

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

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2019/20	No TD / Nr. DA ER/2020/83
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Quoc Hung Tran Professeur / Dozent Klaus Kreher	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> 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.

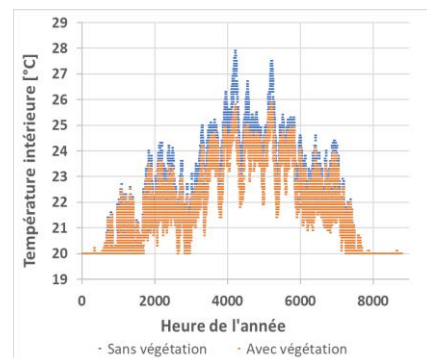
Méthodes | Expériences | Résultats

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
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 :

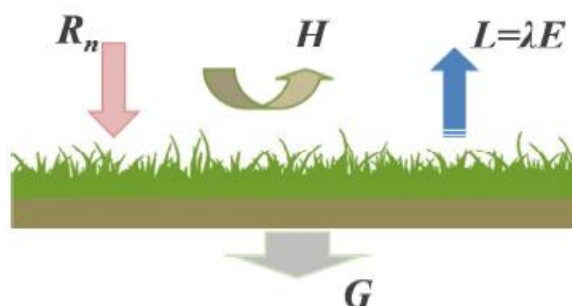


Figure 1 Flux thermiques à travers une surface végétalisée. Tiré de Djedjig (2013).

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

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

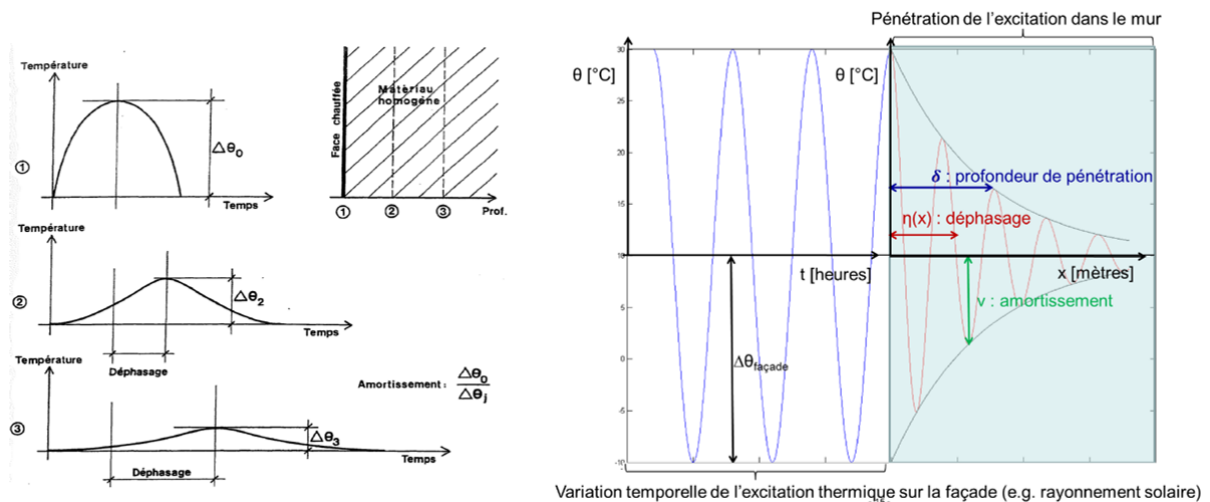


Figure 2 Déphasage et amortissement de la variation de la température intérieure grâce à l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)

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.

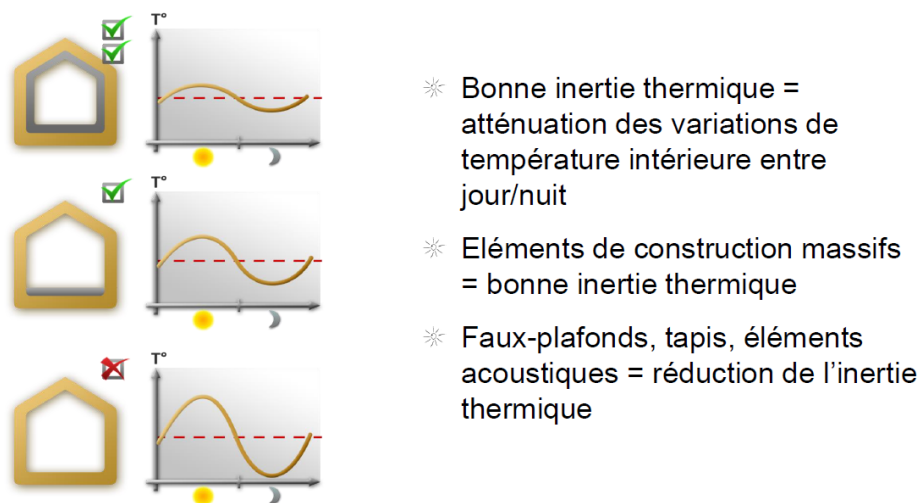


Figure 3 Impact de l'inertie thermique. Tiré du cours de K. Kreher (Document non publié [Support de cours], 2019/2020)

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 :

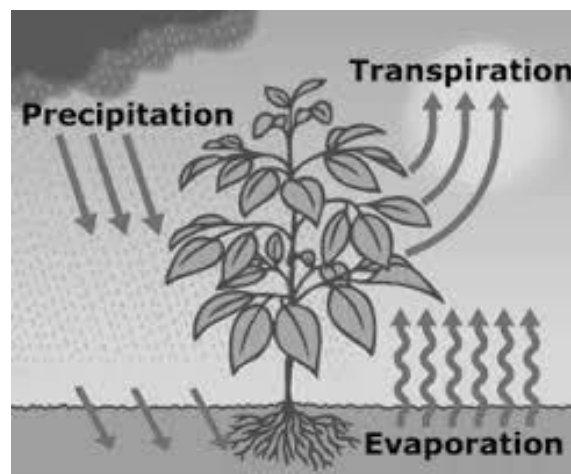


Figure 4 Phénomène d'évapotranspiration. Tiré de Arborera (2004)

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 ($K_{\text{air-plante}}$) est à définir. Si $K_{\text{air-plante}}$ vaut 0.1, alors cela signifie que dans le volume donné, il y a 1% d'air.

$$m_{\text{air}} = k_{\text{air-plante}} \cdot S_{\text{veg}} \cdot e \cdot \rho_{\text{air}} \quad (14)$$

$k_{\text{air-plante}}$: Taux d'air dans le volume de la façade végétalisée [-] ($k_{\text{air-plante}} = 0.1$)

e : Épaisseur de la couche de végétation [m] ($e = 0.25$ m)

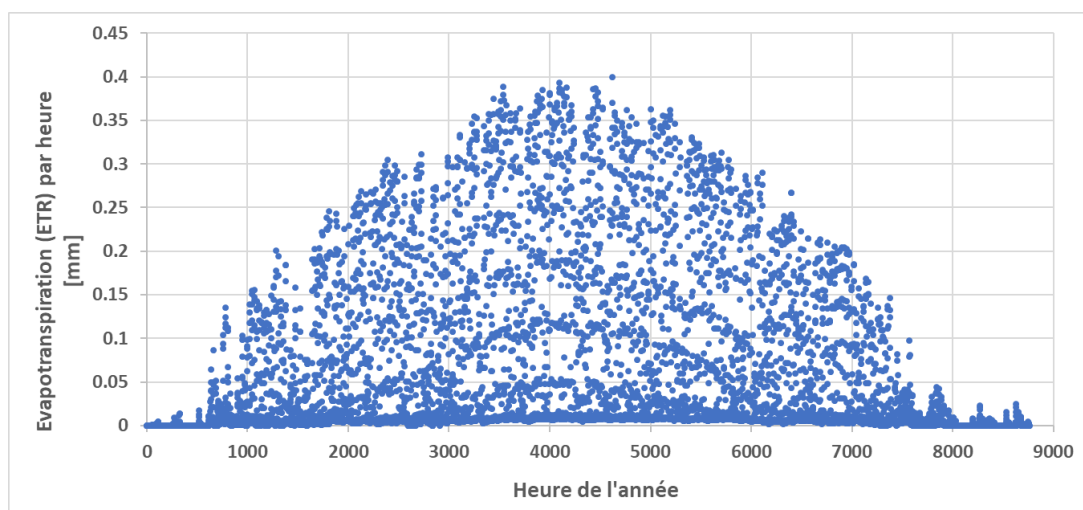
ρ_{air} : Masse volumique de l'air [kg/m³] ($\rho_{\text{air}} = 1.204$ [kg/m³] à 20°C)

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).

$$\Delta T = \frac{ET_{\text{ref}} \cdot kc \cdot \rho_{\text{vapeur d'eau}} \cdot \Delta H_{\text{vap}} \cdot k_{\text{refroidissement}} \cdot S_{\text{veg}} \cdot 10^6}{k_{\text{air-plante}} \cdot S_{\text{veg}} \cdot e \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (15)$$

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.

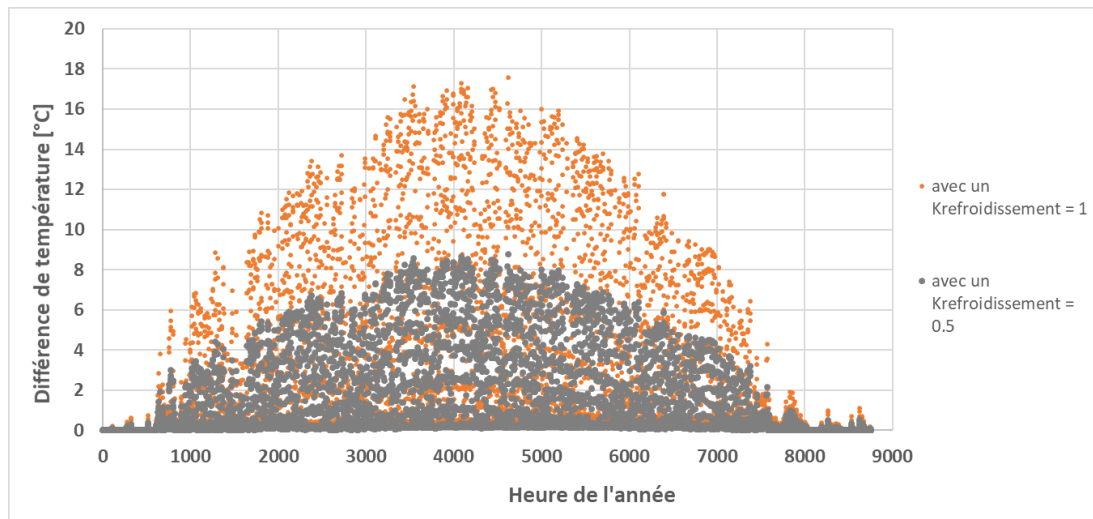
6.4 Résultats de l'évapotranspiration et de son impact



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, azimut 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

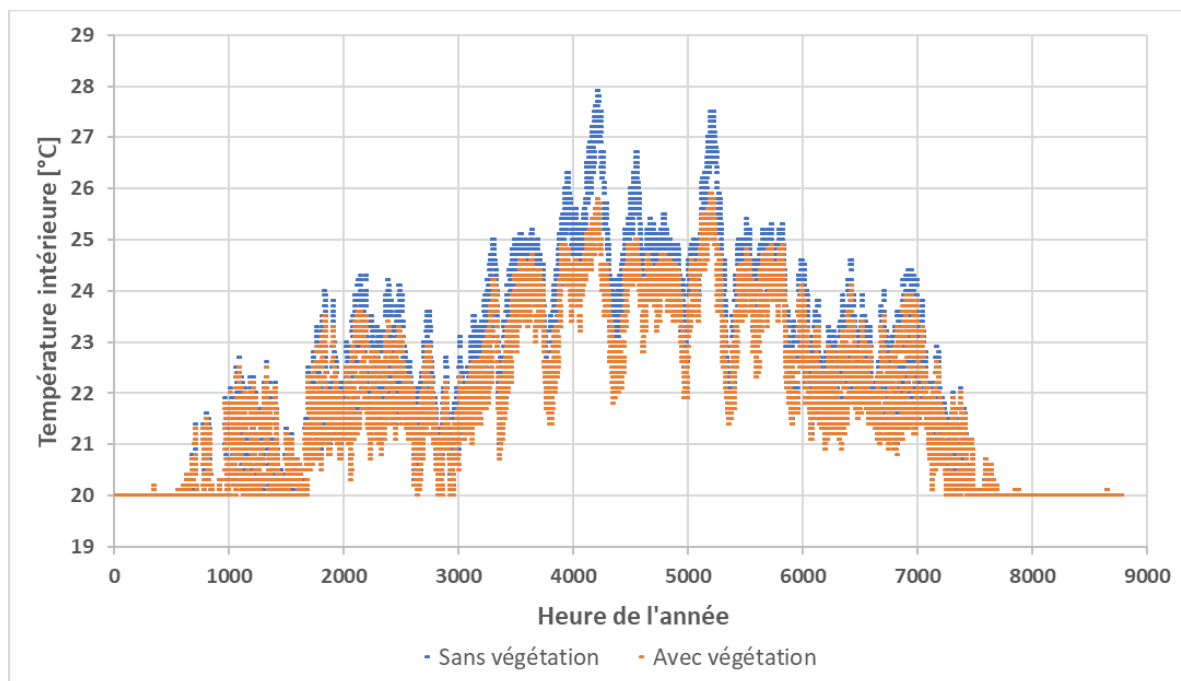
Le Tableau 6 présente les consommations énergétiques de chauffage et de climatisation pour le bâtiment simulé. Les deux colonnes de gauche comparent les consommations lorsqu'il n'y pas de climatisation. L'énergie en lien avec la climatisation est donc nulle. La consommation d'énergie de chauffage est 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

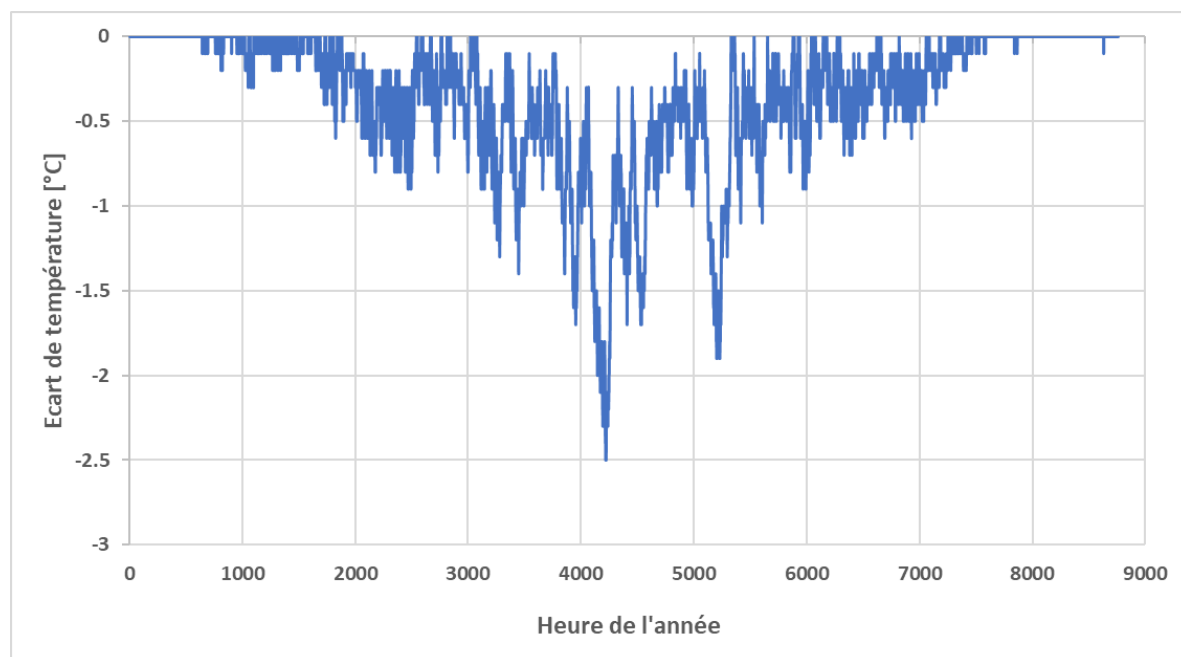
Le Tableau 7 présente l'impact de la végétalisation sur le bilan énergétique annuel lorsque le nombre d'étages du bâtiment augmente. Cette analyse est réalisée pour un bâtiment de 3, 6, 10 et 15 étages. Afin d'en définir l'influence, trois éléments vont être étudiés. La *part d'énergie de clim. (Sans 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.

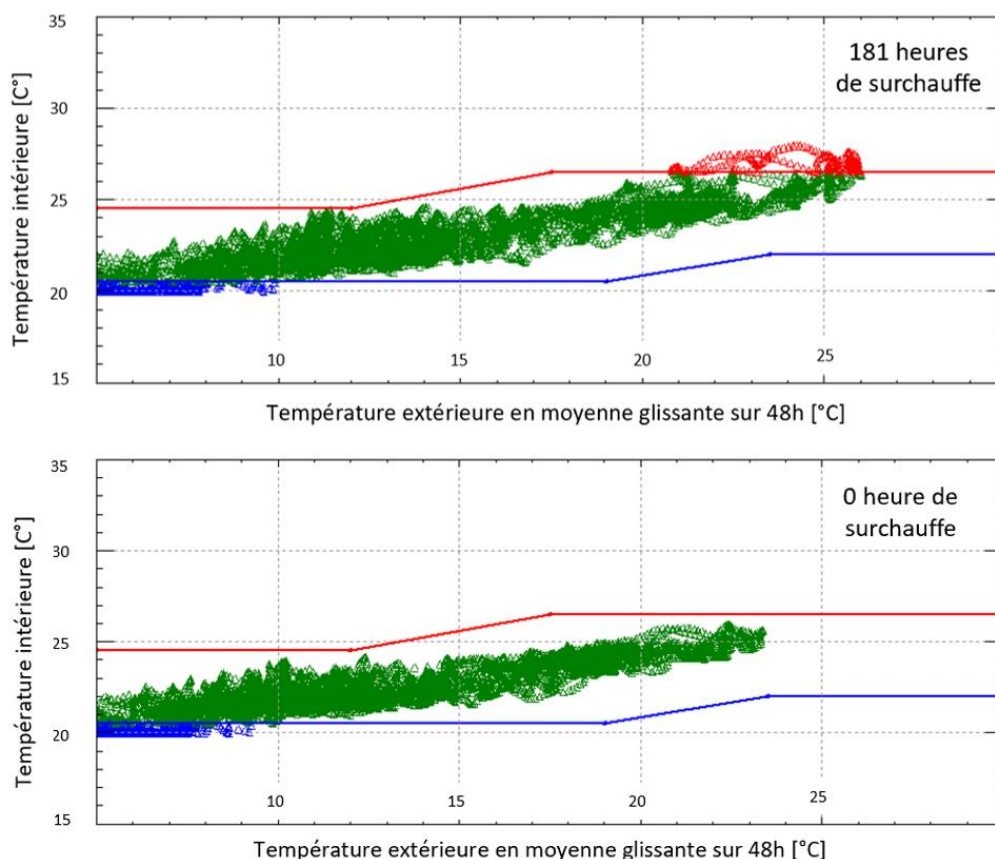


Figure 5 Comparaison des heures de surchauffe (en haut : sans végétalisation, en bas : avec végétalisation)

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

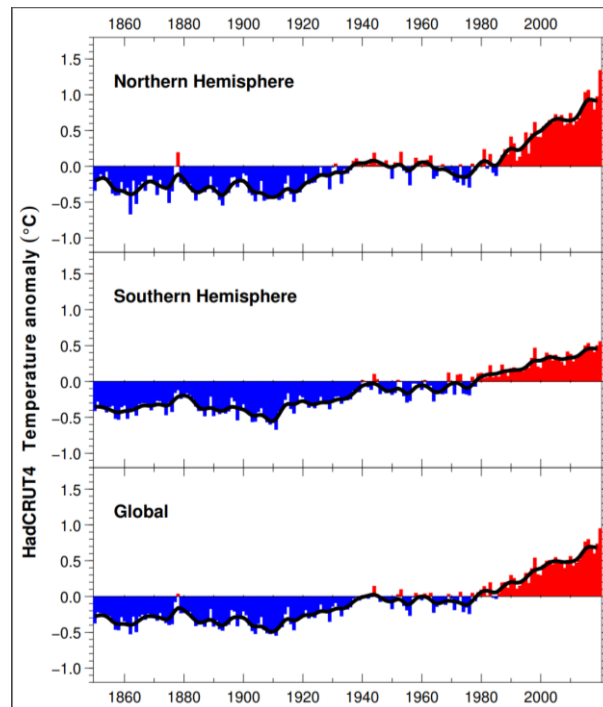
- Alexandris, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. 12.
- Apur. (2016). Recensement des murs végétaux parisiens : Cartographie et typologies. https://www.apur.org/sites/default/files/documents/recensement_murs_vegetaux_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 besoin 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-besoin-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.

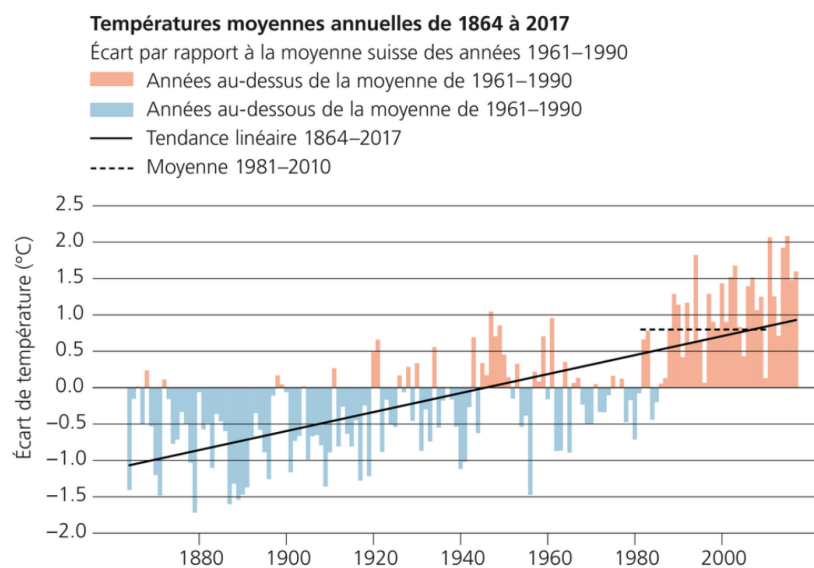
12 Annexes

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%

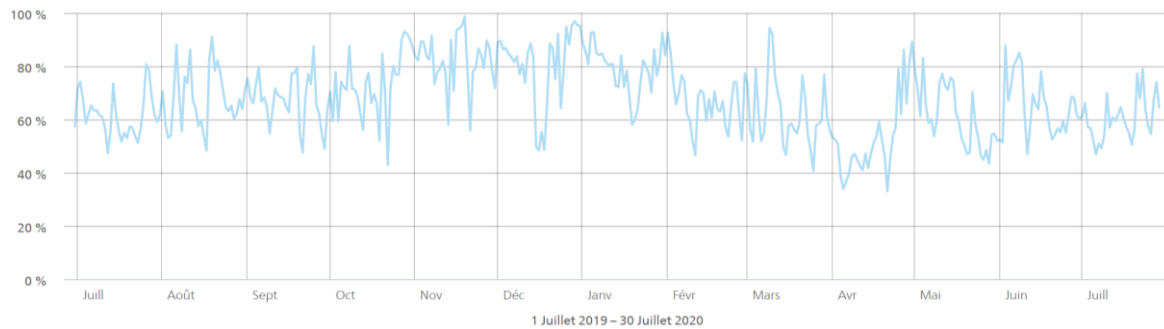
Tiré de Jacquet (2010, p.103)

Annexe 4 Caractéristiques majeures des quatre toits étudiés par Hui (2009)

Green roof site	Description
Ngau Tau Kok Municipal Office Building	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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

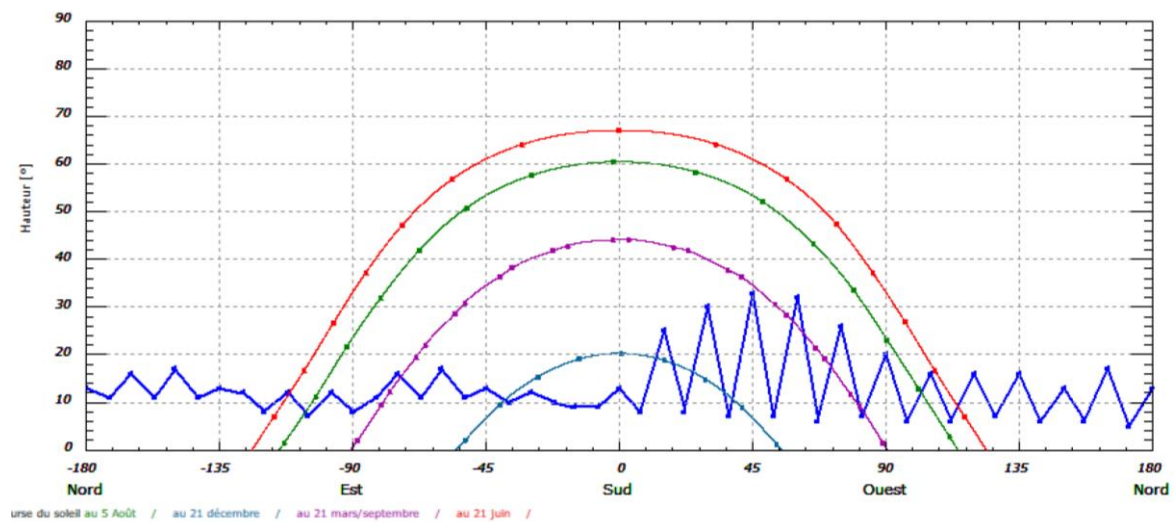
Tiré de Hui (2009, p. 17)

Annexe 5 Variation de l'humidité relative à Viège

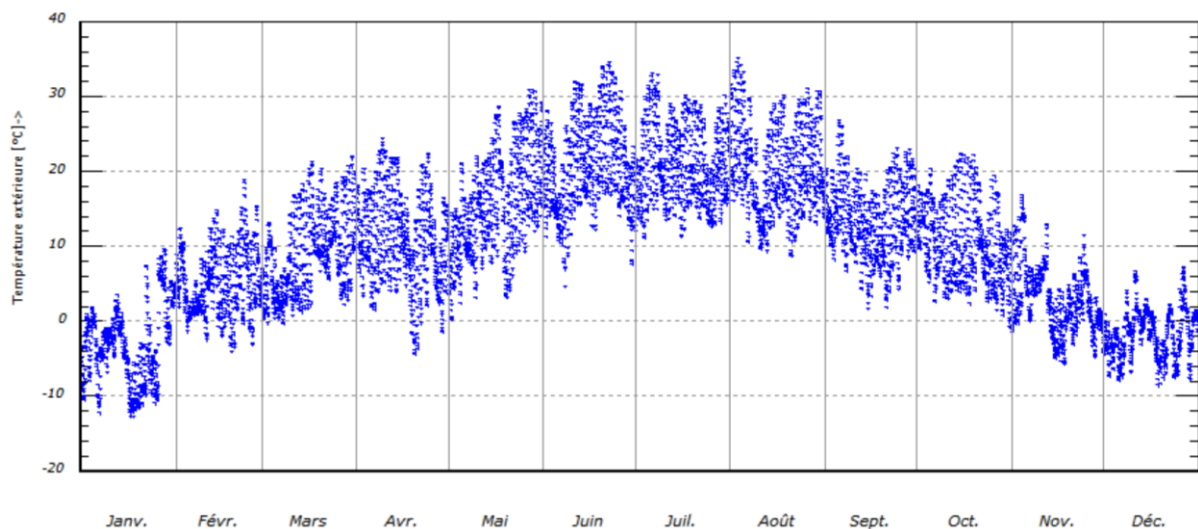


Tiré de Météosuisse (s. d.)

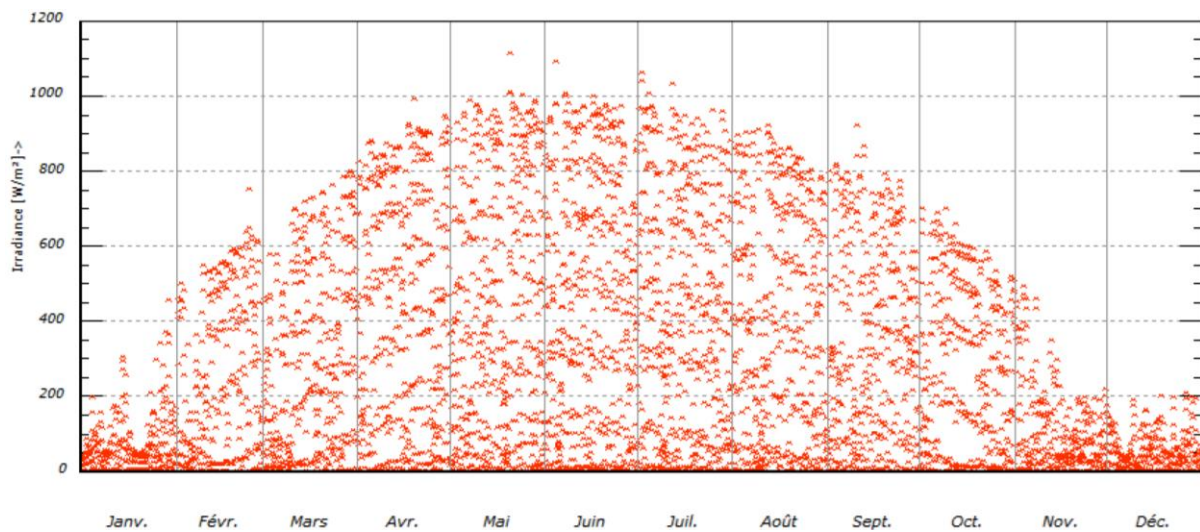
Annexe 6 Hauteur du soleil et horizon (en bleu) pour Viège



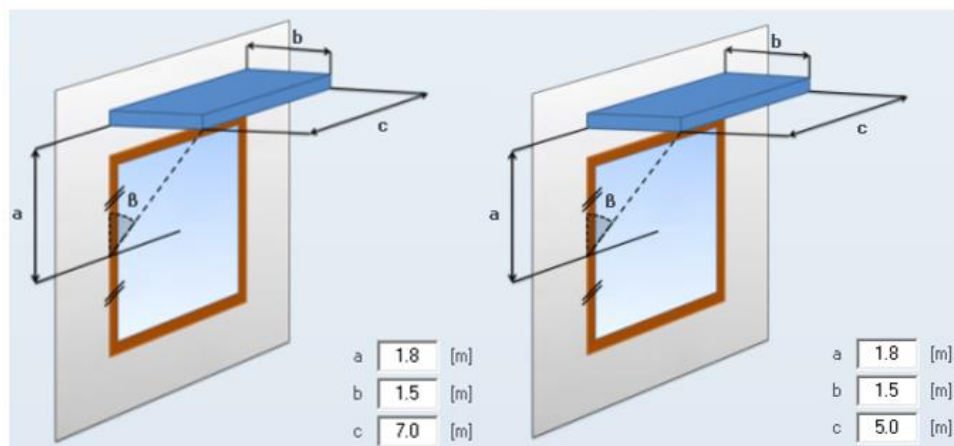
Annexe 7 Température ambiante extérieure à Viège



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]
<input checked="" type="checkbox"/> Récupérateur de chaleur sur l'air extrait		80	[%]
<input checked="" type="checkbox"/> Rafraîchissement par aération	θ_v 22 [°C]	$\Delta\theta$ 2 [°C]	2.4 [m³/h·m²]

Occultation des fenêtres

<input checked="" type="checkbox"/> En fonction de la température (surchauffe)		24	[°C]
<input type="checkbox"/> En fonction du rayonnement (éblouissement)			

<input checked="" type="checkbox"/> 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