%, les heures de climatisation sont abaissées de 80.5% et la température intérieure sans climatisation diminuée en moyenne de 2.87°C (sur la période printemps/été). Avec une gestion efficace des stores et de l'aération, pour cette même configuration, les heures potentielles de climatisation sont réduites de 55 heures. Seulement, même si la réduction de climatisation potentielle liée à la végétalisation est faible, le confort thermique en est grandement amélioré avec une réduction moyenne de température de 1°C (sans climatisation). Toutefois, le bilan énergétique en est dégradé avec une augmentation de 7.8%. Ces résultats sont alors comparés à deux autres bâtiments similaires à inertie moyenne et lourde, ce qui montre qu'avec la même végétalisation, la climatisation peut espérer être supprimée pour le bâtiment lourd (sans gestion des stores et refroidissement par aération). La végétalisation est ensuite associée à des moyens de régulations avancés où l'ouverture automatique des fenêtres peut réduire la totalité de la climatisation en intégrant seulement la végétation sur les façades est et ouest. Ces résultats montrent ainsi la pertinence de l'association réfléchie de la végétalisation aux moyens de régulations.

Enfin, tout au long de cette étude, la végétalisation a illustré ces performances en termes de réduction d'énergie de climatisation et d'amélioration du confort thermique. Ces résultats sont encourageants et amènent de l'intérêt à poursuivre la recherche envers la végétalisation. Cette recherche doit se dérouler dans les modèles de prévision pour améliorer la précision des calculs, mais aussi porter sur l'intégration des structures végétales au bâtiment, qui se doivent adaptées et optimisées à toute sorte de bâtiment. Avec une plus grande accessibilité des modèles de simulation, il sera d'autant plus aisé de prédire et de donner des arguments en faveur de la végétation, ce qui facilitera son déploiement au sein de l'urbanisme.

13. Limites de l'étude et proposition d'amélioration

Cette étude contient plusieurs limites qui mériteraient d'être approfondies. Une limite principale concerne la modélisation de la réduction de température qui est liée à la nature du logiciel bSol. En effet, celui-ci intègre pour les calculs de bilan énergétique uniquement la température extérieure, ne tenant pas compte de la température surfacique des parois. À cet effet, pour visualiser les performances de la végétation, il est nécessaire d'avoir des situations comparables, c'est pourquoi il a été choisi de mettre en parallèle la température extérieure et la température à l'intérieur du feuillage, ou la réduction de température par évapotranspiration au sein du feuillage.

Dans l'objectif d'avoir une simulation plus précise, il serait nécessaire de calculer, selon la composition des parois (matériaux, inertie), la température de surface d'un mur nu, qui pourrait être comparée cette fois-ci à une température de surface du mur derrière la végétation. Cependant, obtenir cette température sans mesure nécessite des calculs poussés et demande de mettre en place un modèle de simulation, faisant intervenir l'ensemble des échanges thermiques au sein du système plante-bâtiment. Ce système pourrait se révéler également incompatible avec la méthode de résolution de bSol qui vise à calculer à l'instant suivant la température intérieure, en n'en faisant une variable supplémentaire (qui serait peut-être nécessaire de fixer comme constante). Par ailleurs, les mesures réalisées ont permis de mettre en évidence le comportement de la température du feuillage vis-à-vis de la température extérieure. Cependant, afin d'avoir une comparaison précise, il aurait été nécessaire d'avoir davantage de matériel de mesure (pyranomètre, anémomètre) sur le site. Il reste encore à voir si ces équations restent viables sur une période de mesure prolongée et des espèces végétales différentes. D'autre part, les équations de température développées ont toutes deux des limites importantes et il est pertinent de les étudier davantage en les mettant en relation avec des mesures supplémentaires.

Par la suite, il pourrait se révéler intéressant de mettre au point une maquette au format réduit, représentant par exemple le bâtiment simulé dans cette étude. Avec une modélisation au préalable sous bSol puis une intégration au sein de l'algorithme Matlab développé, une confrontation théorie et pratique permettrait de valider et/ou renforcer le modèle. Avec la mise en place d'une multitude de capteurs (pyranomètre, anémomètre, thermomètre, hygromètre), situé à différents emplacements sur le bâtiment (extérieur, intérieur, contre paroi), il serait également aisé d'établir une relation empirique liant l'ensemble de ces paramètres à la réduction de température. D'autre part, dans l'objectif d'aller plus loin dans la modélisation énergétique de la végétalisation, l'algorithme ici développé pourrait être greffé au logiciel bSol, ce qui permettrait de manière simplifiée à tous les utilisateurs d'intégrer la végétalisation dans les bâtiments (ce qui n'est pas encore le cas).

Il serait également pertinent de développer différents indicateurs de performance de la végétalisation, axés par exemple, sur les coûts, l'empreinte environnementale (analyse cycle de vie), le confort, qui permettraient de visualiser plus facilement si la végétalisation est intéressante ou non dans le cadre d'un projet.

Liste de références bibliographiques

- académie des sciences naturelles. (2022). *Inverser la tendance: climat et biodiversité*.
- Akbari, H. P. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3), 295-310. Récupéré sur [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Allen, R. G. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO.
- Bagheri Moghaddam, F. F. (2020). Building Orientation in Green Facade Performance and Its Positive Effects on Urban Landscape Case Study: An Urban Block in Barcelona. *Sustainability*, 12(21), 9273. Récupéré sur <https://doi.org/10.3390/su12219273>
- Bakhshoodeh, R. O. (2022). Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111744. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111744>
- Bass, B. &. (2001). *IMPACTS AND ADAPTATION PROGRESS REPORT*.
- Bernier. (2011). *Les plantes grimpantes une solution rafraichissante*.
- Bernier, A. M. (2011). *VÉGÉTALISATION DU BÂTIMENT EN MILIEU URBAIN: BÉNÉFICES ET PERSPECTIVES*.
- Bouattour, M. &. (2009). *La végétalisation des bâtiments*.
- Calanca, P. (2011). *L'évapotranspiration de référence et application en agrométéorologie*. Zurich.
- Campbell, G. S. (2000). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Canton de Genève. (2019). *Plan stratégique de végétalisation 2030*. Genève: Conseil administratif.
- Canton de Genève. (2020). *Projet de loi modifiant la loi sur les constructions et les installations diverses*. Genève: Secrétariat du Grand Conseil.
- Coma, J. P. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Energy and Buildings*, 111, 228-237. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- DETEC. (2017). *Zones à bâtir et densification urbaine*. Consulté le juin 10, 2022, sur DETEC: [https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/detec/votations/initiative-contre-le-mitage/zones-a-batir-et-densification-urbaine.html#:~:text=En%20Suisse%2C%20la%20surface%20des,habitants%20\(%2B7%2C9%20%25\)](https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/detec/votations/initiative-contre-le-mitage/zones-a-batir-et-densification-urbaine.html#:~:text=En%20Suisse%2C%20la%20surface%20des,habitants%20(%2B7%2C9%20%25).).
- Djedjig, R. (2013). *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain*. La Rochelle. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01141046>

- Eumorfopoulou, E. A. (2009). Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44(5), 1024-1038. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.004>
- femto physique. (2011, Mai). *Transfert thermique*. Consulté le juillet 01, 2022, sur femto physique: https://femto-physique.fr/physique_statistique/transfert-thermique.php#:~:text=D%C3%A9finition,gr%C3%A2ce%20%C3%A0%20l'agitation%20thermique
- Hevs. (s.d.). *bsol: Construire avec le soleil*. Consulté le juillet 07, 2022, sur Hevs: <https://www.hevs.ch/fr/projets/bsol-construire-avec-le-soleil-4317>
- Hoelscher, M. T. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Hoyano, A. (1988). Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Energy and buildings*, 11(1-3), 181-199. Récupéré sur [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90035-7)
- Hsieh, C. M. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, 159, 382-397. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.045>
- Ip, K. L. (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45(1), 81-88. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Jean, A. (2015). *Contribution à l'étude des parois complexes végétalisées : évaluation de la performance énergétique globale en climat tropical humide*. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02470090>
- Köhler, M. (2008, May 28). Green facades—a view back and some visions. *Springer Science + Business Media*.
- Luyet. (s.d.). La norme SIA 380/1:2016 Besoins de chauffage dans les bâtiments.
- Merz, T. (2021). *Case Studie IVECT*. Sion: Hes so.
- National Geographic. (2020). Les jardins suspendus de Babylone, la plus mystérieuse des sept merveilles du monde. *National Geographic*.
- Oberndorfer, E. L. (2007, novembre 10). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), pp. 823-833. Récupéré sur <https://doi.org/10.1641/B571005>
- OFEN. (2013, Juillet 12). *Utilisation modérée des climatiseurs en été*. Récupéré sur admin.ch: <https://www.admin.ch/gov/it/pagina-iniziale/documentazione/comunicati-stampa.msg-id-49667.html>
- Office fédéral de l'énergie. (2020, 03 16). *Qu'est-ce que la Stratégie énergétique 2050?* Consulté le juin 15, 2022, sur bfe.admin: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/strategie-energetique-2050/qu-est-ce-que-la-strategie-energetique->

2050.html#:~:text=En%202007%2C%20le%20Conseil%20f%C3%A9d%C3%A9ral,que%20la%20politique%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20ext%C3%A9rieure.

Palermo, S. A. (2020). Green Wall systems: where do we stand? *IOP Publishing*, 410, 012013.

Peck, S. W. (1999). *Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada*.

Pérez, G. C. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 139-165. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>

Pérez, G. R. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1861-1867. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>

Perini, K. O. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and environment*, 46(11), 2287-2294. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>

Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2021, mars). La consommation d'énergie finale en Suisse. Sion, Valais, Suisse.

Sternberg, T. V. (2011). Evaluating the role of ivy (*Hedera helix*) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings. *Building and Environment*, 46(2), 293-297. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.017>

suisseénergie. (s.d.). *Bâtiments énergétiquement efficaces*. Récupéré sur suisseénergie: <https://www.suisseenergie.ch/batiment/#:~:text=B%C3%A2timents%20%C3%A9nerg%C3%A9tiquement%20efficaces&text=Environ%2045%20%25%20de%20la%20consommation,des%20%C3%A9missions%20totales%20de%20CO2>.

Susorova, I. A. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1-13. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>

Tran, Q. H. (2020). *Etude sur l'impact d'une végétalisation*. Sion: HES-SO.

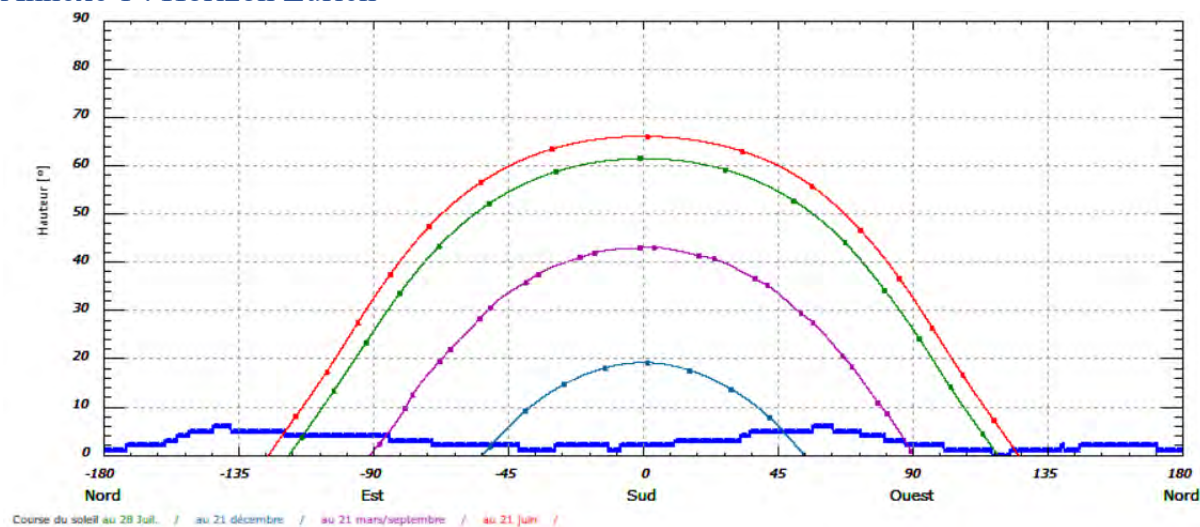
Vandersmissen. (2021). *Les façades végétalisées : analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision*. Liège.

Walther, E. &. (2018). The PET comfort index: Questioning the model. *Building and Environment*, 137, pp. 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.054>

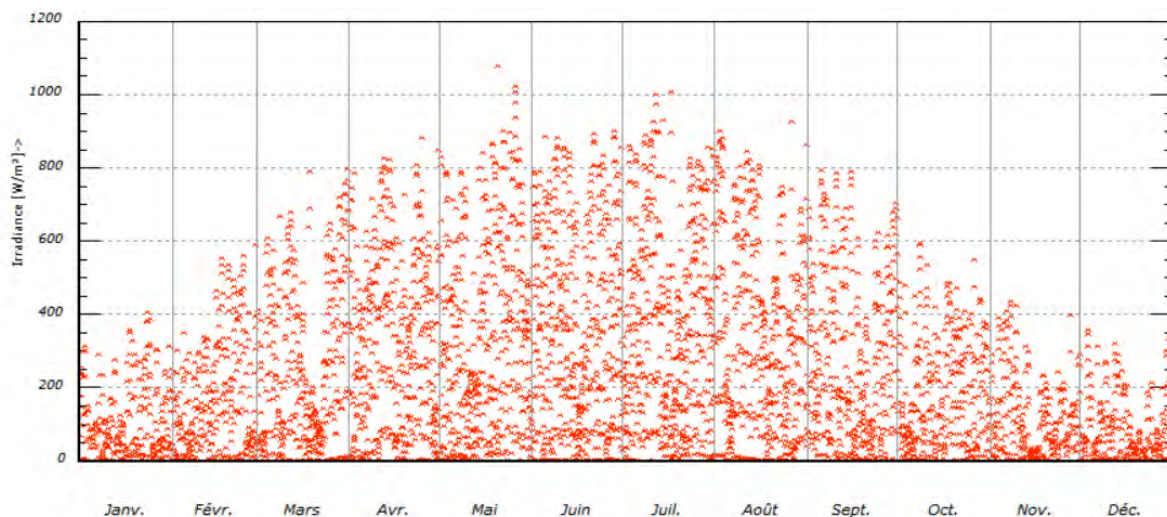
zhaw. (2021). *Klimatische Wirkungsmessung von Fassadenbegrünungen*. Zurich.

14. Annexes

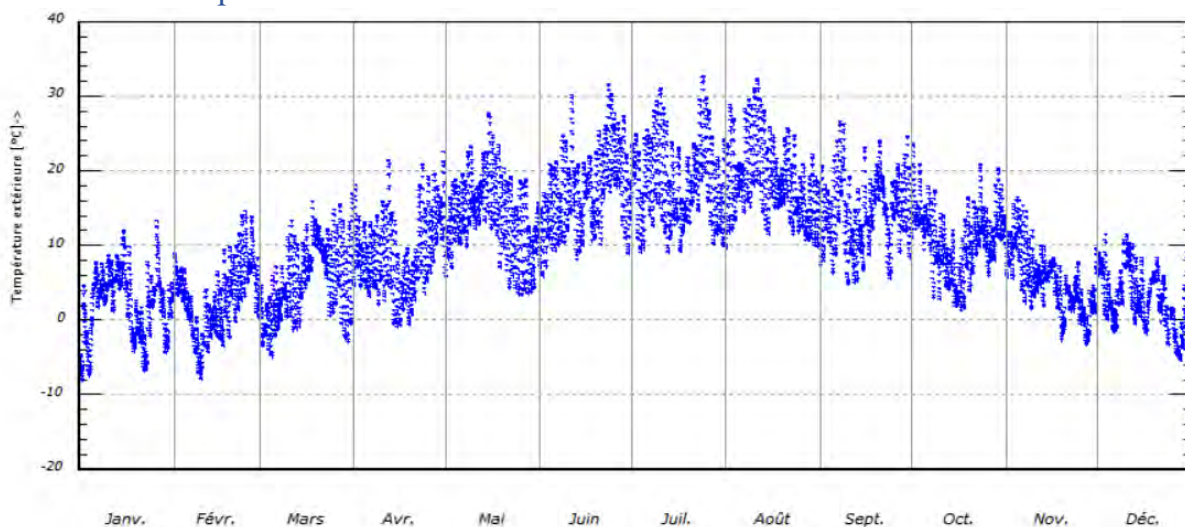
Annexe 1 : Horizon Zurich



Annexe 2 : Irradiance Zurich



Annexe 3 : Température Zurich



Annexe 4 : Conditions d'exploitation bâtiment

Catégorie

Type de bâtiment: **Habitat collectif**

Appliquer les consignes

Habitat collectif

Charges internes (personnes) 2.3 [W/m²]

Charges internes (appareils) 4.0 [W/m²]

Aération avec l'extérieur 0.8 [m³/h m²]

☐ Récupérateur de chaleur sur l'air extrait

☐ Rafraîchissement par aération

Occultation des fenêtres: **(Aucun store)**

☒ Chauffage 20 [°C]

Limitation Puissance 50.0 [W/m²]

☒ Climatisation 26 [°C]

Limitation Puissance 20.0 [W/m²]

Annexe 5 : Paramètres des fenêtres

Propriétés de l'élément

Végétalisation des bâtiments

S. réf. énerg. 510.0 [m²]

Sud

Superficie brute 126.0 [m²] Superficie nette 114.0 [m²] Azimut 0 [°] Inclinaison 90 [°]

Mur Sud

Superficie brute 126.0 [m²] Superficie nette 114.0 [m²] En contact avec Air extérieur

Nom **Fenêtre Sud**

Surface ☒ Longueur × Largeur (Hauteur) 2.00 [m] × 2.00 [m] = 4.0 [m²]

Nombre 3 [-]

Quote-part vitrée 70 [%]

F. ombrage ☒ Facteur d'ombrage dynamique

Chauffage ☐ Chauffage en applique

Composition / U: **Entrée par l'utilisateur**

Vitrage Ug 1.5 [W/m²·K] g 0.65 [0..1]

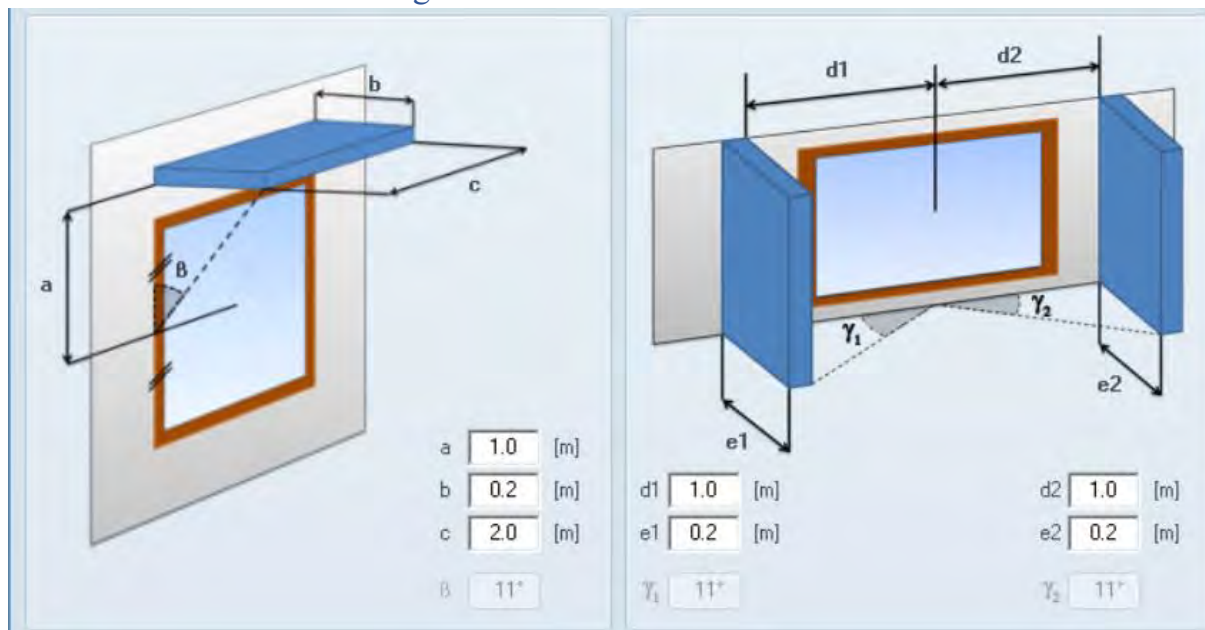
Cadre Uf 0.66 [W/m²·K]

Intercalaire psi 0.043 [W/m·K] L 8.0 [m]

Occultation g 1.0 [0..1]

Transmission 16.0 [W/K]

Annexe 6 : Facteurs d'ombrage



Annexe 7 : Résultats réduction température feuille largeur = 1cm bSol

	Sans végétalisation	Végétalisation 1 façade	végétalisation totale
Heures de surchauffe [h] If = 1cm	1690	1673	1608
Heures de surchauffe avec clim [h] If = 1cm	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m2] If = 1cm	11.5	11.3	10.7
Energie de climatisation [kWh/m2] If = 1cm	3.19	3.14	2.97
Energie de chauffage [MJ/m2] If = 1cm	69.1	69.2	69.4
Energie de chauffage [kWh/m2] If = 1cm	19.2	19.2	19.3
Energie totale [MJ/m2] If = 1cm	80.6	80.5	80.1
Energie totale [kWh/m2] If = 1cm	22.4	22.4	22.3
Utilisation climatisation [%] If = 1cm	100	98.3	93.0
Température intérieure max [°C] If = 1cm	32.9	32.8	32.6
Heure climatisation [h] If =1cm	509	503.0	481

Annexe 8 : Résultats réduction température feuille largeur = 10 cm bSol

	Sans végétalisation	Végétalisation 1 façade	végétalisation totale
Heures de surchauffe [h] If = 10 cm	1690	1658	1547
Heures de surchauffe avec clim [h] If = 10 cm	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m2] If = 10 cm	11.50	11.10	10.10
Energie de climatisation [kWh/m2] If = 10 cm	3.19	3.08	2.81
Energie de chauffage [MJ/m2] If = 10 cm	69.1	69.3	69.8
Energie de chauffage [kWh/m2] If = 10 cm	19.19	19.25	19.39
Energie totale [MJ/m2] If = 10 cm	80.6	80.4	79.9
Energie totale [kWh/m2] If = 10 cm	22.4	22.3	22.2
Utilisation climatisation [%] If = 10 cm	100	96.52	87.83
Température intérieure max [°C] If = 10 cm	32.9	32.8	32.4
Heure climatisation [h] If =10cm	509	496	459

Annexe 9 : Résultats ombrage transmissivité = 0.75 bSol

	Sans végétalisation	Végétalisation nord	Végétalisation sud	végétalisation est	végétalisation ouest	végétalisation totale
Heures de surchauffe [h] $\tau = 0.75$	1681	1629	1593	1581	1575	1230
Heures de surchauffe avec clim [h] $\tau = 0.75$	0	0	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m2] $\tau = 0.75$	16.5	15.7	15.2	14.9	14.8	11.3
Energie de climatisation [kWh/m2] $\tau = 0.75$	4.6	4.4	4.2	4.1	4.1	3.1
Energie de chauffage [MJ/m2] $\tau = 0.75$	105.9	105.9	105.9	105.9	105.9	106
Energie de chauffage [kWh/m2] $\tau = 0.75$	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
Energie totale [MJ/m2] $\tau = 0.75$	122.4	121.6	121.1	120.8	120.7	117.3
Energie totale [kWh/m2] $\tau = 0.75$	34.0	33.8	33.6	33.6	33.5	32.6
Utilisation climatisation [%] $\tau = 0.75$	100	95.15	92.12	90.80	89.70	68.5
Température intérieure max [°C] $\tau = 0.75$	34.7	34.5	34.3	34.2	34.2	33.2
Heure climatisation [h] $\tau = 0.75$	604	594	582	565	584	485

Annexe 10 : Résultats ombrage transmissivité = 0.5 bSol

	Sans végétalisation	Végétalisation nord	Végétalisation sud	végétalisation est	végétalisation ouest	végétalisation totale
Heures de surchauffe [h] $\tau = 0.5$	1681	1562	1469	1439	1446	791
Heures de surchauffe avec clim [h] $\tau = 0.5$	0	0	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²] $\tau = 0.5$	16.5	14.9	13.9	13.4	13.1	7.1
Energie de climatisation [kWh/m ²] $\tau = 0.5$	4.6	4.1	3.9	3.7	3.6	2.0
Energie de chauffage [MJ/m ²] $\tau = 0.5$	105.9	105.9	105.9	105.9	106	106
Energie de chauffage [kWh/m ²] $\tau = 0.5$	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
Energie totale [MJ/m ²] $\tau = 0.5$	122.4	120.8	119.8	119.3	119.1	113.1
Energie totale [kWh/m ²] $\tau = 0.5$	34.0	33.6	33.3	33.1	33.1	31.4
Utilisation climatisation [%] $\tau = 0.5$	100	90.30	84.24	81.21	79.39	43.03
Température intérieure max [°C] $\tau = 0.5$	34.7	34.4	33.8	33.8	33.8	31.7
Heure climatisation [h] $\tau = 0.5$	604	577	551	518	563	350

Annexe 11 : Résultats ombrage transmissivité = 0.25 bSol

	Sans végétalisation	Végétalisation nord	Végétalisation sud	végétalisation est	végétalisation ouest	végétalisation totale
Heures de surchauffe [h] $\tau = 0.25$	1681	1493	1373	1284	1289	500
Heures de surchauffe avec clim [h] $\tau = 0.25$	0	0	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²] $\tau = 0.25$	16.5	14.2	12.6	11.9	11.5	4
Energie de climatisation [kWh/m ²] $\tau = 0.25$	4.6	3.9	3.5	3.3	3.2	1.1
Energie de chauffage [MJ/m ²] $\tau = 0.25$	105.9	105.9	105.9	105.9	106	106
Energie de chauffage [kWh/m ²] $\tau = 0.25$	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
Energie totale [MJ/m ²] $\tau = 0.25$	122.4	120.1	118.5	117.8	117.5	110
Energie totale [kWh/m ²] $\tau = 0.25$	34.0	33.4	32.9	32.7	32.6	30.6
Utilisation climatisation [%] $\tau = 0.25$	100	86.06	76.36	72.12	69.70	24.2
Température intérieure max [°C] $\tau = 0.25$	34.7	34.2	33.4	33.3	33.4	30.2
Heure climatisation [h] $\tau = 0.25$	604	553	520	468	524	222

Annexe 12 : Résultats augmentation température estivale bSol

	Tmean [°C]	Tmean +1°C [°C]	Tmean +2°C [°C]	Tmean +3°C [°C]	Tmean +4°C [°C]	Tmean +5°C [°C]
Heures de surchauffe [h]	1681	1873	2024	2219	2379	2502
Heures de surchauffe avec clim [h]	0	0	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²]	16.5	20.1	24.2	28.8	33.6	38.8
Energie de climatisation [kWh/m ²]	4.6	5.6	6.7	8.0	9.3	10.8
Energie de chauffage [MJ/m ²]	105.9	105.6	105.6	105.5	105.4	105.4
Energie de chauffage [kWh/m ²]	29.4	29.3	29.3	28.8	29.3	29.3
Energie totale [MJ/m ²]	122.4	125.7	129.8	134.3	139	144.2
Energie totale [kWh/m ²]	34.0	34.9	36.1	37.3	38.6	40.1
Utilisation climatisation [%]	100.0	121.8	146.7	174.5	203.6	235.2
Heure climatisation [h]	604	721	854	999	1157	1344

Annexe 13 : Résultats augmentation gains internes bSol

	Tmean [°C]	*2GIn [W.m-2]	*3GIn [W.m-2]	*4GIn [W.m-2]
Heures de surchauffe [h]	1681	2461	3396	4145
Heures de surchauffe avec clim [h]	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²]	16.5	25.5	37.2	51.7
Energie de climatisation [kWh/m ²]	4.6	7.1	10.3	14.4
Utilisation climatisation [%]	100.0	154.5	225.5	313.3
Température intérieure max [°C]	34.7	36.3	38	39.6
Heure climatisation [h]	604	948	1377	1923

Annexe 14 : Résultats gestion aération et stores bSol

	Sans végétalisation	Aération	Gestion des stores g=0.1	Aération + Gestion des stores g=0.1
Heures de surchauffe [h]	1681	502	383	108
Heures de surchauffe avec clim [h]	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²]	16.5	7.5	2.7	1.2
Energie de climatisation [kWh/m ²]	4.6	2.1	0.8	0.3
Energie de chauffage [MJ/m ²]	105.9	106.9	106	106.9
Energie de chauffage [kWh/m ²]	29.4	29.7	29.4	29.7
Energie totale [MJ/m ²]	122.4	114.4	108.7	108.1
Energie totale [kWh/m ²]	34.00	31.78	30.19	30.03
Utilisation climatisation [%]	100.0	45.5	16.4	7.3
Température intérieure max [°C]	34.7	31.9	29.4	28
Heure climatisation [h]	604	243	159	74

Annexe 15 : Résultats variation température de consigne climatisation bSol

	Tconsigne=27°C	Tconsigne=26°C	Tconsigne=25°C	Tconsigne=24°C
Heures de surchauffe avec clim [h]	0	0	0	0
Energie de climatisation [MJ/m ²]	12.3	16.5	21.6	27.7
Energie de climatisation [kWh/m ²]	3.4	4.6	6.0	7.7
Utilisation climatisation [%]	74.5	100.0	130.9	167.9
Heure climatisation [h]	457	604	798	1010

Annexe 16 : Résultats bilan énergétique total réduction température feuille et évapotranspiration murale (inertie faible) Matlab (sans protection solaire et refroidissement par aération)

	Sans végétalisation	végétalisation totale feuille	végétalisation totale évapo
Energie de climatisation [kWh/m2]	4.59	3.85	3.80
Energie de chauffage [kWh/m2]	28.32	28.55	28.66
Energie totale [kWh/m2]	32.91	32.40	32.46
Utilisation climatisation [%]	100.00	83.88	82.79
Température intérieure max [°C]	34.60	33.65	33.80
Heure climatisation [h]	605	554	544
Pmax clim [kW]	17.6	15.9	16.8

Annexe 17 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale et vitrage, et ombrage (inertie faible) Matlab (sans protection solaire et refroidissement par aération)

	Sans végétalisation	Végétalisation nord	Végétalisation sud	végétalisation est	végétalisation ouest	végétalisation totale
Energie de climatisation [kWh/m2]	4.59	3.47	2.94	2.61	2.55	0.51
Energie de chauffage [kWh/m2]	28.32	28.74	29.10	29.11	29.15	31.33
Energie totale [kWh/m2]	32.91	32.21	32.04	31.72	31.70	31.84
Utilisation climatisation [%]	100.00	75.60	64.05	56.86	55.56	11.11
Température intérieure max [°C]	34.60	33.80	32.75	32.64	32.75	29.16
Heure climatisation [h]	605	508.00	455.00	381.00	460.00	118.00
Pmax clim [kW]	17.60	16.70	15.30	16.70	15.56	12.50

Annexe 18 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale (inertie faible) Matlab (avec protection solaire et refroidissement par aération)

	Sans végétalisation	végétalisation totale évapo
Energie de climatisation [kWh/m2]	0.32	0.16
Energie de chauffage [kWh/m2]	28.58	28.89
Energie totale [kWh/m2]	28.90	29.05
Utilisation climatisation [%]	100.00	50.00
Température intérieure max [°C]	27.97	27.35
Heure climatisation [h]	70	36
Pmax clim [kW]	9.6	8.9

Annexe 19 : Résultats bilan énergétique total réduction température évapotranspiration murale et vitrage, et ombrage (inertie faible) Matlab (avec protection solaire et refroidissement par aération)

	Sans végétalisation	Végétalisation nord	Végétalisation sud	végétalisation est	végétalisation ouest	végétalisation totale
Energie de climatisation [kWh/m2]	0.32	0.22	0.19	0.17	0.17	0.06
Energie de chauffage [kWh/m2]	28.58	28.99	29.27	29.30	29.31	31.47
Energie totale [kWh/m2]	28.90	29.21	29.46	29.47	29.48	31.53
Utilisation climatisation [%]	100.00	68.75	59.38	53.13	53.13	18.75
Température intérieure max [°C]	27.97	27.66	27.44	27.36	27.39	26.78
Heure climatisation [h]	70	47	42	36	42	15
Pmax clim [kW]	9.60	8.9	9.2	9.2	7.7	6.4

Annexe 20 : Code Matlab sensibilité évapotranspiration

```
clear all;
close all;
X = categorical(["Tmean","uh","Hr","Rs","z","alphaf","RsRso","Kc"]);
X = reordercats(X,["Tmean","uh","Hr","Rs","z","alphaf","RsRso","Kc"]);
%constantes
lambda = 2.45; %[MJ/kg]
Cp = 1.013*10^-3; %[MJ/kg.°C]
epsilon = 0.622; %[-]
sigma = 2.0413*10^-10; %[MJ/m2.h.K4]
rhoe = 1000; %[kg/m3]
ce = 2.45*10^6; %[J/kg]
%calcul
for i=1:9
%variables
Tmean = 15; %[°C]
uh = 3; %[m/s]
Hr = 70; %[%]
Rs = 500*3.6*10^-3; %[MJ/m2.h]
z = 408; %[m]
alphaf = 0.23; %[-]
RsRso = 0.5; %[-]
Kc = 0.5; %[-]
f = 0.5; %[-]
factor = 1.01;
switch i
case 1

case 2
    Tmean = Tmean*factor;
case 3
    uh = uh*factor;
case 4
    Hr = Hr*factor;
case 5
    Rs = Rs*factor;
case 6
    z = z*factor;
case 7
    alphaf = alphaf*factor;
case 8
    RsRso = RsRso*factor;
case 9
    Kc = Kc*factor;
end
delta = (4098*(0.6108*exp((17.27*Tmean)/(Tmean+237.3)))/(Tmean+237.3))^2;
P = 101.3*((293-0.0065*z)/293)^5.26;
gamma = 0.665*10^-3*P;
es = 0.6108*exp((17.27*Tmean)/(Tmean+237.3));
ea = Hr/100*es;
Rns = (1-alphaf)*Rs;
Rnl = sigma*(Tmean+273)^4*(0.34-0.14*sqrt(ea))*(1.35*RsRso-0.35);
Rn = Rns-Rnl;
G = 0.1*Rn;
ETo = (0.408*delta*(Rn-G)+gamma*37/(Tmean+273)*uh*(es-ea))/(delta+gamma*(1+0.34*uh));
ETc = ETo*Kc;
%LambdaET = Kc*lambda;
Table1(1,i) = ETc;
end
for j=1:9
    Table1(2,j) = (Table1(1,1)-Table1(1,j))/Table1(1,1)*100;
end
bar(X,Table1(2,2:9));
title('Sensibilité des différents paramètres pour évapotranspiration selon Penman Monteith')
ylabel('Contribution [%'])
```

Annexe 21 : Code Matlab bilan énergétique

```
%% Initialisation
close all
clear all

%% Lecture et ouverture des données
%Rechercher les fichiers résultat, bâtiment et météo relatifs aux
%différentes orientations
data_est = readcell('result_est2.txt'); %Ouverture des données façade est dans un tableau
data_est_bat = readcell('result_est_bat2.txt');
data_ouest = readcell('result_ouest2.txt'); %Ouverture des données façade ouest dans un tableau
data_ouest_bat = readcell('result_ouest_bat2.txt');
data_sud = readcell('result_sud2.txt'); %Ouverture des données façade sud dans un tableau
data_sud_bat = readcell('result_sud_bat2.txt');
data_nord = readcell('result_nord2.txt'); %Ouverture des données façade nord dans un tableau
data_nord_bat = readcell('result_nord_bat2.txt');
data_toit = readcell('result_toit2.txt'); %Ouverture des données toiture + sol dans un tableau
data_toit_bat = readcell('result_toit_bat2.txt');
data_met = readcell('result_met.txt'); %Ouverture des données météo supplémentaires dans un tableau

%% Recup données bSol/météo
heure = cell2mat(data_sud(8:8767,1)); %Heures dans l'année [h]
hr = cell2mat(data_met(2:8761,2)); %Humidité relative [%]
uh = cell2mat(data_met(2:8761,3)); %Vitesse de vent [m/s]
i_est = cell2mat(data_est(8:8767,2)); %Irradiance entrante est [W]
i_ouest = cell2mat(data_ouest(8:8767,2)); %Irradiance entrante ouest[W]
i_sud = cell2mat(data_sud(8:8767,2)); %Irradiance entrante sud [W]
i_nord = cell2mat(data_nord(8:8767,2)); %Irradiance entrante nord [W]
i_toit = cell2mat(data_toit(8:8767,2)); %Irradiance entrante toiture [W]
i_tot = i_est+i_ouest+i_sud+i_nord+i_toit; %Irradiance totale [W]
temp_ext = cell2mat(data_sud(8:8767,7)); %Température extérieure [°C]
hgk = cell2mat(data_sud(8:8767,8)); %Irradiance globale [W/m2]
terrain = cell2mat(data_toit(8:8767,10)); %Température du terrain [°C]
debitair = cell2mat(data_sud(8:8767,12)); %Débit d'air [m3/h*m2]
gainpers = cell2mat(data_sud(8:8767,14)); %Gain des personnes [W/m2]
gainapp = cell2mat(data_sud(8:8767,15)); %Gain des appareils électriques [W/m2]
gainappers = gainpers+gainapp;%Gain des appareils électriques et personnes [W/m2]

%% Paramètres plantes
%Insérer l'ensemble des paramètres correspondant aux plantes étudiées
lambda = 2.45; %Chaleur latente évapotranspiration [MJ/kg]
sigma = 2.0413*10^-10; %Constante Stefan Boltzmann [MJ/m2.h.K4]
sigma2 = 5.67*10^-8; %Constante Stefan Boltzmann [W/m2.K4]
rhoe = 1000; %Masse volumique de l'eau [kg/m3]
albedof = 0.23; %Albédo [-]
alphaf = 0.5; %Absorptivité feuillage [-]
epsilonf = 0.99; %Emissivité feuillage [-]
rrso = 0.5; %Rayonnement extraterrestre [-]
kc = 0.3; %Coefficient de culture [-]
ef = 0.30; %Epaisseur du feuillage [m]
fv = 0.5; %Facteur de vision [-]
tauxevap = 1; %Taux d'évapotranspiration [-]
ratioplante = 1; %Part d'air dans la végétation [-]
renouv = 180; %Taux de renouvellement de l'air (Coefficient global)
cp = 29.3; %Densité molaire de l'air [J/mol°C]
coeffex = 0.5; %Coefficient d'extinction [-]
gr = 0.18; %Conductance radiative [mol/m2*s]
debutf = 1872; %Début du feuillage [h]
finf = 6360; %Fin du feuillage [h]
lfin = 0.05; %Largeur des feuilles [m]
lf2 = lfin*100; %Largeur des feuilles [cm]
laimax = 2; %Indice de surface foliaire [-]
coeffrayo = 0.2; %Coefficient de rayonnement [-]
mw = 18.02; %Masse molaire eau [g/mol]
rgaz = 8.31; %Constante gaz parfait [J/mol.K]
```

```
%% Paramètres bâtiment
%Insérer l'ensemble des paramètres du bâtiment
z = 408; %Altitude [m]
cair = ones(8760,1)*1005; %Capacité calorifique de l'air[J/kg*K]
rhoa = 1.12; %Masse volumique de l'air [kg/m3]
tconsignechauff = 20; %Température de consigne chauffage [°C]
tconsigneclim = 26; %Température de consigne climatisation [°C]
tconsignestore = 24; %Température de consigne store [°C]
tconsignefen = 22; %Température de consigne ouverture fenêtre [°C]
deltafen = 2; %Différence de température intérieur extérieure pour ouverture fenêtre [°C]
debitfen = 2.4; %Débit avec ouverture fenêtre [m3/h.m2]
text_ete = 4; %Température supplémentaire extérieure estivale [°C]
pchauffmax = 50; %Puissance maximale de chauffage [W/m2]
prefmax = 20; %Puissance maximale de refroidissement [W/m2]
%Paramètres pouvant être obtenu depuis le fichier bâtiment mais ici
%introduits manuellement
gvi_est = 0.65; %Valeur g vitrage est [-]
gvi_ouest = 0.65; %Valeur g vitrage ouest [-]
gvi_sud = 0.65; %Valeur g vitrage sud [-]
gvi_nord = 0.65; %Valeur g vitrage nord [-]
pvi_est = 0.7; %Quote part vitrée est [-]
pvi_ouest = 0.7; %Quote part vitrée ouest [-]
pvi_sud = 0.7; %Quote part vitrée sud [-]
pvi_nord = 0.7; %Quote part vitrée nord [-]
gconsigne_est = 0.1; %Valeur g store est [-]
gconsigne_ouest = 0.1; %Valeur g store ouest [-]
gconsigne_nord = 0.1; %Valeur g store nord [-]
gconsigne_sud = 0.1; %Valeur g store sud [-]
gconsigne_toit = 0.1; %Valeur g store toit [-]

heureclim = 0; %Nombre d'heure de climatisation [h]

%Step correspond ici au nombre d'itérations, 1 signifie une simulation du
%bâtiment sans végétalisation et 2 la simulation du bâtiment avec
%végétalisation et sans végétalisation
step = 2; %Variable calcul végétation

%% Choix du type de programme
%Choisir le type de programme, 1 signifie activer
progstore = 1; %Descente des stores selon température de consigne
progfen = 1; %Ouverture des fenêtres selon température de consigne
progclim = 1; %Programmation de la climatisation (0 = inactive; 1 = active)

progtmpf = 0; %Choix du calcul de température (0 = température feuille ; 1 = Evapotranspiration)
progcs = 0; %Changement capacité calorifique air + intégration variation humidité
progtempaer = 1; %Modification de la température extérieure aération
progtempete = 0; %Changement température extérieure estivale

%% Choix de la végétalisation
vegetempmur_sud=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi opaque sud 0 = sans, 1 = avec
vegetempmur_nord=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi opaque nord
vegetempmur_est=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi opaque est
vegetempmur_ouest=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi opaque ouest

vegetempfen_sud=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi vitrée sud 0 = sans, 1 = avec
vegetempfen_nord=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi vitrée nord
vegetempfen_est=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi vitrée est
vegetempfen_ouest=1; %Choix de la baisse de température sur la paroi vitrée ouest

vegeomb_sud=1; %Choix de l'ombrage sur le vitrage sud 0 = sans, 1 = avec
vegeomb_nord=1; %Choix de l'ombrage sur la façade nord
vegeomb_est=1; %Choix de l'ombrage sur la façade est
vegeomb_ouest=1; %Choix de l'ombrage sur la façade ouest

%% Initialisation des listes
lai = zeros(8760,1); %Indice de surface foliaire [-]
```

```

lf = zeros(8760,1); %Largeur de feuille [m]
es2 = zeros(8760,1); %Pression de vapeur saturation intérieur [kPa]
ea2 = zeros(8760,1); %Pression de vapeur avec végétation intérieur [kPa]
x = zeros(8760,1); %Humidité spécifique [kgau/kgair]
cs = zeros(8760,1); %Capacité calorifique air humide [J/kg*K]
taer = zeros(8760,1); %Transmission par aération [°C]
tint = zeros(8760,1); %transmission par intérieur [°C]
tzone_est = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur est [°C]
tzone_ouest = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur ouest [°C]
tzone_sud = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur sud [°C]
tzone_nord = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur nord [°C]
tzone_toit = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur toiture/sol [°C]
tzone = zeros(8760,1); %Transmissions par extérieur total [°C]
tterrain = zeros(8760,1); %Transmissions par terrain [°C]
tgs_est = zeros(8760,1); %Transmissions par vitrage est [°C]
tgs_ouest = zeros(8760,1); %Transmissions par vitrage ouest [°C]
tgs_nord = zeros(8760,1); %Transmissions par vitrage nord [°C]
tgs_sud = zeros(8760,1); %Transmissions par vitrage sud [°C]
tgs_toit = zeros(8760,1); %Transmissions par vitrage toit [°C]
tgs = zeros(8760,1); %Tranmissions vitrage total [°C]
tgi = zeros(8760,1); %Transmissions par gains internes [°C]
tgic = zeros(8760,1); %Transmissions par local chauffé [°C]
tginc = zeros(8760,1); %Transmissions par local non chauffé [°C]
sumt = zeros(8760,1); %Somme des transmissions [°C]
ec = zeros(8760,1); %Puissance pour égaliser les transmissions chauffage/refroidissement [W/m2]
tgc = zeros(8760,1); %Transmission par chauffage/refroidissement [°C]
tin = zeros(8760,1); %Température intérieure [°C]
energiechauff = zeros(1,step); %Énergie de chauffage [Wh/m2]
energieclim = zeros(1,step); %Énergie de climatisation [Wh/m2]
etot = zeros(1,step); %Énergie totale [Wh/m2]
erefutil = zeros(1,step); %Énergie refroidissement utilisation [%]
heurec = zeros(1,step); %Heure de climatisation [h]
pmaxchauff = zeros(1,step); %puissance max de chauffage [W]
pmaxref = zeros(1,step); %Puissance max de climatisation [W]
text1=zeros(8760,1); %Augmentation température estivale [°C]
g_est = zeros(8760,1); %valeur énergie stockage sol est [W/m2]
g_ouest = zeros(8760,1); %valeur énergie stockage sol ouest [W/m2]
g_sud = zeros(8760,1); %valeur énergie stockage sol sud [W/m2]
g_nord = zeros(8760,1); %valeur énergie stockage sol nord [W/m2]
energie_exterieure = zeros(1,step); %Énergie correspondant à la déperdition des murs [Wh]
energie_aeration = zeros(1,step); %Énergie correspondant aux pertes par aération [Wh]
ratioenergie = zeros(1,step); %Ratio entre les pertes par mur et aération [-]
gstore_est = ones(8760,1); %Valeur g store est [-]
gstore_ouest = ones(8760,1); %Valeur g store ouest [-]
gstore_sud = ones(8760,1); %Valeur g store sud [-]
gstore_nord = ones(8760,1); %Valeur g store nord [-]
gstore_toit = ones(8760,1); %Valeur g store toit [-]
r1 = zeros(8760,1); %Humidité absolue extérieure [kg/m3]
r = zeros(8760,1); %Humidité absolue intérieure [kg/m3]
hrin = zeros(8760,1);

%% Calcul modification température estivale
if (progtmpete==1)
    for heure_loop = 1:8760
        if(heure_loop >= 4098 && heure_loop <= 6354)
            text1(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1)+text_etc; %Augmentation température estivale [°C]
        else
            text1(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
        end
    end
    temp_ext=text1;
else
end

%% Calcul température ciel
alphan = log(hr/100)+17.625*temp_ext./(243.04+temp_ext);
tdew = (243.04*alphan)/(17.625-alphan); %Température de rosée [°C]

```



```
tsky = (temp_ext+273.15).*(0.8+tdew/250).^0.25; %Température du ciel [K]

%% Caractéristiques bâtiment
%Ici la plupart des données sont extraites depuis les fichiers résultats et
%bâtiments, cependant certains paramètres comme les transmissions des
%parois sont ajoutés manuellement. Également, l'ensemble des température
%sont d'abord définies comme étant contre l'extérieur (sauf sol et terrain) puis
%modifiées avec la végétalisation
SRE = cell2mat(data_sud(4,3)); %Surface de référence énergétique [m2]
ccal_est = cell2mat(data_est(4,4)); %Capacité calorifique est [MJ/K]
ccal_ouest = cell2mat(data_ouest(4,4)); %Capacité calorifique ouest [MJ/K]
ccal_sud = cell2mat(data_sud(4,4)); %Capacité calorifique sud [MJ/K]
ccal_nord = cell2mat(data_nord(4,4)); %Capacité calorifique nord [MJ/K]
ccal_toitsol = cell2mat(data_toit(4,4)); %Capacité calorifique sol+toit [MJ/K]
ccal_tot = ccal_est+ccal_ouest+ccal_nord+ccal_sud+ccal_toitsol; %Capacité calorifique totale [MJ/K]
%ccal_tot = 160.75; %Capacité calorifique bâtiment inertie moyenne [MJ/K]
%ccal_tot = 291.498; %Capacité calorifique bâtiment inertie lourde [MJ/K]
volume = 1500; %Volume du bâtiment [m3]
n = 0.8*SRE/volume; %Taux de renouvellement horaire [1/h]
qg = 0.5; %Humidité absolue additionnelle générée par les occupants [kg/h]

ratioccal = 3600/(ccal_tot*10^6); %Constante pour calcul température bâtiment [K/W]

trtoitsol = cell2mat(data_toit(4,9)); %Transmission extérieure toiture/sol [W/K]
trlnctoitsol = cell2mat(data_toit(4,11)); %Transmission local non chauffé toiture/sol [W/K]
trlctoitsol = cell2mat(data_toit(4,10)); %Transmission local chauffé toiture/sol [W/K]
ttoit = temp_ext; %Température toit [°C]
trsol = cell2mat(data_toit(4,12)); %Transmission sol [W/K]
tsol = terrain; %Température du terrain [°C]

surfacesudfa = cell2mat(data_sud_bat(44,3)); %Surface façade Sud [m2]
surfacesudvi = (-surfacesudfa+cell2mat(data_sud_bat(43,3)))*pvi_sud; %Surface vitrage Sud [m2]
trsudmur = 25.1; %Transmission extérieure Sud façade [W/K]
trsudvi = 16; %Transmission extérieure Sud fenêtre [W/K]
trlncsud = cell2mat(data_sud(4,11)); %Transmission local non chauffé Sud [W/K]
trlcsud = cell2mat(data_sud(4,10)); %Transmission local chauffé Sud [W/K]
tsudmur = temp_ext; %Température Sud mur [°C]
tsudvi = temp_ext; %Température Sud vitrage [°C]

surfaceestfa = cell2mat(data_est_bat(44,3)); %Surface façade est [m2]
surfaceestvi = (-surfaceestfa+cell2mat(data_est_bat(43,3)))*pvi_est; %Surface vitrage est [m2]
trestmur = 25.1; %Transmission extérieure Est façade [W/K]
trestvi = 16; %Transmission extérieure Est fenêtre [W/K]
trlncest = cell2mat(data_est(4,11)); %Transmission local non chauffé Est [W/K]
trlcest = cell2mat(data_est(4,10)); %Transmission local chauffé Est [W/K]
testmur = temp_ext; %Température Est mur [°C]
testvi = temp_ext; %Température Est vitrage [°C]

surfaceouestfa = cell2mat(data_ouest_bat(44,3)); %Surface façade ouest [m2]
surfaceouestvi = (-surfaceouestfa+cell2mat(data_ouest_bat(43,3)))*pvi_ouest; %Surface vitrage ouest [m2]
trouestmur = 25.1; %Transmission extérieure Ouest façade [W/K]
trouestvi = 16; %Transmission extérieure Ouest fenêtre [W/K]
trlncoouest = cell2mat(data_ouest(4,11)); %Transmission local non chauffé Ouest [W/K]
trlcoouest = cell2mat(data_ouest(4,10)); %Transmission local chauffé Ouest [W/K]
touestmur = temp_ext; %Température Ouest mur [°C]
touestvi = temp_ext; %Température Ouest façade [°C]

surfacenordfa = cell2mat(data_nord_bat(44,3)); %Surface façade Nord [m2]
surfacenordvi = (-surfacenordfa+cell2mat(data_nord_bat(43,3)))*pvi_nord; %Surface vitrage Nord [m2]
trnordmur = 25.1; %Transmission extérieure Sud façade [W/K]
trnordvi = 16; %Transmission extérieure Sud fenêtre [W/K]
trlncnord = cell2mat(data_nord(4,11)); %Transmission local non chauffé nord [W/K]
trlcnord = cell2mat(data_nord(4,10)); %Transmission local chauffé nord [W/K]
tnordmur = temp_ext; %Température Nord mur [°C]
tnordvi = temp_ext; %Température Nord vitrage [°C]
```

```

trest = trtoitsol+trestmur+trsudmur+trouestmur+tnordmur+trestvi+trsudvi+trouestvi+tnordvi; %Transmission vers extérieur
[W/K]
trlnc = trlncsud+trlncest+trlncouest+trlncnord+trlncitoitsol; %Transmission vers non chauffé [W/K]
trlc = trlcsud+trlcst+trlcouest+trlcncnord+trlcitoitsol; %Transmission vers chauffé [W/K]

tlc(1:8760,1) = 0; %Température contre chauffé [°C]
tlnc(1:8760,1) = 0; %Température contre non chauffé [°C]

temp_aer = temp_ext; %Température extérieure aération [°C]

%% Calcul rayonnement sur la végétation
i_est_vege1 = i_est/surfacestvi*coeffrayo/gvi_est; %Irradiance sur végétation est calcul température feuille [W/m2]
i_ouest_vege1 = i_ouest/surfaceouestvi*coeffrayo/gvi_ouest; %Irradiance sur végétation ouest calcul température feuille
[W/m2]
i_sud_vege1 = i_sud/surfacesudvi*coeffrayo/gvi_sud; %Irradiance sur végétation sud calcul température feuille [W/m2]
i_nord_vege1 = i_nord/surfacenordvi*coeffrayo/gvi_nord; %Irradiance sur végétation nord calcul température feuille
[W/m2]

i_est_vege = i_est/surfacestvi/gvi_est; %Irradiance sur végétation est calcul évapotranspiration [W/m2]
i_ouest_vege = i_ouest/surfaceouestvi/gvi_ouest; %Irradiance sur végétation ouest calcul évapotranspiration [W/m2]
i_sud_vege = i_sud/surfacesudvi/gvi_sud; %Irradiance sur végétation sud calcul évapotranspiration [W/m2]
i_nord_vege = i_nord/surfacenordvi/gvi_nord; %Irradiance sur végétation nord calcul évapotranspiration [W/m2]

%% Calcul transmissivité
a = laimax/(((debutf+finf)/2-debutf)*((debutf+finf)/2-finf)); %Coefficient courbe feuillage
for heure_loop = 1:8760
    if(heure_loop > debutf && heure_loop < finf)
        lai(heure_loop,1) = a*(heure(heure_loop,1)-debutf)*(heure(heure_loop,1)-finf); %Calcul du LAI en fonction des heures
de l'année
    else
        lai(heure_loop,1) = 0;
    end
end
tf = exp(-coeffex*lai); %Calcul de la transmissivité

%% Calcul évapotranspiration
delta = (4098*(0.6108*exp((17.27*temp_ext)/(temp_ext+237.3)))/(temp_ext+237.3).^2); %Pente de vapeur saturation
[kPa/°C]
pressure = 101.3*((293-0.0065*z)/293)^5.26; %Pression atmosphérique [kPa]
gamma = 0.665*10^-3*pressure; %Constante psychrométrique [kPa]
es = 0.6108*exp((17.27*temp_ext)/(temp_ext+237.3)); %Pression de vapeur saturation [kPa]
ea = hr/100.*es; %Pression de vapeur actuelle [kPa]

rns_est = (1-albedof)*i_est_vege*3.6*10^-3; %Rayonnement courte longueur d'onde est [MJ/m2*h]
rns_ouest = (1-albedof)*i_ouest_vege*3.6*10^-3; %Rayonnement courte longueur d'onde ouest [MJ/m2*h]
rns_sud = (1-albedof)*i_sud_vege*3.6*10^-3; %Rayonnement courte longueur d'onde sud [MJ/m2*h]
rns_nord = (1-albedof)*i_nord_vege*3.6*10^-3; %Rayonnement courte longueur d'onde nord [MJ/m2*h]

rnl = sigma*(temp_ext+273.16).^4.*(0.34-0.14*sqrt(ea))*(1.35*rrsro-0.35); %Rayonnement grande longueur d'onde
[MJ/m2*h]

rn_est = rns_est-rnl; %Rayonnement net est [MJ/m2*h]
rn_ouest = rns_ouest-rnl; %Rayonnement net ouest [MJ/m2*h]
rn_sud = rns_sud-rnl; %Rayonnement net sud [MJ/m2*h]
rn_nord = rns_nord-rnl; %Rayonnement net nord [MJ/m2*h]

for heure_loop = 1:8760
    if(hgk(heure_loop,1) == 0)
        g_est(heure_loop,1) = 0.5*rn_est(heure_loop,1);
        g_ouest(heure_loop,1) = 0.5*rn_ouest(heure_loop,1);
        g_sud(heure_loop,1) = 0.5*rn_sud(heure_loop,1);
        g_nord(heure_loop,1) = 0.5*rn_nord(heure_loop,1);
    else
        g_est(heure_loop,1) = 0.1*rn_est(heure_loop,1);
        g_ouest(heure_loop,1) = 0.1*rn_ouest(heure_loop,1);
        g_sud(heure_loop,1) = 0.1*rn_sud(heure_loop,1);
        g_nord(heure_loop,1) = 0.1*rn_nord(heure_loop,1);
    end
end

```

```

end
end

eto_est = (0.408*delta.*(rn_est-g_est)+gamma*37./(temp_ext+273).*uh.*(es-ea))./(delta+gamma.*(1+0.34*uh));
%Evapotranspiration potentielle est [mm/h]
eto_ouest = (0.408*delta.*(rn_ouest-g_ouest)+gamma*37./(temp_ext+273).*uh.*(es-ea))./(delta+gamma.*(1+0.34*uh));
%Evapotranspiration potentielle ouest [mm/h]
eto_sud = (0.408*delta.*(rn_sud-g_sud)+gamma*37./(temp_ext+273).*uh.*(es-ea))./(delta+gamma.*(1+0.34*uh));
%Evapotranspiration potentielle sud [mm/h]
eto_nord = (0.408*delta.*(rn_nord-g_nord)+gamma*37./(temp_ext+273).*uh.*(es-ea))./(delta+gamma.*(1+0.34*uh));
%Evapotranspiration potentielle nord [mm/h]

if (progttempf==1)
    etc_est = eto_est*kc; %Evapotranspiration culture est [mm/h]
    etc_ouest = eto_ouest*kc; %Evapotranspiration culture ouest [mm/h]
    etc_sud = eto_sud*kc; %Evapotranspiration réelle sud [mm/h]
    etc_nord = eto_nord*kc; %Evapotranspiration réelle nord [mm/h]

    lambdaet_est = etc_est*lambda*10^6/3600; %Chaleur latente évapotranspiration est [W/m2]
    lambdaet_ouest = etc_ouest*lambda*10^6/3600; %Chaleur latente évapotranspiration ouest [W/m2]
    lambdaet_sud = etc_sud*lambda*10^6/3600; %Chaleur latente évapotranspiration sud [W/m2]
    lambdaet_nord = etc_nord*lambda*10^6/3600; %Chaleur latente évapotranspiration nord [W/m2]

    tempf_est(1:8760,1) = temp_ext-(etc_est.*rhoe/1000*lambda*10^6*tauxeavp)./(ratioplante*ef*1.2*renouv.*cair);
    %Calcul température feuillage est [°C]
    tempf_ouest(1:8760,1) = temp_ext-(etc_ouest.*rhoe/1000*lambda*10^6*tauxeavp)./(ratioplante*ef*1.2*renouv.*cair);
    %Calcul température feuillage ouest [°C]
    tempf_sud(1:8760,1) = temp_ext-(etc_sud.*rhoe/1000*lambda*10^6*tauxeavp)./(ratioplante*ef*1.2*renouv.*cair);
    %Calcul température feuillage sud [°C]
    tempf_nord(1:8760,1) = temp_ext-(etc_nord.*rhoe/1000*lambda*10^6*tauxeavp)./(ratioplante*ef*1.2*renouv.*cair);
    %Calcul température feuillage nord [°C]

    for heure_loop = 1:8760
        %Correction apportée sur les valeurs de température calculées
        if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0))
            tempf_est(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
            elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_est(heure_loop,1) < 0)
                tempf_est(heure_loop,1) = 0;
            end
            if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0))
                tempf_ouest(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
                elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_ouest(heure_loop,1) < 0)
                    tempf_ouest(heure_loop,1) = 0;
                end
                if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0))
                    tempf_nord(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
                    elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_nord(heure_loop,1) < 0)
                        tempf_nord(heure_loop,1) = 0;
                    end
                    if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0))
                        tempf_sud(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
                        elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_sud(heure_loop,1) < 0)
                            tempf_sud(heure_loop,1) = 0;
                        end
                    end
                deltat_est = temp_ext-tempf_est; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage est
                deltat_ouest = temp_ext-tempf_ouest; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage ouest
                deltat_sud = temp_ext-tempf_sud; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage sud
                deltat_nord = temp_ext-tempf_nord; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage nord

elseif (progttempf==0)
    %% Calcul largeur feuillage
    b = lfmav/(((debutf+finf)/2-debutf)*((debutf+finf)/2-finf)); %Coefficient courbe feuillage

```

```

for heure_loop = 1:8760
    if(heure_loop > debutf && heure_loop < finf)
        lf(heure_loop,1) = b*(heure(heure_loop,1)-debutf)*(heure(heure_loop,1)-finf)+0.0001; %Calcul du LAI en fonction
des heures de l'année
    else
        lf(heure_loop,1) = 0.0001;
    end
end
d = 0.7*lf;

%% Calcul température feuilles
gha = 1.4*0.135*sqrt(uh./d); %Conductance couche limite transfert de chaleur [mol/m2.s]
gva = 1.4*0.147*sqrt(uh./d); %Conductance couche limite transfert de vapeur [mol/m2.s]
ghr = gr+gha; %Conductance convective-radiative [mol/m2.s]
gv = (0.5*0.5*gva)/(gva+0.5); %Conductance transfert de vapeur [mol/m2.s]
gammap = 6.66*10^-4*ghr/gv; %Conductance psychrométrique apparente [kPa/°C]
qleaf_est = i_est_vege1*alphaf+epsilonf*sigma2*fv*((temp_ext+273.15).^4+(tsky).^4)-
epsilonf*sigma2*(temp_ext+273.15).^4;
qleaf_ouest = i_ouest_vege1*alphaf+epsilonf*sigma2*fv*((temp_ext+273.15).^4+(tsky).^4)-
epsilonf*sigma2*(temp_ext+273.15).^4;
qleaf_sud = i_sud_vege1*alphaf+epsilonf*sigma2*fv*((temp_ext+273.15).^4+(tsky).^4)-
epsilonf*sigma2*(temp_ext+273.15).^4;
qleaf_nord = i_nord_vege1*alphaf+epsilonf*sigma2*fv*((temp_ext+273.15).^4+(tsky).^4)-
epsilonf*sigma2*(temp_ext+273.15).^4;
tempf_est(1:8760,1) = temp_ext+(gammap./(delta/pressure+gammap)).*((qleaf_est)/(ghr.*cp)-(es-
ea)./(pressure*gammap)); %Température des feuilles [°C]
tempf_ouest(1:8760,1) = temp_ext+(gammap./(delta/pressure+gammap)).*((qleaf_ouest)/(ghr.*cp)-(es-
ea)./(pressure*gammap)); %Température des feuilles [°C]
tempf_sud(1:8760,1) = temp_ext+(gammap./(delta/pressure+gammap)).*((qleaf_sud)/(ghr.*cp)-(es-
ea)./(pressure*gammap)); %Température des feuilles [°C]
tempf_nord(1:8760,1) = temp_ext+(gammap./(delta/pressure+gammap)).*((qleaf_nord)/(ghr.*cp)-(es-
ea)./(pressure*gammap)); %Température des feuilles [°C]
for heure_loop = 1:8760
    %Correction apportée sur les valeurs de température calculées
    if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0) || i_est_vege(heure_loop,1) < 1)
        tempf_est(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
    elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_est(heure_loop,1) < 0)
        tempf_est(heure_loop,1) = 0;
    end
    if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0) || i_ouest_vege(heure_loop,1) < 1)
        tempf_ouest(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
    elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_ouest(heure_loop,1) < 0)
        tempf_ouest(heure_loop,1) = 0;
    end
    if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0) || i_nord_vege(heure_loop,1) < 1)
        tempf_nord(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
    elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_nord(heure_loop,1) < 0)
        tempf_nord(heure_loop,1) = 0;
    end
    if ((heure_loop <= debutf || heure_loop >= finf) || (heure_loop > debutf && heure_loop < finf &&
temp_ext(heure_loop,1) < 0) || i_sud_vege(heure_loop,1) < 1)
        tempf_sud(heure_loop,1) = temp_ext(heure_loop,1);
    elseif (heure_loop > debutf && heure_loop < finf && tempf_sud(heure_loop,1) < 0)
        tempf_sud(heure_loop,1) = 0;
    end
end
deltat_est = temp_ext-tempf_est; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage est
deltat_ouest = temp_ext-tempf_ouest; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage ouest
deltat_sud = temp_ext-tempf_sud; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage sud
deltat_nord = temp_ext-tempf_nord; %Différence température entre l'extérieur et le feuillage nord
end

%% Calcul température/Puissance et climatisation
for k = 1:step

```

```

switch k
case 1
    %Simulation sans végétalisation
case 2
    %Simulation avec végétalisation et attribution des valeurs de
    %température et ombrage selon options choisies
    if (vegetempmur_sud==1)
        tsudmur = tempf_sud(1:8760,1);
    end
    if (vegetempmur_nord==1)
        tnordmur = tempf_nord(1:8760,1);
    else
    end
    if (vegetempmur_est==1)
        testmur = tempf_est(1:8760,1);
    else
    end
    if (vegetempmur_ouest==1)
        touestmur = tempf_ouest(1:8760,1);
    end

    if (vegetempfen_sud==1)
        tsudvi = tempf_sud(1:8760,1);
    end
    if (vegetempfen_nord==1)
        tnordvi = tempf_nord(1:8760,1);
    else
    end
    if (vegetempfen_est==1)
        testvi = tempf_est(1:8760,1);
    else
    end
    if (vegetempfen_ouest==1)
        touestvi = tempf_ouest(1:8760,1);
    end

    if (vegeomb_sud==1)
        gstore_sud = gstore_sud.*tf(1:8760,1);
    else
    end
    if (vegeomb_nord==1)
        gstore_nord = gstore_nord.*tf(1:8760,1);
    end
    if (vegeomb_est==1)
        gstore_est = gstore_est.*tf(1:8760,1);
    end
    if (vegeomb_ouest==1)
        gstore_ouest = gstore_ouest.*tf(1:8760,1);
    end

    if (protempaer==1)
        temp_aer=tempf_est;
    end
end

tin(1,k) = tconsignechauff;
for heure_loop = 1:8760
    if (progs==1&&k==2)
        if (heure_loop==1)
            hrin(1,1) = 40; %Humidité relative intérieure initiale [%]
            es2(heure_loop,1) = 0.6108*exp((17.27*tin(heure_loop,k))/(tin(heure_loop,k)+237.3)); %Pression de vapeur
saturation intérieure [kPa]
            ea2(heure_loop,1) = hrin(heure_loop,1)/100*es2(heure_loop,1); %Pression de vapeur actuelle intérieure [KPa]
            r(1,1) = (ea2(heure_loop,1)*mw)/(rgaz*(tin(heure_loop,k)+273.15)); %Humidité absolue intérieure initiale
%[kg/m3]
        else

```



```

    r1(heure_loop,1) = (ea(heure_loop,1)*mw)/(rgaz*(temp_ext(heure_loop,1)+273.15)); %Humidité absolue
    extérieure [kg/m3]
    r(heure_loop,1) = r1(heure_loop,1)+qg/(n*volume)+(r(1,1)-(r1(heure_loop,1))-qg/(n*volume))*exp(-
    n*(heure_loop-1)); %Humidité absolue intérieure [kg/m3]
    es2(heure_loop,1) = 0.6108*exp((17.27*tin(heure_loop,k))/(tin(heure_loop,k)+237.3)); %Pression de vapeur
    saturation [kPa]
    hrin(heure_loop,1) = (r(heure_loop,1)*rgaz*(tin(heure_loop,k)+273.15)*100)/(mw*es2(heure_loop,1));
    %Humidité relative intérieure [%]
    end
    if hrin(heure_loop,1)>=100
        %Correction dépassement humidité (condensation)
        hrin(heure_loop,1)=100;
    end
    ea2(heure_loop,1) = hrin(heure_loop,1)/100*es2(heure_loop,1); %Pression de vapeur avec végétation [kPa]
    x(heure_loop,1) = ea2(heure_loop,1)/(pressure-ea2(heure_loop,1))*0.621; %Humidité spécifique [kg eau/kg air]
    cs(heure_loop,1) = (cair(heure_loop,1)/1000+1.82*x(heure_loop,1))*1000; %Capacité calorifique air humide
    [J/kg*K]
    cair(heure_loop,1)=cs(heure_loop,1);
    end

    if(tin(heure_loop,k) >= tconsigne_fen && (tin(heure_loop,k)-temp_ext(heure_loop,1)) >= deltafen && progfen == 1)
        taer(heure_loop,1) = cair(heure_loop,1)*rhoa*debitfen*(temp_aer(heure_loop,1)-
        tin(heure_loop,k))/3600*SRE*ratioocal; %Transmissions par aération fenêtre [°C]
    else
        taer(heure_loop,1) = cair(heure_loop,1)*rhoa*debitair(heure_loop,1)*(temp_aer(heure_loop,1)-
        tin(heure_loop,k))/3600*SRE*ratioocal; %Transmissions par aération standard [°C]
    end

    tint(heure_loop,1) = -ratioocal*(trext+trlc+trlnc+trsol)*tin(heure_loop,k); %Transmissions par intérieure [°C]

    tzone_est(heure_loop,1) = ratioocal*trestmur*testmur(heure_loop,1)+ratioocal*trestvi*testvi(heure_loop,1);
    %Transmissions par extérieur est [°C]
    tzone_ouest(heure_loop,1) = ratioocal*trouestmur*touestmur(heure_loop,1)+ratioocal*trouestvi*touestvi(heure_loop,1);
    %Transmissions par extérieur ouest [°C]
    tzone_sud(heure_loop,1) = ratioocal*trsudmur*tsudmur(heure_loop,1)+ratioocal*trsudvi*tsudvi(heure_loop,1);
    %Transmissions par extérieur sud [°C]
    tzone_nord(heure_loop,1) = ratioocal*trnordmur*tnordmur(heure_loop,1)+ratioocal*trnordvi*tnordvi(heure_loop,1);
    %Transmissions par extérieur nord [°C]
    tzone_toit(heure_loop,1) = ratioocal*trtoitsol*ttoit(heure_loop,1); %Transmissions par extérieur toit/sol [°C]

    tzone(heure_loop,1) =
    tzone_est(heure_loop,1)+tzone_ouest(heure_loop,1)+tzone_sud(heure_loop,1)+tzone_nord(heure_loop,1)+tzone_toit(heure_
    loop,1); %Transmissions par extérieur totale [°C]

    tterrain(heure_loop,1) = ratioocal*trsol*tsol(heure_loop,1); %Transmissions par terrain [°C]

    if(tin(heure_loop,k) <= tconsigne_store || progstore == 0)
        tgs_est(heure_loop,1) = ratioocal*i_est(heure_loop,1)*gstore_est(heure_loop,1); %Transmissions par vitrage est [°C]
        tgs_ouest(heure_loop,1) = ratioocal*i_ouest(heure_loop,1)*gstore_ouest(heure_loop,1); %Transmissions par vitrage
        ouest [°C]
        tgs_nord(heure_loop,1) = ratioocal*i_nord(heure_loop,1)*gstore_nord(heure_loop,1); %Transmissions par vitrage
        nord [°C]
        tgs_sud(heure_loop,1) = ratioocal*i_sud(heure_loop,1)*gstore_sud(heure_loop,1); %Transmissions par vitrage sud
        [°C]
        tgs_toit(heure_loop,1) = ratioocal*i_toit(heure_loop,1)*gstore_toit(heure_loop,1); %Transmissions par vitrage toit
        [°C]
    else
        tgs_est(heure_loop,1) = ratioocal*i_est(heure_loop,1)*gstore_est(heure_loop,1)*gconsigne_est; %Transmissions par
        vitrage est [°C]
        tgs_ouest(heure_loop,1) = ratioocal*i_ouest(heure_loop,1)*gstore_ouest(heure_loop,1)*gconsigne_ouest;
        %Transmissions par vitrage ouest [°C]
        tgs_nord(heure_loop,1) = ratioocal*i_nord(heure_loop,1)*gstore_nord(heure_loop,1)*gconsigne_nord;
        %Transmissions par vitrage nord [°C]
        tgs_sud(heure_loop,1) = ratioocal*i_sud(heure_loop,1)*gstore_sud(heure_loop,1)*gconsigne_sud; %Transmissions
        par vitrage sud [°C]
        tgs_toit(heure_loop,1) = ratioocal*i_toit(heure_loop,1)*gstore_toit(heure_loop,1)*gconsigne_toit; %Transmissions
        par vitrage toit [°C]
    end

```

```

end
tgs(heure_loop,1) =
tgs_est(heure_loop,1)+tgs_ouest(heure_loop,1)+tgs_nord(heure_loop,1)+tgs_sud(heure_loop,1)+tgs_toit(heure_loop,1);

tgi(heure_loop,1) = ratioccal*(gainappers(heure_loop,1))*SRE; %Transmissions par gains internes [°C]
tglc(heure_loop,1) = ratioccal*trlc*tlc(heure_loop,1); %Transmissions par local chauffé [°C]
tglnc(heure_loop,1) = ratioccal*trlnc*tlnc(heure_loop,1); %Transmissions par local non chauffé [°C]
sumt(heure_loop,1) =
taer(heure_loop,1)+tint(heure_loop,1)+tzone(heure_loop,1)+tterrain(heure_loop,1)+tgs(heure_loop,1)+tgi(heure_loop,1)+tgc(heure_loop,1)+tglnc(heure_loop,1); %Somme des transmissions [°C]
if(tin(heure_loop,k)+sumt(heure_loop,1) < tconsignechauff)
    if((tconsignechauff-(sumt(heure_loop,1)+tin(heure_loop,k)))/(SRE*ratioccal) <= pchauffmax)
        ec(heure_loop,1) = (tconsignechauff-(sumt(heure_loop,1)+tin(heure_loop,k)))/(SRE*ratioccal); %Puissance pour
égaliser les transmissions chauffage [W/m2]
    else
        ec(heure_loop,1) = pchauffmax;
    end
    energiechauff(1,k) = energiechauff(1,k)+ec(heure_loop,1);
elseif(tin(heure_loop,k)+sumt(heure_loop,1) > tconsigneclim && progclim == 1)
    if((tconsigneclim-(tin(heure_loop,k)+sumt(heure_loop,1)))/(SRE*ratioccal) >= -prefmax)
        ec(heure_loop,1) = (tconsigneclim-(tin(heure_loop,k)+sumt(heure_loop,1)))/(SRE*ratioccal); %Puissance pour
égaliser les transmissions climatisation [W/m2]
    else
        ec(heure_loop,1) = -prefmax;
    end
    heureclim = heureclim+1;
    energieclim(1,k) = energieclim(1,k)+ec(heure_loop,1);
else
    ec(heure_loop,1) = 0;
end
tgc(heure_loop,1) = ec(heure_loop,1)*SRE*ratioccal; %Transmission par chauffage/refroidissement [°C]
tin(heure_loop+1,k) = sumt(heure_loop,1)+tgc(heure_loop,1)+tin(heure_loop,k); %Température intérieure [°C]
end
etot(1,k) = sum(abs(ec)); %Energie totale [Wh/m2]
erefutil(1,k) = energieclim(1,k)/energieclim(1,1)*100; %Utilisation énergie de climatisation [%]
heurec(1,k) = sum(heureclim); %Heure de climatisation [h]
pmaxchauff(1,k) = max(ec); %Puissance max de chauffage [W]
pmaxref(1,k) = -min(ec); %Puissance max de refroidissement [W]
heureclim = 0;
end
tinmax=max(tin);
deltatin = tin(1:8760,1)-tin(1:8760,2);
averagedeltatin = mean(deltatin(debutf:finf));
deltatext = temp_ext-tempf_est;
averagedeltatext = mean(deltatext(debutf:finf));

%% Graphiques température feuille
subplot(4,2,1)
X = categorical(["sans végétalisation", "avec végétalisation"]);
X = reordercats(X,["sans végétalisation", "avec végétalisation"]);
bar(X,heurec(1,1:2))
ylabel('Heure climatisation [h]')
title('Heure utilisation climatisation selon végétation')

subplot(4,2,2)
bar(X,-energieclim(1,1:2)/1000)
ylabel('Énergie climatisation [kWh/m2]')
title('Énergie de climatisation selon végétation')

subplot(4,2,3)
plot(tempf_est)
hold on
plot(temp_ext)
xlabel('Heure année')
ylabel('Température [°C]')
title('Température extérieure avec et sans végétalisation')
legend('Tvégé','Text')
```

```

subplot(4,2,4)
scatter(1:8760,deltatext,1)
hold on
plot(debutf:finf,ones(1,finf-debutf+1)*averagedeltatext)
xlabel('Heure année')
ylabel('Température [°C]')
title('Différence température extérieure avec et sans végétalisation ')
legend('Delta température','Delta moyen')

subplot(4,2,5)
plot(tin)
xlabel('Heure année')
ylabel('Température [°C]')
title('Température intérieure avec et sans végétalisation')
legend('sans végétalisation','avec végétalisation')

subplot(4,2,6)
plot(deltatin)
hold on
plot(debutf:finf,ones(1,finf-debutf+1)*averagedeltatin)
xlabel('Heure année')
ylabel('Température [°C]')
title('Différence température intérieure avec et sans végétalisation ')
legend('Delta température','Delta moyen')

subplot(4,2,7)
plot(lf)
xlabel('Heure année')
ylabel('largeur feuille [m]')
title('Largeur de feuille selon heure année')
legend('lf = " + num2str(lf2) + " cm")

subplot(4,2,8)
plot(tf)
xlabel('Heure année')
ylabel('Transmissivité [-]')
title('Évolution transmissivité durant année')
legend('LAIMax = " + num2str(laimax))

evoenerchauff=energiechauff(2)/energiechauff(1);
evoenerclim=energieclim(2)/energieclim(1);
evoenertot=etot(2)/etot(1);
evopuichauff=pmaxchauff(2)/pmaxchauff(1);
evopuiref=(pmaxref(1)-pmaxref(2))*SRE/1000;
evoheure=heurec(1)-heurec(2);

f = msgbox("Informations résultats - Energie climatisation : " + num2str(energieclim(1,2)/1000)+ " , Energie chauffage : " +
num2str(energiechauff(1,2)/1000)+ " , Heure climatisation : " + num2str(heurec(1,2))+ " , Température max intérieure : " +
num2str(max(tin(1:8760,2))))+ " , Moyenne réduction température ext : " + num2str(averagedeltatext) + " , Moyenne réduction
température in : " + num2str(averagedeltatin) + " , Baisse de puissance clim : " + num2str(pmaxref(1)-pmaxref(2)));
%f = msgbox("Avec cette option de végétalisation, l'énergie de chauffage a été multipliée par " + num2str(evoenerchauff)+ "
et la climatisation par " + num2str(evoenerclim) + " L'énergie totale a quant à elle été multipliée par " + num2str(evoenertot)
+ ". Les heure de climatisation sont réduites de " + num2str(evoheure) + " heures et la puissance de climatisation a baissée de
" + num2str(evopuiref) + " kW.");

```

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 ☒ HES—SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiante / Studentin Ludivine Défago Professeur / Dozent Klaus Kreher Jakob Rager	Lieu d'exécution / Ausführungsort ☒ HES—SO Valais ☐ Industrie ☐ Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit ☐ oui / ja ☒ 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

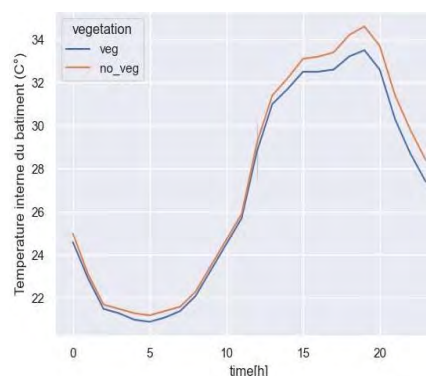
Ce rapport étudie l'effet thermique des façades végétales sur l'amélioration du confort urbain ainsi que l'influence sur le bilan énergétique des bâtiments.

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.

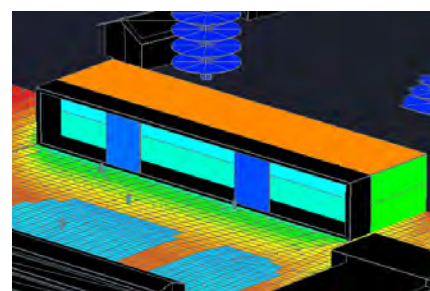
L'analyse des mécanismes d'évapotranspiration et d'ombrage associés aux plantes démontre que les façades vertes réduisent les besoins de refroidissement du bâtiment d'environ 16%.

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 & Cuce, 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.

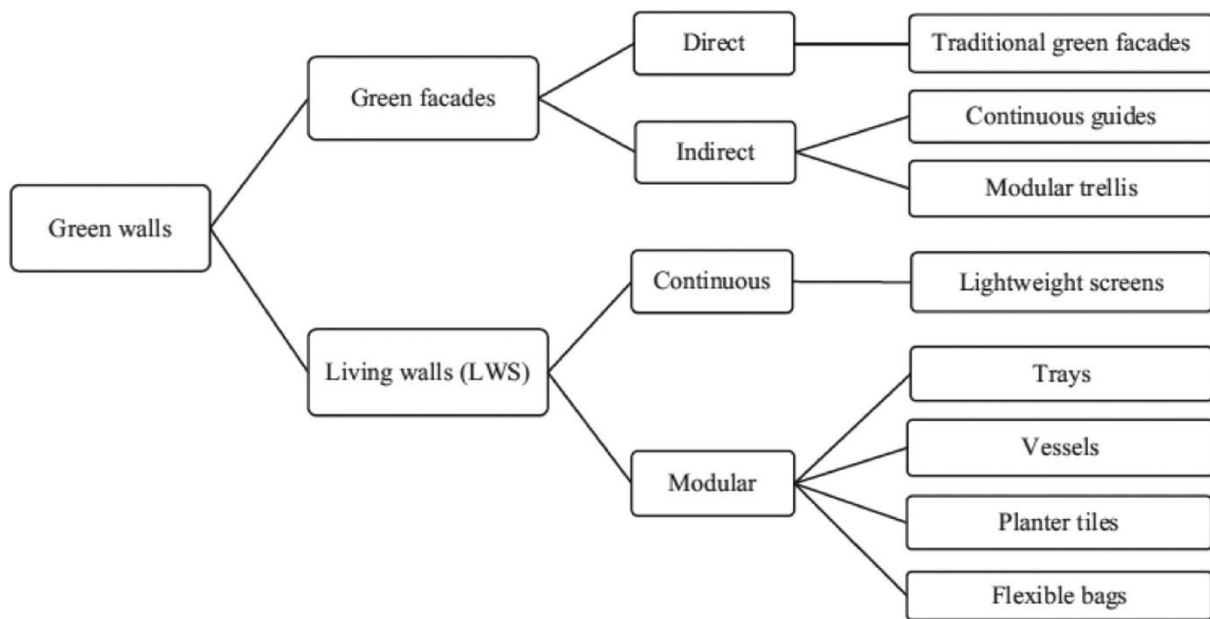


Figure 4: Classification des façades végétalisées
 Source : (Besir & Cuce, 2018)

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.

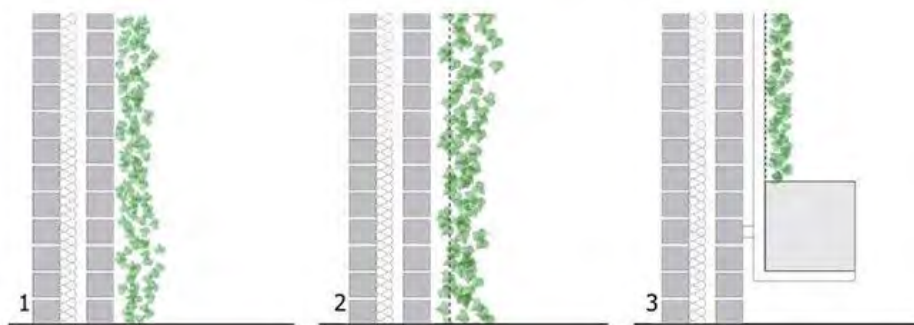


Figure 5: Différents systèmes de façades végétalisées, (1) Façade verte directe et enracinée dans le sol ; (2) Façade verte indirecte et enracinée au sol ; (3) Façade verte indirecte avec conteneurs
 Source : (Małyszko & Laska, 2019)

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 lambda (λ), 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.

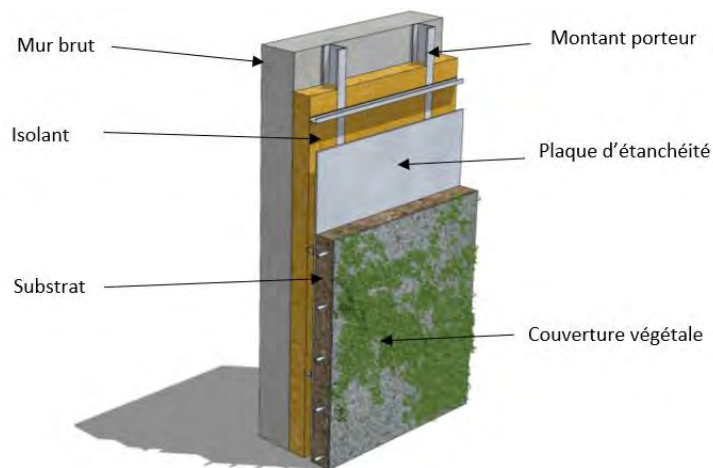


Figure 8: Structure type d'une façade avec mur vivant
 Source : biodiversiteetbati.fr, modifiée par l'auteur

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.

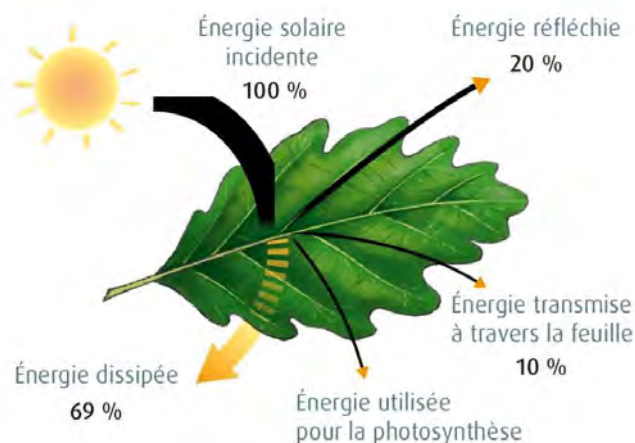


Figure 9: Le devenir de l'énergie solaire au niveau d'une feuille
 Source : Belin Education/Humensis, 2019 Enseignement scientifique 1^{ère}, Amelie Veaux

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.

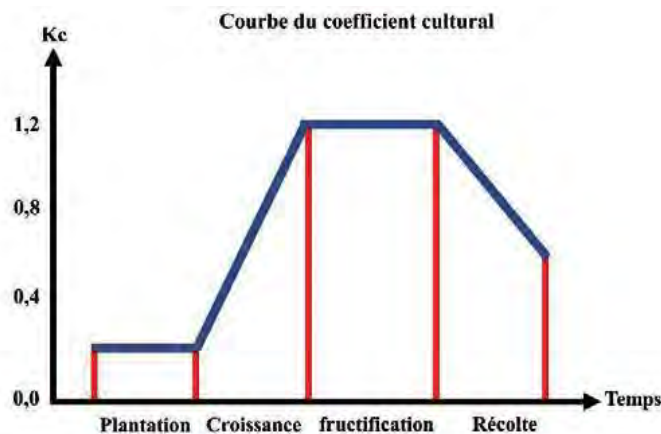


Figure 10: Evolution du Kc en fonction de la croissance de la plante
 Source : (Skhiri, 2019)

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.

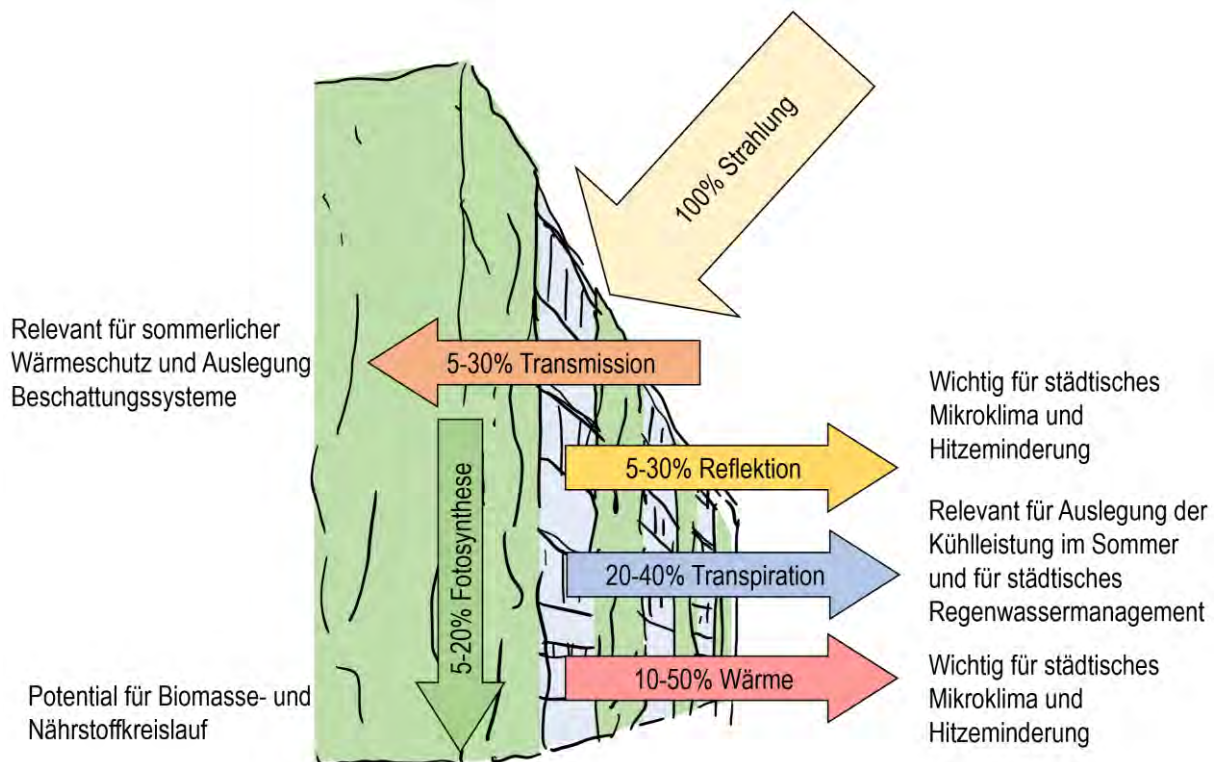


Figure 11: Diagramme de flux de chaleur d'une façade végétalisée
 Source : (Tschander et al., 2021)

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.

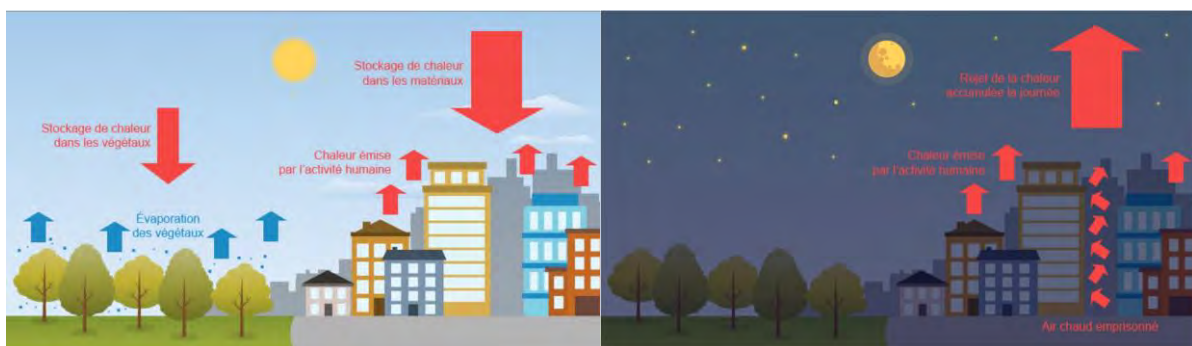


Figure 12: Phénomène d'îlot de chaleur urbain
 Source : Emeline Gaube / BFMTV.com

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.

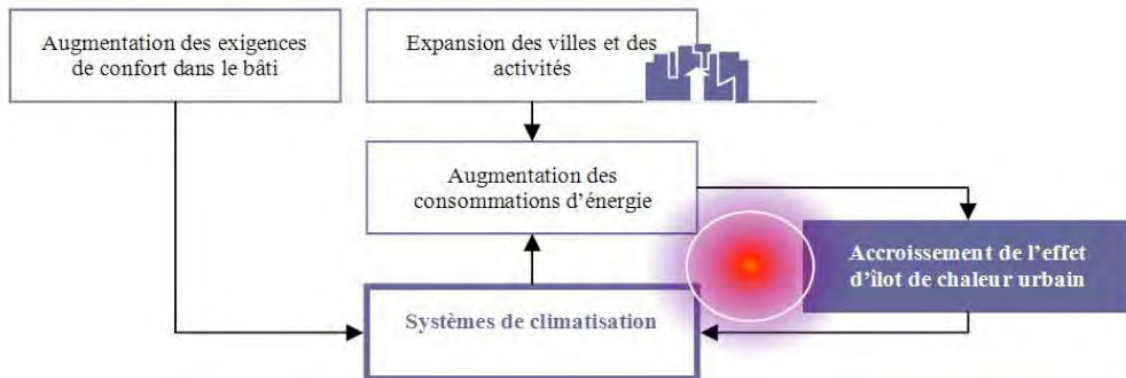


Figure 13: Problématiques des ICU et facteurs anthropiques

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.

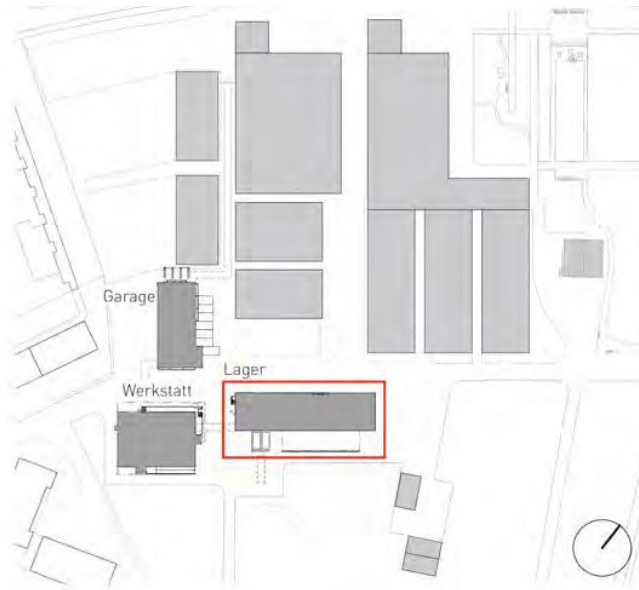


Figure 14: Plan d'ensemble de la pépinière de Zürich, Gutstrasse 199, 8047 Zürich-Albisrieden

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.

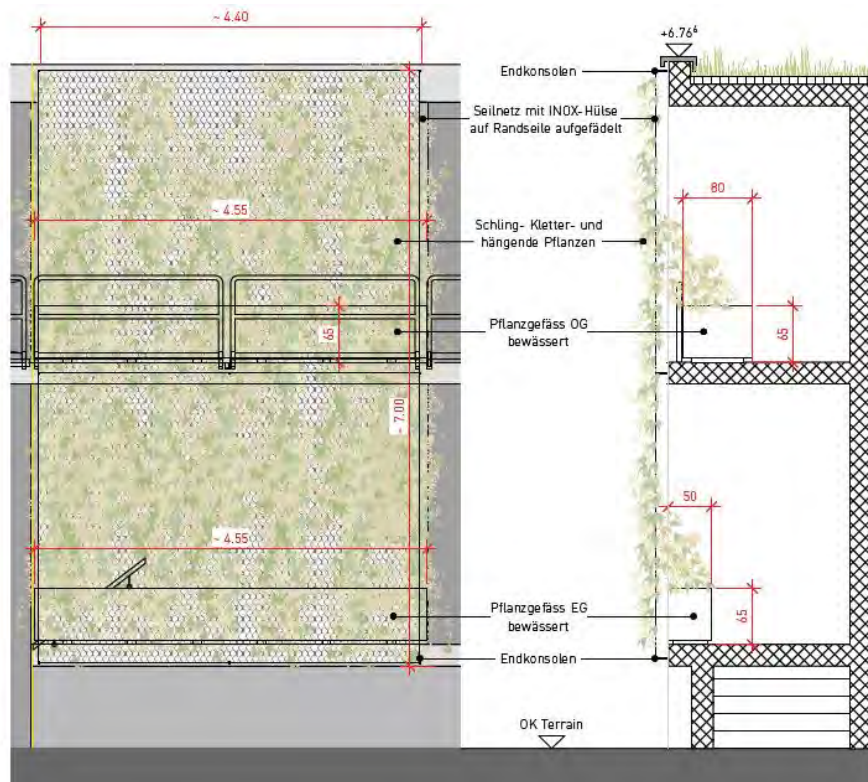


Figure 16: Façade rideau installée sur la façade nord-ouest du bâtiment de la pépinière de Zürich
 Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

Le mur vivant est composé de modules comprenant la structure porteuse 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.

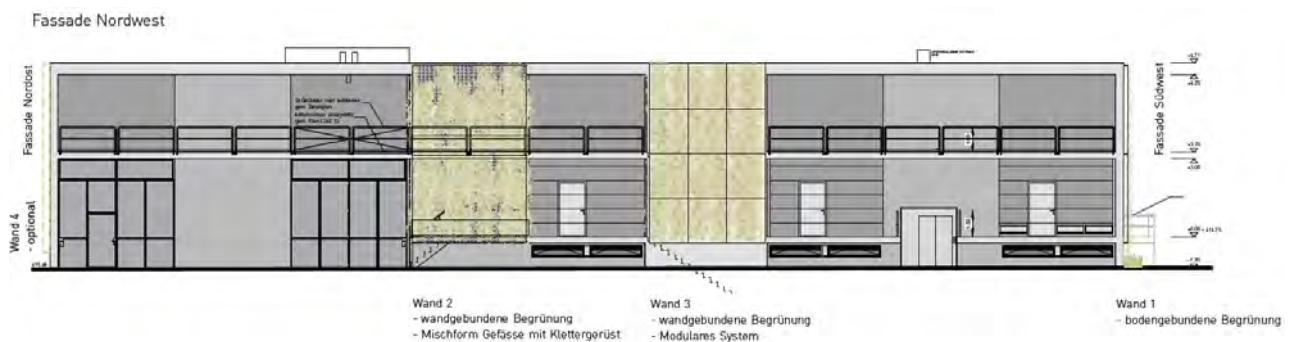


Figure 18: Façade nord-ouest du bâtiment avec intégration de la végétation
 Source: Raderschallpartner ag, www.raderschall.ch

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.

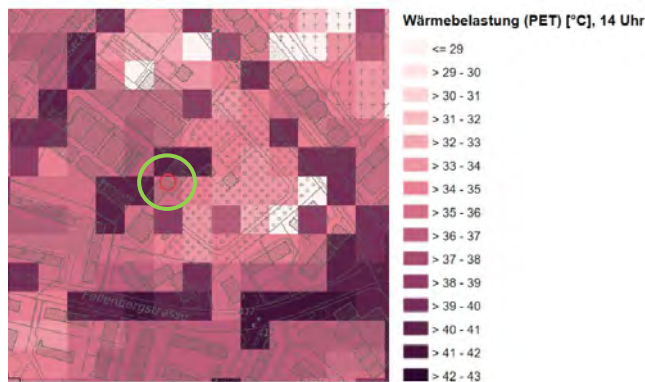


Figure 20: PET à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)
 Source : SIG-ZH

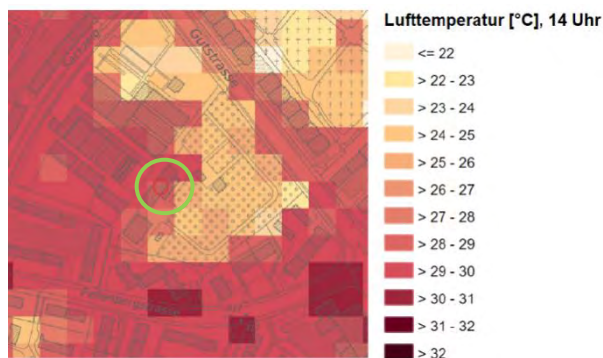


Figure 21: Température de l'air à 14h autour du bâtiment étudié (en vert)
 Source : SIG-ZH

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.

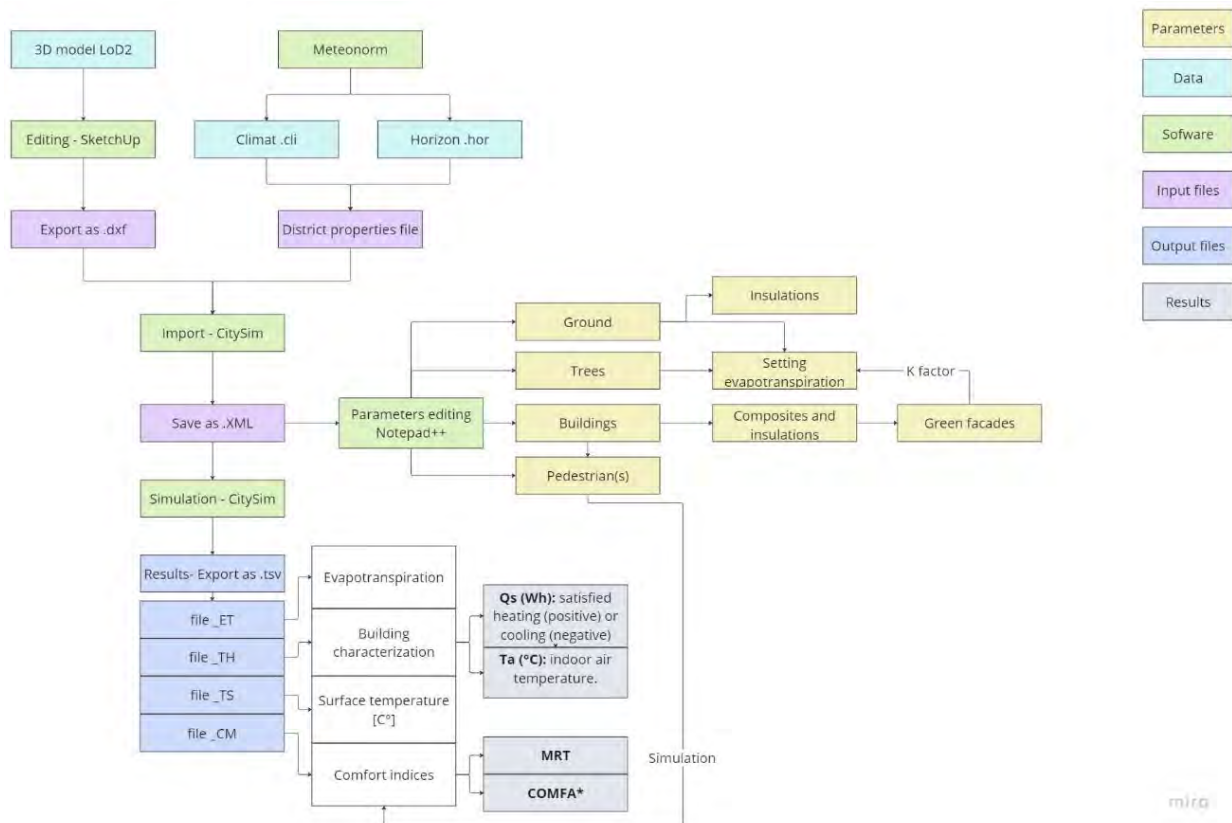


Figure 23: Schéma de méthodologie de simulation

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.

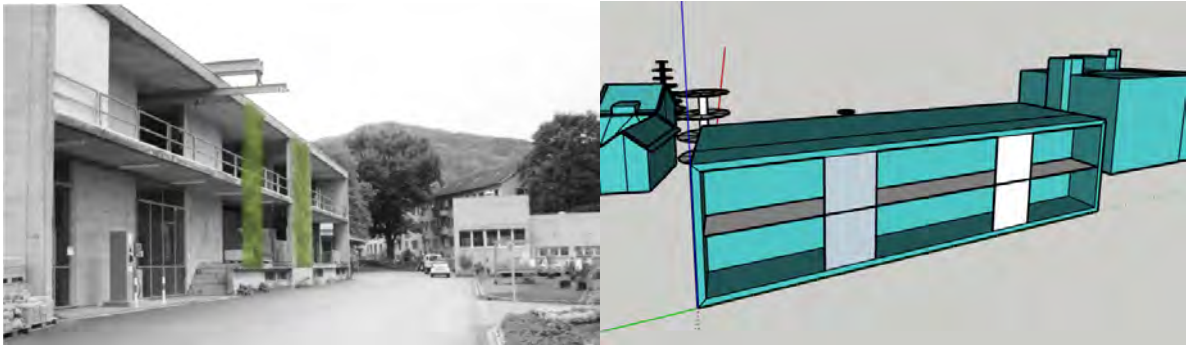


Figure 25: à gauche, une photo du bâtiment étudié avec ses façades végétales, à droite le bâtiment modélisé sur SketchUp avec en gris la façade rideau et en blanc le mur vivant.

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

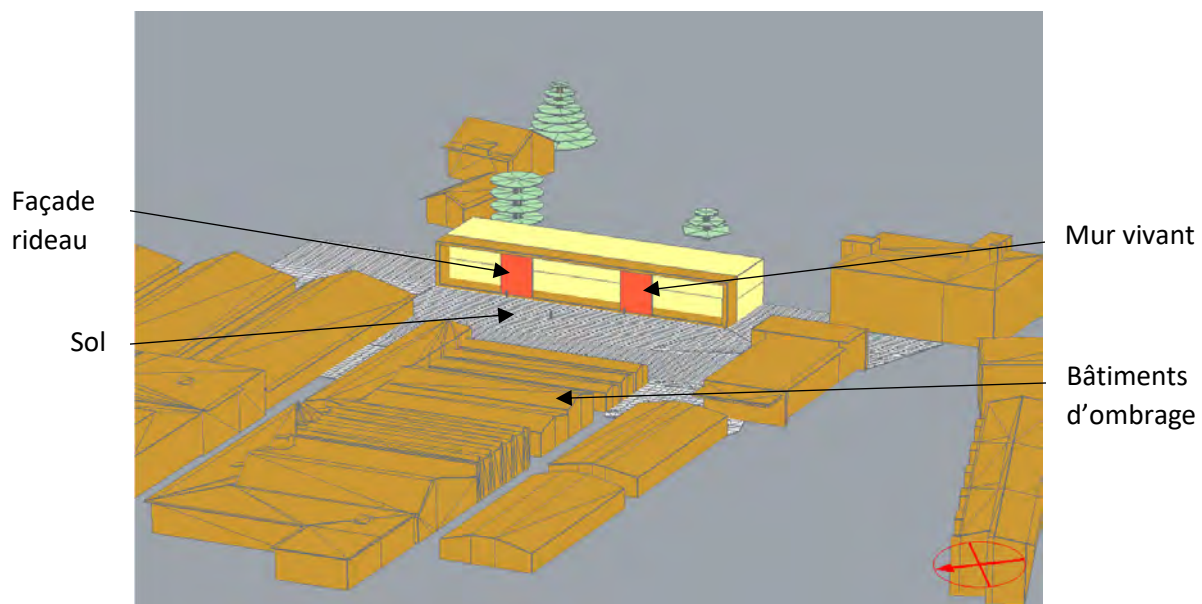


Figure 26: Rendu de la modélisation 3D avant simulation importé sur CitySim

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.

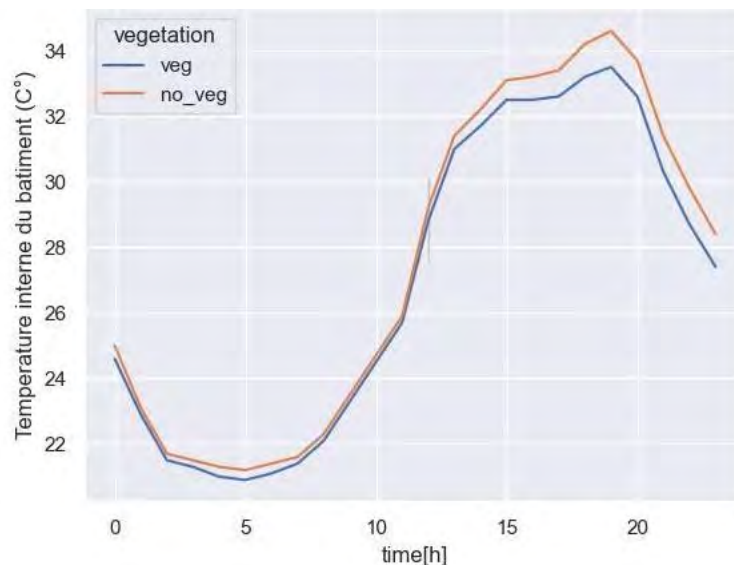


Figure 27: Répartition des températures dans le bâtiment avec et sans végétation pour le jour le plus chaud de l'année 2020

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

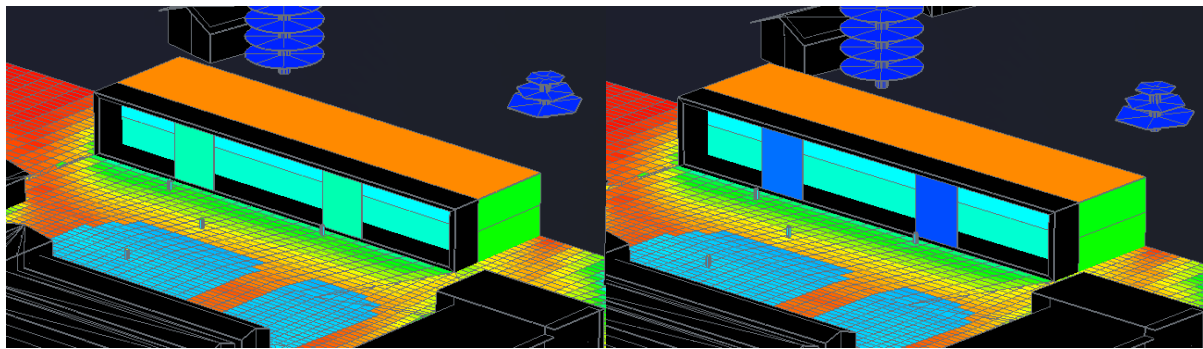


Figure 29: Température moyenne annuelle de chaque surface de la scène. À gauche sans la végétation de paroi, à droite avec la végétation de paroi

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.

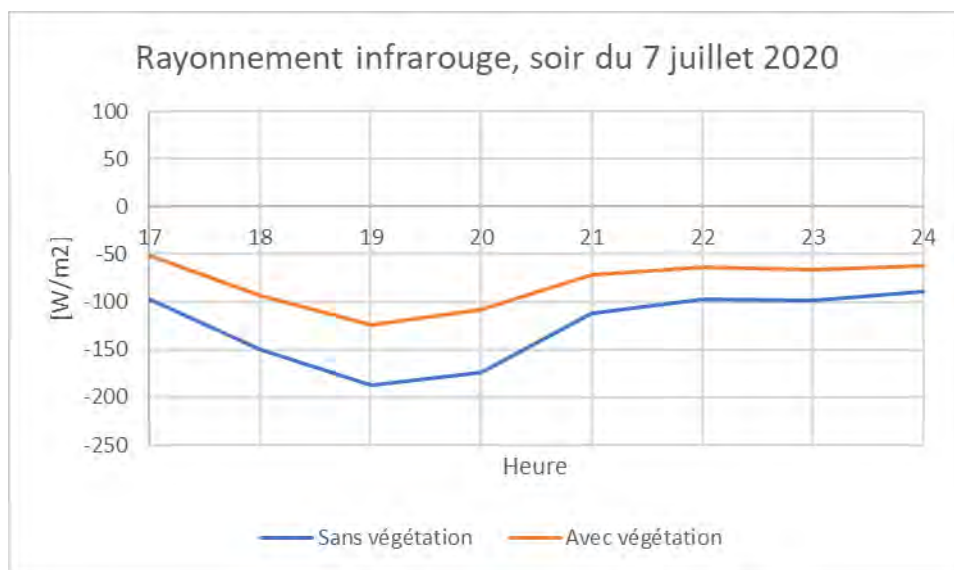


Figure 30: Emission de rayonnement infrarouge nocturne du mur vivant pour les scénarios avec et sans végétation

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.

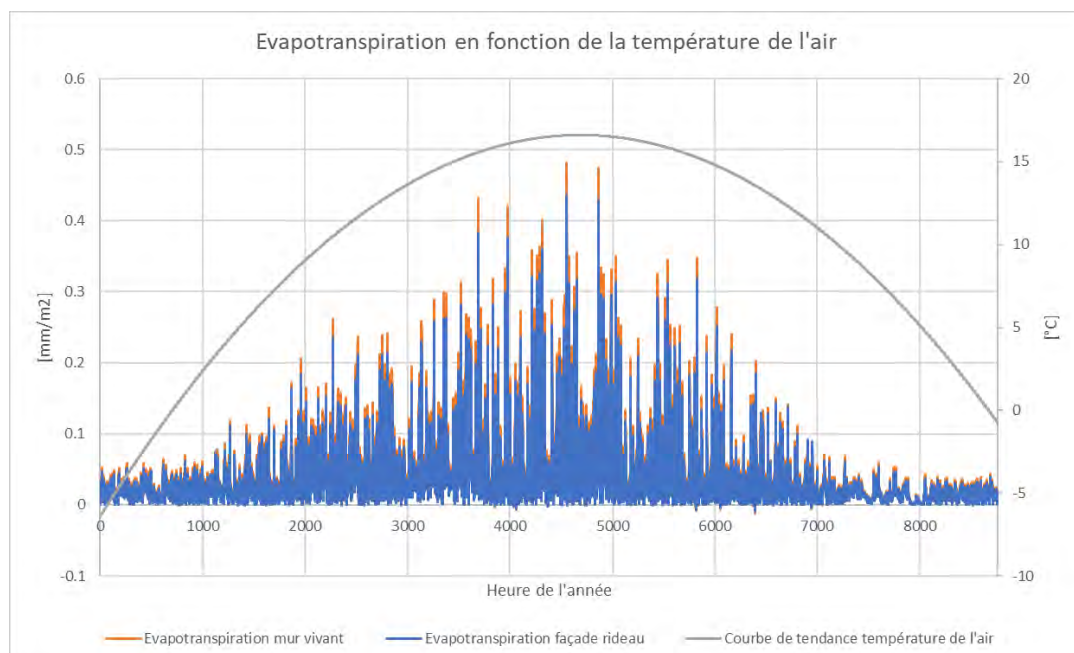


Figure 31: Evapotranspiration annuelles des parois végétalisées

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.

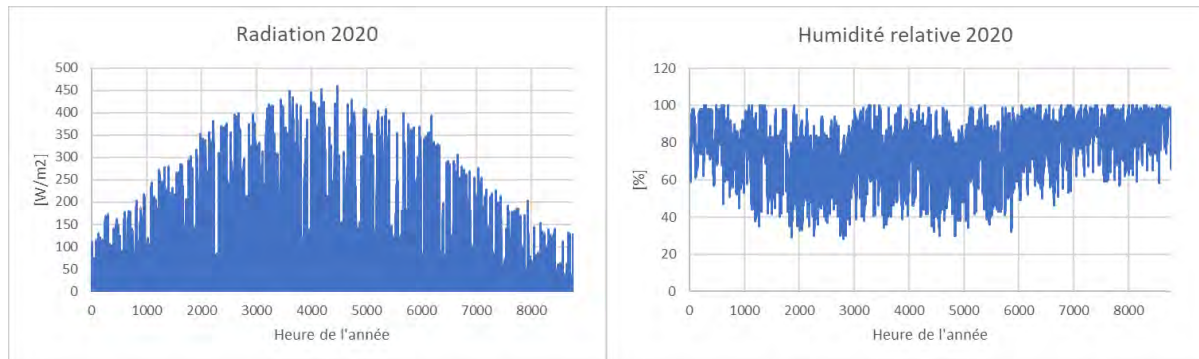


Figure 32: à gauche la radiation annuelle, à droite l'humidité relative annuelle

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 Wold+ 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.

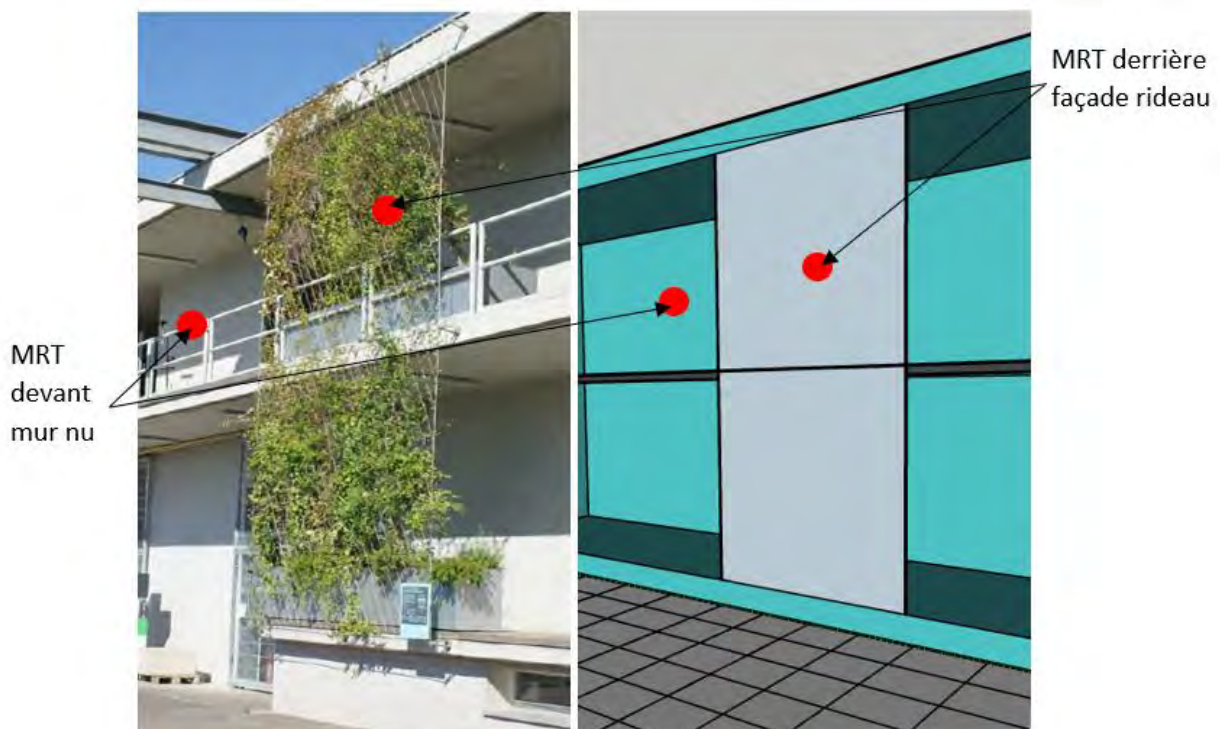


Figure 33: Points de mesures de MRT à gauche dans la réalité et à droite dans la simulation
 Source : à gauche (Tschander et al., 2021), à droite réalisation de l'auteur

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.

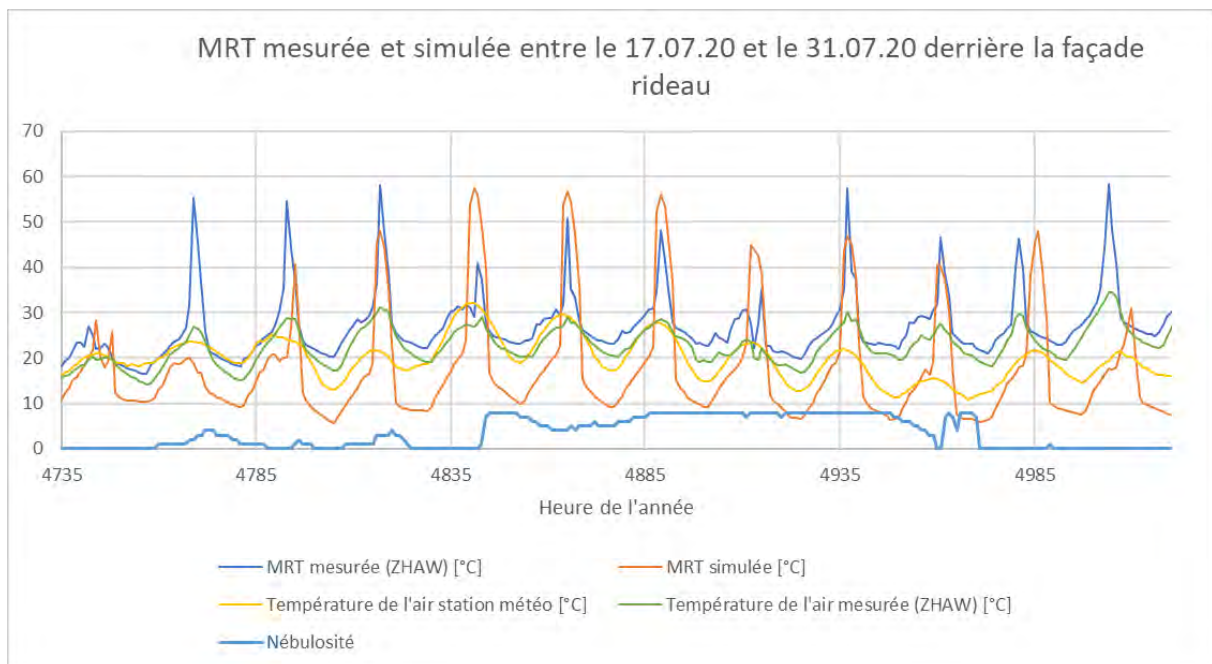


Figure 34: Comparaison de la MRT mesurée et simulée derrière la façade rideau

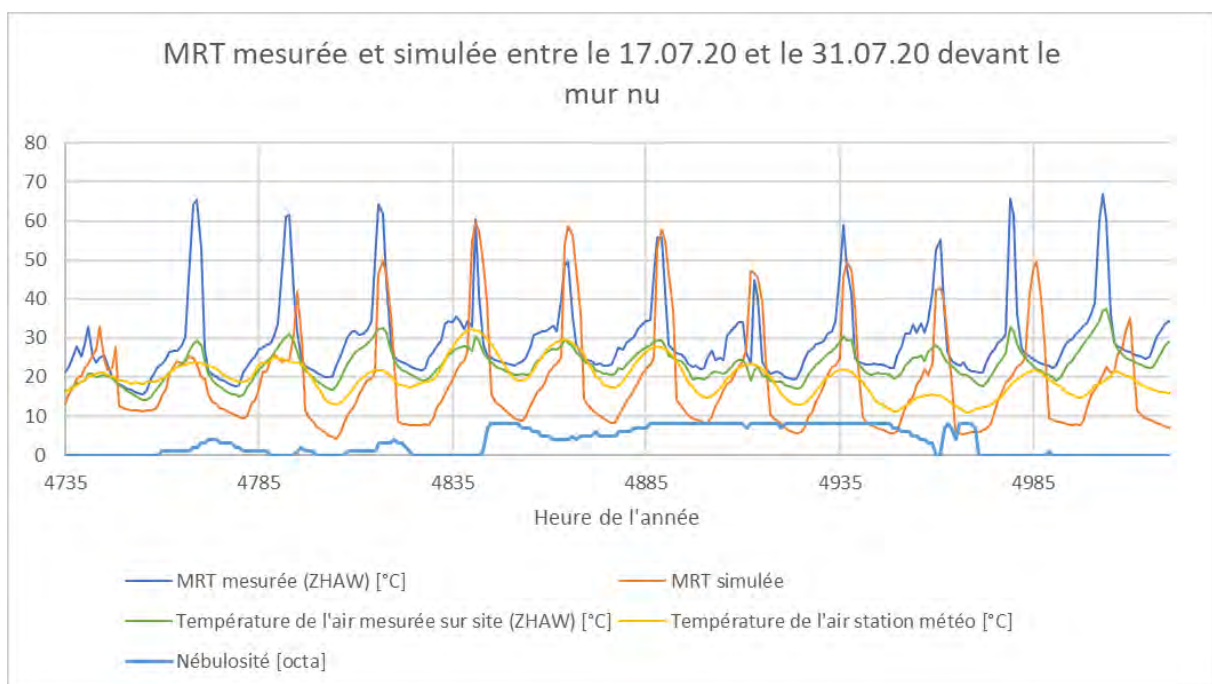


Figure 35: Comparaison de la MRT mesurée et simulée devant le mur nu

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.

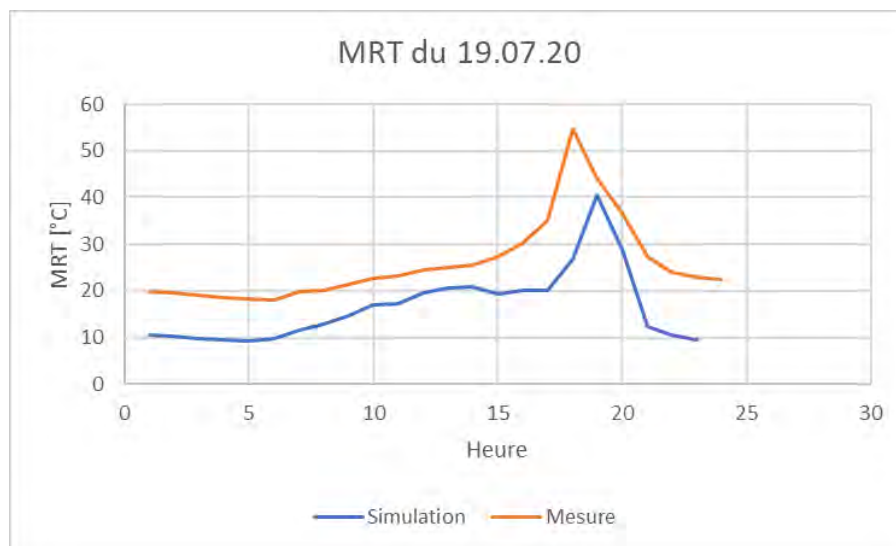


Figure 36: MRT pour le 19.07.20

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 utilisé 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/m^2 avec un pic à 278 W/m^2 . Pour rappel, les valeurs supérieures à 201 W/m^2 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.

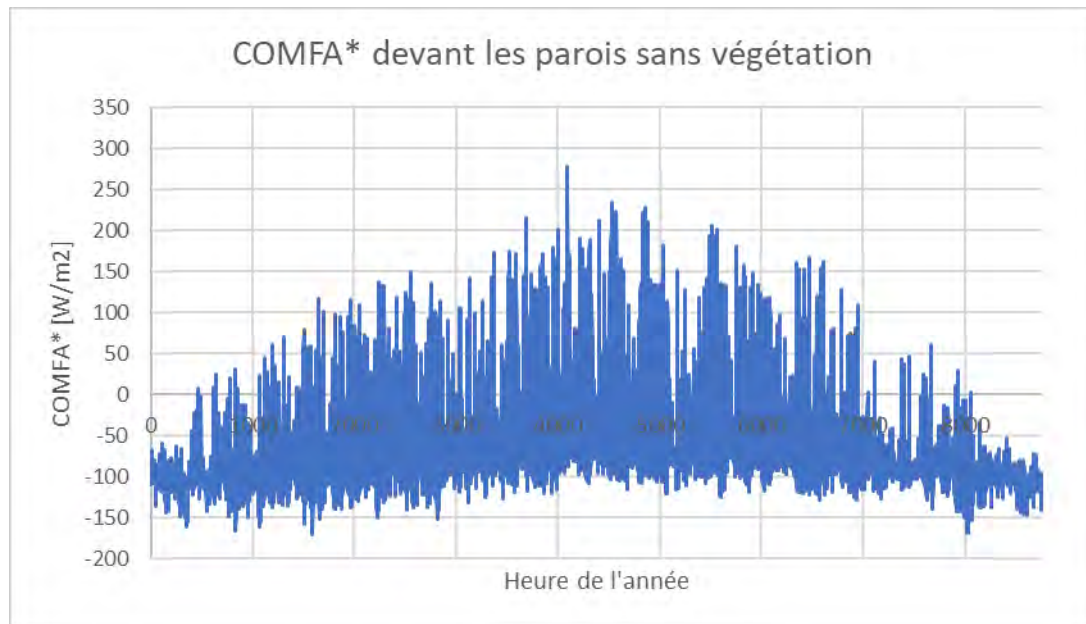


Figure 37: Indice COMFA* devant les parois dépourvues de végétation

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.

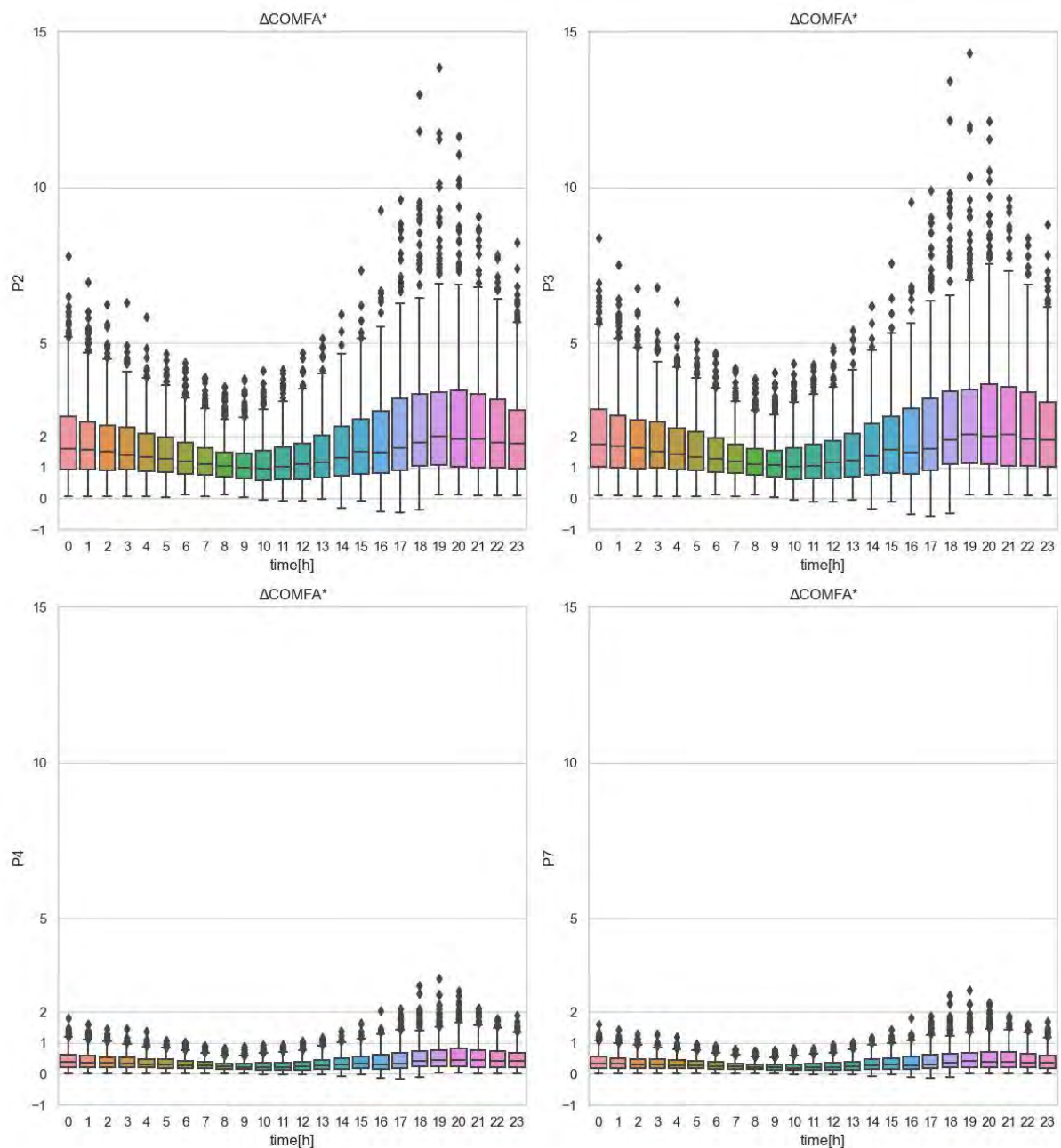


Figure 38: Réduction de l'indice COMFA* grâce à la végétation des parois. P2 = piéton 2 situé à 2m devant le mur vivant, P3 = piéton 3 situé à 2m devant la façade rideau, P4 = piéton 4 situé 10m devant le bâtiment entre les deux façades et P7 = piéton 7 situé à 13m devant le bâtiment aussi entre les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

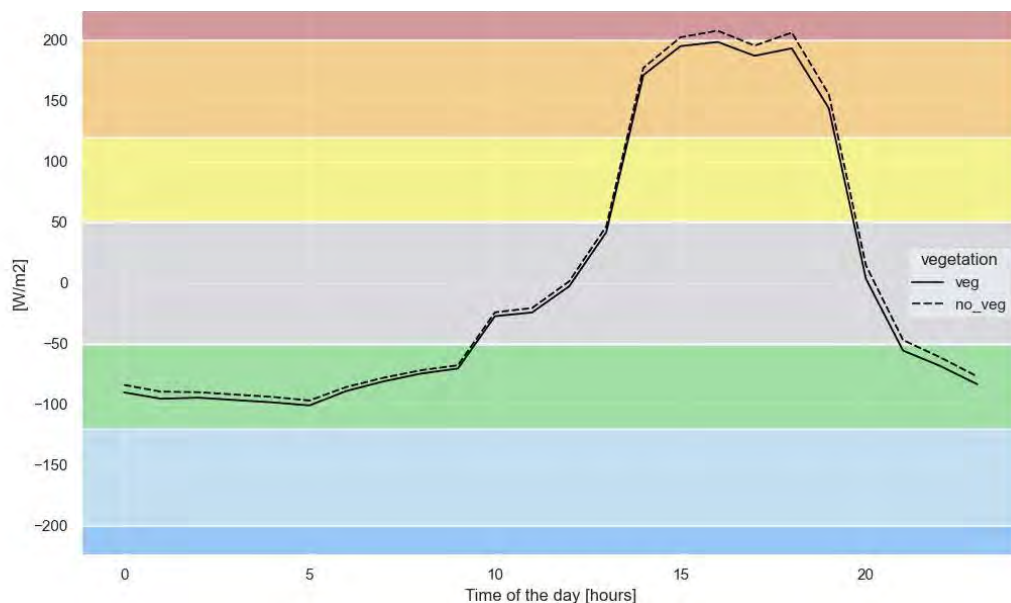


Figure 39: Amélioration du confort thermique grâce à la végétation du mur vivant pour le 8 juillet 2020

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.

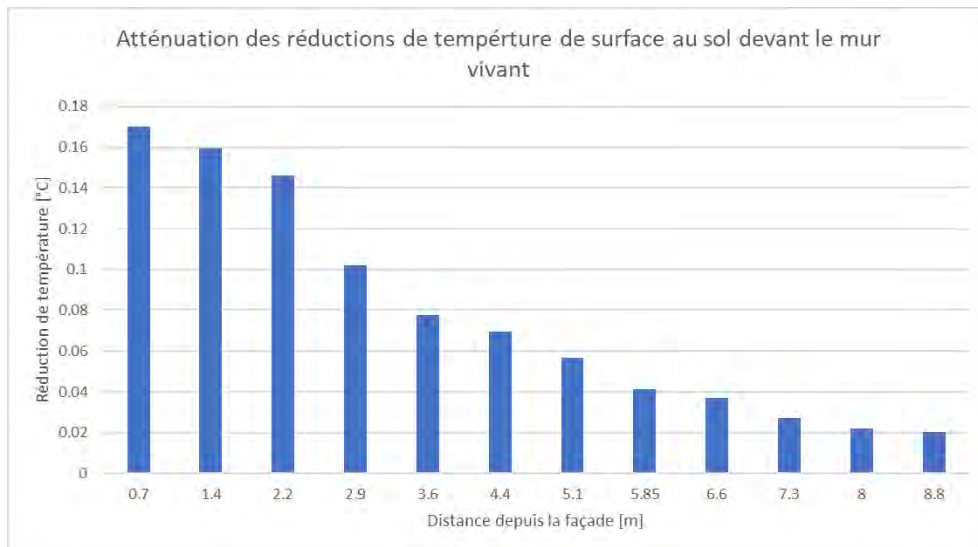


Figure 40: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant le mur vivant

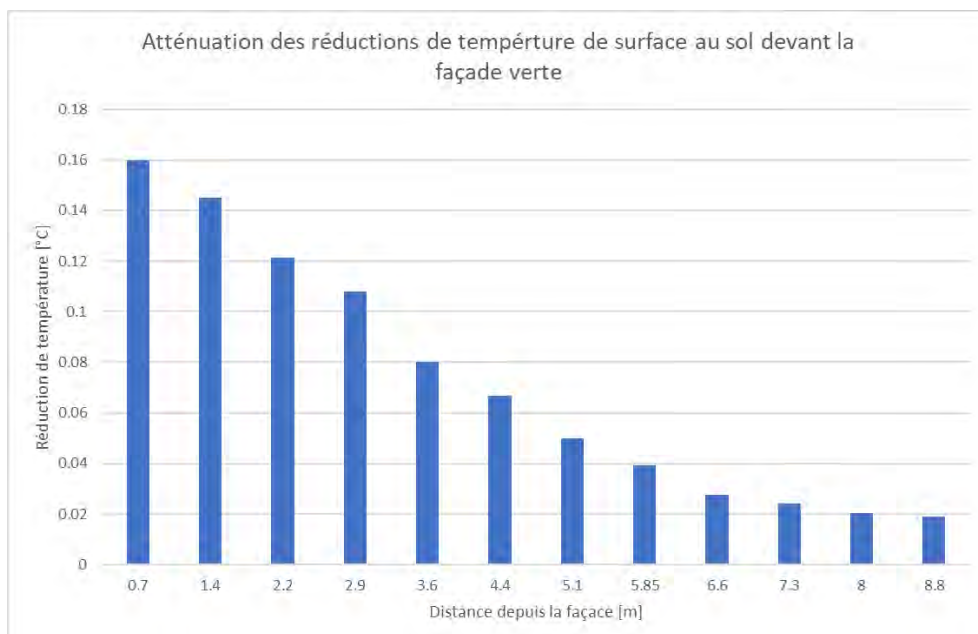


Figure 41: Réduction moyenne des températures des surfaces au sol devant la façade rideau

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.

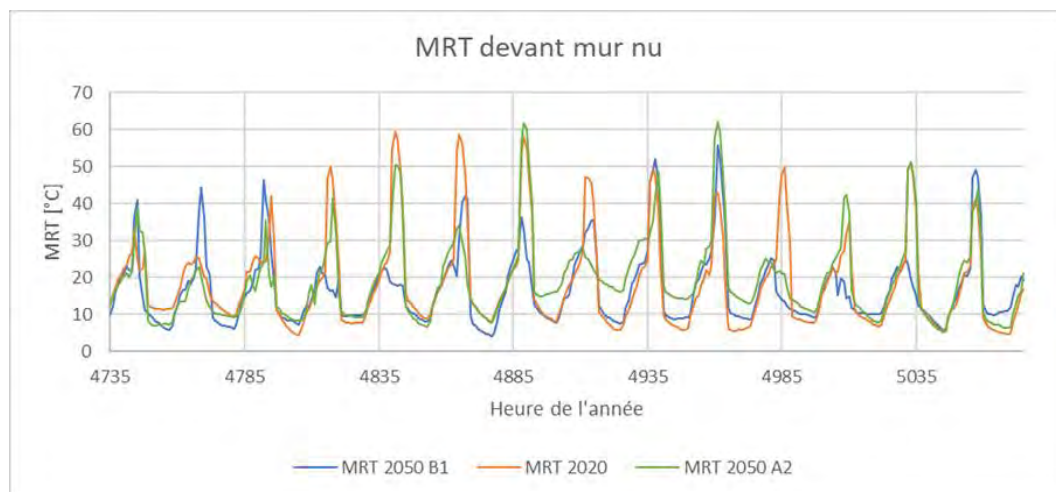


Figure 42: MRT devant le mur nu pour 2050 comparée à 2020

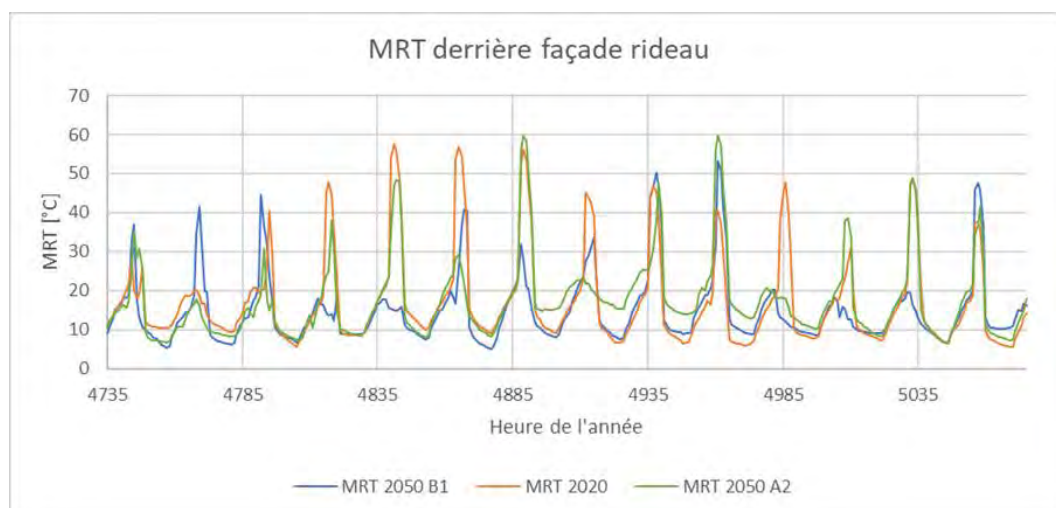


Figure 43: MRT derrière la façade rideau pour 2050 comparée à 2020

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.

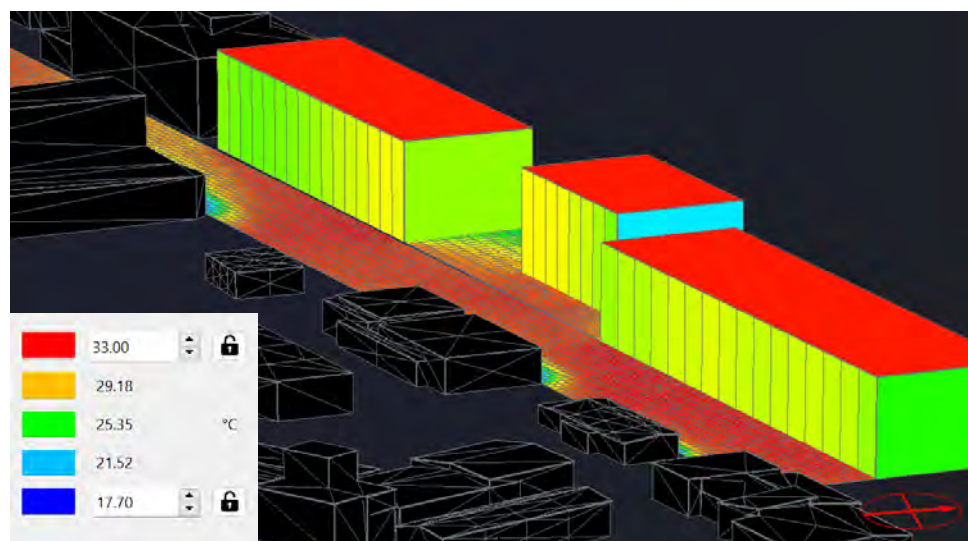


Figure 46: Evaluation de la charge thermique du Campus

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.

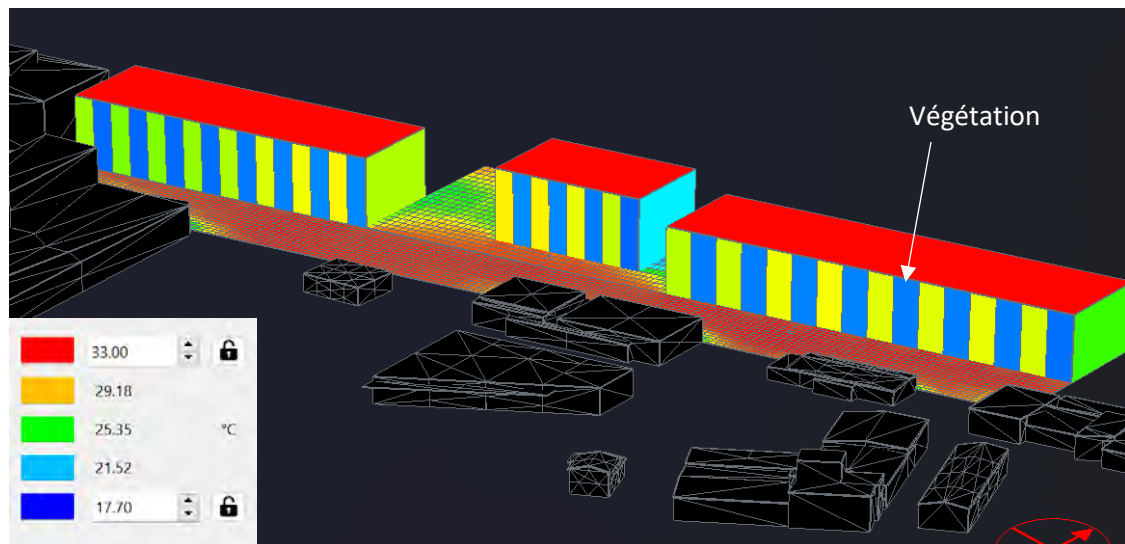


Figure 47: Températures moyennes de surface pour le modèle avec végétalisation de façade des bâtiments de la HEI pour le mois de juillet 2020

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 façade 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 solver 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">
```

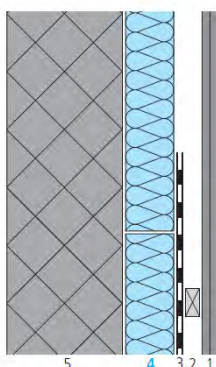
10.5 HYPOTHÈSES POUR LES COMPOSITIONS DU BÂTIMENT D'ÉTUDE

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 Lattage/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

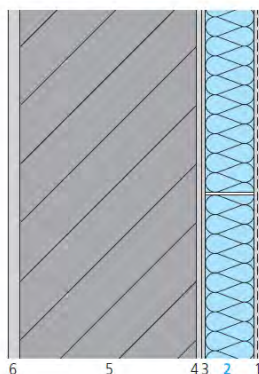
Mesures d'isolation thermique et protection contre l'humidité

- 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»

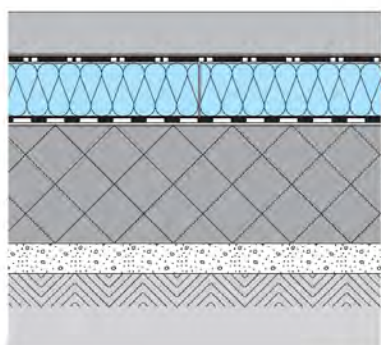
Minergie: Vous trouverez les données concernant les exigences actuelles sous www.minergie.ch.

10.5.2 Sol

370 Support de planification swisspor Plafond et sol

Radier avec isolation intérieure

swissporEPS 150 Sol | Variante: swissporLAMBDA Universel 029



Eléments de construction: détails et caractéristiques

Couches/désignation	Epaisseur 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 ²⁾
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) ²⁾)

Indication

²⁾ Conductivité thermique faisant foi: www.swisspor.ch, Produits

Caractéristiques de l'élément de construction

Epaisseur 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 λ 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.

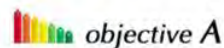
Norme SIA: 180 «Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments», 380/1 «L'énergie thermique dans le bâtiment»

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
 Énergie 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

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.

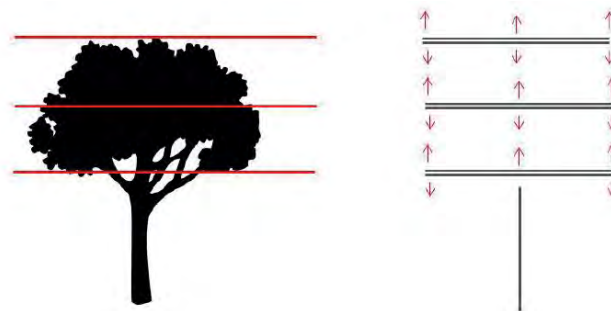
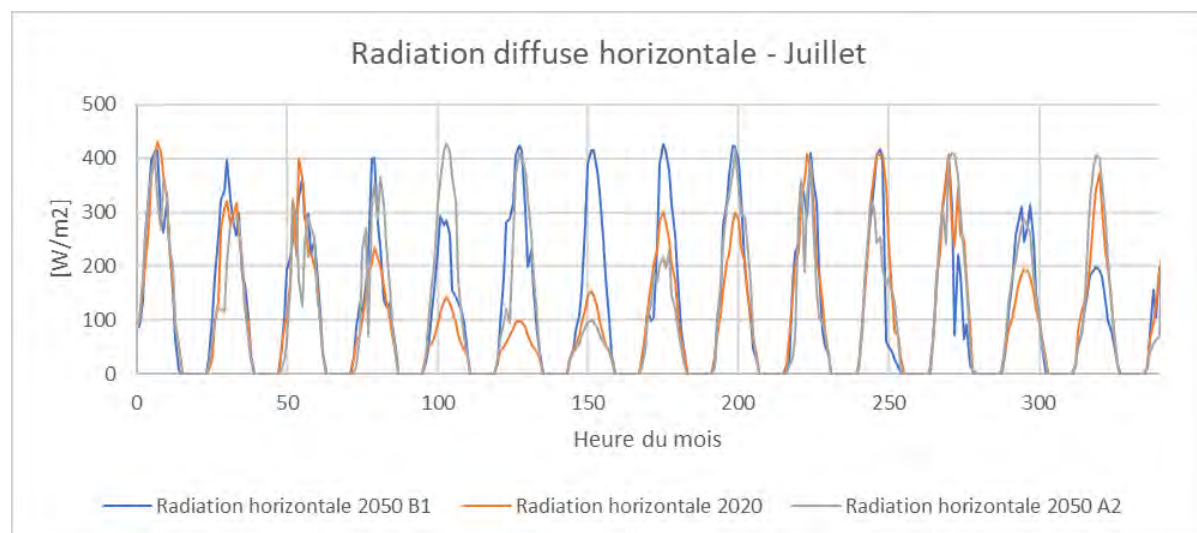
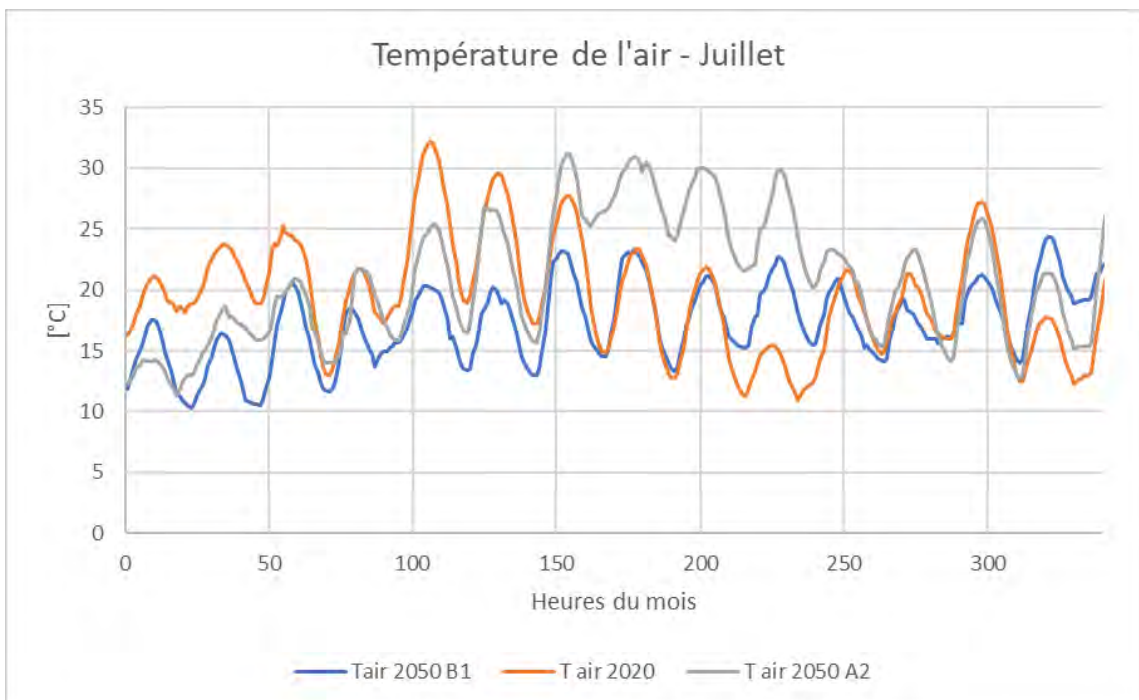
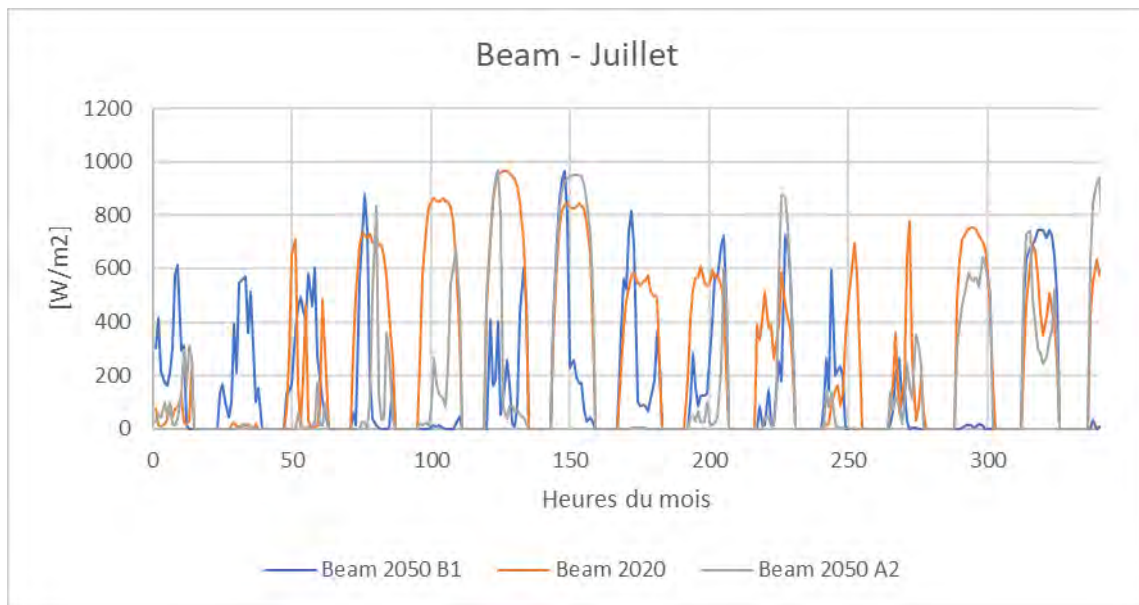


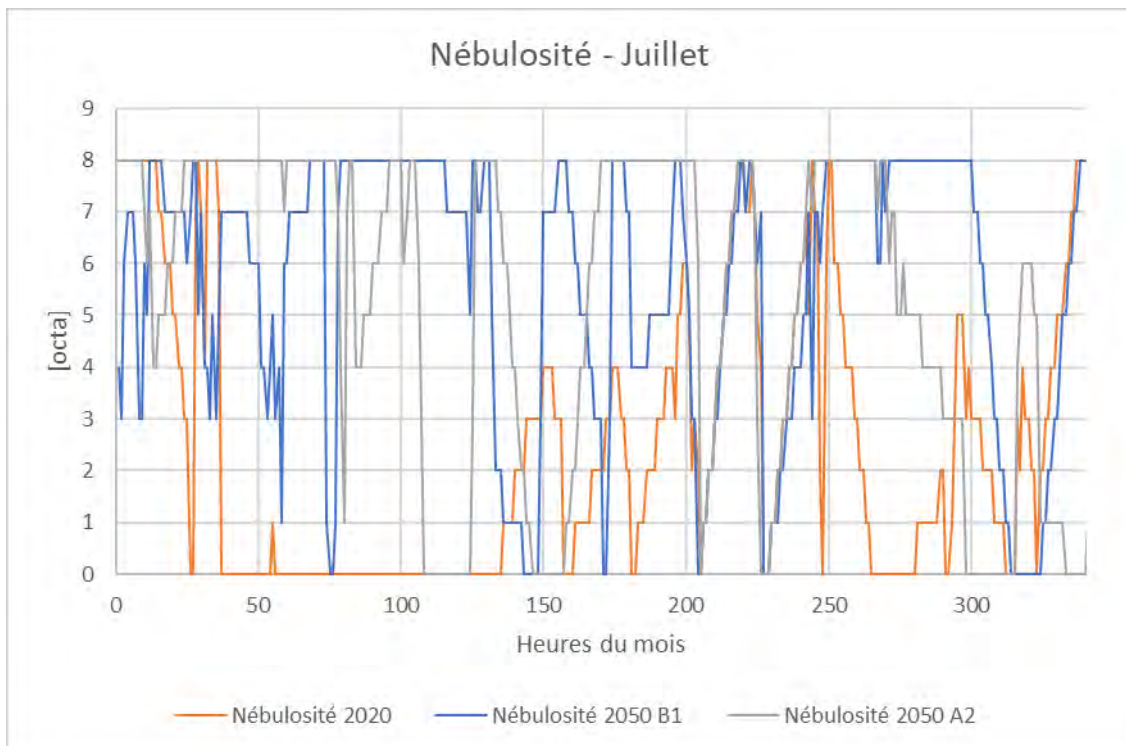
Figure 50: Représentation schématique de la modélisation des arbres sur CitySim à partir de l'index de surface foliaire
 Source : (Coccolo, 2017)

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

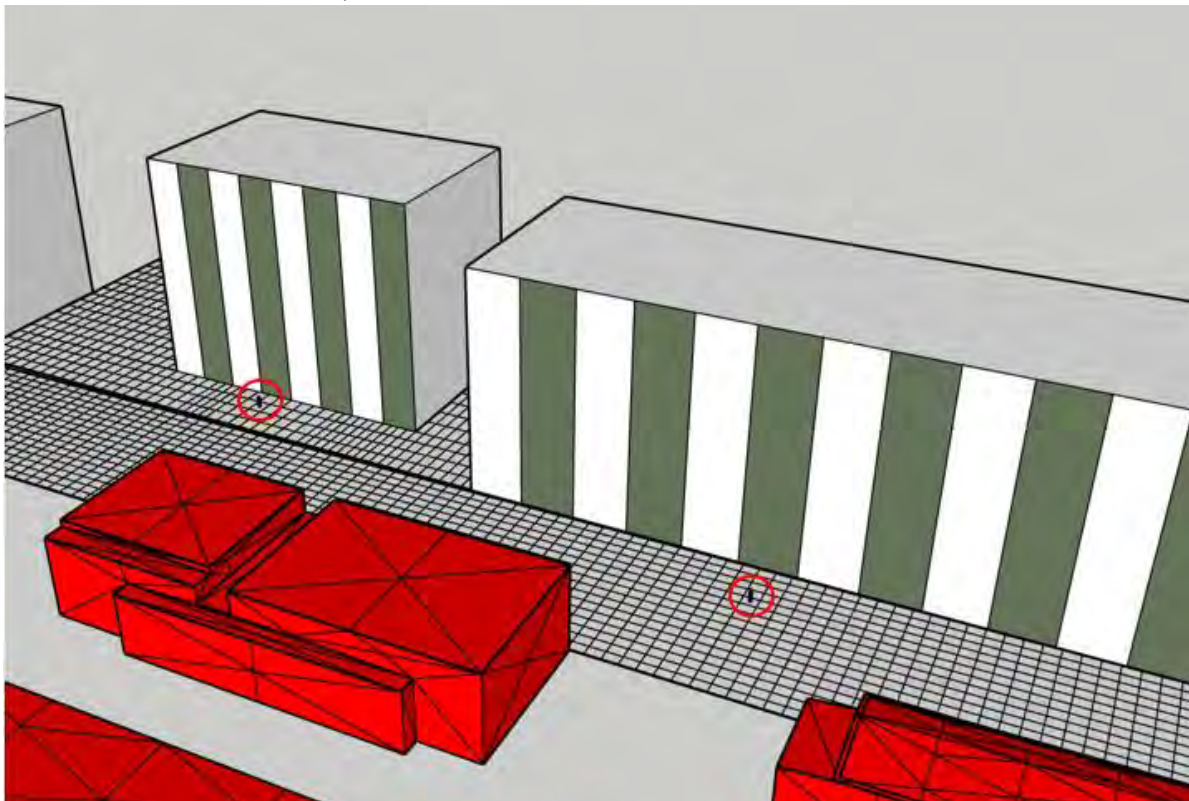




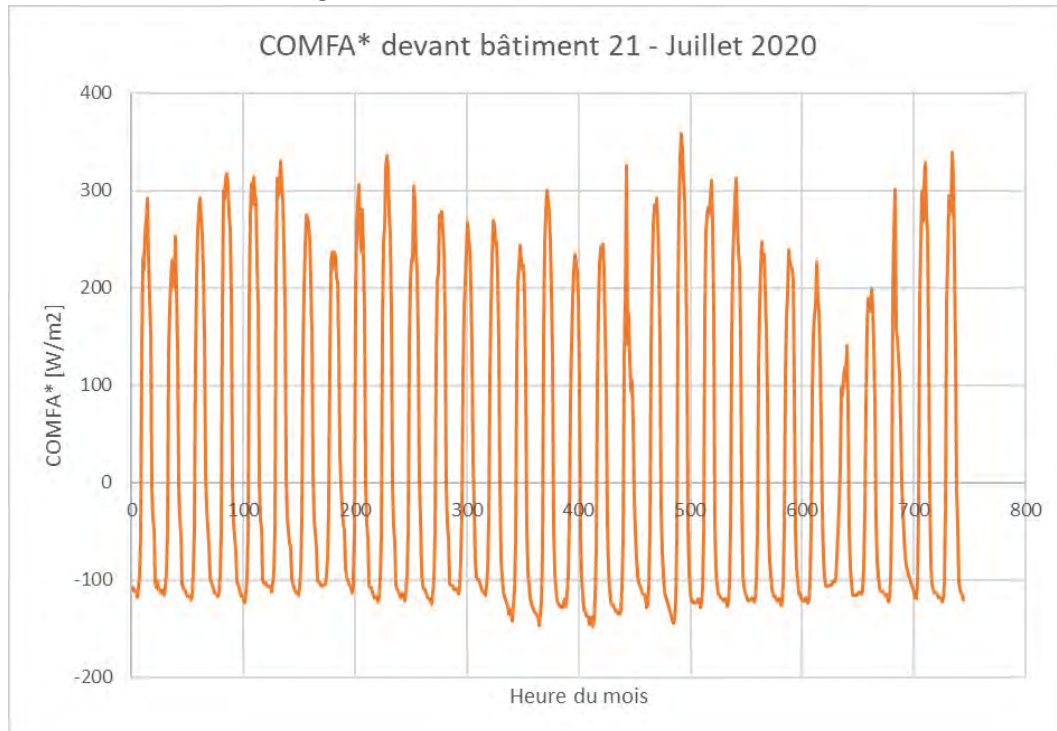


10.9 ENERGYPOLIS

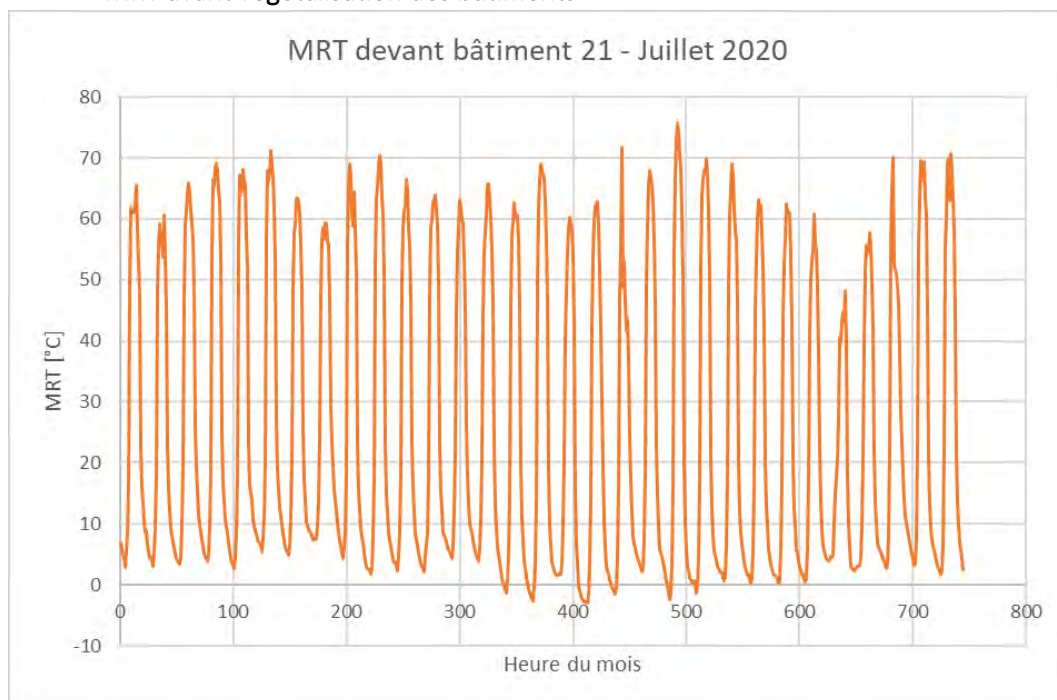
10.9.1 Positionnement des piétons



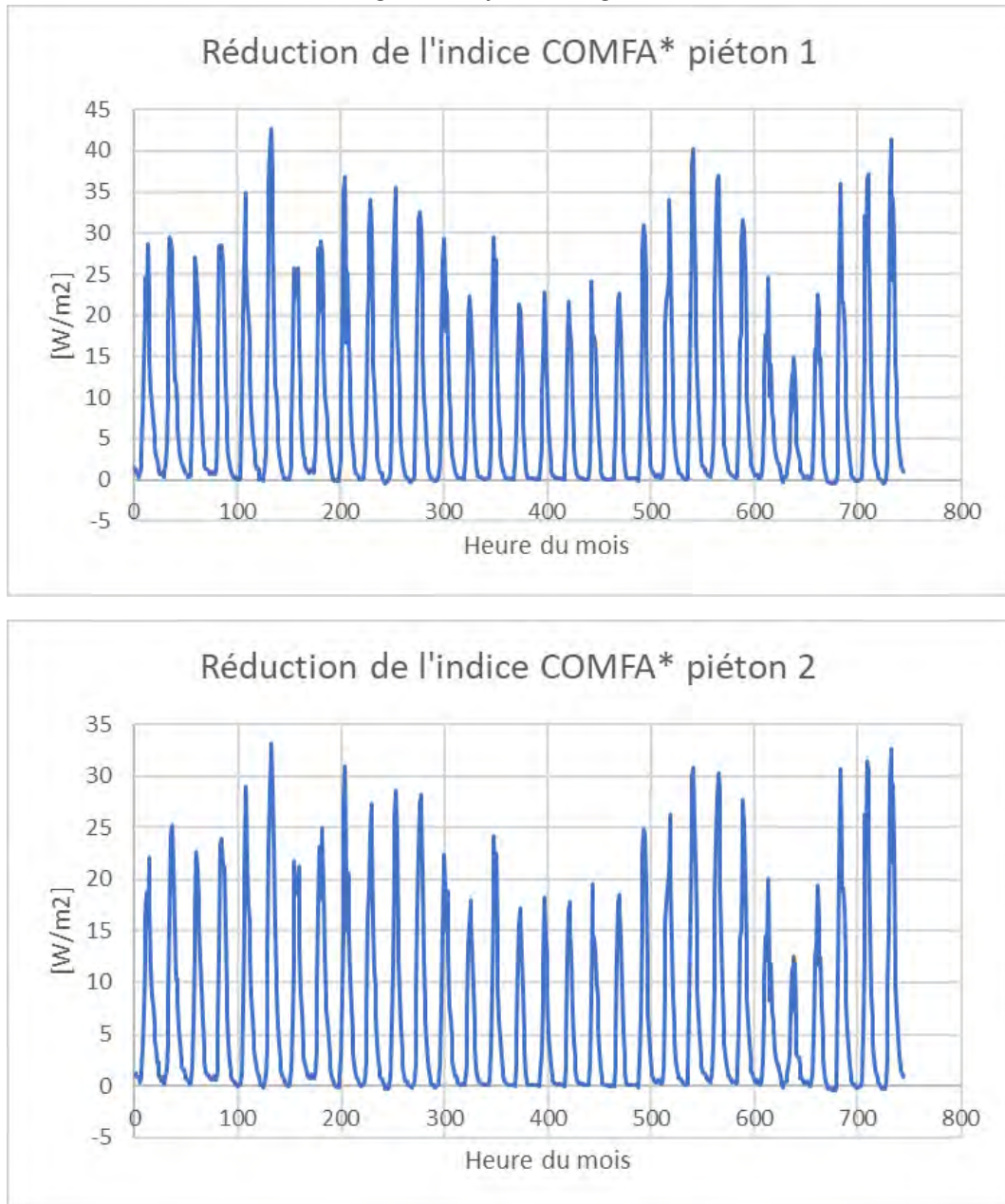
10.9.2 COMFA* avant végétalisation des bâtiments



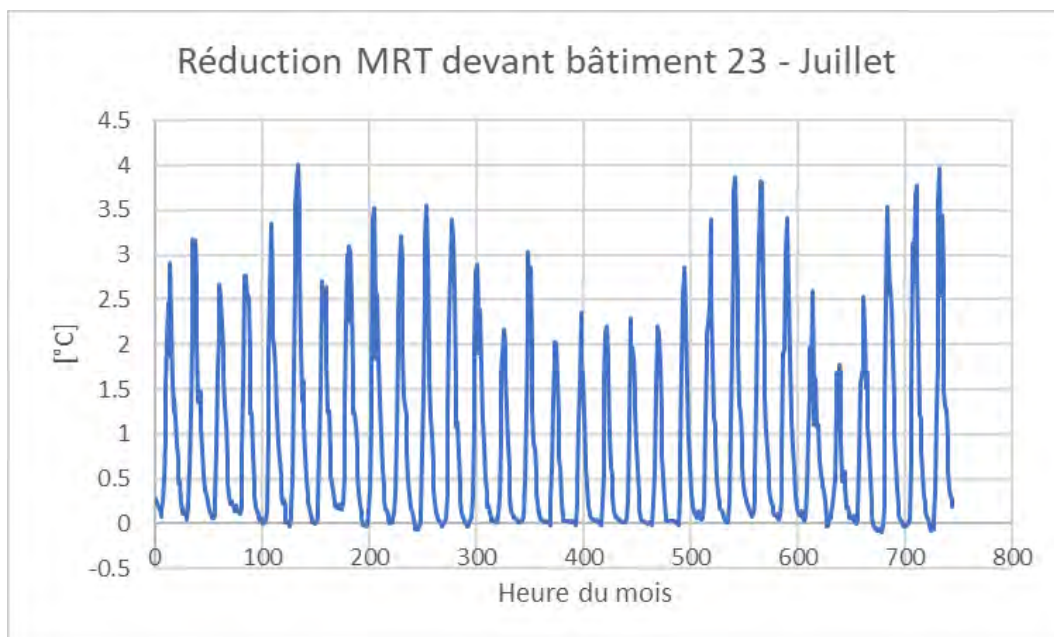
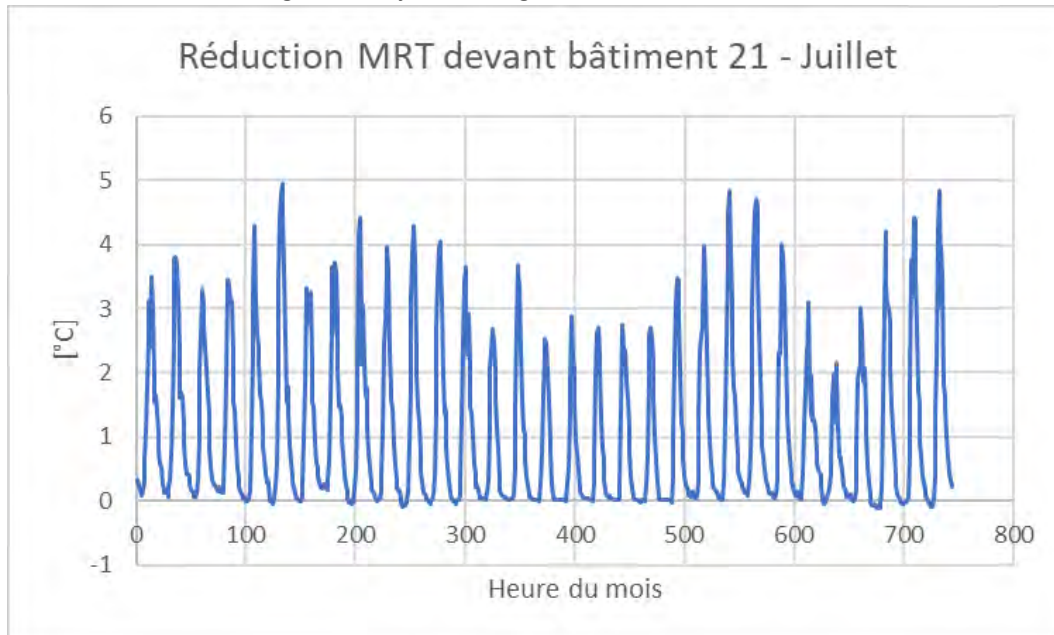
10.9.3 MRT avant végétalisation des bâtiments



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



hes.
so
ingenious.



Projektsitzung IVECT
27.09.2023

> Tagesordnung

1. Begrüssung
2. Zusammenfassung durchgeführte Arbeiten HES
3. Zusammenfassung durchgeführte Arbeiten ZHAW
4. Zusammenfassung durchgeführte Arbeiten IDIAP
5. Stand WPs
6. Planung Projektabschluss

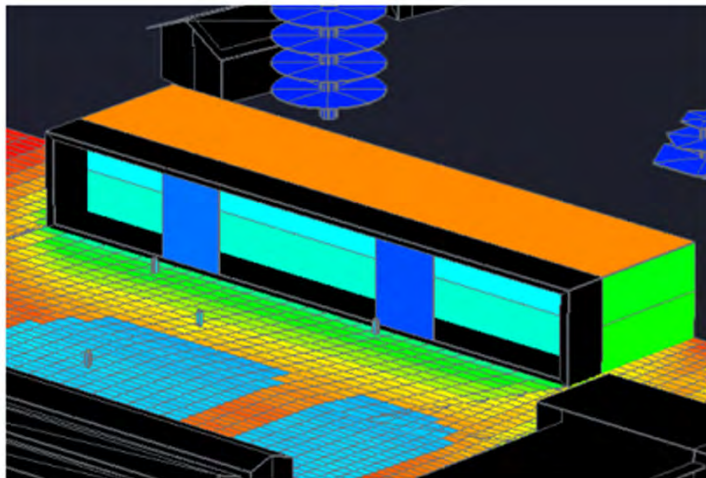
Source: Pfoser 2013

> HEVS

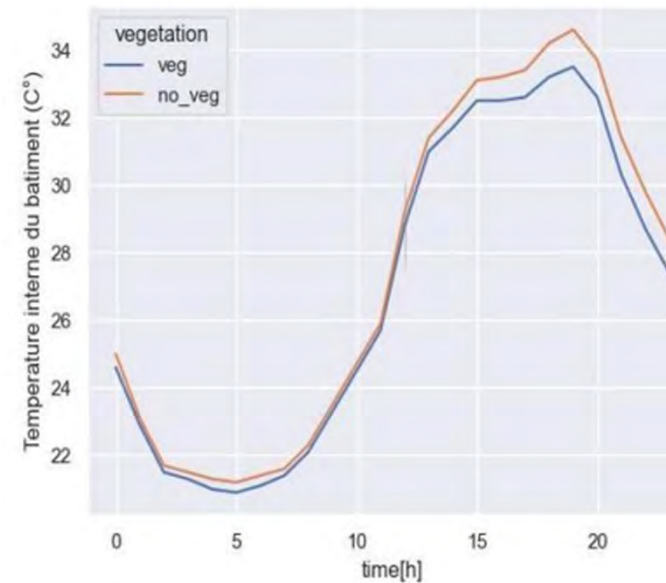
1. Präsentation des Projektes an:
 - Seminar Bauen Wallis
 - Seminar IEE
2. Mehrere Anpassungen des Zwischenberichts
3. Bachelor Arbeit von Ludivine Défago
4. Projektarbeit IEE, IDIAP, (CREM)

Source: Pfoser 2013

➤ Bachelor Arbeit Ludivine Défago



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

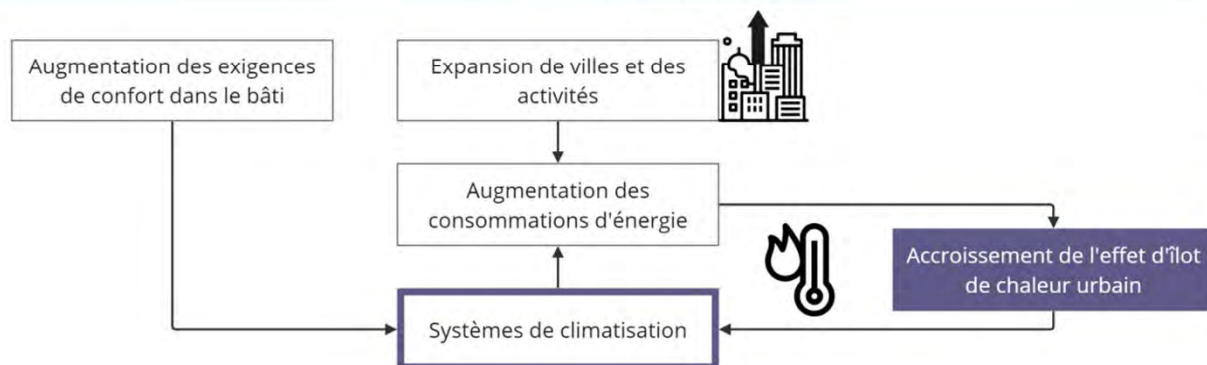


Impact de la végétation de façade
sur la température intérieure du
bâtiment durant le jour le plus
chaud de l'année 2020

> Bachelor Arbeit Ludivine Défago

Simulation façade verte: impact sur le climat du quartier

Contexte

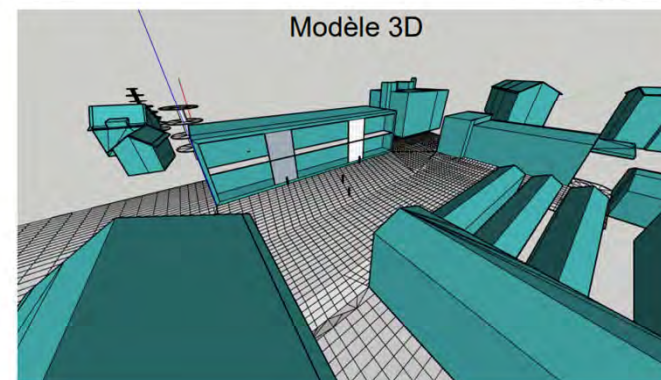
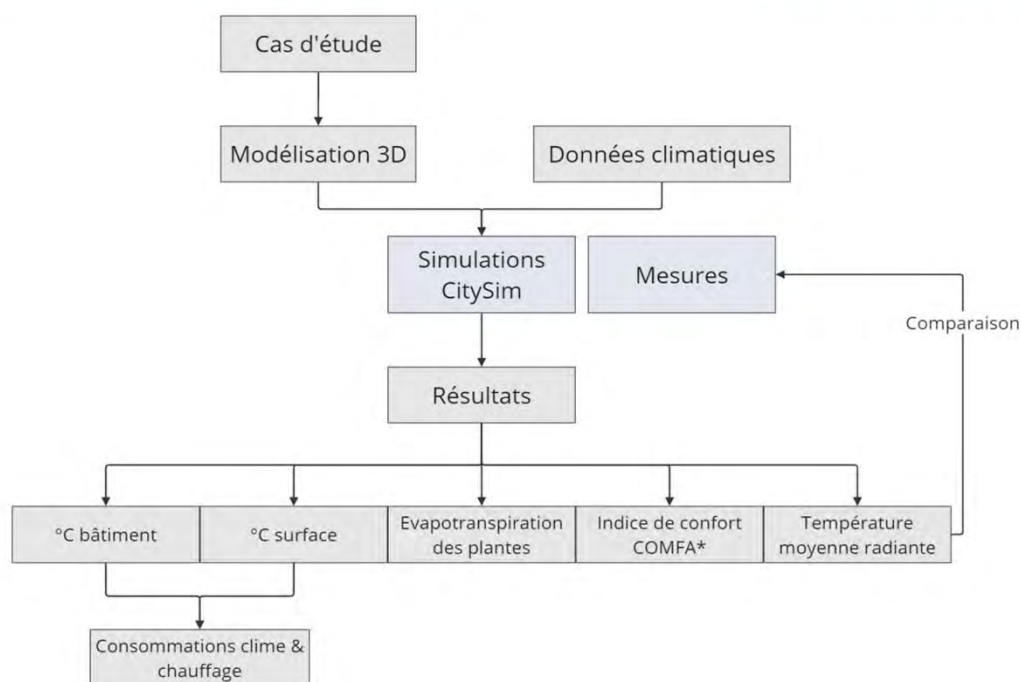


Objectifs

Étudier l'impact de la végétalisation de façade sur le climat d'un quartier et les consommations énergétiques des bâtiments via des simulations à l'aide du logiciel CitySim. Le tout dans le but d'évaluer la cohérence en simulation et mesures ainsi que de comparer les résultats avec et sans façades vertes.

> Bachelor Arbeit Ludivine Défago

Méthodologie



> Zusammenfassung ZHAW, IDIAP und CREM

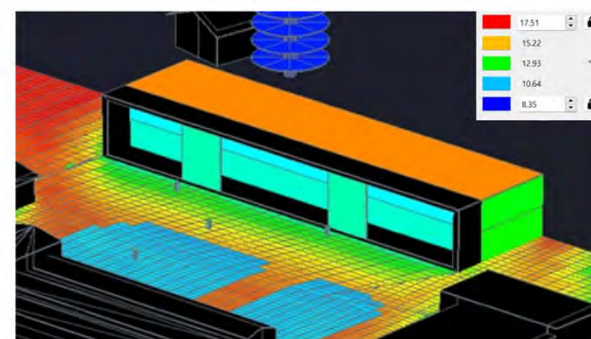
Résultats

L'impact sur le climat local est étudié à travers l'évaluation de la température moyenne radiante, l'indice de confort COMFA* (qui permet de décrire les échanges d'énergie entre un humain et son environnement), ainsi que la température de surface au sol.

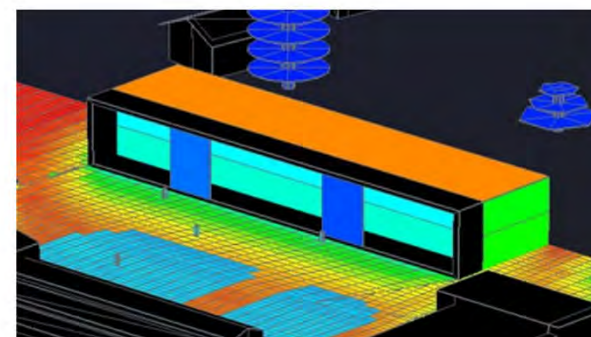
Les résultats obtenus indiquent que l'intégration de végétation en façade réduit la sensation de chaleur pour les piétons, diminue la température moyenne radiante d'environ 2°C et abaisse la température du sol de 0.17°C.

L'analyse des mécanismes d'évapotranspiration et d'ombrage liés aux plantes démontre une diminution des consommations d'énergie thermique, engendrant une réduction des émissions de CO₂ de manière proportionnelle.

2020	Avec façades végétales	Sans façades végétales	delta abs	delta [%]
Surchauffe [h]	266	282	-16	-6
Conso chauffage [KWh]	150'352	147'275	3'077	2
Conso clime [kWh]	463	551	-88	-16
Emission CO2 clime [kg CO2 Eq]	51	61	-10	-16
Emission CO2 chauffage [kg CO2 Eq]	34'280	33'579	702	2



Températures de surface sans végétation de façade



Températures de surface avec végétation de façade

> Stand WP

Workpackage-Nr: 1		Workpackage-Name:	Zusammenführung bestehender Daten		
Start:	01.10.20	Ende:	31.01.21	Aufwand:	470h
Verantwortliche/r:	Klaus Kreher (IEE); Jakob Rager (CREM), Bettina Tschander (STADT ZÜRICH), Evelyn Trachsel (ZHAW); Joel Fournier (KANTON WALLIS)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Literaturübersicht zum Thema Begrünungsmassnahmen an Gebäuden und Erfahrungswerte sowie bestehende Forschungsergebnisse der ZHAW, des Kantons Wallis und der Stadt Zürich sichten und aufbereiten. - Auswertung der vorhandenen und eigenen Messstrecken an bestehenden Gebäuden (Temperatur und Feuchtigkeitsverläufe, Innen-, Aussen- und Oberflächentemperaturen, Temperaturprofile in Konstruktion). - Bestimmung der relevanten Inputparameter für die Simulationen sowohl auf Gebäude-Ebene als auch auf Areal-Ebene. - Verwaltung des Zugriffs auf Datenbanken, die für die geplanten Arbeiten erforderlich sind. Dabei handelt es sich überwiegend um Datenbanken, die die nötigen Inputparameter beherbergen und es dann ermöglichen Referenzgebäude und Areale zu bestimmen (z.B. Datenbanken des Kantons Wallis).					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:			Deliverable:
1	31.12.20	Daten als Vergleichswerte zur Evaluierung der späteren Simulationsrechnungen.			Liste bestehende nutzbare Daten
2	31.01.21	Daten zur Quantifizierung des Einflusses der baulichen Begrünungsmassnahmen			Liste bestehende nutzbare Daten
3	31.01.21	Daten für Inputparameter			Liste, schematisches Diagramm
4	31.01.21	Referenzgebäude und Areale			Liste Gebäude

Workpackage-Nr: 2		Workpackage-Name:	Pflanzenkatalog zu den typisierten Quartieren aus Punkt 3a und den Begrünungstypen für Fassaden		
Start:	01.12.20	Ende: 02.02.21		Aufwand:	100h
Verantwortliche/r:	Evelyn Trachsel (ZHAW)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Analyse der Quartiertypen und der Begrünungstypen der Fassaden als Voraussetzung der Pflanzenauswahl. - Pflanzenauswahl basierend auf der Einteilung der Arten in die Lebensbereiche, der Analyse der ursprünglichen Herkunft, den pflanzenphysiologischen Eigenschaften (Aufbau der Pflanze und damit verbundener Wasserbedarf & Nährstoffbedarf) sowie dem Standort und dem Fassadentyp. - Erstellung eines Katalogs mit Stadtklima tauglichen, standortgerechten, zukunftsfähigen Pflanzen für die typisierten Quartiere und den verschiedenen Begrünungstypen der Fassaden, welche durch einen hohen Deckungsgrad den gewünschten Klimaeffekt erbringt.					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:		Deliverable:	
1	01.12.20	Analyse der Quartiertypen		Typisierung der Pflanzenstandorte	
2	01.12.20	Analyse der Begrünungstypen der Fassaden		Typisierung der Pflanzenstandorte	
3	02.02.21	Pflanzenauswahl und Pflanzenkatalog		Erstellung des Pflanzenkataloges	

K D X W H # H F R O H # G † L Q J H Q L H U L H

> Stand WP

Workpackage-Nr: 3		Workpackage-Name:	Messung der Verdunstungsleistung von Kletterpflanzen bei bodengebundenen oder linearen sowie bei fassadengebundenen Systemen		
Start:	01.02.21	Ende: 01.09.22		Aufwand:	200h
Verantwortliche/r:	Evelyn Trachsel (ZHAW)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Durchführung von Saftflussmessungen an einzelnen Kletterpflanzen (aufbauend auf bestehenden Forschungsergebnisse). - Auswertung der transpirativen Kühlleistung einer Pflanzenart sowie einen Vergleich der Verdunstungsraten zwischen den verschiedenen Kletterpflanzen und Auswertung der Kühlleistung einer gesamten Fassadenbegrünung. - Datenaufnahme mittels Lysimeter im Zusammenhang mit dem Anteil Wasserverbrauch zur Bewässerung der Begrünung an Fassadengebundenen Systemen (modulare und flächige Bauweise). - Auswertung der transpirativen Kühlleistung einer gesamten Fassadenbegrünung.					
Meilensteine/Deliverables:					
1	01.02.21	Messreihe bodengebundene Begrünung: Planung der Datenaufnahme - Anpassung der Messmethoden auf den Standort		Entscheid welche Fassaden (Pflanzen) bemessen werden	
2	01.07.21	Messreihe bodengebundene Begrünung: Datenaufnahme: Installation und Durchführung der Messungen (Dauer 4 Wochen)		Datenaufnahme der Saftflussmessungen	
3	01.09.21	Messreihe bodengebundene Begrünung: Auswertung – die Daten werden statistisch ausgewertet und bezüglich ihrer klimatischen Wirkung interpretiert		Kurzbericht mit statistischer und visueller Aufbereitung der Daten	
4	01.09.21	Messreihe fassadengebundene Begrünung: Planung der Datenaufnahme – Vorbereitungen des Messtandortes		Aufbau der Modellwand	
5	01.06.22	Messreihe fassadengebundene Begrünung: Datenaufnahme Standort 1: Installation und Durchführung der Messungen (Dauer 2 Monate)		Datenaufnahme mittels Lysimeter an Modellwand	
6	01.09.22	Messreihe fassadengebundene Begrünung:		Kurzbericht mit statistischer und	



Workpackage-Nr: 4		Workpackage-Name:	Messung der Oberflächentemperatur von verschiedenen Begrünungstypen sowie Messung der gefühlten Kühlleistung (PET) von Fassadenbegrünungen in Trogbepflanzungen, lineare Systeme		
Start:	01.03.21	Ende: 01.01.23		Aufwand:	100h
Verantwortliche/r:	Evelyn Trachsel (ZHAW)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Ermittlung der Oberflächentemperatur von Fassadenbegrünungen mittels Wärmebildkamera. Dabei wird die Differenz der Begrünung zur umliegenden Fassade und somit bildnerisch die Kühlleistung des begrünten Fassadensegmentes aufgezeigt. - Messungen der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und der mittleren Strahlungswärme (PET-Messungen) um bei linearen Bepflanzungssystemen die gefühlte Kühlleistung hinter der Fassadenbegrünung aufzuzeigen.					
Meilensteine/Deliverables:					
1	01.03.21	<i>Messreihe Oberflächentemperatur:</i> Planung der Datenaufnahme – Auswahl der Standorte			Entscheid welche Fassaden bemessen werden
2	Laufend	<i>Messreihe Oberflächentemperatur:</i> Aufnahme der Wärmebilder an einer bodengebundenen und einer fassadengebundenen Begrünung			Datenaufnahme
3	01.04.21	<i>PET-Messreihe:</i> Planung der Datenaufnahme: Anpassung der Messmethoden auf den Standort			Entscheid welche Fassaden (Pflanzen) bemessen werden
4	01.08.21	<i>PET-Messreihe:</i> Installation und Durchführung der Messungen (Laufzeit 4 Wochen)			Datenaufnahme
5	01.10.21	<i>PET-Messreihe:</i> Auswertung: Die Daten werden statistisch ausgewertet und bezüglich ihrer klimatischen Wirkung interpretiert			Kurzbericht mit statistischer und visueller Aufbereitung der Daten
6	01.01.23	<i>Messreihe Oberflächentemperatur:</i> Auswertung: Die Daten werden statistisch ausgewertet und bezüglich ihrer klimatischen Wirkung interpretiert			Kurzbericht mit statistischer und visueller Aufbereitung der Daten



K D X W H # H F R O H # G † L Q J H Q L H U L H

> Stand WP

Workpackage-Nr: 5		Workpackage-Name:	Implementierung Indikatoren und Simulationsmethodik		
Start:	01.10.20	Ende: 31.07.21		Aufwand:	200
Verantwortliche/r:	Klaus Kreher (IEE);				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Bestimmung der relevanten Indikatoren zur Jahresenergiebilanz, Innentemperaturen (Komfort), Spitzenlasten bei Kälte und Wärme, Einfluss der thermischen Speicherkapazität des Gebäudes. - Festlegung einer Simulationsmethodik um Begrünungsparameter wie Verdunstungsleistung der Pflanzen, Entwicklung der Oberflächentemperatur der Fassaden und Änderung des Fassadenaufbaus in den Computersimulationsprogramm bSol zu integrieren.					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:			Deliverable:
1	31.01.21	Indikatoren (Verdunstungsleistung, Oberflächentemperaturen)			Vorgehensliste, schematisches Diagramm
2	31.07.21	Verifikation Simulationsmethodik Gebäude			Beschrieb Simulationsverfahren

Workpackage-Nr: 6		Workpackage-Name:	Fallstudien Gebäudesimulation		
Start:	01.08.21	Ende:	31.07.22	Aufwand:	360h
Verantwortliche/r:	Klaus Kreher (IEE);				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Simulationsrechnungen ohne Begrünung an unterschiedlichen Typologien von Gebäuden durchführen. - Simulationsrechnungen mit verschiedenen Begrünungsmassnahmen an den festgelegten Typologien von Gebäuden durchführen. - Klassifizierung und Typisierung der Begrünungsmassnahmen nach deren Effizienz an den verschiedenen Gebäudearten. - Hochrechnungen bzw. Prognose der Auswirkungen der unterschiedlichen Begrünungsmassnahmen und des Energiesparpotenzials auf Arealebene. - Arealspezifische Parameter und Grundlagen in den Überlegungen miteinbeziehen.					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:			Deliverable:
1	31.12.21	Jahresenergiebedarf der verschiedenen Typologien von Gebäuden ohne Begrünung			Tabelle mit Ergebnissen
2	31.05.22	Jahresenergiebedarf der festgelegten Typologien von Gebäuden mit verschiedenen Begrünungsmassnahmen			Tabelle mit Ergebnissen
3	30.06.22	Klassifizierung und Typisierung von Begrünungsmassnahmen an Gebäuden nach Effizienz			Tabelle mit Ergebnissen
4	31.07.22	Schätzung des Energiesparpotenzials für ein spezifisches Areal			Tabelle mit Prognose

K D X W H # H F R O H # G † L Q J H Q L H U L H

> Stand WP

Workpackage-Nr: 7		Workpackage-Name:	Erweiterung von CitySim zur Berücksichtigung von grünen Fassaden		
Start:	01.05.22	Ende:	31.12.22	Aufwand:	60h
Verantwortliche/r:	Jérôme Kämpf (Idiap)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
– Erweiterung des bestehenden Open-Source Codes von CitySim zur Berücksichtigung von grünen Fassaden – Vergleich der Simulation mit Messwerten für ein Gebäude					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:	Deliverable:		
1	30.09.22	Publikation des Codes	Code Repository		
2	31.12.22	Kommentierter Vergleich der Messwerte mit den Simulationswerte	Bericht Simulation		



Workpackage-Nr: 8		Workpackage-Name:	Simulation eines Stadtviertels mit begrünten Fassaden		
Start:	01.01.23	Ende:	31.07.23	Aufwand:	225h
Verantwortliche/r:	Jakob Rager (CREM) Jérôme Kaempf (Idiap)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Nach Diskussion mit den Projektpartnern und unter Berücksichtigung der vorherigen Ergebnisse, Simulation eines Stadtviertels: - o 1. Ohne grüne Fassaden - o 2. Mit einem Gebäude, das grüne Fassaden hat - o 3. Mehreren Gebäuden, die begrünte Fassaden haben - o 4. Vergleich mit anderen Massnahmen, wie z.B. Sonnensegeln oder Bäume - o 5. Veränderungen der Klimainputdaten zur Berücksichtigung des Klimawandels - Vergleich der Simulationsresultate unter den Folgenden Gesichtspunkten: - o 1. Jährlicher Energieverbrauch bzw. Energieeinsparungspotentiale - o 2. Einfluss auf Spitzenlast und Spitzenlastdauer für Wärme und Kältebedarf - o 3. Veränderung des menschlichen Komfortempfindens nach ITS, COMFA oder UTCI Standard - o 4. Berechnung weiter abgeleiteter Indikatoren wie CO₂ Emissionen - Begleitung durch Jérôme Kämpf zur Qualitätssicherung					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:	Deliverable:		
1	laufend	Diskussion mit den Projektpartnern zur Festlegung der Fallstudie sowie aller zu simulierenden Fällen	Bericht Fallstudie		
2	31.07.23	Wissenschaftliche Auswertung der Simulationsergebnisse	Bericht Ergebnisse		



Kcbwñ#†frcññj #qj Ÿqñññ###4

K D X W H # H F R O H # G † L Q J H Q L H U L H

> Stand WP

Workpackage-Nr: 9		Workpackage-Name:	Aufbereitung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Begleitgruppe (auf Stadtviertelebene)		
Start:	01.01.23	Ende:	30.09.23	Aufwand:	90h
Verantwortliche/r:	Jakob Rager (CREM)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Erstellung einer Kurzzusammenfassung - Aufbereiten einer Präsentation - Diskussion in der Begleitgruppe der Ergebnisse sowie der Kurzzusammenfassung und der Präsentation					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:	Deliverable:		
1	31.05.23	Präsentation der Resultate in der Begleitgruppe	Präsentation Ergebnisse		
2	30.09.23	Zusammenfassung des Feedbacks der Begleitgruppe und Empfehlungen zur Verbesserung der Best-Practice	Bericht Feedback Begleitgruppe		



Workpackage-Nr: 10		Workpackage-Name:	Rechtliche, wirtschaftliche und soziale Einflussfaktoren		
Start:	01.01.23	Ende:	30.09.23	Aufwand:	170
Verantwortliche/r:	Klaus Kreher (IEE); Joel Fournier (Kanton Wallis); Bettina Tschander (Stadt Zürich)				
Beschreibung:	(inkl. Ziele)				
- Bestimmung der Gründe die GEGEN und FÜR den Einsatz von Begrünungsmassnahmen sprechen. - Diskussionen und Umfragen zur Ableitung der möglichen Begleitmassnahmen, die zu einer hohen Akzeptanz von Begrünungsmassnahmen führen. - Möglichkeiten auswerten die technischen Vorteile einer Begrünung in die bestehenden Beurteilungskriterien (Gebäudenachweis, Fördermassnahmen, usw.) zu integrieren. Dabei handelt es sich um ausgearbeitete Vorschläge. Die tatsächliche Umsetzung liegt in den Händen der zuständigen Stellen; mögliche Änderungen auf rechtlicher Ebene benötigen Zeit.					
Meilensteine/Deliverables:					
Nr.:	Datum:	Beschreibung:	Deliverable:		
1	28.02.23	Gründe GEGEN und FÜR Begrünungsmassnahmen	Schriftliche Dokumentation		
2	30.06.23	Überlegungen zu Begleitungsmassnahmen die eine Akzeptanz der Begrünungsmassnahmen fördern	Umfragen, qualitative und statistische Resultate		
3	30.09.23	Möglichkeiten ausarbeiten, um Begrünungsmassnahmen in bestehenden Beurteilungskriterien zu integrieren.	Schriftliche Dokumentation, Planungshilfen		



> Planung Projektabschluss

1. Definition und Auflistung fehlender Ergebnisse und Deliverables
2. Produktion fehlender Deliverables
3. Erstellen Schlussbericht
4. Planung Publikationen



Haute Ecole d'Ingénierie
Rue de l'Industrie 23
1950 Sion

[hevs.ch / he](https://hevs.ch/he)



Merci de votre attention.

swissuniversities

