

Les façades végétalisées : Analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision

Auteur : Vandersmissen, Gauthier

Promoteur(s) : Wellens, Joost

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13260>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative" (BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Les façades végétalisées : analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision

GAUTHIER VANDERSMISSEN

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

PROMOTER :
Prof. WELLENS JOOST

©Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Les façades végétalisées : analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision

GAUTHIER VANDERSMISSEN

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

PROMOTEUR :
Prof. WELLENS JOOST

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement mon promoteur Joost Wellens pour son soutien, son suivi ainsi que ses conseils avisés.

Je remercie également l'équipe de l'entreprise MATRIciel pour leur accueil chaleureux, et plus particulièrement mes maîtres de stage, Isabelle Bruyère et Sébastien Pouppez, pour leur accompagnement tout au long du stage et pour leur suivi durant la période de rédaction.

Je tiens également à remercier profondément ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de ce TFE.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui prendront le temps et auront la patience de lire mon mémoire.

Résumé

A l'heure où l'urbanisation est de plus en plus importante, la végétalisation des espaces urbains est un enjeu actuel majeur. En effet, les espaces verts permettent de mitiger les risques environnementaux, comme l'effet de chaleur urbain, le ruissellement ou encore la pollution atmosphérique, qui risquent de s'aggraver au vu des conditions climatiques actuelles. Néanmoins, la densité de construction et l'imperméabilisation rendent les surfaces horizontales propices à la végétalisation de plus en plus rares. Les façades végétalisées permettent de valoriser les surfaces verticales qui représentent une superficie beaucoup plus importante que les surfaces horizontales. Elles permettent de promouvoir le développement de la biodiversité et de combler les lacunes du réseau écologique tout en améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Plusieurs technologies sont actuellement présentes sur le marché. Chacune d'entre elles comporte des avantages et des inconvénients. L'irrigation constitue un point faible de ces technologies et plusieurs pistes, comme l'utilisation des eaux pluviales ou des eaux grises seront étudiées pour optimiser cet aspect. Le but de ce mémoire est de faire un état de l'art de ces technologies et de les comparer afin d'étudier leur balance environnementale et de pouvoir mettre au point une matrice d'aide à la décision pour accompagner les chefs de projet dans leur choix de la plus adaptée. Cet outil sera utilisé dans le cadre de plusieurs projets de construction neuve et de rénovation.

Abstract

At a time when urbanisation is becoming increasingly important, the greening of urban spaces is a major current issue. Indeed, green spaces help to mitigate environmental risks, such as the urban heat effect, runoff and air pollution, which are likely to worsen in the current climate. Nevertheless, building density and waterproofing make horizontal surfaces suitable for vegetation increasingly rare. Green walls make it possible to enhance the value of vertical surfaces, which represent a much larger surface area than horizontal surfaces. They promote the development of biodiversity and fill gaps in the ecological network while improving the energy performance of buildings. Several technologies are currently available on the market. Each of them has pros and cons. Irrigation is a major drawback of these technologies and several ways to solve this issue will be studied to optimise this aspect, such as the use of rainwater or grey water. The aim of this thesis is to make a state of the art of these technologies and to compare them in order to study their environmental balance in order to develop a decision support matrix to assist project managers in their choice of the most adapted one. This tool will be used in several new construction and renovation projects.

Table des matières

1	Introduction	10
1.1	Cadre du TFE	10
1.2	Objectifs	10
1.3	Problématique	11
2	Etat de l'art des façades végétalisées	14
2.1	Bref historique	14
2.2	Présentation des technologies existantes	14
2.2.1	Green facades	15
2.2.2	Living walls	17
2.2.2.1	Technologie "panels"	18
2.2.2.2	Technologie "soil-cells"	19
2.2.2.3	Technologie "planter boxes"	20
2.2.2.4	Technologie "felt-layers"	21
2.3	Avantages	23
2.3.1	Esthétique et bien-être	23
2.3.2	Dépollution atmosphérique	23
2.3.3	Diminution du coût en énergie des bâtiments et réduction de l'effet îlot de chaleur	24
2.3.4	Isolation phonique et réduction du bruit	25
2.3.5	Protection de l'enveloppe du bâtiment	25
2.3.6	Interception des pluies et diminution du ruissellement	26
2.3.7	Biodiversité	26
2.4	Inconvénients	26
2.4.1	Irrigation	26
2.4.2	Fertilisation	27
2.4.3	Entretien	27
2.5	Comparaison des différentes technologies	27
2.5.1	Contraintes d'installation	28

2.5.1.1	Adaptation à l'architecture du bâtiment	28
2.5.1.2	Poids de la structure	28
2.5.2	Coût	29
2.5.2.1	Coût d'installation	29
2.5.2.2	Coûts de maintenance	31
2.5.2.3	Coûts d'entretien	32
2.5.2.4	Coûts de fin de vie	32
2.5.2.5	Coût global	33
2.5.3	Esthétique	33
2.5.3.1	Diversité des plantes disponibles	33
2.5.3.2	Temps de couverture	34
2.5.4	Potentiel écologique	35
2.5.5	Impact environnemental	36
2.5.5.1	Irrigation	36
2.5.5.2	Fertilisation	38
2.5.5.3	Energie grise	38
2.5.5.4	Recyclabilité	39
2.5.5.5	Durabilité	39
2.5.5.6	Conclusion	40
2.5.6	Conclusion	40
3	Intégration de façades végétalisées à des projets de rénovation ou de construction neuve	42
3.1	Certification BREEAM	42
3.2	Ecopotentiel ou CBS du projet	44
3.3	Outil d'aide à la décision	45
3.3.1	Sélection d'un outil d'aide à la décision	45
3.3.2	Création de la matrice de décision	45
3.3.3	Technologies retenues	46
3.3.4	Attribution des scores aux différentes technologies	46
3.3.4.1	Contraintes d'installation	46
3.3.4.2	Coût	46
3.3.4.3	Esthétique	47
3.3.4.4	Potentiel écologique	47
3.3.4.5	Impact environnemental	47
3.4	Projet Montoyer	48
3.4.1	Introduction au projet	48

3.4.2	Maintenance	51
3.4.3	Sélection des espèces végétales	52
3.5	Projet du bâtiment des Halles à Louvain-la-Neuve	53
3.5.1	Introduction au projet	53
3.5.2	Attribution des pondérations	54
3.5.3	Résultats	54
3.5.4	Maintenance	55
3.5.5	Choix des plantes	56
3.6	Projet AXS	57
3.6.1	Introduction au projet	57
3.6.2	L'hôtel	58
3.6.2.1	Attribution des pondérations	59
3.6.2.2	Attribution des scores pour le critère de réduction du bruit	59
3.6.2.3	Résultats	60
3.6.3	Les toitures vertes	60
3.6.3.1	Attribution des pondérations	61
3.6.3.2	Résultats	61
3.6.4	La résidences pour étudiants	62
3.6.4.1	Attribution des pondérations	62
3.6.4.2	Résultats	63
4	Conclusion et perspectives	66
4.1	Conclusion	66
4.2	Perspectives	68
4.2.1	Analyse du cycle de vie	68
4.2.2	Besoin en eau des plantes	68
4.2.3	Amélioration de la matrice de décision	69
5	Annexes	74

Table des figures

2.1	Différents systèmes de GF : (a) DGF enracinée dans le sol ; (b) DGF enracinée dans des jardinières ; (c) IGF enracinée dans le sol ; (d) IGF enracinée dans des jardinières Source : [Palermo and Turco, 2020]	15
2.2	DGF composée de lierre grimpant	16
2.3	IGF sur support unidimensionnel	16
2.4	IGF sur treillis bidimensionnel	16
2.5	IGF sur support tridimensionnel	16
2.6	Système Greencable de la société Carl Stahl	17
2.7	Système Webnet de la société Jakob	17
2.8	Module GABION de la société Le Prieuré	19
2.9	Module VIVAGREEN de la société Soprema	19
2.10	LW soil-cells	20
2.11	Mur végétal intérieur soil-cells	20
2.12	Façade végétalisée de l'Atrium57 à Gembloux	20
2.13	Murs végétaux de la Cité des sciences et de l'industrie, Paris	21
2.14	L'Oasis d'Aboukir, Paris	21
2.15	Mur végétal rue Belliard après sa conception en 2009	22
2.16	Mur végétal rue Belliard après sa mort en 2015	22
2.17	Système VGTEX	22
2.18	Substrat hydrophile contenant les semences	22
2.19	Mur végétale à Mons	23
2.20	Façade végétalisée à Anvers	23
2.21	"Le Nouvel" Kuala Lumpur	34
2.22	Système OASIS de la société lePrieuré	37
2.23	GF en lierre de plus de 100 ans sur un bâtiment allemand	40
3.1	Situation actuelle du projet Montoyer	48
3.2	Représentation 3D de la situation projetée du projet Montoyer	48
3.3	Façade SSO avant l'intégration d'IGF	49

3.4	Façade SSO après l'intégration d'IGF	49
3.5	Façade ONO avant l'intégration d'IGF	49
3.6	Façade ONO après l'intégration d'IGF	49
3.7	Plan du 3 ^{ème} étage	50
3.8	Façade arrière avant l'intégration d'une IGF	51
3.9	Façade arrière après l'intégration d'une IGF	51
3.10	Modélisation 3D d'une jardinière utilisée pour le projet Montoyer	52
3.11	Situation actuelle de la façade NE	53
3.12	Représentation 3D de la situation projetée de la façade NE	53
3.13	Représentation 3D de la situation projetée des pans de murs exposés NE .	54
3.14	Représentation 3D de la situation projetée des pans de murs exposés SO .	54
3.15	Matrice de décision pour la végétalisation du bâtiment des Halles	55
3.16	Plan du premier étage du bâtiment des Halles	55
3.17	Plan de masse du projet AXS	57
3.18	Situation projetée du projet AXS	58
3.19	Représentation 3D de la façade Est de l'hôtel	58
3.20	Plan d'implantation de l'hôtel	58
3.21	Représentation 3D de la façade nord de l'hôtel	59
3.22	Plan d'implantation de l'hôtel	59
3.23	Matrice de décision pour la végétalisation de l'hôtel	60
3.24	Représentation 3D des bâtiments D-E-F	61
3.25	Plan d'implantation des bâtiments B-C-D-E-F	61
3.26	Matrice de décision pour la végétalisation des murs aux abords des toitures vertes	62
3.27	Représentation 3D de la façade SO de la résidence pour étudiants	62
3.28	Plan d'implantation de la résidence pour étudiants	62
3.29	Matrice de décision utilisée pour la végétalisation de la façade sud de la résidence pour étudiants	63
3.30	Représentation 3D de la façade sud de la résidence pour étudiants	64
3.31	Plan d'implantation de la résidence pour étudiants	64
3.32	Représentation 3D de la toiture verte de la résidence pour étudiants	65
3.33	Plan d'implantation de la résidence pour étudiants	65
5.1	Estimation des prix au m ² HTVA pour des GF par l'IBGE	74
5.2	Simulation de prix GREENCABLE au m ² selon différents calepinages	74
5.3	Outil de calcul BREEAM	75
5.4	Outil de calcul écopotentiel	76

5.5 Outil de calcul CBS	77
-----------------------------------	----

Chapitre 1

Introduction

1.1 Cadre du TFE

Ce TFE a été réalisé en partie en entreprise chez MATRIciel à Louvain-la-Neuve. Ce bureau d'ingénierie du bâtiment durable a pour ambition de développer toutes les dimensions du développement durable et vise à limiter l'impact négatif des bâtiments sur la nature tout en maximisant le confort, la santé et le bien-être des utilisateurs à l'intérieur et à l'extérieur. Leur approche se base d'avantage sur les concepts de bioclimatisme et d'économie circulaire que sur des solutions "high-tech". Fondée en 2005, cette entreprise compte désormais une trentaine d'employés qui travaillent ensemble sur de nombreux projets de construction neuve et de rénovation dans les domaines d'expertise suivants : étude des techniques spéciales, conception de bâtiments durables et évaluation environnementale des bâtiments.

1.2 Objectifs

L'entreprise souhaite intégrer des façades végétalisées dans certains de leurs projets afin d'améliorer leur potentiel écologique et de favoriser le développement de la biodiversité dans les espaces urbains. Cependant, elle émet quelques réserves sur le fait que les avantages environnementaux de ces structures permettraient de compenser leur empreinte environnementale. Ensuite, un autre point pose question à l'entreprise, celui du choix de la technologie la plus adaptée aux objectifs du projet.

L'objectif principal de ce TFE est de déterminer si l'intégration d'une façade végétalisée dans un projet a réellement un intérêt environnemental. Pour ce faire, les avantages et les inconvénients de ces structures seront présentés. Ensuite, un état de l'art des technologies

existantes sera réalisé et celles-ci seront comparées sur base de différents critères déterminés par l'entreprise. Un outil d'aide à la décision sera mis au point afin d'assister les chefs de projet dans leur choix pour la technologie la plus adaptée. A titre d'illustration, cet outil se verra appliquer à plusieurs projets concrets de l'entreprise.

L'objectif secondaire est de fournir des pistes d'amélioration des systèmes d'irrigation et de fertilisation afin de réduire l'empreinte environnementale de l'ouvrage. En effet, la consommation d'eau et de fertilisant des façades végétalisées représente un inconvénient majeur de ces structures et contribue à alourdir leur empreinte environnementale.

1.3 Problématique

L'explosion démographique et l'exode rural engendrent une urbanisation de plus en plus importante. En effet, d'ici 2050, la population vivant dans les milieux urbains atteindra les 6,3 milliards d'individus. Cela représente une augmentation de 72% entre 2011 et 2050 [United Nations, 2012]. Les villes d'aujourd'hui sont densément construites afin de pouvoir accueillir le plus de citoyens possible tout en limitant l'étalement urbain. De cette manière, les villes contribuent à réduire les émissions de CO₂ en concentrant les services d'approvisionnement et en optimisant le transport ainsi que les performances énergétiques des bâtiments. De manière générale, les personnes qui vivent en ville utilisent moins d'énergie et de terrain pour leur transport et leur logement que les personnes vivant en dehors des villes [European Commission, 2015]. Par conséquent, les zones fortement urbanisées sont caractérisées par un environnement très minéral et un manque de végétation. Ce manque d'éléments naturels a de nombreux impacts sur la santé mentale et physique des citoyens mais également sur la gestion des risques environnementaux.

En effet, l'urbanisation engendre une augmentation locale de la pollution. Celle-ci est à la fois nuisible pour l'environnement et pour la santé humaine. En effet, en 2012, les morts causées par la pollution atmosphérique sont estimées à 7 millions (Simunich, 2016 cité par [Paull et al., 2020]). Les espaces verts fournissent de nombreux services écosystémiques de régulation dont la dépollution atmosphérique.

De plus, la densification du tissu urbain est responsable de la hausse locale des températures. Ce phénomène est connu sous le nom "effet îlot de chaleur urbain" et constitue l'impact le plus important qu'a l'homme sur le climat local [Gabriel and Endlicher, 2011]. Lors de fortes vagues de chaleur, l'effet îlot de chaleur contribue à intensifier la hausse des températures rendant les conditions extrêmes, parfois même fatales, surtout pour les

personnes plus âgées. C'est d'ailleurs ce qui s'est passé lors des canicules en 2003. De nombreux pays d'Europe ont vu leur taux de mortalité augmenter à cause des températures extrêmes. Par exemple, l'OMS estime que la France a compté près de 15.000 décès supplémentaires causées par les vagues de chaleur [World Health Organisation, 2004].

Le changement d'occupation des sols dû à l'urbanisation engendre une perte de biodiversité. En effet, les zones rurales et les espaces naturels abritent des écosystèmes très riches en biodiversité. Lorsque ces zones sont urbanisées, ce sont des habitats qui sont détruits. L'imperméabilisation des sols empêche la végétation de se développer. Par conséquent, la faune associée à cette flore disparaît également, tout comme les services écosystémiques rendus par la nature, comme la dépollution atmosphérique, la régulation du ruissellement, la séquestration du carbone et bien d'autres.

L'urbanisation intensive implique l'imperméabilisation des surfaces et par conséquent, une intensification du ruissellement. Lors d'évènements pluvieux, l'eau ne pouvant pas s'infiltrer, ruisselle jusqu'au premier exutoire situé sur son passage et il s'agit souvent d'une bouche d'égout. Or, le réseau d'égouttage n'est pas conçu et dimensionné pour accueillir ces eaux pluviales. Lors d'évènements pluvieux intenses, ils sont saturés et les déversoirs d'orage s'activent, relâchant de l'eau non traitée dans l'environnement. Il arrive également qu'ils débordent, tout comme les cours d'eau qui passent à proximité des villes, ce qui cause d'importants dégâts d'inondation. Lorsque des axes de ruissellement importants traversent des zones agricoles, ils sont susceptibles d'engendrer de l'érosion et des coulées boueuses pouvant occasionner des dégâts importants. C'est ce qui s'est passé en Belgique en juillet 2021. Les précipitations intenses ont causé des inondations et des coulées boueuses dans plusieurs villes de Wallonie, causant de lourdes pertes humaines et des dommages considérables. D'ailleurs, la situation ne risque pas de s'arranger avec le temps. En effet, l'urbanisation et l'intensification des évènements pluvieux extrêmes ne risquent pas d'améliorer les choses. C'est la raison pour laquelle il est primordial d'intégrer des espaces verts dans les villes. La végétation et les zones imperméables contribuent à diminuer le ruissellement. En effet, les plantes vont intercepter une partie des pluies et diminuer le ruissellement grâce à l'évapotranspiration. Par ailleurs, les substrats vont infiltrer l'eau et contribuer au rechargeement des nappes phréatiques.

La végétalisation des zones urbanisées est un enjeu actuel majeur absolument nécessaire à considérer si l'on veut rétablir les services écosystémiques rendus par les espaces verts et améliorer l'aspect durable de nos villes. Toutefois, végétaliser un centre urbain relève du défi. La densité croissante des villes est un frein à l'épanouissement des végétaux. C'est

pourquoi chaque surface libre est à considérer. Les surfaces horizontales sont évidemment les plus propices à la végétalisation mais sont souvent destinées à d'autres usages. Il n'est pas possible de végétaliser les voiries, trottoirs, parkings car aucunes plantes ne survivraient aux passages intensifs sur ces types d'ouvrages. Certains parterres, îlots, ou arbres de pluies sont parfois installés aux abords de ces structures mais le plus souvent dans un but esthétique. L'aspect biodiversité ou gestion du ruissellement est rarement considéré, même s'ils tendent à l'être de plus en plus au vu des évènements climatiques actuels et au déclin de la biodiversité dans nos villes.

Les toitures vertes constituent une solution idéale pour végétaliser les espaces urbains. On en compte de plus en plus dans nos villes et en périphérie. Elles fournissent une isolation complémentaire aux bâtiments et permettent de réduire le débit de ruissellement en interceptant les pluies ainsi qu'en stockant une partie des eaux pluviales. Elles permettent également de favoriser le développement de la biodiversité dans les villes et contribuent à compléter les lacunes du réseau écologique. Malheureusement, elles sont de plus en plus en compétition avec les panneaux solaires. En effet, les normes PEB actuelles imposent aux bâtiments d'être les plus performants énergétiquement, ce qui implique le plus souvent d'utiliser les toitures comme support pour des panneaux solaires. La combinaison panneaux solaires et toiture verte n'est possible que si la densité de panneaux solaires est faible. Dans ce cas, le potentiel de génération d'énergie est sous-exploité, c'est pourquoi les toitures solaires sont souvent installées en dépit des toitures végétales.

Il est donc nécessaire de trouver d'autres surfaces disponibles pour la végétalisation. Les surfaces verticales sont certes moins intéressantes que les surfaces horizontales, mais néanmoins exploitables si la structure est adaptée et réfléchie pour pouvoir assurer la survie et l'épanouissement des végétaux. Les façades des bâtiments sont de plus en plus considérées pour remplir ce rôle. En effet, à l'échelle d'une ville, ces surfaces verticales représentent une superficie énorme, bien plus importante que les surfaces horizontales. Les végétaliser permettrait de les valoriser et de ramener la nature dans nos villes tout en améliorant les performances énergétiques des bâtiments.

Chapitre 2

Etat de l'art des façades végétalisées

2.1 Bref historique

Durant la grande majorité de son existence, l'Homme a toujours été intimement lié à la nature [Soga and Gaston, 2016]. Celle-ci a toujours su trouver sa place auprès de lui, même au sein de villes les plus urbanisées. L'association du bâtiment et de la végétation est un concept ancien qui existe depuis l'antiquité. Le plus vieil exemple est sans doute Babylone et ses célèbres jardins suspendus, bâtis au VI^e siècle ACN [Kontoleon and Eumorfopoulou, 2010], et considérés comme l'une des sept merveilles du monde antique. D'autres civilisations, comme celle des vikings, utilisaient déjà des toitures végétales pour isoler leurs maisons [Almusaed, 2011]. Les plantes grimpantes étaient déjà utilisées il y a 2000 ans en Méditerranée pour leur capacité à produire des zones d'ombre et d'autres bénéfices comme la production de fruits [Medl et al., 2017]. Il y a 500 ans en Europe centrale, les vignes étaient très populaires dans les châteaux et les villages, tout comme les rosiers grimpants pour leurs qualités ornementales [Köhler, 2008]. De nos jours, l'utilisation des façades comme support pour la végétation présente un intérêt particulier pour les ingénieurs, les architectes et les écologistes au vu des nombreux services écosystémiques que fournissent les façades végétalisées [Madre et al., 2015].

2.2 Présentation des technologies existantes

Les façades végétalisées, couramment appelées "Vertical Greening Systems" (VGS), "Green Walls" (GW) ou encore "Vertical Garden" (VG), sont des structures végétales couvrant les façades des bâtiments. Elles ont un rôle esthétique mais comportent également beaucoup d'avantages socio-économiques et environnementaux. Il existe différents types de technologies que l'on peut classer selon deux catégories principales : les "Green

Facades" (GF) et les "Living Walls" (LW). Les GF sont des façades végétalisées constituées de plantes grimpantes qui sont enracinées directement dans le sol ou dans des jardinières disposées en pied de façade ou accrochées à celles-ci. Les LW sont constitués de plantes qui s'enracinent dans un substrat vertical apposé à la façade.

2.2.1 Green facades

Les GF sont composées de plantes grimpantes qui s'accrochent directement à la façade, grâce à leurs racines adventives spécialisées pour l'ancrage (crampons ou ventouses), ou qui grimpent le long d'un support fixé à la façade, en s'y enroulant ou en s'y accrochant grâce à leurs organes spécialisés (villes, pétioles volubiles). Ce support est généralement composé de câbles et/ou de barres en acier inoxydable afin de s'assurer qu'elles résistent aux conditions extérieures. Séparé de la façade, il permet de la protéger d'une éventuelle détérioration par les végétaux mais également de contrôler l'expansion de la couverture végétale et de la moduler. Cette structure permet de passer outre les contraintes architecturales du bâtiment. De plus, la couche d'air entre le bâtiment et le couvert végétal constitue un élément d'isolation supplémentaire. Dans leur article, [Palermo and Turco, 2020] parle d' "Indirect Green Facade" (IGF) lorsque les plantes grimpent le long d'une structure d'accroche et de "Direct Green Facade" (DGF) lorsque les plantes grimpent directement sur la façade. La figure 2.1 présente les différents systèmes de GF.

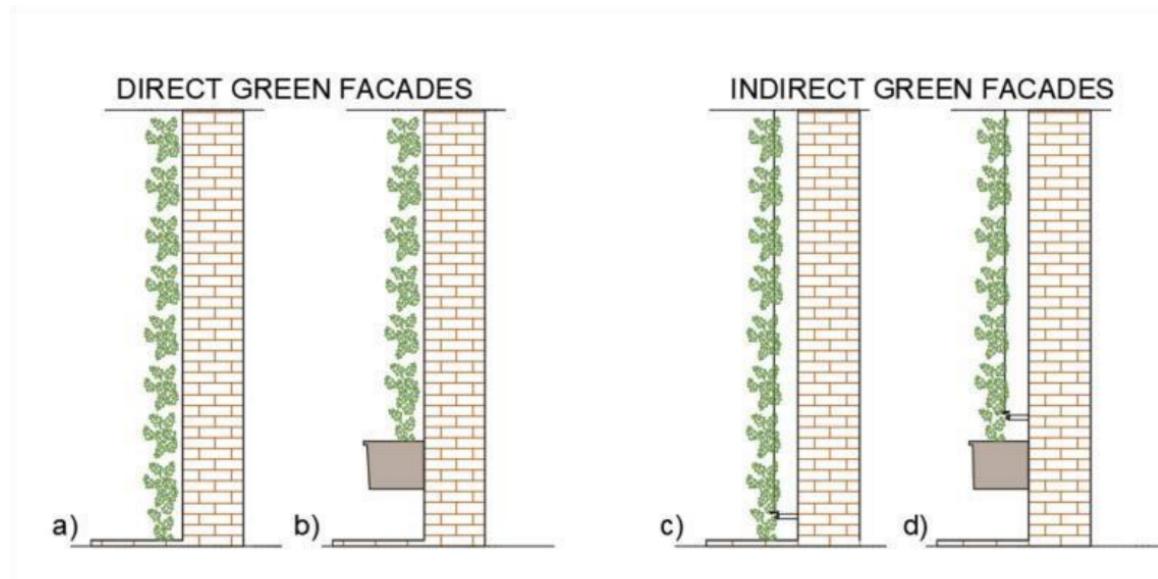


Figure 2.1 – Différents systèmes de GF : (a) DGF enracinée dans le sol ; (b) DGF enracinée dans des jardinières ; (c) IGF enracinée dans le sol ; (d) IGF enracinée dans des jardinières
Source : [Palermo and Turco, 2020]

La configuration de la structure portante va dépendre des espèces sélectionnées et de leur système d'accroche. Les plantes radicantes s'accrochent à leur support grâce à leurs racines adventives spécialisées en crampons ou en ventouses et ne nécessitent donc pas de support pour grimper (voir figure 2.2). Néanmoins, si on veut composer une IGF avec de telles espèces, il faudra les palisser au fur et à mesure de leur croissance. Les espèces volubiles grimpent en s'enroulant autour de leur support. La structure d'accroche est donc unidimensionnelle. Il s'agit le plus souvent d'un câble tendu sur lequel la plante grimpe en s'y enroulant (voir figure 2.3). Les plantes à vrilles s'accrochent à leur support grâce à leurs organes spécialisés en vrilles. Elles sont généralement guidées par un support bidimensionnel (voir figure 2.4). Il existe également des supports tridimensionnels pour les plantes au feuillage exubérant (voir figure 2.5). Cela permet d'augmenter la densité de la façade végétale.



Figure 2.2 – DGF composée de lierre grimant



Figure 2.3 – IGF sur support unidimensionnel



Figure 2.4 – IGF sur treillis bidimensionnel



Figure 2.5 – IGF sur support tridimensionnel

La société Carl Stahl a développé un support constitué de fils d'acier inoxydable accrochés au mur par des plots en aluminium (voir figure 2.6). La tension des câbles peut être ajustée au niveau de ces plots. Le système développé par la société Jakob allie les fils d'acier inoxydable avec des barres de renfort, généralement fabriquées en inox (voir figure 2.7).



Figure 2.6 – Système Greencable de la société Carl Stahl



Figure 2.7 – Système Webnet de la société Jakob

Lorsque l'enracinement des plantes en pleine terre n'est pas possible, celles-ci sont disposées dans des jardinières. Le volume de ces jardinières doit être suffisamment grand afin que les végétaux disposent d'une réserve suffisante en eau et en nutriments pour leur développement. Les dimensions vont dépendre de la hauteur à atteindre. En règle générale, la profondeur de substrat est d'au moins 50 cm.

2.2.2 Living walls

Les LW sont constitués de plantes enracinées dans un substrat apposé à la façade. Ce substrat est doté d'une très bonne capacité de rétention afin de minimiser la consommation en eau de l'ouvrage. En effet, le substrat étant apposé à la façade, son volume est limité. Par conséquent, les ressources en eau et en nutriments le sont également. C'est pourquoi il est impératif d'intégrer un système de ferti-irrigation à la structure. Des capteurs d'humidité sont généralement intégrés dans le substrat afin d'optimiser au mieux la consommation en eau de l'ouvrage et de réduire son coût de maintenance et son empreinte environnementale. Différentes technologies existent au sein des LW et se distinguent principalement par la nature et le cloisonnement de leur substrat.

2.2.2.1 Technologie "panels"

Les panels sont des "cages" métalliques remplies d'un substrat, organique ou non, dans lequel viennent s'enraciner les plantes. La fibre de coco ou encore la sphagnum sont des substrats couramment utilisés car ils possèdent une très bonne capacité de rétention et permettent de réduire considérablement le volume et le poids de l'ouvrage. Néanmoins, ce type de substrat est fort différent des conditions naturelles dans lesquelles poussent les végétaux. Il implique de devoir arroser et fertiliser constamment les plantes et se rapproche plus du principe de fonctionnement de l'hydroponie. De plus, malgré le fait que la sphagnum est un matériau biosourcé durable, elle est cultivée au Chili et son importation alourdi l'empreinte écologique de la façade. Elle a également tendance à se tasser et à se faire emporter par des oiseaux qui construisent leur nid avec. Il faut donc compléter le substrat régulièrement. Enfin, la sphagnum risque de complètement sécher en cas de problème sur le réseau d'irrigation. Dans ce cas, elle est facilement inflammable et peut causer des incendies. Toutes ces raisons ont poussé certaines entreprises à opter pour un substrat composé d'éléments minéraux et organiques se rapprochant d'avantage des conditions naturelles. Leur composition est pensée pour résister au tassemement tout en ayant les caractéristiques requises en terme de rétention et de drainage pour le bon développement des plantes.

Les entreprises Le Prieuré et Soprema ont opté pour un substrat d'origine minérale et organique. Les modules GABION de chez Le Prieuré (voir figure 2.8¹) ont une épaisseur de substrat de 10 cm alors que les modules VIVAGREEN de chez Soprema (voir figure 2.9²) ont une épaisseur de substrat de 6 cm. La consommation en eau annoncée pour l'irrigation est d'environ 150 L/m².an pour le module GABION et de 300 à 450 L/m².an pour le module VIVAGREEN. Malgré le fait que les deux substrats aient été conçus pour avoir une capacité de rétention optimale, leur épaisseur va fortement influencer la consommation en eau de l'ouvrage. Par ailleurs, l'épaisseur de substrat va également influencer le poids de la structure. Les modules GABION pèsent 150 kg/m² à CME (capacité maximale en eau) alors que les modules VIVAGREEN pèsent 80 kg/m² à CME.

1. Source : vegetalid.fr

2. Source : soprema.fr



Figure 2.8 – Module GABION de la société Le Prieuré



Figure 2.9 – Module VIVAGREEN de la société Soprema

2.2.2.2 Technologie "soil-cells"

La technologie soil-cells consiste à faire pousser chaque plante dans une cellule de substrat individuelle. Le fait de discréteriser le substrat en entités ponctuelles localisées au niveau de chaque plante permet de réduire le volume de substrat mais complique l'architecture de la structure. L'irrigation se fait localement au niveau de chaque cellule grâce à un réseau d'irrigation intégré à la structure. L'avantage de ce type d'ouvrage est que l'on peut mieux contrôler et optimiser l'uniformité de l'humidité du substrat. Néanmoins, cette technologie implique de devoir irriguer et fertiliser constamment chaque cellule étant donnée sa faible réserve en nutriments et en eau. Cette technologie est souvent mise en oeuvre pour de petits projets extérieurs (voir figure 2.10) ou des murs végétaux intérieurs (voir figure 2.11).



Figure 2.10 – LW soil-cells



Figure 2.11 – Mur végétal intérieur soil-cells

2.2.2.3 Technologie "planter boxes"

La technologie planter boxes est constitué de jardinières intégrées à la façade qui accueillent un substrat organo-minéral dans lequel peuvent se développer une multitude d'espèces. Ce système se différencie des autres par la visibilité de sa structure. En effet, les autres systèmes de LW offrent un écran de verdure comme rendu final, alors que les planter boxes intègrent les jardinières contenant le substrat au résultat final. La figure 2.12 présente la façade végétalisée de l'Atrium57 à Gembloix réalisée par la spin-off Murvert. Elle est constituée de jardinières en acier intégrées à la façade du bâtiment.

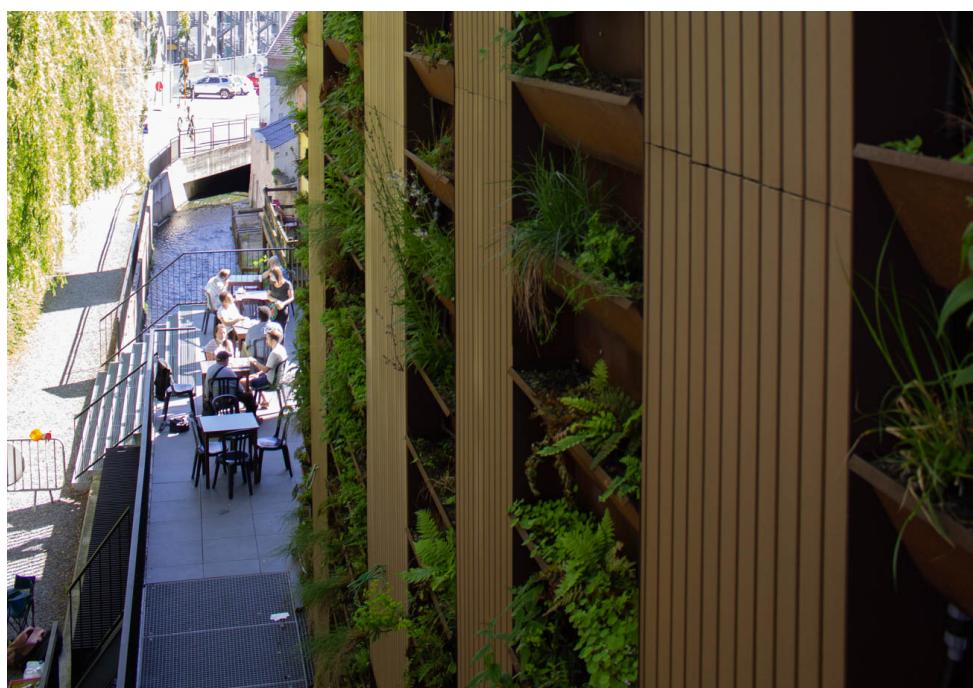


Figure 2.12 – Façade végétalisée de l'Atrium57 à Gembloix

2.2.2.4 Technologie "felt-layers"

La technologie felt-layers est probablement la plus célèbre. Elle a été inventée et brevetée par Patrick Blanc, qui a d'ailleurs déposé le terme "mur végétal" en 1986 après sa première création : Les murs végétaux de la Cité de sciences et de l'industrie à Paris (voir figure 2.13). Il a depuis réalisé de nombreux projets beaucoup plus impressionnantes aux quatre coins du monde, comme par exemple, l'Oasis d'Aboukir à Paris (voir figure 2.14). Ce système consiste à utiliser un feutre polyamide comme substrat disposé sur un support en PVC expansé [Allix, 2005]. Celui-ci sert de substrat d'enracinement et de rétention pour l'eau et les minéraux. Ce système fonctionne selon les principes de l'hydroponie et consomme par conséquent, une grande quantité d'eau et de fertilisants. De plus, une faille dans le système d'irrigation s'avère être très problématique car le substrat s'assèche très vite entraînant la mort de la façade. C'est ce qui est arrivé au bâtiment rue Belliard à Bruxelles. La façade réalisée par Patrick Blanc a déjà brûlé deux fois en 6 ans. La première fois à cause d'un électricien qui n'a pas rebranché correctement le système. Il a fallu 24 heures aux propriétaires pour s'en rendre compte. En 24 heures, 5000 des 7000 plantes ont péri [Fabré and Nahjari, 2010]. La fois suivante est également due à un problème électrique. Une panne de courant a entraîné une panne du système d'irrigation. La compagnie n'a pas réussi à joindre le propriétaire de l'immeuble à temps et la façade a complètement brûlé. Elle doit être démontée et reconstruite pour un coût estimé entre 60 et 70 000 euros [Boulet, 2015]. Les figures 2.15 et 2.16 présentent la façade après sa conception en 2009 et après sa mort en 2015.



Figure 2.13 – Murs végétaux de la Cité des sciences et de l'industrie, Paris



Figure 2.14 – L'Oasis d'Aboukir, Paris



Figure 2.15 – Mur végétal rue Belliard après sa conception en 2009

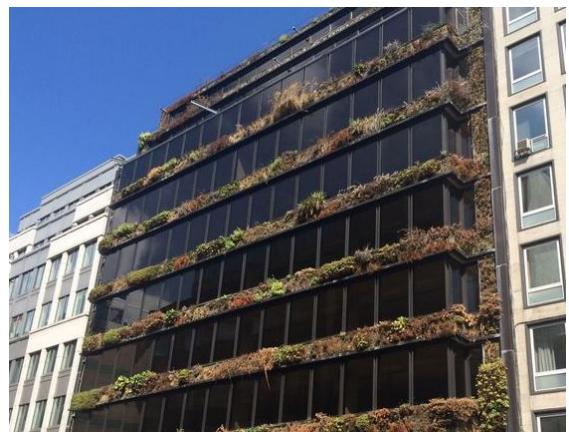


Figure 2.16 – Mur végétal rue Belliard après sa mort en 2015

L’entreprise VGTEX située à Gembloix a également développé un système felt-layers. Il consiste à coller une membrane PVC directement sur la façade. Cette membrane assure l’étanchéité et peut être installée sur n’importe quel type de support et même directement sur l’isolant. Un feutre hydrophile est ensuite disposé sur la membrane et sert de substrat. Il a une grande capacité de rétention (jusqu’à 1000% de son poids). Les graines sont ensuite intégrées au substrat manuellement avant la pose ou par hydroseeding (voir figure 2.18). Cette technique consiste à bombarder ce substrat d’un mélange de semences et de colle végétale. Certaines d’entre elles germeront ensuite et se développeront pour couvrir la façade. Les espèces sélectionnées sont des espèces méditerranéennes adaptées aux milieux rochers (substrat et réserve en eau limités). Enfin, des grilles 2D et 3D assurent l’ancrage des végétaux et la fixation de la couverture végétale. La figure 2.17 présente le système VGTEX. Les figures 2.19 et 2.20 sont des exemples de réalisation de façades végétalisées par l’entreprise VGTEX.



Figure 2.17 – Système VGTEX



Figure 2.18 – Substrat hydrophile contenant les semences

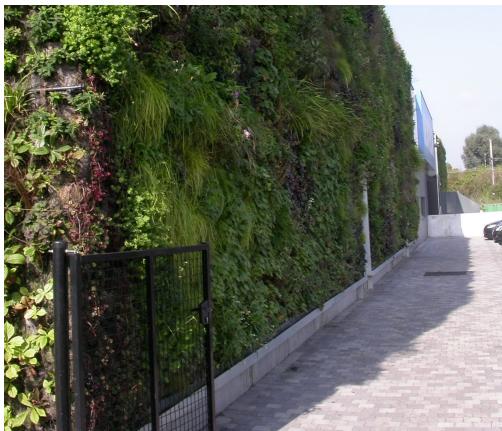


Figure 2.19 – Mur végétal à Mons



Figure 2.20 – Façade végétalisée à Anvers

2.3 Avantages

2.3.1 Esthétique et bien-être

On ne compte plus les études ou les revues bibliographiques étudiant l'impact du contact avec la nature sur le bien-être psychologique des citoyens [Bratman et al., 2019] [Dean et al., 2018] [Cox et al., 2017] et bien d'autres. Les espaces verts aident l'Homme à se ressourcer et contribuent à sa bonne santé mentale. [White et al., 2013] démontre que les individus vivant dans des villes comportant beaucoup d'espaces verts sont plus heureux et souffrent moins de détresse mentale. La nature a également un impact positif sur la santé mentale en diminuant l'anxiété [Dean et al., 2018] et en favorisant une attitude positive [Bratman et al., 2015] .

Les espaces verts en ville ont également un impact positif sur les capacités cognitives des citoyens [Bratman et al., 2015][Stevenson et al., 2018] et sur leurs interactions sociales [Weinstein et al., 2015]. De plus, selon [Weinstein et al., 2015], le nombre de crimes est inversement corrélé avec la présence de nature dans un environnement.

2.3.2 Dépollution atmosphérique

Les façades végétalisées contribuent à améliorer la qualité de l'air en interceptant les particules fines [Paull et al., 2020], en prélevant certains polluants gazeux dans l'atmosphère comme le CO₂, le NO₂ et le SO₂ [Perini et al., 2013] et en décomposant certains polluants organiques dans leurs tissus ou dans le sol (Baker and Brooks, 1989 cité par [Rowe, 2011]). De plus, la couverture végétale va contribuer indirectement à la réduction de la quantité de polluants dans l'atmosphère en diminuant la température des surfaces. Par conséquent, le nombre de réactions photochimiques qui génèrent des polluants, comme

l'ozone, va diminuer [Rowe, 2011]. [Sternberg et al., 2010] et [Ottelé et al., 2010] ont démontré dans leurs études que le lierre grimpant (*Hedera helix L.*) était efficace pour capter les particules en suspension dans l'air. Il améliore la qualité de l'air et protège les façades des bâtiments contre l'effet de corrosion des polluants.

Installer des façades végétales est également un moyen de séquestrer du carbone. Les plantes vont absorber du dioxyde de carbone durant leur développement et le stocker dans leurs tissus et dans le substrat, contribuant ainsi à diminuer la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. [Marchi et al., 2015] ont élaboré un modèle dynamique afin d'estimer la séquestration du carbone par la couverture végétale d'un LW. Le modèle a calculé une absorption de 0,44 à 3,18 kg CO_{2eq}/m² par an par la biomasse.

2.3.3 Diminution du coût en énergie des bâtiments et réduction de l'effet îlot de chaleur

La capacité des façades végétalisées à réduire la consommation en énergie des bâtiments est l'un des aspects les plus étudiés dans la littérature. En effet, les façades végétales agissent comme des systèmes passifs pour diminuer les apports calorifiques des bâtiments via plusieurs processus (Perez et al., 2011 cité par [Coma et al., 2014]). Tout d'abord, les plantes vont intercepter le rayonnement solaire et créer des zones d'ombres. Ensuite, la couverture végétale et le substrat vont constituer des couches isolantes supplémentaires. Lorsqu'une lame d'air est présente entre le mur et la couverture végétale, elle va générer un microclimat caractérisé par une température plus faible et un taux d'humidité relative plus élevé [Pérez et al., 2011]. Les plantes vont également diminuer la température de leur environnement proche en réalisant l'évapotranspiration durant laquelle elles vont convertir l'énergie captée en chaleur latente [Koyama et al., 2013]. [Stec et al., 2005] annoncent dans leur article que les plantes transforment environ 60% du rayonnement absorbé en chaleur latente. La capacité des façades végétales à diminuer la température de l'air ambiant permet d'endiguer l'effet îlot de chaleur [Shafiee et al., 2020]. En effet, la présence de zones végétalisées permet de créer des îlots de fraîcheurs en ville [Fahed, 2018]. De plus, la couverture végétale va faire office de barrière contre le vent en réduisant sa vitesse ce qui va affecter la résistance thermique du bâtiment et par conséquent, son efficacité [Perini et al., 2011a]. Elle va donc constituer un élément d'isolation supplémentaire et permet de réduire la consommation liée au chauffage en hiver.

2.3.4 Isolation phonique et réduction du bruit

Les façades végétales ont la capacité d'améliorer le confort acoustique en absorbant les ondes sonores. Elles sont particulièrement intéressantes à mettre en place dans les centres urbains afin de diminuer les bruits liés au trafic routier et à l'activité importante de ces lieux. Selon [Davis et al., 2017], le substrat joue un rôle beaucoup plus important dans l'absorption du bruit en se comportant comme un matériau poreux. Il absorbe mieux le bruit dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences. Sa capacité à absorber les ondes sonores dépend de son épaisseur, sa porosité et sa teneur en eau [Geetere, 2016].

Par conséquent, les LW sont plus performants que les GF. Néanmoins, le feuillage des végétaux joue également un rôle dans l'absorption des ondes sonores, surtout dans les fréquences élevées où la diffusion est importante [Aylor, 1972]. Le potentiel des GF en terme de réduction de la gène acoustique reste cependant limité étant donné qu'il faudra attendre que la couverture végétale atteigne une certaine surface et une certaine densité avant de pouvoir avoir un effet notable sur la réduction du bruit.

2.3.5 Protection de l'enveloppe du bâtiment

La couverture végétale va former une protection de l'enveloppe du bâtiment. Tout d'abord, elle va protéger la façade du bâtiment contre les polluants atmosphériques corrosifs qui pourraient l'endommager [Sternberg et al., 2010]. Ensuite, elle va protéger la façade contre les dégâts occasionnés par les intempéries (pluie, grêle, etc.). De plus, la couverture végétale protégera la façade du rayonnement solaire et des rayons ultraviolets [Grant and Heisler, 1996]. Enfin, elle constituera un rempart contre toute agression physique en protégeant le mur contre les dégradations volontaires comme les graffitis ou autre acte de vandalisme. Les façades végétales contribuent donc à étendre la durée de vie du bâtiment et à réduire les coûts de maintenance [Perini et al., 2011b].

Les GF sont parfois affublées à tort d'une mauvaise réputation. En effet, selon certaines croyances, certaines plantes grimpantes comme le lierre seraient responsables de dégâts sur les façades en s'immisçant dans les joints ou les fissures. En réalité, le lierre ne cherche pas à s'immiscer dans les fissures ou dans les joints. Il se contente de grimper à la façade à l'aide de ses racines adventives spécialisées en crampons. Néanmoins, il est possible que le lierre ou d'autres plantes grimpantes occasionnent des dégâts à la façade si celle-ci est déjà en mauvais état. C'est pourquoi il est conseillé d'effectuer un ravalement de façade avant d'y faire grimper des plantes ou d'opter pour une IGF. De manière générale, il est tout de même conseillé de rafraîchir la façade avant d'installer une façade végétale, peu

importe la technologie choisie, car l'entretien de la façade sous la couverture végétale ne pourra plus être effectué.

2.3.6 Interception des pluies et diminution du ruissellement

Les plantes qui composent les façades végétales vont contribuer à diminuer le ruissellement en interceptant les précipitations. Une partie de l'eau interceptée finira par retomber au sol mais une autre partie restera retenue par la végétation. Cette eau sera ensuite évapotranspirée et ne contribuera donc pas au ruissellement de surface. Le substrat va également retenir une partie des précipitations qui sera disponible pour les plantes, diminuant ainsi les besoins en irrigation. Dans son article, [van de Wouw et al., 2017] démontre que les LW contribuent à diminuer le ruissellement en interceptant l'eau de pluie et en la rejetant à débit régulé, lorsque les événements pluvieux ne sont pas trop intenses.

2.3.7 Biodiversité

Les façades végétales contribuent au développement de la biodiversité dans les espaces urbains [Madre et al., 2015] en hébergeant une faune et une flore riche et diversifiée. Ces aménagements peuvent intégrer le maillage vert en jouant le rôle de corridor pour le réseau écologique [IBGE, 2007], et ainsi augmenter la capacité de migration de la flore et de la faune (White, 2008 cité par [Ellis, 2013]). Ils fournissent de la nourriture et servent de refuge à de nombreuses espèces d'insectes, araignées, oiseaux et escargots [Chiquet, 2014]. Le type de façade, le substrat et les plantes sélectionnées ont une grande influence sur les espèces qui les fréquentent et sur leur potentiel écologique. C'est pourquoi ce point sera abordé plus en détail dans la suite du mémoire (parti XXX).

2.4 Inconvénients

2.4.1 Irrigation

L'inconvénient majeur des façades végétales est leur consommation en eau pour l'irrigation des plantes. L'installation d'un LW nécessite obligatoirement l'installation d'un réseau d'irrigation afin d'assurer la bonne santé des plantes. Sans celui-ci, le substrat se dessécherait en quelques jours entraînant la dessiccation et la mort des végétaux. Le réseau d'irrigation est habituellement raccordé à l'eau courante. C'est la manière la plus simple et elle permet de s'assurer d'avoir toujours de l'eau disponible pour les plantes. Cependant, ce n'est pas la manière la plus économique et écologique. Ce système consomme énormément d'eau potable. Par ailleurs, les GF ne requièrent pas toujours un système d'irrigation

lorsque les plantes sont plantées en pleine terre. Par contre, il est conseillé d'en installer un lorsqu'elles sont plantées dans des jardinières. Cela facilite la maintenance de l'ouvrage et permet de s'assurer que les plantes sont toujours dans des conditions optimales de croissance.

2.4.2 Fertilisation

Tout comme l'irrigation, la fertilisation est une étape indispensable à la survie des végétaux. Dans la majorité des cas, les plantes disposent d'une quantité limitée de substrat et par conséquent, d'un quantité limitée d'éléments nutritifs [van de Wouw et al., 2017]. Il faut donc régulièrement effectuer un apport de nutriments afin de s'assurer que les plantes n'aient aucune carences et se développent normalement. Un système de fertilisation est souvent intégré au système d'irrigation afin de faciliter cette étape. On parle alors d'un système de ferti-irrigation. Les nutriments dont les plantes ont besoin pour se développer sont dissous dans l'eau utilisée pour irriguer les plantes.

2.4.3 Entretien

L'entretien des façades végétales est indispensable afin de s'assurer de la bonne santé des végétaux et du bon développement de la couverture. Par conséquent, il faut régulièrement s'assurer que le système de ferti-irrigation fonctionne bien et que le substrat présente les caractéristiques idéales pour la croissance des plantes. Il est parfois nécessaire de remplacer des végétaux, des éléments du système d'irrigation ou une partie du substrat. La taille des végétaux est généralement effectuée une à plusieurs fois par an, en fonction de leur stade de croissance, afin de contrôler l'expansion de la couverture végétale. Si les espèces installées sont des plantes au feuillage caduc, il faudra ramasser les fanes en automne. La fréquence et la nature de l'entretien vont différer en fonction de la technologie installée.

2.5 Comparaison des différentes technologies

La comparaison des différentes technologies va se baser sur différents critères considérés comme les plus importants par l'entreprise. Certains avantages précédemment cités, comme l'effet cooling ou l'interception des pluies, ne seront pas pris en compte, même si le type de technologie va fortement influencer la performance de ces avantages.

2.5.1 Contraintes d'installation

Le critère des contraintes d'installation est déterminant dans le choix d'une technologie. Si le bâtiment n'est pas adapté à un système, il faudra s'orienter vers un autre à moins d'adapter le bâtiment si cela est possible mais cette tâche est généralement très onéreuse.

2.5.1.1 Adaptation à l'architecture du bâtiment

Pour pouvoir installer une DGF, il faut disposer d'une façade aveugle ou peu vitrée en bon état. En effet, la couverture végétale ne peut pas être installée sur des façades fortement vitrées car elle risquerait de détériorer les châssis et empêcherait l'usage des fenêtres. De plus, les plantes grimpantes ont besoin d'une surface un minimum rugueuse pour pouvoir grimper le long de la façade. Il est donc possible de contrôler l'expansion de la couverture végétale en la taillant et en disposant un revêtement lisse aux abords des surfaces à préserver afin d'empêcher l'ancrage des végétaux (sur le tableau des fenêtres par exemple).

Si on veut installer un GF sur une façade vitrée, il est préférable d'opter pour une IGF. Celles-ci ont très peu de contraintes d'installation. La façade végétale étant séparée de la façade du bâtiment, elle ne dépend pas de l'architecture de celui-ci. La couverture végétale peut donc s'étendre partout où la structure d'accroche est présente, y compris devant les fenêtres. Un ravalement de façade n'est pas obligatoire étant donné que les plantes ne grimpent pas le long de celle-ci mais il reste conseillé de couvrir une façade en bonne état car son entretien sera difficile une fois la couverture végétale installée.

Les LW sont des structures modulables réalisées sur mesure. Elles peuvent donc s'accommoder des contraintes du bâtiment sur lequel elles sont installées. Elles peuvent aussi bien être implantées sur une façade aveugle que sur une façade vitrée. Néanmoins, les modules doivent être installés sur une surface pleine, ils ne peuvent recouvrir les fenêtres ou autres ouvertures. Afin de pouvoir profiter des avantages de la couverture végétale, il est préférable d'installer ce type d'infrastructure sur des façades qui ne comportent pas trop d'ouvertures. De plus, les surfaces vitrées compliquent l'installation, étant donné qu'il faut les contourner et travailler sur mesure. Par conséquent, le coût d'installation sera plus important.

2.5.1.2 Poids de la structure

Le poids des DGF ne constitue généralement pas une contrainte et peut être supporté par la grande majorité des bâtiments. Pour ce qui est des IGF, la charge est un peu

plus importante. Il faut prendre en compte le poids du support, la charge ajoutée par les précipitations ainsi que la charge du vent sur les végétaux et la structure de support. La charge du support dépend évidemment de sa nature (de 1 à 50 kg/m²)³. La charge ajoutée par les précipitations vaut 2 x le poids des plantes (de 10 à 25 kg/m²) si le feuillage est caduque et 3 x si le feuillage est persistant⁴. Le vent , en fonction de son origine et de son intensité, peut causer un arrachement de la façade végétale. Il faut s'assurer que les fixations soient adaptées afin d'éviter des dégâts sur le bâtiment. Si les plantes grimpantes sont disposées dans des jardinières accrochées à la façade, le poids va représenter une contrainte beaucoup plus importante. La société Le Prieuré propose ce type de solution et annonce un poids à CME de 383 kg/m² uniquement pour la jardinière ce qui en fait le système de façade végétalisée le plus lourd.

Par ailleurs, le poids représente généralement une contrainte importante des LW, à l'exception de la technologie felt-layers. La structure est beaucoup plus importante et il faut ajouter le poids à CME du substrat. Il est impératif que les fixations résistent à l'arrachement et que le bâtiment soit capable de reprendre les charges de l'ouvrage. Si ce n'est pas le cas, il faut reprendre les charges d'une autre manière en ajoutant des fondations et une structure pour les reprendre, ce qui augmente le coût d'installation. Par exemple, les systèmes des sociétés Le Prieuré et Soprema pèsent respectivement 150 et 80 kg/m² à CME. Ces sociétés ont opté pour un substrat organo-minéral. Les panels utilisant un substrat organique comme de la sphagnum sont plus légers. La technologie "planter-boxes" est également assez contraignante au niveau du poids. La combinaison des jardinières en acier et du substrat organo-minéral en fait probablement la technologie la plus lourde. Par ailleurs, les LW felt-layers présentent l'avantage d'être plus léger. Par exemple, l'entreprise VGTEX annonce un poids de 25 kg/m² pour son système.

2.5.2 Coût

Le coût global d'une technologie comprend les coûts d'installation, de maintenance, d'entretien et de fin de vie.

2.5.2.1 Coût d'installation

Plusieurs paramètres vont influencer le coût d'installation. L'accessibilité du bâtiment, la surface de la façade à couvrir, l'architecture du bâtiment, les matériaux choisis, etc.

3. IBGE

4. idem

Le coût d'installation au mètre carré décroît généralement lorsque la surface à couvrir augmente.

Les GF sont peu coûteuses à mettre en oeuvre. Le coût d'installation est faible si les végétaux sont plantés directement en pleine terre et qu'ils ne nécessitent pas de structure pour grimper le long de la façade. Si la plantation en pleine terre n'est pas envisageable, il faut disposer les plantes dans des jardinières et cela augmente le coût d'installation. Par ailleurs, certaines plantes grimpantes peuvent occasionner des dégâts sur un mur en mauvais état en s'infiltrant dans les fissures déjà présentes. Une rénovation de la façade est parfois nécessaire et implique une augmentation du coût d'installation.

Selon l'IBGE, le coût d'installation HTVA pour une DGF varie entre 0,16 et 1,6€ / m². Ces chiffres dépendent bien évidemment des plantes sélectionnées, de leur stade de croissance, et de la taille maximale des végétaux. Prenons l'exemple d'une façade en lierre. Celui-ci peut atteindre 25 m de hauteur. Si on plante 3 pieds de lierre à 5€ (substrat de plantation compris) par mètre linéaire, le coût d'installation pour une surface de 25m² est donc de 15€ ce qui équivaut à 0,6€ / m².

Les IGF ont un coût d'installation plus important étant donné qu'il faut ajouter le coût de la structure servant de guide pour la croissance des plantes, ainsi que son installation par des professionnels. Le choix de la structure de support influence le coût d'installation. Ces structures sont généralement composées de câbles et/ou de barres en inox accrochés à la façade grâce à des entretoises.

Le prix de la structure d'accroche varie entre 20 et 60 €/mm² en fonction de la taille de la façade à couvrir et du type de maillage sélectionné⁵⁾

Les LW sont des structures beaucoup plus complexes que les GF et sont constituées de beaucoup plus de matériaux. Leur installation est par conséquent beaucoup plus complexe et doit être réalisée par des professionnels. C'est pourquoi le coût d'installation est beaucoup plus élevé. Il variera également en fonction de la technologie choisie, de la surface à couvrir et des contraintes architecturales du bâtiment. Il décroît lorsque la surface à couvrir augmente. La technologie panels est la plus chère. Le prix dépend également du type de substrat. La sphaigne est moins chère que les substrats organo-minéraux. Par l'exemple, l'entreprise Vivagreen annonce un coût d'installation allant de 550 à 1000 €/m² HTVA. La société Plantdesign, qui utilise de la sphaigne comme substrat, annonce quant

5. Source : IBGE, Carl Stahl (voir annexes figures 5.1 et 5.2

à elle un coût d'installation se situant entre 400 et 500 €/m² HTVA. La technologie felt-layers est la moins chère des LW. L'entreprise VGTEX annonce un coût d'installation allant de 250 à 450 €/m² HTVA.

2.5.2.2 Coûts de maintenance

Les coûts de maintenance représentent les coûts liés aux opérations de maintien de la couverture végétale, à savoir les consommations en eau et en nutriments pour l'irrigation et la fertilisation des plantes.

Les GF dont les plantes sont enracinées en pleine terre et disposent d'une quantité importante de substrat ne génèrent aucun coût de maintenance. En effet, les végétaux sont capables de se développer en profitant des réserves en eau et en nutriments du sol. Lorsque les plantes sont installées dans des jardinières ou que leurs réserves en nutriments et en eau sont limitées, il est nécessaire de les irriguer et de les fertiliser, ce qui augmente le coût de maintenance. Néanmoins, afin de limiter ces derniers, l'irrigation et la fertilisation peuvent se faire en utilisant des ressources disponibles gratuitement comme l'eau de pluie ou des déchets verts compostés.

Les LW ont une consommation élevée en eau et en nutriments car même si les substrats sont conçus pour avoir une bonne capacité de rétention, leur quantité est limitée. C'est pourquoi cette technologie possède un coût de maintenance élevé. La consommation en eau et en nutriments dépendra du produit de LW sélectionné. Le système felt-layers fonctionne sur base d'un principe hydroponique et est donc constamment irrigué et fertilisé. Les LW "panels" utilisant un substrat organo-minéral consomment généralement moins d'eau que ceux utilisant un substrat organique comme la sphagnum. Le système VIVAGREEN de la société Soprema consomme 1L / m² par jour, alors que le système de la société Plantdesign utilisant de la sphagnum comme substrat consomme entre 1 et 2 L / m² par jour. Les modules GABION de la société Le Prieuré consomme quant à eux à peine 0,5 L / m² par jour car l'épaisseur de substrat organo-minéral est plus importante.

La teneur en eau du substrat est pilotée par un système automatisé qui reçoit les mesures prises par des sondes implantées dans le substrat. De cette manière, le système est capable d'optimiser l'irrigation. Certains systèmes se basent sur les données météorologiques pour doser l'irrigation. Dans certains cas, les données sont également envoyées à l'entreprise installatrice afin de vérifier que tout fonctionne parfaitement. Si le système présente un problème, comme une fuite ou une électrovanne défectueuse, l'entreprise en est directement informée et peut agir rapidement afin de minimiser les dégâts.

2.5.2.3 Coûts d'entretien

Les GF nécessitent peu d'entretien. Hormis une taille pour contrôler l'expansion de la couverture végétale et un palissage si cela s'avère nécessaire, aucune autre opération d'entretien ne doit être effectuée à l'exception du ramassage des fanes si des plantes au feuillage caduque ont été sélectionnées. Si un réseau d'irrigation est installé, il faudra le contrôler régulièrement et vider les gouttières afin de s'assurer qu'elles ne s'encombrent pas. Pour les façades peu accessibles ou de grande hauteur, les coûts d'entretien seront plus importants étant donné qu'il faut faire appel à des cordistes ou utiliser une nacelle au sol ou en toiture.

Les LW, quant à eux, nécessitent une attention particulière en matière d'entretien afin de vérifier que tout le système fonctionne de manière optimale d'une part pour optimiser la consommation d'eau, et d'autre part pour s'assurer que le substrat présente les caractéristiques nécessaires en terme d'humidité et de nutriments pour le bon développement des végétaux. L'entretien des LW est souvent pris en charge par les sociétés installatrices et font l'objet d'un contrat avec celles-ci. Le coût d'entretien varie en fonction des caractéristiques du projet (hauteur, surface, accessibilité, système, etc.). Les entreprises pilotent les systèmes d'irrigation à distance. Au moindre problème, elles sont averties et peuvent rapidement entrer en oeuvre afin de résoudre la situation.

2.5.2.4 Coûts de fin de vie

Les coûts de fin de vie concernent le démontage de la façade végétale et la gestion des déchets. Cette partie du coût global est prise en compte car le propriétaire pourrait vouloir retirer la couverture végétale de son bâtiment.

Les GF ont un coût de fin de vie très faible. Pour ce qui est des DGF, il suffit de couper les plantes grimpantes à la base de la tige et de les laisser mourir. Une fois mortes, les plantes se décrocheront de la façade sans mal. Cette opération ne nécessite pas l'intervention de professionnels et peut être réalisée par le particulier lui-même. Il est possible que les plantes radicantes laissent des traces sur la façade. Un nettoyage de celle-ci est donc parfois nécessaire afin de retrouver un bâtiment propre.

Le démontage d'une IGF est similaire à celui d'une DGF. Il suffit de tailler les plantes là où elles s'accrochent à la structure de support. Celle-ci peut ensuite être démontée et réutilisée ou recyclée. En effet, les supports des IGF sont souvent constitués d'aluminium, qui est l'un des matériaux se recyclant le mieux.

Les LW ont un coût de fin de vie plus élevé. Tout d'abord, leur démontage est beaucoup plus fastidieux et doit se faire par des professionnels. Ensuite, la quantité de matériaux les constituant étant beaucoup plus importante, la quantité de déchets l'est tout au moins. Néanmoins, ces déchets sont recyclables étant donné qu'il s'agit principalement de substrat organique, matériaux plastique et aluminium. En revanche, les feutres utilisés dans les LW felt-layers ne peuvent pas être recyclés.

2.5.2.5 Coût global

Les GF ont un coût global assez faible étant donné la simplicité de leur structure, leur faible consommation en eau et en nutriments, ainsi que la facilité de démontage et la recyclabilité des matériaux la composant. Les LW en revanche ont un coût global plus élevé. Ce sont des structures complexes qu'il faut faire installer et démonter par des professionnels. De plus, elles consomment beaucoup d'eau et de nutriments.

2.5.3 Esthétique

L'aspect esthétique est un critère délicat à prendre en compte car il dépend de plusieurs paramètres. Tout d'abord, les goûts et les couleurs dépendent de chacun de nous. Il serait inapproprié d'émettre un jugement de valeur en déclarant une technologie plus belle que les autres. Ensuite, le rendu esthétique d'un ouvrage va dépendre de son environnement et de sa mise en valeur.

Néanmoins, il est possible de comparer certains critères ayant une influence sur le rendu esthétique de l'ouvrage, comme le temps de couverture ou la diversité des plantes disponibles.

2.5.3.1 Diversité des plantes disponibles

La palette de végétaux adaptés aux GF est assez restreinte. Dans le cas des DGF, il faut sélectionner des plantes radicantes. Pour ce qui est des IGF, il faut sélectionner des espèces volubiles ou à vrilles. Les plantes radicantes peuvent également être sélectionnées mais il faudra les palisser à la main autour de la structure d'accroche au fur et à mesure de leur croissance.

La palette de végétaux disponible pour les LW est beaucoup plus étendue que pour les GF étant donné que le choix n'est pas restreint aux plantes grimpantes. On peut donc se permettre plus de fantaisies et même incorporer des plantes tropicales, pour autant qu'elles soient adaptées au climat local. Il faudra néanmoins veiller à ce que les plantes soient dans

les conditions de croissance adaptées en leur fournissant la quantité d'eau et de nutriments nécessaire. Toutefois, afin de minimiser les coûts de maintenance et d'optimiser l'intérêt pour la biodiversité, les plantes sélectionnées sont souvent des plantes locales adaptées au climat et ne nécessitant pas beaucoup de ressources pour se développer.

2.5.3.2 Temps de couverture

Les GF ont un temps de couverture élevé étant donné qu'il faut attendre que les plantes grandissent à leur rythme pour couvrir la surface désirée. Ce temps de couverture va évidemment dépendre de la surface à couvrir, du stade de croissance des végétaux lorsqu'ils sont mis en place et de leur taux de croissance. Ces paramètres doivent être considérés lors de la sélection des espèces. Si on veut accélérer le processus de couverture, on peut accrocher des jardinières à des hauteurs intermédiaires. Cette astuce permet également de prolonger le couvert végétal au-delà de la hauteur maximale de croissance des plantes sélectionnées. C'est d'ailleurs ce qu'à fait Patrick Blanc pour le projet "Le nouvel" à Kuala Lumpur. Il a planté pas moins de 273 espèces de lianes dans des jardinières suspendues aux deux tours de l'immeuble (voir figure 2.21).

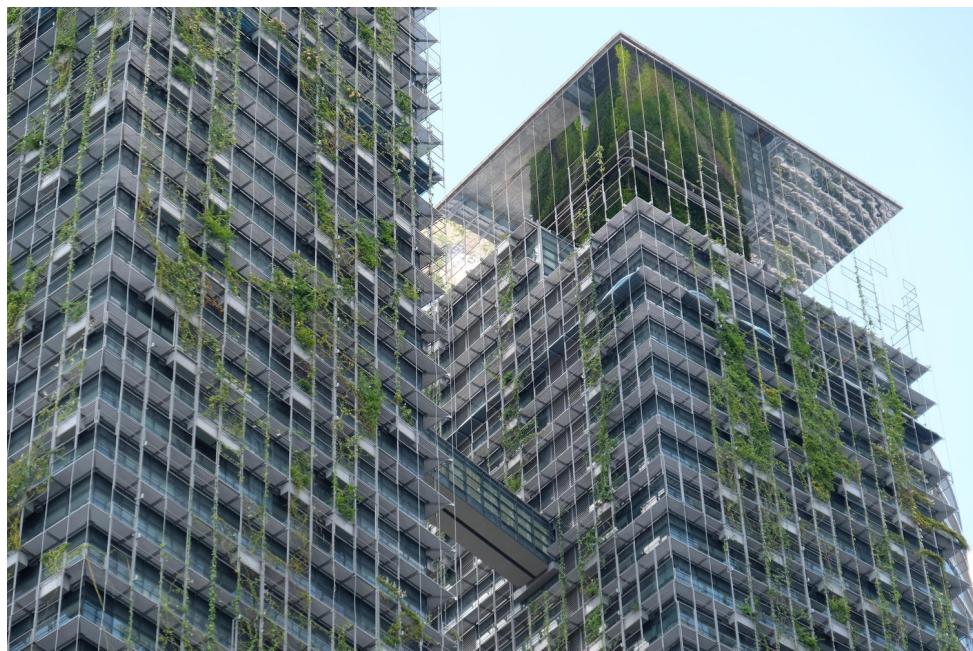


Figure 2.21 – "Le Nouvel" Kuala Lumpur

Les LW "panels" présentent l'avantage de couvrir immédiatement la surface à couvrir. La couverture végétale est beaucoup plus dense et les éléments la constituant sont souvent précultivés en pépinière, ce qui permet d'avoir un rendu esthétique dès l'installation de l'ouvrage avec taux de couverture allant de 80 à 100%. D'autre part, les LW felt-layers, soil-

cells et planter boxes ne présentent pas un taux de couverture aussi élevé à l'installation. Les jeunes plantes sont disposées dans le feutre ou dans le substrat préalablement mis en place sur la façade. Néanmoins, la densité de plantes assure une couverture rapide.

2.5.4 Potentiel écologique

Le potentiel écologique exprime la mesure dans laquelle la façade végétalisée contribuera à la biodiversité locale. On parle de potentiel car la plus-value en terme de biodiversité dépendra de la gestion de la couverture végétale ainsi que de l'environnement dans lequel elle se trouve.

Le potentiel écologique des GF est faible au début et évoluera au fur et à mesure de la croissance de la couverture végétale. Leur impact sur la biodiversité va dépendre des espèces installées. Il est préférable de travailler avec des espèces qui ont le plus d'interactions possible avec la faune locale. Les plantes pouvant servir d'abris aux oiseaux, insectes, araignées, et qui peuvent également leur fournir une source de nourriture comme du nectar ou des fruits. Le lierre par exemple, présente un très grand intérêt pour la biodiversité étant donné qu'il fleurit et fructifie en dehors des périodes de floraison et de fructification des autres plantes. Elle est parfois l'unique source de nourriture pour certains oiseaux et insectes durant certaines périodes de l'année. De plus, c'est une plante rustique au feuillage persistant qui résiste au gel et à la sécheresse et qui s'accorde très bien de toutes les expositions [Metcalfe, 2005]. Elle peut également grimper jusqu'à 30 mètres de haut. Toutes ces caractéristiques en font une plante idéale pour une façade végétalisée, d'autant plus qu'aucune structure d'accroche n'est nécessaire puisque c'est une plante radicante.

L'intérêt pour la biodiversité des LW dépend de la technologie utilisée et des espèces sélectionnées. Une partie significative des bénéfices écologiques de ces ouvrages dépend de la nature du substrat et de son accessibilité. En effet, les LW felt-layers ont un impact moins important sur le développement de la biodiversité que les autres technologies de LW étant donné que leur substrat synthétique n'a pas d'intérêt pour la faune habituellement présente dans les substrats naturels. En revanche, les technologies panels et planter boxes présentent plus d'intérêt à condition qu'elles utilisent un substrat organo-minéral qui reste accessible à la faune. De cette manière, la faune épigée et endogée présente dans les sols naturels peut s'épanouir dans les façades végétalisées.

2.5.5 Impact environnemental

2.5.5.1 Irrigation

L'irrigation va jouer un rôle important dans l'impact environnemental des façades végétalisées. Dans le cas des LW, les végétaux sont plantés sur un substrat vertical. Par conséquent, la gravité va avoir une grande influence sur la distribution de l'eau au sein de celui-ci. La composante horizontale du mouvement de l'eau engendrée par la diffusion est beaucoup moins importante que la composante verticale engendrée par la gravité [Pérez-Urrestarazu and Urrestarazu, 2018] ce qui rend le contrôle de l'homogénéité de la distribution en eau plus compliqué. C'est pourquoi il est important d'intégrer un nombre suffisant de goutteurs au réseau d'irrigation avec un faible espacement. Même si les substrats sont conçus pour avoir une bonne capacité de rétention, leur exposition au vent et au rayonnement solaire ainsi que leur faible épaisseur les rendent vulnérables à l'assèchement. La structure est donc constamment irriguée afin de maintenir des conditions de croissance idéales pour les végétaux. Le système d'irrigation est généralement raccordé au réseau d'eau courante de manière à s'assurer d'avoir toujours de l'eau disponible pour les plantes. Afin d'optimiser au mieux la consommation d'eau, le réseau est habituellement piloté par un ordinateur qui adapte la fréquence d'irrigation en fonction de la teneur en eau du substrat, mesurée par des sondes. Lorsqu'il est sec, l'irrigation se fait par faibles doses appliquées assez souvent afin de s'assurer que l'eau n'est pas perdue par écoulement gravitaire.

Les GF requièrent moins d'eau que les LW étant donné que les plantes grimpantes sont enracinées dans le sol ou dans des jardinières. Les plantes disposent donc d'une plus grande quantité de substrat et par conséquent, d'une plus grande réserve d'eau. Certaines GF ne nécessitent pas l'installation d'un réseau d'irrigation si les plantes sont enracinées dans le sol. Cela va dépendre du type de plante et de l'exposition de la couverture végétale. Si les précipitations ne suffisent pas à irriguer les plantes, l'arrosage peut se faire directement au pied des plantes. Sinon, un système d'irrigation est nécessaire mais il est nettement plus simple que les systèmes des LW. Il peut être moins précis et peut fonctionner sur base des informations météorologiques et non en fonction de mesures prises par des sondes implantées dans le substrat.

Il existe plusieurs stratégies afin de minimiser la consommation en eau de l'ouvrage et par conséquent, son empreinte environnementale. Comme expliqué précédemment, la méthode la plus simple est de valoriser l'eau de pluie. Celle-ci peut être récupérée et réutilisée lors de périodes sèches. Si cela est possible, un réservoir d'eau de pluie peut être installé

sur la toiture et l'irrigation peut être commandée, manuellement ou automatiquement en fonction des conditions météorologiques ou de la teneur en eau du substrat, à distance via l'ouverture d'une électrovanne. L'eau peut ensuite rejoindre les jardinières par écoulement gravitaire.

Intégrer des réserves d'eau directement dans les jardinières permettrait d'éviter l'installation d'une citerne et rendrait le système d'irrigation totalement autonome. Lors d'un épisode pluvieux, l'eau de pluie arrivant sur le toit peut rejoindre les jardinières via de simples gouttières et y être stocké. Cette eau peut ensuite être transférée au substrat via des mèches capillaires. L'entreprise Le Prieuré propose ce type de système pour les toitures végétales ainsi que pour les GF plantées dans des jardinières. La figure 2.22 présente le système de toiture stockante OASIS zéro rejet. Les jardinières fonctionnent sur base du même principe. Celles-ci disposent d'une réserve de 50L par jardinière.

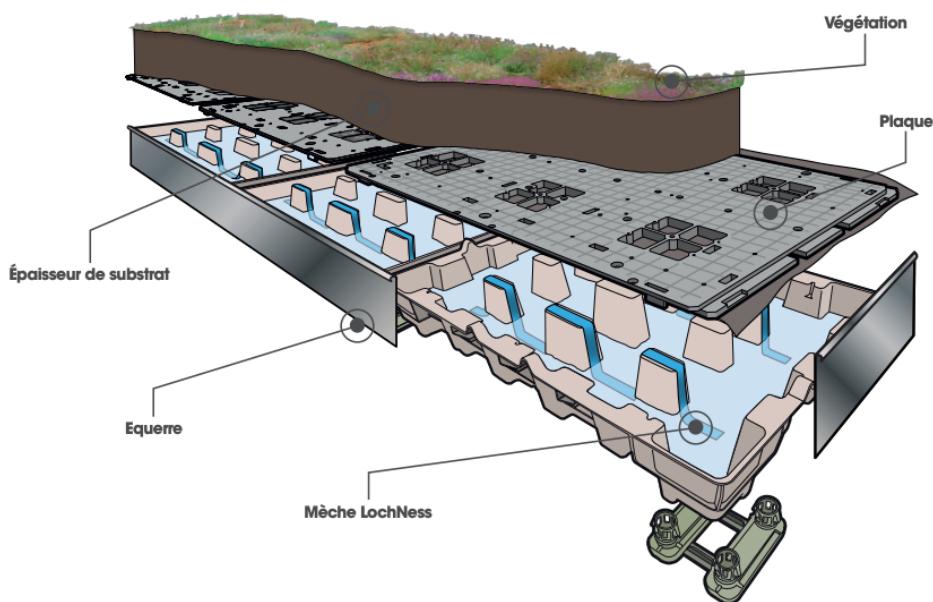


Figure 2.22 – Système OASIS de la société lePrieuré

Il est également possible d'utiliser les eaux grises du bâtiment en adaptant le réseau d'évacuation et le réseau d'irrigation. Cette manière d'irriguer la façade est assez onéreuse mais permettrait de valoriser ces eaux. Les espèces sélectionnées sont adaptées à ce système d'irrigation et les eaux sont préalablement filtrées. En fonction de la qualité de ces eaux et de la densité de solvant, il est parfois nécessaire de faire passer l'eau par une zone humide avant de la pomper pour l'irrigation. Un tel projet a déjà été réalisé par l'entreprise Le Prieuré et la façade est toujours viable plusieurs années après. Néanmoins, ce type

de solution est encore au stade de développement et demande des études approfondies, surtout lorsque l'objectif est de traiter les eaux grises grâce à la façade végétalisée.

2.5.5.2 Fertilisation

Les GF ne requièrent pas toujours un système de fertilisation lorsqu'elles sont plantées en pleine terre et n'alourdissement donc pas leur empreinte environnementale de ce point de vue-là. Néanmoins, lorsqu'elles disposent d'un volume restreint de substrat, il est nécessaire de fournir des nutriments aux végétaux afin de s'assurer de leur bon développement. Les apports en nutriments peuvent provenir d'engrais chimiques ou d'engrais organiques. L'utilisation d'engrais organiques, issus de la décomposition de matières organiques, réduit l'impact environnemental lié à la fertilisation. En effet, les procédés de production des engrais chimiques impliquent de devoir extraire certains minéraux et de réaliser toute une série de réactions chimiques pour obtenir des composés nutritifs sous une forme facilement assimilable par les plantes. Toutes ces opérations nécessitent des réactifs et de l'énergie. C'est la raison pour laquelle les engrais chimiques ont une empreinte environnementale plus importante que les engrais organiques.

2.5.5.3 Energie grise

En terme d'énergie grise, l'empreinte environnementale des GF sans supports et plantées en pleine terre est quasiment nulle. Cette empreinte s'alourdit si l'on dispose les plantes dans des jardinières et qu'un support de croissance est installé. Les supports sont généralement fabriqués en aluminium. Si cet aluminium est issu d'une production primaire, son empreinte environnementale est de 18,3 kg eq/CO₂⁶. En revanche, s'il est issu d'une production secondaire, elle n'est que de 0,619 kg eq/CO₂⁷. Le type de production de l'aluminium va donc énormément influencer l'impact environnemental lié à l'énergie grise.

De manière générale, les LW produisent plus d'énergie grise étant donné que ce sont des structures plus complexes composées de beaucoup plus de matériaux. Leur structure est généralement composée d'aluminium, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé. L'empreinte environnementale de la production d'acier inoxydable est de 4,43 kg eq/CO₂⁸ et celle de l'acier galvanisé est de 2,7 kg eq/CO₂⁹. Le réseau d'irrigation est généralement

6. Source : ecoinvent 3

7. idem

8. idem

9. Source : industry data 2.0

constitué de tuyau en polyéthylène haute densité dont la production a une empreinte environnementale de 2,29 kg eq/CO₂¹⁰.

2.5.5.4 Recyclabilité

Les GF ont l'avantage d'être recyclables. La matière végétale peut être broyée et utilisée comme biomasse pour générer de l'énergie. Les structures en aluminium des IGF sont également entièrement recyclables puisque ce matériau peut être réutilisé à l'infini sans aucune perte de qualité. Son recyclage consomme 95% d'énergie en moins que sa production primaire et permet d'éviter un rejet de plus de 130 millions de tonnes de CO₂ par an dans l'atmosphère.¹¹.

Le substrat des technologies LW panels, soil-cells et felt-layers est recyclable. La biomasse comme la sphaigne peut être incinérée pour produire de l'énergie. Le substrat minéralo-organique peut être dispersé dans l'environnement en l'étalant sur des terrains. En ce qui concerne la technologie felt-layers, le feutre textile ne peut pas être recyclé. Son utilisation comme substrat lui impose d'être constamment irrigué, fertilisé ce qui le rend inutilisable pour un quelconque projet de recyclage.

2.5.5.5 Durabilité

Les GF sont des structures durables. Leur durée de vie peut s'étendre jusqu'à plus de 50 ans si la maintenance et l'entretien sont correctement effectués. Certaines façades en lierre peuvent même atteindre une durée de vie de plus de 100 ans (voir figure 2.23). Les structures en aluminium des IGF sont également durables étant donné que l'aluminium est un matériau très résistant à l'usure. En effet, 75% de tout l'aluminium produit est encore utilisé activement¹². En revanche, les LW felt-layers ont une durée de vie beaucoup plus limitée. Selon [Perini et al., 2013], la durée de vie moyenne d'une façade réalisée avec la technologie felt-layers de 10 ans contre plus de 50 ans pour les systèmes planter boxes ou les GF.

10. Source : ecoinvent 3

11. Source : <https://recycling.world-aluminium.org/home/> consultée le 21/07

12. Source : <https://recycling.world-aluminium.org/home/> consultée le 21/07



Figure 2.23 – GF en lierre de plus de 100 ans sur un bâtiment allemand

2.5.5.6 Conclusion

L’empreinte environnementale des façades végétalisées dépendra principalement de la quantité de matériaux utilisés, de leur nature et de la manière dont sont réalisées les étapes d’irrigation et de fertilisation. Les GF ont une empreinte beaucoup moins importante que les LW puisqu’elles requièrent moins d’eau pour l’irrigation et sont composées de moins de matériaux.

2.5.6 Conclusion

Les différents systèmes ont tous des avantages et des inconvénients. Les GF présentent de meilleures performances au niveau de l’empreinte environnementale et du coût global de l’installation. Les LW ont quant à eux l’avantage de couvrir très rapidement la surface à végétaliser et ce avec une grande diversité de plantes adaptées. Elles permettent d’obtenir un rendu esthétique très vite. La technologie utilisée va donc dépendre des différents objectifs des projets. Ceux privilégiant l’aspect environnemental ou qui ont un budget restreint opteront pour une GF alors que les projets mettant l’esthétique en critère principal opteront pour un LW. D’autres critères que ceux présentés dans cette partie du mémoire peuvent être pris en compte en fonction des objectifs du projet. En effet, l’isolation du bâtiment, l’interception des eaux de pluie et bien d’autres avantages vont également dépendre de la technologie sélectionnée. Afin de faciliter la prise de décision quant au choix

du système le plus adapté pour un projet, un outil d'aide à la décision va être développé dans la suite du mémoire.

Chapitre 3

Intégration de façades végétalisées à des projets de rénovation ou de construction neuve

3.1 Certification BREEAM

Le BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) est une méthode d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments développée par le BRE (Building Research Establishment), organisme privé britannique de recherche dans l'impact environnementale des bâtiments. C'est l'équivalent du CSTC en Belgique. La méthode d'évaluation BREEAM est une référence au niveau mondial. Elle permet d'évaluer la performance environnementale d'un bâtiment sur base de critères précis et comparables afin de pouvoir comparer différents projets. L'évaluation est basée sur des critères rassemblés en 9 domaines : Management, Confort et santé, Energie, Transports, Eau, Matériaux, Déchets, Terrain et écologie, Pollution. Un ou plusieurs crédits sont attribués lorsqu'un critère est rempli. Une fois l'évaluation terminée, un score BREEAM est attribué au projet.

Une des thématiques du domaine "Eau" concerne les équipements économes en eau. "Réduire la consommation d'eau potable pour l'arrosage des abords" constitue le critère à remplir pour satisfaire cette thématique qui rapporte un point. L'installation d'une façade végétale permet de satisfaire ce critère si l'eau de pluie est utilisée pour irriguer les plantes constituant la couverture végétale. Ou encore si la façade et les plantent qui la constituent ne nécessitent pas d'irrigation et se contentent des précipitations.

L'implantation d'une façade végétalisée permet de contribuer à la validation de deux critères du domaine "Utilisation du terrain et écologie". Le premier fait partie de la théma-

tique "Mise en valeur de l'écologie du site". Une étude du site est réalisée par un écologue qualifié qui fait ensuite des recommandations pour optimiser la valeur écologique du projet. Un, deux ou trois crédits sont accordés pour le critère "Mise en oeuvre de mesures pour optimiser la valeur écologique du site" en fonction du pourcentage de recommandations mise en oeuvre (50, 75 ou 95%). Parmi ces recommandations peuvent figurer la végétalisation d'une façade ou d'un pan de mur afin d'améliorer le potentiel écologique du site, si l'architecture du bâtiment le permet.

Le second fait partie de la thématique "Impact à long terme sur la biodiversité". Deux crédits peuvent être accordés si un plan de gestion est constitué et si des mesures supplémentaires sont adoptées afin d'améliorer la biodiversité à long terme sur le site. L'intégration d'une façade végétale peut contribuer à satisfaire ce critère en faisant partie des mesures supplémentaires adoptées.

Le domaine "Pollution" comporte deux thématiques dans lesquelles figurent des critères pouvant être remplis par l'installation de façades végétales. La première thématique concerne le "Ruisseaulement de surface". Une façade végétalisée contribue à l'obtention d'un point pour le critère "Taux maximum de ruissellement" étant donné qu'elle constitue une mesure permettant d'atteindre un taux de ruissellement du site moindre par rapport à la situation avant projet. Un point pour le critère "Volume de ruissellement de surface" peut également être obtenu si l'ouvrage contribue à la limitation du débit de rejet du site.

La seconde thématique concerne "L'atténuation du bruit". "Eviter l'augmentation du bruit dans les zones sensibles (zones résidentielles, hôpitaux, réserves naturelles, écoles, etc.) aux alentours du projet (rayon de 800m)" est le critère à remplir pour obtenir un point. Intégrer une façade végétale dans un projet constitue une mesure d'atténuation du bruit et peut donc contribuer à l'obtention de ce point pour ce critère.

Le score final, exprimé en pourcentage, est calculé en additionnant les points accordés au projet tout en appliquant une pondération sur les différents domaines. L'intégration d'une façade végétale à un projet permet ou contribue à l'obtention potentielle de 9 points au total. Il existe quatre statuts différents en fonction du score obtenu. Le statut "Good" est obtenu à partir de 45%, "Very good" à partir de 55%, "Excellent" à partir de 70% et "Outstanding" à partir de 85%. Une partie de l'outil de calcul mis au point par l'entreprise est présenté dans les annexes (figure 5.3).

3.2 Ecopotentiel ou CBS du projet

L'écopotentiel et le CBS (Coefficient de Biotope par Surface) sont deux indicateurs qui permettent d'évaluer le potentiel de biodiversité d'un site. Le calcul de ces deux indicateurs se fait sur base d'un facteur de pondération, variant de 0 à 1, attribué à chaque surface en fonction de sa contribution à la biodiversité locale et de ses fonctions pour l'écosystème. L'écopotentiel ou le CBS du site est ensuite calculé en réalisant une moyenne des surfaces pondérées.

La différence entre ces deux indicateurs est leur précision. L'écopotentiel est plus performant que le CBS car il référence beaucoup plus de surfaces différentes. En effet, l'écopotentiel propose des facteurs de pondération pour 48 types de surface alors que le CBS n'en propose que 8. Le CBS est par conséquent beaucoup plus simple à calculer. L'utilisation des outils de calcul de cet indicateur ne nécessite aucune connaissance spécifique (voir annexes figure 5.5). Il a été développé dans le but d'être intégré dans le règlement régional d'urbanisme (RRU) en tant qu'outil réglementaire facilement utilisable et accessible à tous. L'écopotentiel est quant à lui plus évolué. Son utilisation n'est pas à la portée de n'importe qui car il faut savoir classer correctement les surfaces du site parmi les 48 types de surfaces proposés par l'outil (voir annexes figure 5.4). Il permet de donner une meilleure estimation du potentiel écologique d'un site. La notion de "potentiel" est importante car la performance écologique d'un espace vert va dépendre de son environnement et de sa gestion.

Les facteurs de pondération attribués aux murs végétaux et aux façades végétalisées sont respectivement de 0,2 et 0,5 pour le calcul de l'écopotentiel. Les murs végétaux correspondent aux LW et les façades végétalisées au GF. Le CBS ne fait pas la distinction entre les différents systèmes et attribue un facteur de pondération de 0,4 à toute surface de façade verte de plus de 1,8m de hauteur. Le calcul de ces indicateurs se base sur les superficies pondérées des différentes surfaces. Le score attribué à un LW ou une GF est calculé en multipliant le facteur de pondération par la largeur de l'ouvrage et par une épaisseur par défaut de 0,2 m. La hauteur de la couverture végétale n'est donc pas prise en compte ce qui tend à sous-estimer le potentiel écologique d'un site comportant des façades végétalisées.

3.3 Outil d'aide à la décision

3.3.1 Sélection d'un outil d'aide à la décision

Afin de faciliter la prise de décision dans le choix d'une technologie, un outil d'aide à la décision est mis au point dans le cadre de ce TFE en entreprise. Il doit être adapté à la situation et rester le plus simple possible afin de pouvoir être facilement compris et utilisé.

L'outil sélectionné est la matrice de décision. C'est un outil qui facilite la prise de décision en départageant toutes les alternatives prises en compte sur base d'un système de pondération. L'alternative avec le plus haut score sera celle qui répond au mieux aux objectifs du projet. Cet outil à l'avantage d'être très simple d'utilisation. En effet, la matrice se présente comme un tableau excel. Il suffit d'encoder les différentes valeurs dans le tableau pour obtenir un résultat. De plus, elle est facilement modifiable et peut être adaptée à n'importe quel projet.

3.3.2 Création de la matrice de décision

La première étape est d'identifier toutes les alternatives à prendre en compte. Dans le cas présent, il s'agit des différents systèmes de végétalisation de façade.

Il faut ensuite identifier les différents critères qui vont influencer le choix. Le coût, l'esthétique, les contraintes d'installation, le potentiel écologique et l'impact environnemental sont les critères retenus par l'entreprise pour les projets considérés dans le cadre de ce TFE. Ces critères peuvent évidemment évoluer en fonction des attentes et des envies du client.

L'étape suivante consiste à attribuer une pondération à ces critères en fonction de leur importance dans la prise de décision. Cette pondération dépendra des objectifs du projet. Certains accorderont une plus grande importance au budget alors que d'autres privilégieront les aspects environnementaux.

Une fois la pondération des critères effectuée, il faut noter chaque alternative en fonction de la manière dont elle remplit les différents critères. Cette note ne changera pas en fonction des différents projets à moins que les caractéristiques d'une alternative changent. Par exemple, la note attribuée pour le critère potentiel écologique peut varier en fonction des espèces qui constituent la couverture végétale.

3.3.3 Technologies retenues

Toutes les technologies présentées précédemment ont été retenues pour faire partie de la matrice de décision à l'exception de la technologie soil-cells car c'est la moins présente sur le marché. La technologie felt-layers, a quant à elle été retenue, même si son intérêt pour la biodiversité est limité et son empreinte environnemental importante. Elle a été conservée car c'est le système de LW le moins cher et qu'il peut être installé sur n'importe quel type de bâtiment. Les projets faisant recourt à ce système ont souvent pour objectif principal l'esthétique et non l'aspect biodiversité. La technologie panels est retenue en considérant un substrat organo-minéral. Le substrat en sphaigne présente moins d'intérêts écologiques et a une plus grosse empreinte environnementale.

3.3.4 Attribution des scores aux différentes technologies

Les scores attribués pour les différents critères sont basés sur la comparaison des technologies précédemment présentées. Les technologies sont notées de 1 à 4 en fonction de leur performance pour chaque critère, 4 représentant le score pour la meilleure performance.

3.3.4.1 Contraintes d'installation

Le critère des contraintes d'installation est le premier à prendre en compte. On ne peut pas installer un système sur un bâtiment non adapté. C'est pourquoi il est pris en compte avant tous les autres et ne fait pas partie de la matrice. Si le bâtiment comporte beaucoup de surfaces vitrées, il faudra opter pour une IGF. Le poids des structures est également déterminant. Le système choisi ne peut pas être plus lourd que la résistance aux charges du bâtiment. Si le bâtiment ne peut pas résister à une grosse charge, il faudra opter pour une GF ou reprendre les charges autrement.

Dans le cas d'une façade aveugle ou peu vitrée, tous les systèmes peuvent être installés et la matrice de décision va pouvoir identifier la technologie la plus adaptée au projet.

3.3.4.2 Coût

Les DGF sont les moins chers à mettre en oeuvre et obtiennent donc le score de 4. Les IGF se voient attribuer un score de 3 étant donné que leur structure de soutien augmente leur coût. Les LW felt-layers obtiennent le score de 2 étant donné que c'est la technologie LW la moins chère. Les systèmes planter boxes et panels sont les plus chers et sont donc notés au score de 1.

3.3.4.3 Esthétique

Les scores attribués au critère "esthétique" sont basés sur les critères de comparaison précédemment présentés, à savoir le temps de couverture et la diversité des plantes disponibles.

Les DGF ont un temps de couverture assez élevé et une palette de végétaux assez restreinte puisque seules les plantes grimpantes radicantes sont adaptées. C'est pourquoi le score de 1 lui est attribué pour ce critère. La technologie IGF se voit attribuer un score de 2 étant donné que des plantes grimpantes volubiles et radicantes peuvent être sélectionnées (à condition de palisser les plantes radicantes au fur et à mesure de leur croissance). Les technologies panels, planter boxes et felt-layers se voient attribuer la note de 4 puisque la palette de végétaux adaptés pour ces types de culture est beaucoup plus importante et le temps de couverture beaucoup plus rapide.

3.3.4.4 Potentiel écologique

Le potentiel écologique de la façade va dépendre des espèces sélectionnées et peut donc varier de 1 à 4. En faisant l'hypothèse que les espèces sélectionnées présentent un intérêt pour la biodiversité locale (fournissent abris et nourriture à la faune locale) et s'intègrent dans le réseau écologique pour combler ses lacunes, les systèmes DGF et IGF se voient attribuer un score de 3. En réalité, leur score lors de l'installation est de 1 et va augmenter jusqu'à 4 au fur et à mesure de leur croissance, c'est pourquoi le score présenté dans la matrice est 3. La technologie felt-layers présente quant à elle peu d'intérêt d'un point vue écologique puisque son substrat en matière synthétique ne peut contribuer au développement de la biodiversité locale. En revanche, les systèmes panels et planter boxes présentent un plus grand intérêt étant donné que leur substrat organo-minéral est plus proche des conditions naturelles et peut donc accueillir la faune endogée et épigée habituellement présente dans les sols. Ces systèmes se voient donc attribuer la note de 3.

3.3.4.5 Impact environnemental

L'impact environnemental des DGF est très faible. Le score attribué à cette technologie est donc 4. Celui attribué aux IGF est de 3 étant donné que la structure d'accroche alourdi l'empreinte environnementale. Les systèmes panels et planter boxes sont moins performants d'un point de vue empreinte environnemental et se voient donc attribuer la note de 2. Le système felt-layers est composé d'une membrane synthétique non recyclable qui alourdi son empreinte environnementale. Le score de 1 lui est donc attribué.

3.4 Projet Montoyer

3.4.1 Introduction au projet

Le projet Montoyer est un projet de rénovation d'un bâtiment construit dans les années 70, occupé par des bureaux, se situant rue Montoyer à Bruxelles. La rénovation du bâtiment a pour but la création d'étages supplémentaires et l'amélioration des performances énergétiques, écologiques et environnementales du bâtiment. En effet, le projet a pour but d'atteindre un CBS élevé et une certification BREEAM "outstanding". Pour ce faire, un écologue a fourni toute une série de recommandations dans le but de maximiser le potentiel écologique du site. Parmi ces recommandations figure l'installation de façades végétalisées. Les figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement le bâtiment dans la situation actuelle et la représentation 3D de la situation projetée (sans façades végétalisées).



Figure 3.1 – Situation actuelle du projet Montoyer



Figure 3.2 – Représentation 3D de la situation projetée du projet Montoyer

Comme le montre la figure 3.2, les façades du bâtiments sont fortement vitrées. Par conséquent, le critère des contraintes d'installation est décisif pour ce projet et la seule technologie adaptée à ce type de projet est une IGF. Plusieurs façades sont propices à l'installation de ces IGF. Tout d'abord, les façades exposées ouest-nord-ouest (ONO) et sud-sud-ouest (SSO) donnant respectivement sur la rue du commerce et sur la rue Montoyer. En plus de créer des zones d'ombres et de rafraîchir les bureaux, elles profitent d'une grande visibilité et contribuent à enjoliver le quartier. Elles sont installées à partir du 3ème étage car la zone est densément construite et l'immeuble est entouré d'autres grands immeubles. Les premiers étages ont donc été laissé sans végétation afin qu'ils puissent profiter d'un maximum de luminosité. Les figures 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 présentent respectivement les représentations 3D de la situation après projet, avant et après l'inté-

gration d'IGF sur les façades exposées SSO et ONO.



Figure 3.3 – Façade SSO avant l'intégration d'IGF



Figure 3.4 – Façade SSO après l'intégration d'IGF



Figure 3.5 – Façade ONO avant l'intégration d'IGF



Figure 3.6 – Façade ONO après l'intégration d'IGF

Les IGF seront constituées de plantes grimpantes enracinées dans des jardinières suspendues à la façade. Ces plantes se développeront le long d'une structure d'accroche disposée devant les fenêtres. Les IGF des étages 3-4-5-6 font 6m de haut et celle couvrant les 2 derniers étages fait 7m de haut. La couverture de certaines ouvertures ne représente pas un problème dans le cas présent étant donné que le bâtiment est occupé par des bureaux. Les étages ne sont pas cloisonnés et l'espace est éclairé par de nombreuses autres ouvertures. Occulter certaines d'entre elles est même bénéfique car cela permettra de créer des zones d'ombre et de rafraîchir le bâtiment en été. De plus, les plantes seront visibles depuis les bureaux et cela contribuera à améliorer la qualité de vie des occupants. La figure 3.7 présente le plan du 3^{ème} étage. Les traits rouges désignent les emplacement

de IGF et les traits bleus les fenêtres.

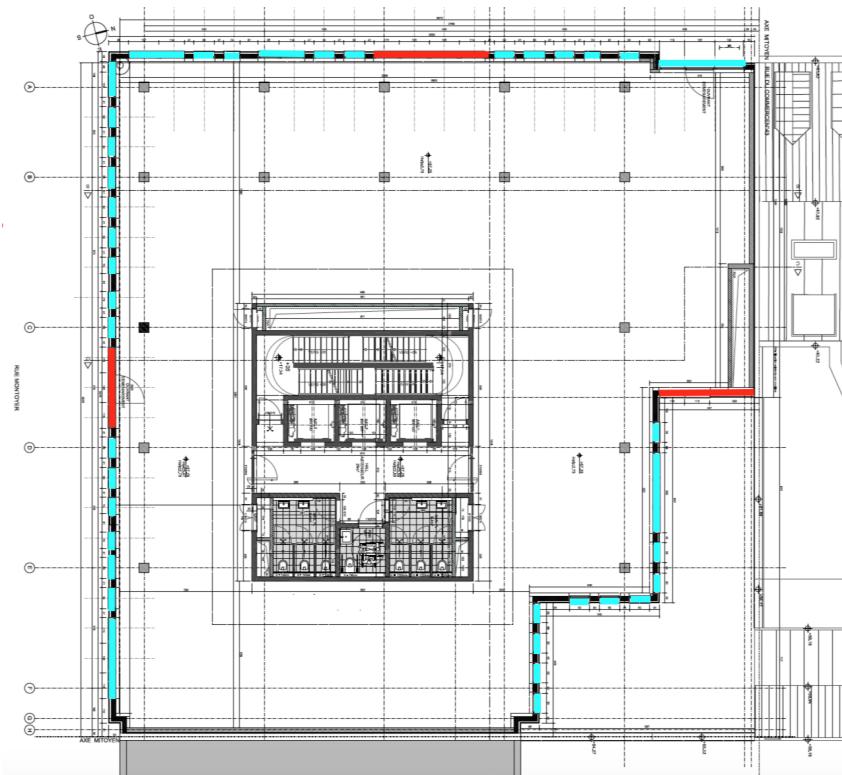


Figure 3.7 – Plan du 3^{ème} étage

Un autre pan de mur est également propice à la végétalisation à l’arrière du bâtiment. Il est exposé est-sud-est (ESE) et donne sur la cour de l’immeuble. Le pan de mur peut être végétalisé sur ses 25m de hauteur. La pleine terre est disponible pour l’enracinement des plantes. Au vu de la hauteur à couvrir, une jardinière sera placée au niveau du 5^{ème} étage afin de réduire le temps de couverture mais également d’étendre la palette de plantes grimpantes adaptées. En effet, seul le lierre est capable de monter jusqu’à une telle hauteur. Les figurent 3.8 et 3.9 présentent respectivement la façade arrière du bâtiment avant et après l’intégration d’une IGF.



Figure 3.8 – Façade arrière avant l'intégration d'une IGF



Figure 3.9 – Façade arrière après l'intégration d'une IGF

3.4.2 Maintenance

Afin de minimiser les coûts de maintenance et de rendre le système autonome, les jardinières sont irriguées avec de l'eau de pluie. Celle-ci est récupérée sur le toit du bâtiment et acheminée jusqu'aux jardinière par écoulement gravitaire. Ces jardinières disposent d'une réserve d'eau intégrée. Lors d'épisodes pluvieux, elles pourront stocker l'eau de pluie et l'utiliser lorsque le substrat s'assèchera, grâce à des mèches capillaires. Ce système ressemble au système proposé par l'entreprise Le Prieuré précédemment présenté. Toutefois, il sera adapté au projet et au réseau d'irrigation gravitaire prévu. Étant donné qu'il y a plusieurs jardinières installées à des hauteurs différentes, les jardinières se doivent d'avoir une entrée pour accueillir l'eau de pluie et un trop plein situé sur son côté opposé. Le trop plein de la jardinière du dessus est connecté à l'entrée de la jardinière du dessous. Le trop-plein de la dernière jardinière du réseau devra être connecté à l'évacuation ou à une zone d'infiltration. Afin d'éviter un assèchement trop rapide du substrat, une couche de paillage d'environ 5 cm sera disposée au pied des plantes. La figure 3.10 présente la représentation 3D, réalisée sur Sketchup, de la jardinière conçue pour ce projet.

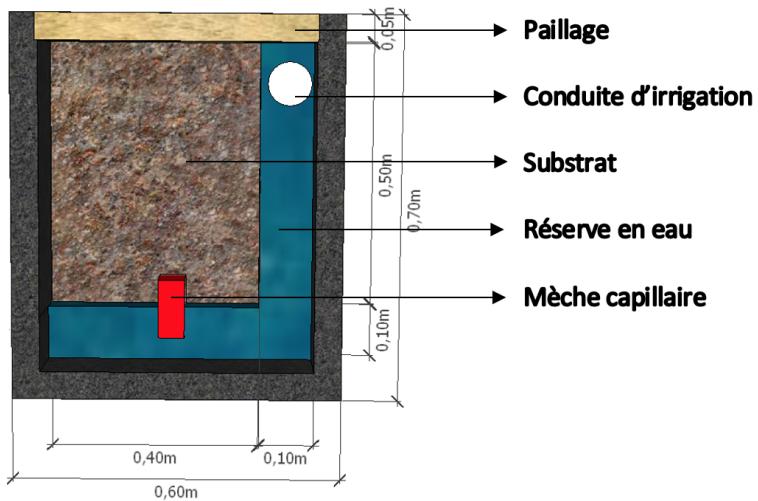


Figure 3.10 – Modélisation 3D d'une jardinière utilisée pour le projet Montoyer

La fertilisation des jardinières peut se faire à l'aide d'engrais ou via les déchets verts compostés des occupants de l'immeuble. Cette étape est assez simple à réaliser étant donné que les jardinières sont facilement accessibles par les fenêtres.

3.4.3 Sélection des espèces végétales

Afin de conserver l'apport calorifique des rayons du soleil en hiver, on pourrait envisager de sélectionner des espèces au feuillage caduc. Néanmoins, cela implique que ce feuillage se retrouve sur la voie publique en automne puisque ces façades sont exposées à rue. Au vu de la hauteur du pan de mur à l'arrière du bâtiment et de l'intérêt pour la biodiversité du projet, le lierre est un très bon candidat pour la végétalisation de cette surface. Il faudra néanmoins le palisser autour de la structure au fur et à mesure de sa croissance. Pour ce qui est des IGF des façades donnant sur les rues du commerce et Montoyer, la palette de plantes grimpantes est plus étendue puisque les hauteurs à couvrir sont moins importantes.

3.5 Projet du bâtiment des Halles à Louvain-la-Neuve

3.5.1 Introduction au projet

Le bâtiment des Halles se situe dans le centre urbain de Louvain-le-Neuve, construit sur une immense dalle de béton qui supporte les bâtiments et les rues piétonnes. C'est un environnement très minéral qui manque cruellement de végétation. Le projet de rénovation de ce bâtiment, qui n'a jamais été rénové depuis sa construction en 1976, a pour objectif de diminuer par 3 sa consommation énergétique et d'améliorer le confort des occupants. De plus, l'université catholique de Louvain, propriétaire du bâtiment, souhaite valoriser au maximum la biodiversité sur leurs sites. Le bâtiment des Halles comporte justement plusieurs pans de murs aveugles propices à la végétalisation. Le premier se situe le long de la place de l'université et est orienté au nord-est (NE). Il fait 20 m de haut pour 14 m de large. Cette façade est fréquemment vandalisée par des graffitis. En plus d'apporter une touche naturelle à cet environnement minéral, végétaliser cette surface permettrait également de régler ce problème. Les figures 3.11 et 3.12 présentent respectivement une photo du pan de mur dans la situation actuelle et la représentation 3D de la situation projetée.



Figure 3.11 – Situation actuelle de la façade NE

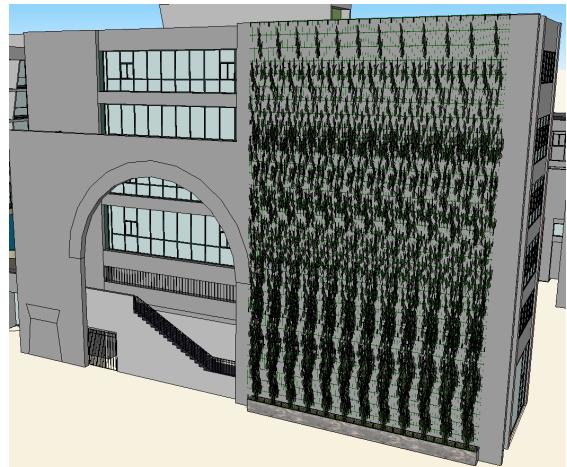


Figure 3.12 – Représentation 3D de la situation projetée de la façade NE

Plusieurs pans de murs de la cour intérieure du premier étage de l'immeuble sont également végétalisables sur toute leur hauteur. Ils sont exposés au NE et au SO. Ces pans

de murs sont visibles depuis tout le bâtiment et contribueront à améliorer la qualité de vie des occupants de l'immeuble. Les figures 3.13 et 3.14 présentent respectivement les représentations 3D de la situation projetée des façades NE et SO de la cour intérieure.



Figure 3.13 – Représentation 3D de la situation projetée des pans de murs exposés NE



Figure 3.14 – Représentation 3D de la situation projetée des pans de murs exposés SO

Les surfaces à couvrir sont des pans de murs aveugles et solides capables de supporter de grandes charges. Toutes les technologies sont donc envisageables. La matrice de décision va être utilisée afin de définir la technologie la plus adaptée au projet.

3.5.2 Attribution des pondérations

Le coût est un critère très important pour les autorités universitaires responsables du projet. C'est pourquoi la pondération de ce critère est fixée à 4. L'empreinte environnementale et le potentiel écologique sont également très importants étant donné que l'objectif est de restaurer la biodiversité sur les sites de l'université. La pondération de ces deux critères est donc fixée à 3. L'esthétique ne constitue pas un critère prioritaire comme les trois précédents mais n'est tout de même pas négligeable. La pondération pour ce critère est donc fixée à 2.

3.5.3 Résultats

La figure 3.15 présente la matrice de décision utilisée pour la végétalisation des pans de murs aveugles du bâtiment des Halles. La technologie mise en évidence est une DGF. Elles seront implantées dans des jardinières étant donné que la pleine terre n'est pas disponible sur le site. Les plantes grimpantes pourront directement grimper le long des façades du bâtiment. Celles-ci sont en bon état et ne nécessitent pas d'être rafraîchies avant l'installation des DGF.

Critères	Coût		Esthétique		Potentiel écologique		Impact environnemental		Total pondéré
	Pondération	4	2	score	score pondéré	3	score pondéré	3	
Scores	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	
DGF	4	16	1	2	3	9	4	12	39
IGF	3	12	2	4	3	9	3	9	34
PANELS	1	4	4	8	3	9	2	6	27
PLANTER BOXES	1	4	4	8	3	9	2	6	27
FELT-LAYERS	2	8	4	8	1	3	1	3	22

Figure 3.15 – Matrice de décision pour la végétalisation du bâtiment des Halles

3.5.4 Maintenance

Afin de réduire la consommation d'eau de la façade et de rendre le système plus autonome, le système d'irrigation peut être conçu de la même manière que pour le projet Montoyer. L'eau de pluie récupérée sur le toit plat de l'immeuble peut être acheminée jusqu'aux jardinières, grâce à un réseau d'écoulement gravitaire, et stockée dans celles-ci. Les DGF installées dans la cour intérieure du bâtiment profitent également d'une réserve d'eau à disposition. En effet, la majeure partie de la surface de la cour est occupée par un plan d'eau. En le connectant aux jardinières, celles-ci bénéficieraient d'une réserve en eau permanente et l'irrigation des DGF se ferait de manière totalement autonome. La figure 3.16 représente le plan du premier étage du bâtiment des Halles avec le plan d'eau en bleu et les DGF représentées en rouge.

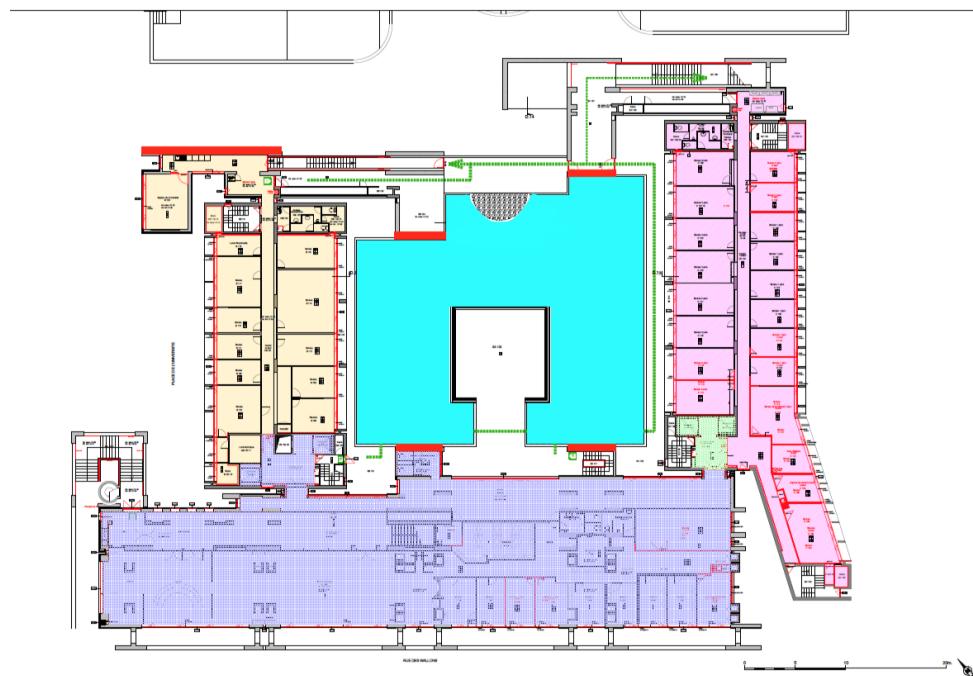


Figure 3.16 – Plan du premier étage du bâtiment des Halles

3.5.5 Choix des plantes

Au vu des hauteurs des différents pans de murs et de l'intérêt du projet pour la biodiversité, le lierre semble tout indiqué comme espèce sélectionnée. Néanmoins, afin de varier les plaisirs visuels, d'autres plantes grimpantes peuvent être incorporées aux DGF afin d'avoir un mixte de plusieurs espèces. Même si les autres plantes ne grimpent pas aussi haut que le lierre, le résultat promet tout de même d'être réussi d'un point de vue esthétique.

3.6 Projet AXS

3.6.1 Introduction au projet

Le projet AXS est un projet de construction de 5 immeubles occupés par des bureaux (bâtiments B-C-D-E-F) pour une surface totale de 28.500 m², d'un hôtel (bâtiment A) de 102 chambres et d'une résidence pour étudiants (bâtiment G) de 217 logements (voir figure 3.17). Ce projet est construit sur le site SNCB dit "la courgette" le long du boulevard Ernest Mélot et des voies de chemin de fer à Namur.



Figure 3.17 – Plan de masse du projet AXS

Un rapport de biodiversité a été effectué dans le but d'obtenir des recommandations afin d'atteindre les objectifs BREEAM. La conclusion du rapport démontre que le projet présente de belles opportunités pour favoriser le développement de la biodiversité sur le site. D'autant plus que le site en question se trouve en plein cœur de la zone où le réseau écologique est le plus lacunaire, d'où l'importance de le doper à cet endroit. La figure 3.18 présente la situation projetée du projet (sans l'intégration des façades végétalisées).



Figure 3.18 – Situation projetée du projet AXS

3.6.2 L'hôtel

L'hôtel comporte deux pans de murs aveugles qu'il est possible de végétaliser. Le premier se situe sur la façade Est et donne sur le boulevard. Le second pan de mur végétalisable se situe sur la façade nord qui donne sur les voies de chemin de fer. Ces pans de murs accueilleront une enseigne de l'hôtel qui pourra être mise en valeur par la végétation. La technologie la plus pertinente sera mise en évidence grâce à la matrice de décision. Les figures 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 présentent respectivement la représentation 3D et la position sur le plan d'implantation des façades est et nord de l'hôtel. Les traits rouges représentent les pans de murs végétalisables.



Figure 3.19 – Représentation 3D de la façade Est de l'hôtel

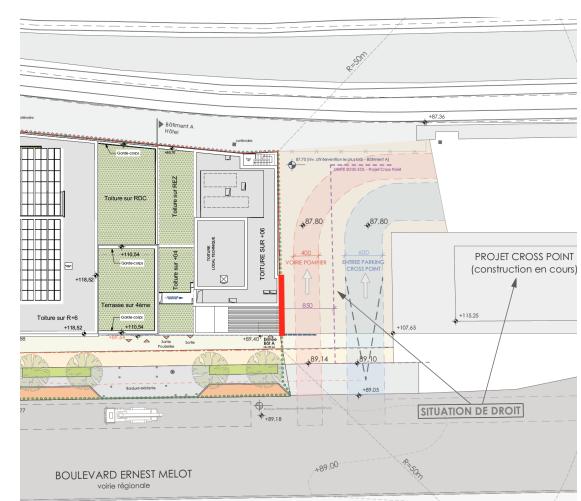


Figure 3.20 – Plan d'implantation de l'hôtel



Figure 3.21 – Représentation 3D de la façade nord de l'hôtel

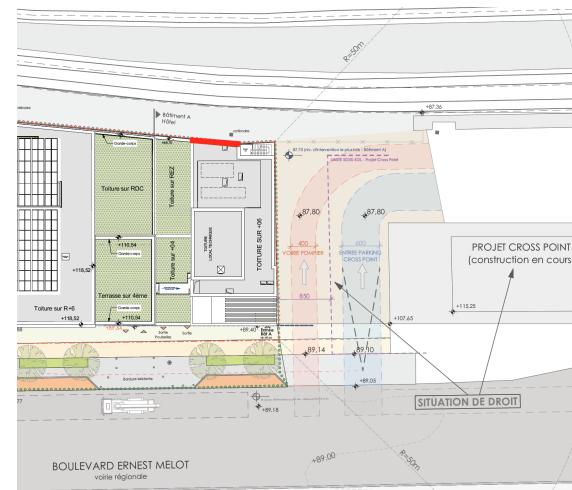


Figure 3.22 – Plan d'implantation de l'hôtel

3.6.2.1 Attribution des pondérations

Les pans de murs végétalisables de l'hôtel profitent d'un grande visibilité. L'un donne sur le boulevard alors que l'autre donne sur les voies de chemin de fer et sera donc visible par tous les voyageurs. L'esthétique sera donc le critère le plus important dans le cadre de ce projet. En effet, l'hôtel est un lieu touristique qu'il convient de rendre le plus attractif possible et ce le plus vite possible. Le coût vient en second et le potentiel écologique et l'empreinte environnementale en dernier. Ce bâtiment étant situé le long des voies de chemin de fer, le critère "réduction du bruit" va être intégré à la matrice avec une pondération importante car le confort des résidents est un point important pour l'établissement hôtelier.

3.6.2.2 Attribution des scores pour le critère de réduction du bruit

La technologie la plus performante dans la réduction du bruit est le système panels en raison de l'épaisseur et de la continuité du substrat. En effet, c'est ce substrat qui est majoritairement responsable de l'absorption des ondes acoustiques. C'est pourquoi le score de 4 lui a été attribué. Les technologies planter boxes et felt-layers viennent ensuite avec un score de 3. Les LW planter boxes n'offrent pas une continuité du substrat comme les panels et les LW felt-layers ont un substrat beaucoup plus fin. Les DGF et IGF se voient attribuer un score de 1 car aucun substrat ne pourra contribuer à la réduction du

bruit. De plus, il faudra attendre que la couverture végétale soit dense avant qu'elle puisse avoir un effet notable sur la réduction du bruit.

3.6.2.3 Résultats

La figure 3.23 présente la matrice de décision utilisée pour la végétalisation des façades de l'hôtel. La technologie mise en évidence par la matrice est un LW panels. En effet, cette technologie est la plus performante en terme de réduction du bruit et d'esthétique, les critères les plus importants pour ce projet. Le pan de mur orienté à l'est fait 9,5 m de large par 17 m de hauteur. Celui orienté au nord fait 6,5 m de large par 20 m de hauteur. Les plantes sélectionnées devront être adaptées à l'orientation des murs. Un système de ferti-irrigation doit être installé afin de s'assurer que le substrat conserve une qualité nutritive et une teneur en eau idéale pour le développement de la végétation. L'hôtel dispose d'une toiture plate qui peut potentiellement accueillir une citerne de récupération des eaux pluviales qui peuvent ensuite être utilisées pour l'irrigation. De cette manière, l'empreinte environnementale et le coût de maintenance de l'ouvrage se verront réduits.

Critères	Coût		Esthétique		Potentiel écologique		Impact environnemental		Réduction du bruit		Total pondéré
	Pondération		3	4	Pondération		2	Pondération		1	
Scores	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	
DGF	4	12	2	8	3	6	4	4	1	4	34
IGF	3	9	2	8	3	6	3	3	1	4	30
PANELS	1	3	4	16	3	6	2	2	4	16	43
PLANTER BOXES	1	3	4	16	3	6	2	2	3	12	39
FELT-LAYERS	2	6	4	16	1	2	1	1	3	12	37

Figure 3.23 – Matrice de décision pour la végétalisation de l'hôtel

3.6.3 Les toitures vertes

Les toitures vertes sont situées entre les bâtiments occupés par les bureaux (bâtiments B-C-D-E-F). Elles font office de passerelles entre ces bâtiments et d'endroits de détente. Plusieurs pans de murs aveugles sont végétalisables aux abords de ces toitures. Les couvrir de végétation permettrait de contribuer à la biodiversité du site et d'apporter une touche de nature à ces endroits de passage. La figure 3.24 présente la représentation 3D des bâtiments D-E-F sur laquelle nous pouvons apercevoir la toiture végétale qui connecte les bâtiments D et E. La figure 3.25 présente le plan d'implantation des bâtiments occupés par les bureaux. Les traits rouges représentent les surfaces qu'il est possible de végétaliser aux abords des toitures vertes.



Figure 3.24 – Représentation 3D des bâtiments D-E-F



Figure 3.25 – Plan d'implantation des bâtiments B-C-D-E-F

3.6.3.1 Attribution des pondérations

Le critère le plus important pour ce projet est le potentiel écologique. En effet, les toitures végétales ont pour but de développer la biodiversité sur le site et font partie des recommandations présentes dans le rapport de biodiversité du projet. Implanter des façades végétales à leurs abords renforcerait leur potentiel écologique. La pondération pour ce critère est donc fixée à 4. L'empreinte environnementale et le coût sont également des critères importants et se voient attribuer une pondération de 3. Le coût constitue ici un critère important étant donné le nombre de surfaces à végétaliser et leur petite taille. En effet, plus la surface est faible, plus le prix au m^2 augmente. L'esthétique ne constitue pas un critère aussi important. Les surfaces à couvrir ne sont pas importantes et donc le temps de couverture ne le sera pas non plus. La réduction du bruit ne fait quant à elle pas partie des critères pris en compte. Sa pondération est donc fixée à 0.

3.6.3.2 Résultats

La figure 3.26 présente la matrice de décision utilisée pour définir la technologie la mieux adaptée à la végétalisation des murs situés aux abords des toitures vertes. La technologie mise en évidence est une DGF. C'est la technologie la moins chère à mettre et qui comporte l'empreinte environnementale la plus faible. Elles pourront être installées directement dans le substrat de la toiture végétale si celui-ci est assez profond. De cette manière, les façades végétales ne demanderont pas beaucoup d'entretien. La hauteur à couvrir varie entre 4 et 11 mètres. Afin de maximiser le potentiel écologique des façades, il convient de sélectionner des végétaux ayant un intérêt pour la biodiversité locale et qui peuvent contribuer à renforcer le maillage écologique de la zone.

Critères Pondération	Coût		Esthétique		Potentiel écologique		Impact environnemental		Réduction du bruit		Total pondéré
	3	1	4	3	4	3	0				
Scores	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	
DGF	4	12	2	2	3	12	4	12	1	0	38
IGF	3	9	2	2	3	12	3	9	1	0	32
PANELS	1	3	4	4	3	12	2	6	4	0	25
PLANTER BOXES	1	3	4	4	3	12	2	6	3	0	25
FELT-LAYERS	2	6	4	4	1	4	1	3	3	0	17

Figure 3.26 – Matrice de décision pour la végétalisation des murs aux abords des toitures vertes

3.6.4 La résidences pour étudiants

La résidence pour étudiants comporte plusieurs pans de murs végétalisables. Tout d'abord, le bâtiment dispose de deux grands pans de murs aveugles sur sa façade sud-ouest (SO). Ensuite, la cage d'escalier située sur la façade sud peut également être végétalisée. Enfin, deux pans de murs aveugles sont également disponibles aux abords de la toiture verte située au 4^{ème} étage. Les figures 3.27 et 3.28 présentent respectivement la représentation 3D de la façade SO du bâtiment et le plan d'implantation, sur lequel figurent en rouge les pans de murs aveugles végétalisables.



Figure 3.27 – Représentation 3D de la façade SO de la résidence pour étudiants

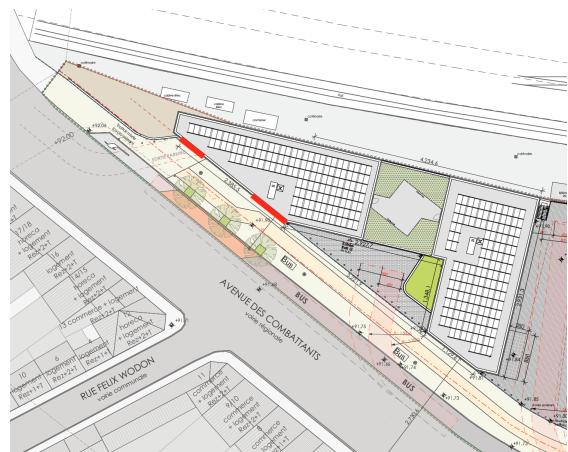


Figure 3.28 – Plan d'implantation de la résidence pour étudiants

3.6.4.1 Attribution des pondérations

La matrice de décision va déterminer la technologie adaptée pour la végétalisation des pans de murs aveugles de la façade sud-ouest du bâtiment. Le critère le plus important est le coût, car il s'agit d'une résidence occupée par des étudiants. Ce critère se voit donc attribuer une pondération de 4. Le potentiel écologique et l'empreinte environnementale sont également des critères importants pour le projet et se voient attribuer une note de 3. Le critère esthétique est moins important et se voit attribuer une note de 2. La réduction

ne fait pas partie des critères pris en compte et sa pondération est par conséquent fixée à 0.

3.6.4.2 Résultats

La figure 3.29 présente la matrice de décision utilisée pour la végétalisation de la façade SO du bâtiment. La technologie mise en avant par la matrice est une DGF. Cette technologie est la moins chère et affiche de bonnes performances en terme de potentiel écologique et d'empreinte environnementale. La pleine terre n'étant pas accessible, les plantes grimpantes devront être installées dans des jardinières. Le pan de mur le plus à l'ouest fait 15 mètres de hauteur et se situe au-dessus de l'entrée de garage. Les jardinières devront donc être suspendues à la façade. Le pan de mur le plus à l'est fait 18 mètres de hauteur. Des jardinières peuvent être disposées en pied de façade ou suspendues à celle-ci. Ces deux pans de murs sont situés à côté de terrasses. Il est possible d'aménager un accès pour entretenir les jardinières aux étages où elles sont disposées. Le type de jardinière utilisé et le réseau d'irrigation sont les mêmes que pour l'IGF de la cage d'escalier. Afin de réduire les coûts de maintenance, de minimiser l'empreinte environnementale et de responsabiliser les étudiants, l'étape de fertilisation peut se faire sur base de leur initiative en déléguant cette tâche à des résidents responsables. Les déchets verts des étudiants constituent une ressource qu'il serait intéressant de valoriser directement sur place.

Critères	Coût		Esthétique		Potentiel écologique		Impact environnemental		Réduction du bruit		Total pondéré
	Pondération	4	2	3	3	3	0				
Scores	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	score	score pondéré	
DGF	4	16	2	4	3	9	4	12	1	0	41
IGF	3	12	2	4	3	9	3	9	1	0	34
PANELS	1	4	4	8	3	9	2	6	4	0	27
PLANTER BOXES	1	4	4	8	3	9	2	6	3	0	27
FELT-LAYERS	2	8	4	8	1	3	1	3	3	0	22

Figure 3.29 – Matrice de décision utilisée pour la végétalisation de la façade sud de la résidence pour étudiants

La cage d'escalier étant un espace ouvert, il n'y a pas d'autre choix que d'opter pour une IGF. Celle-ci sera plantée dans des jardinières étant donné qu'il n'y a pas de pleine terre disponible. Afin de réduire la consommation en eau et de favoriser l'autonomie de l'ouvrage, il est préférable d'opter pour des jardinières contenant une réserve d'eau et de la relier à la toiture plate du bâtiment (voir projet du bâtiment des Halles). La hauteur à couvrir est de 25 mètres. Il faudra donc opter pour une plante capable de grimper jusqu'à une telle hauteur. Le lierre par exemple, peut avoir une hauteur maximale de 25 à 30 mètres. Si c'est cette plante qui est sélectionnée, il sera nécessaire de la palisser autour de la structure d'accroche au fur et à mesure de sa croissance. Il est également possible

de disposer des jardinières intermédiaires, accrochées à la façade. De cette manière, la palette de plantes grimpantes adaptées au projet peut s'étendre aux végétaux allant une hauteur maximale inférieure à la hauteur à couvrir. Les figures 3.30 et 3.31 présentent respectivement la représentation 3D de la façade sud de la résidence pour étudiants et le plan d'implantation du bâtiment, sur lequel figure en rouge la position de la cage d'escalier à végétaliser.



Figure 3.30 – Représentation 3D de la façade sud de la résidence pour étudiants

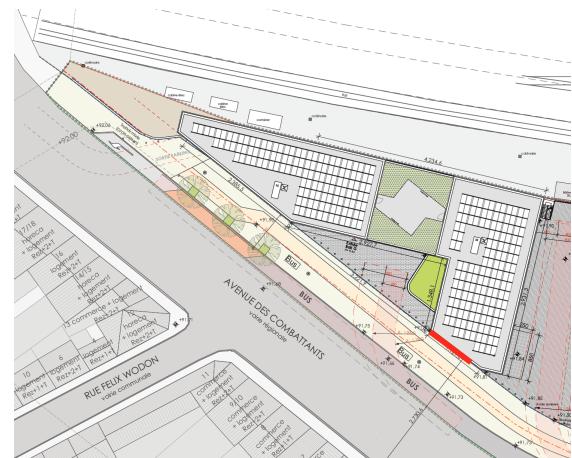


Figure 3.31 – Plan d'implantation de la résidence pour étudiants

La pondération pour les pans de murs aux abords des toitures vertes est la même que celle pour les pans de murs de la façade sud-est du bâtiment. Par conséquent, il seront végétalisés de la même manière. Les figures 3.32 et 3.33 présentent respectivement la représentation 3D de la toiture verte et le plan d'implantation du bâtiment, sur lequel figurent en rouge les pans de murs végétalisables.

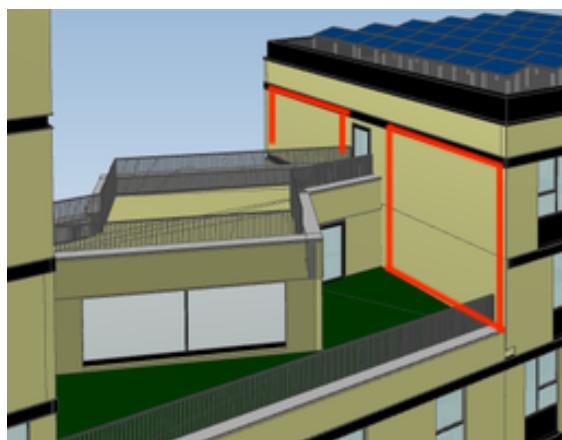


Figure 3.32 – Représentation 3D de la toiture verte de la résidence pour étudiants



Figure 3.33 – Plan d'implantation de la résidence pour étudiants

Chapitre 4

Conclusion et perspectives

4.1 Conclusion

L'intégration de façades végétalisées dans des projets de construction neuve ou de rénovation permet de favoriser le développement de la biodiversité en ville et de rétablir les services écosystémiques des espaces verts. De plus, la végétalisation des espaces urbains permet de résoudre les problèmes majeurs que rencontrent nos villes actuellement. Elle permet de lutter contre le changement climatique et de mitiger les risques environnementaux comme le ruissellement, l'effet îlot de chaleur et la pollution atmosphérique. Elle contribue également à améliorer les performances énergétiques des bâtiments et la qualité de vie des citoyens en jouant un effet positif sur leur santé mentale et physique.

Les façades végétalisées comportent plusieurs avantages environnementaux mais leur construction, leur installation et leur maintenance ont également un impact sur l'environnement. La balance environnementale va dépendre de beaucoup de paramètres. La technologie choisie, les matériaux utilisés, les espèces sélectionnées et la maintenance du système sont les principaux. Les GF ont une faible empreinte environnementale et comportent beaucoup d'avantages environnementaux. En fonction des plantes sélectionnées, elles peuvent contribuer à combler les lacunes du réseau écologique, à favoriser la biodiversité en ville et à mitiger certains risques environnementaux comme la pollution de l'air et le ruissellement. Leur balance environnementale est par conséquent positive. Les LW ont quant à eux une empreinte environnementale plus conséquente. Il est donc important d'optimiser le système afin d'en tirer un maximum d'avantages environnementaux et de réduire au maximum leur impact sur l'environnement. Les espèces doivent être soigneusement sélectionnées afin de contribuer au maximum au développement de la biodiversité. Les matériaux utilisés pour leur conception doivent être recyclables, avoir une durée de vie longue et une empreinte environnementale la plus faible possible. Le réseau d'irrigation

doit être optimisé et le systèmes doit être conçu de manière à fournir le plus d'avantages possible. Les technologies panels et planter boxes, par exemple, sont les plus efficaces pour réduire le risque de ruissellement, pour l'isolation thermique et acoustique du bâtiment et pour le développement de la biodiversité. La technologie felt-layers est moins performante sur ces aspects et comporte une empreinte environnementale plus importante. C'est pourquoi cette technologie n'est pas à recommander si les objectifs du projets sont d'optimiser les performances environnementales, même si elle reste la moins chère du marché pour les systèmes LW.

L'irrigation est sans aucun doute le plus gros point faible des façades végétalisées. Les GF peuvent se passer d'un réseau d'irrigation lorsqu'elles sont plantées en pleine terre et disposent d'une quantité de substrat suffisante. Malheureusement, ce n'est pas souvent le cas dans les zones fortement urbanisées. Un réseau d'irrigation est donc souvent installé afin de s'assurer du bon développement des végétaux. Les LW quant à eux dépendent d'un réseau de ferti-irrigation. Afin de réduire l'impact environnemental et les coûts de maintenance, l'irrigation peut se faire grâce à l'eau de pluie récupérée et stockée dans des citernes de récupération ou dans des jardinières équipées d'un réservoir. Il est également possible d'utiliser les eaux grises du bâtiment pour irriguer les plantes. Cette piste est encore au stade de développement et très peu de projets de la sorte ont déjà vu le jour, mais elle mérite tout de même d'être approfondie. Valoriser les eaux grises de cette manière permettrait d'alléger l'empreinte environnementale liée à l'irrigation et de traiter directement ces eaux sur place.

La comparaison des différentes technologies a mis en avant les points forts et les points faibles de chacune d'entre elles. Le choix de l'une d'entre elles va dépendre du projet et de ses objectifs. Tout d'abord, la technologie doit être adaptée au bâtiment sur lequel elle est installée. Le critère des contraintes d'installation est donc le premier à prendre en compte. La technologie la plus performante à ce niveau est l'IGF. C'est la seule à pouvoir s'affranchir des contraintes architecturales du bâtiment. L'importance des autres critères dépendront du projet et de ses objectifs. Certains ont un budget limité et mettent le coût en tant que critère important. La technologie la plus adaptée est alors une DGF si l'architecture du bâtiment le permet. D'autres favorisent l'aspect esthétique et optent donc généralement pour un LW. Enfin, certains projets privilégient les aspects biodiversité et environnement. La matrice de décision mise au point dans le cadre de ce TFE permet de sélectionner la technologie la plus adaptée aux objectifs du projet et de prendre en considération plusieurs critères en leur attribuant une pondération en fonction de leur importance.

L'intégration d'une façade végétalisée dans un projet de construction neuve ou de rénovation permet d'améliorer ses performances environnementales. Cet aspect est de plus en plus important dans les projets de construction et ceux-ci sont désormais soumis à certaines évaluations de leur impact sur leur environnement. La certification BREEAM, l'écopotential et le CBS sont des exemples d' indicateurs de cet impact. L'intégration d'une façade végétale permet d'améliorer les scores de ces indicateurs et d'atteindre les objectifs environnementaux du projet.

4.2 Perspectives

4.2.1 Analyse du cycle de vie

Il serait intéressant d'avoir une valeur chiffrée quant à l'impact environnemental d'une façade végétalisée en réalisant une analyse de cycle de vie (ACV). Néanmoins, pour que celle-ci soit précise, il faut considérer tous les bénéfices environnementaux et les exprimer de manière chiffrée. De plus, les performances environnementales des façades végétalisées varient en fonction de chaque projet puisqu'elles dépendent également de l'environnement dans lequel elles sont implantées. Une ACV reste néanmoins intéressante afin d'avoir un ordre d'idée de l'impact environnemental de l'intégration d'une façade végétalisée dans un projet.

4.2.2 Besoin en eau des plantes

Afin d'optimiser le réseau d'irrigation et de dimensionner correctement les citernes de récupération ou les jardinières stockantes, il serait judicieux de déterminer les besoins en eau des plantes. Cette étape est assez fastidieuse étant donné qu'il faut calculer l'évapotranspiration de référence. Elle est habituellement calculée pour des sols agricoles via l'équation de Penman-Montheit sur base des données climatiques. Ensuite, les besoins en eau d'une culture peuvent être déterminés via certains logiciels comme AQUACROP. Malheureusement, le calcul de l'ET₀ pour une surface horizontale est plus compliqué et nécessitera la prise en compte de paramètres supplémentaires comme l'exposition de la façade ainsi que sa hauteur. De plus, le volume de substrat est faible et celui-ci est conçu de manière à avoir une très bonne capacité de rétention. Il est donc saturé beaucoup plus vite qu'un sol lors d'un épisode pluvieux. De surcroît, l'épaisseur du feuillage des plantes sur une surface verticale est plus limitée que leur hauteur sur une surface horizontale. C'est pourquoi le coefficient cultural K_c, nécessaire au calcul de l'évapotranspiration réelle, doit être adapté [van de Wouw et al., 2017]. L'évapotranspiration peut néanmoins

être déterminée expérimentalement en mesurant les flux entrant et sortant du système.

4.2.3 Amélioration de la matrice de décision

La matrice de décision mise au point dans ce TFE ne prend en compte que les critères les plus importants selon l'entreprise. D'autres avantages peuvent être intégrer aux critères afin de compléter la matrice. La sélection des plantes est une opération extrêmement importante qui va définir les performances de la façade. Cet aspect n'est néanmoins pas pris en compte dans la matrice de décision. Ce choix dépend également de plusieurs critères, tout comme le choix d'une technologie. Cependant, la palette de plantes disponibles est nettement plus étendue que celle des technologie de façades végétalisées existantes. C'est pourquoi l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour le choix des espèces végétales serait d'une grande d'utilité et pourrait être utilisé de pair avec la matrice de décision développée dans le cadre de ce TFE. De cette manière, un outil complet permettrait de définir la technologie et la composition végétale la plus adaptée aux objectifs du projet.

Bibliographie

- [Allix, 2005] Allix, G. (2005). Patrick Blanc, quand la nature fait le mur. *Le Monde*.
- [Almusaed, 2011] Almusaed, A. (2011). *Biophilic and Bioclimatic Architecture*.
- [Aylor, 1972] Aylor, D. (1972). Noise Reduction by Vegetation and Ground. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51(1B) :197–205.
- [Boulet, 2015] Boulet, B. (2015). Le mur végétal de la rue Belliard est mort. *RTBF*.
- [Bratman et al., 2019] Bratman, G. N., Anderson, C. B., Berman, M. G., Cochran, B., de Vries, S., Flanders, J., Folke, C., Frumkin, H., Gross, J. J., Hartig, T., Kahn, P. H., Kuo, M., Lawler, J. J., Levin, P. S., Lindahl, T., Meyer-Lindenberg, A., Mitchell, R., Ouyang, Z., Roe, J., Scarlett, L., Smith, J. R., van den Bosch, M., Wheeler, B. W., White, M. P., Zheng, H., and Daily, G. C. (2019). Nature and mental health : An ecosystem service perspective. *Science Advances*, 5(7).
- [Bratman et al., 2015] Bratman, G. N., Daily, G. C., Levy, B. J., and Gross, J. J. (2015). The benefits of nature experience : Improved affect and cognition. *Landscape and Urban Planning*, 138 :41–50.
- [Chiquet, 2014] Chiquet, C. (2014). *The animal biodiversity of Green Walls in the urban environment*. PhD thesis.
- [Coma et al., 2014] Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., and Cabeza, L. F. (2014). New green facades as passive systems for energy savings on Buildings. *Energy Procedia*, 57 :1851–1859.
- [Cox et al., 2017] Cox, D. T., Shanahan, D. F., Hudson, H. L., Plummer, K. E., Siriwardena, G. M., Fuller, R. A., Anderson, K., Hancock, S., and Gaston, K. J. (2017). Doses of neighborhood nature : The benefits for mental health of living with nature. *BioScience*, 67(2) :147–155.
- [Davis et al., 2017] Davis, M. J., Tenpierik, M. J., Ramírez, F. R., and Pérez, M. E. (2017). More than just a Green Facade : The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment*, 116 :64–72.
- [Dean et al., 2018] Dean, J. H., Shanahan, D. F., Bush, R., Gaston, K. J., Lin, B. B., Barber, E., Franco, L., and Fuller, R. A. (2018). Is nature relatedness associated with

- better mental and physical health? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7) :9–11.
- [Ellis, 2013] Ellis, J. B. (2013). Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(1) :24–41.
- [European Commission, 2015] European Commission (2015). Annex 1. The urbanisation of Europe and the World. Technical report.
- [Fabré and Nahjari, 2010] Fabré, G. and Nahjari, N. (2010). Bruxelles : le mur végétal de la rue Belliard se flétrit. *RTBF*.
- [Fahed, 2018] Fahed, J. (2018). Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Génie civil. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT : 2018ISAT0024. tel-02003346.
- [Gabriel and Endlicher, 2011] Gabriel, K. M. and Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, 159(8-9) :2044–2050.
- [Geetere, 2016] Geetere, L. D. (2016). Des façades vertes pour réduire la gêne acoustique à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. pages 1–2.
- [Grant and Heisler, 1996] Grant, R. H. and Heisler, G. M. (1996). Solar ultraviolet-B and photosynthetically active irradiance in the urban sub-canopy : A survey of influences. *International Journal of Biometeorology*, 39(4) :201–212.
- [IBGE, 2007] IBGE (2007). Réaliser des façades vertes. *Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments*, pages 1–14.
- [Köhler, 2008] Köhler, M. (2008). Green facades-a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4) :423–436.
- [Kontoleon and Eumorfopoulou, 2010] Kontoleon, K. J. and Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5) :1287–1303.
- [Koyama et al., 2013] Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., ichiro Maeda, K., and Yamauchi, A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, 66 :96–103.
- [Madre et al., 2015] Madre, F., Clergeau, P., Machon, N., and Vergnes, A. (2015). Building biodiversity : Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 3 :222–233.

- [Marchi et al., 2015] Marchi, M., Pulselli, R. M., Marchettini, N., Pulselli, F. M., and Bastianoni, S. (2015). Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling*, 306 :46–56.
- [Medl et al., 2017] Medl, A., Stangl, R., and Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125 :227–239.
- [Metcalfe, 2005] Metcalfe, D. J. (2005). Hedera helix L. *Journal of Ecology*, 93(3) :632–648.
- [Ottelé et al., 2010] Ottelé, M., van Bohemen, H. D., and Fraaij, A. L. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36(2) :154–162.
- [Palermo and Turco, 2020] Palermo, S. A. and Turco, M. (2020). Green Wall systems : Where do we stand ? *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 410(1).
- [Paull et al., 2020] Paull, N. J., Krix, D., Torpy, F. R., and Irga, P. J. (2020). Can green walls reduce outdoor ambient particulate matter, noise pollution and temperature ? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14) :1–19.
- [Pérez et al., 2011] Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., and Cabeza, L. F. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4) :1861–1867.
- [Pérez-Urrestarazu and Urrestarazu, 2018] Pérez-Urrestarazu, L. and Urrestarazu, M. (2018). Vertical greening systems : Irrigation and maintenance. In *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, pages 55–63.
- [Perini et al., 2011a] Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L., Haas, E. M., and Raiteri, R. (2011a). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11) :2287–2294.
- [Perini et al., 2011b] Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., and Raiteri, R. (2011b). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 01(01) :1–8.
- [Perini et al., 2013] Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., and Raiteri, R. (2013). Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls. *Urban Ecosystems*, 16(2) :265–277.
- [Rowe, 2011] Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8-9) :2100–2110.

- [Shafiee et al., 2020] Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., and Khanmohammadi, M. A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181(April) :106923.
- [Soga and Gaston, 2016] Soga, M. and Gaston, K. J. (2016). Extinction of experience : The loss of human-nature interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(2) :94–101.
- [Stec et al., 2005] Stec, W. J., Van Paassen, A. H., and Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5) :419–427.
- [Sternberg et al., 2010] Sternberg, T., Viles, H., Cathersides, A., and Edwards, M. (2010). Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L) on historic walls in urban environments. *Science of the Total Environment*, 409(1) :162–168.
- [Stevenson et al., 2018] Stevenson, M. P., Schilhab, T., and Bentsen, P. (2018). Attention Restoration Theory II : a systematic review to clarify attention processes affected by exposure to natural environments. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B : Critical Reviews*, 21(4) :227–268.
- [United Nations, 2012] United Nations (2012). World Urbanization Prospects : The 2011 Revision. Technical Report 4.
- [van de Wouw et al., 2017] van de Wouw, P. M., Ros, E. J., and Brouwers, H. J. (2017). Precipitation collection and evapo(transpi)ration of living wall systems : A comparative study between a panel system and a planter box system. *Building and Environment*, 126(July) :221–237.
- [Weinstein et al., 2015] Weinstein, N., Balmford, A., Dehaan, C. R., Gladwell, V., Bradbury, R. B., and Amano, T. (2015). Seeing Community for the Trees : The Links among Contact with Natural Environments, Community Cohesion, and Crime. *BioScience*, 65(12) :1141–1153.
- [White et al., 2013] White, M. P., Alcock, I., Wheeler, B. W., and Depledge, M. H. (2013). Would You Be Happier Living in a Greener Urban Area ? A Fixed-Effects Analysis of Panel Data. *Psychological Science*, 24(6) :920–928.
- [World Health Organisation, 2004] World Health Organisation (2004). Heat-waves : risks and responses. Technical Report 2.

Chapitre 5

Annexes

Coûts (€/ m ² hors TVA)	Revêtement végétal apposé	Paroi végétale séparée
Végétaux	0,16 - 1,60	0,16 - 1,60
Support linéaire	4,00 - 8,00	9,00 - 18,00
Support bidimensionnel	10,00 - 25,00	25,00 - 55,00
Support tridimensionnel		100,00 - 200,00

Figure 5.1 – Estimation des prix au m² HTVA pour des GF par l'IBGE

type de pose	Prix au m ² en € H.T (fourniture seule)				
	de 1 à 24 m ²	de 25 à 49 m ²	de 50 à 99 m ²	de 100 à 499 m ²	de 500 m ² et +
Maillage losange 50 x 80 cm	61 €	58 €	50 €	44 €	42 €
Maillage carré 80 x 80 cm	32 €	30 €	26 €	23 €	22 €
Maillage carré 50 x 50 cm	52 €	45 €	41 €	40 €	38 €
Maillage Carré 40 x 40 cm	63 €	61 €	51 €	48 €	44 €
Câbles verticaux espacement 50 cm	37 €	36 €	32 €	28 €	26 €

Figure 5.2 – Simulation de prix GREENCABLE au m² selon différents calepinages

BREEAM 2016 - bureaux		Commentaires		Détail crédits			
Breeam sections / thèmes	Critères	Credits dispos	Pondération	Minimum number of credits	Credits potentiels	Impossible ou trop difficile	
Management (pondération 11,11%)	Man 01 Avant-projet et conception	21	11,11%	Rating "excellent"	Rating "outstanding"	21	
	Assurer un bâtiment fonctionnel et durable, conçu et construit en accord avec les performances prévues.	4					
	Identification des rôles et responsabilités de chacun. Démontrer comment les contributions des parties prenantes du projet ont influencé la conception du projet dès l'intégration, en amont de la conception, des besoins de l'utilisateur final et des contraintes de gestion doivent être apportées via PV de réunion (min 4 réunions : conception, construction, commissioning et mise à disposition, occupation), liste des responsabilités, clauses de cdt,...	1				1	
	Consultation des parties prenantes (réalisation du projet)	1				1	
	Consultation des parties prenantes et notamment : - Utilisateurs du bâtiment, y compris le personnel de gestion/maintenance et du fonctionnement du site au quotidien - communauté implantée actuelle	1				1	
	Riverains La consultation comprend au minimum les éléments de contenu suivants : 1. Fonctionnalité, qualité de la construction et impact (esthétique comprise). 2. Fourniture d'équipements intérieurs et extérieurs appropriés (pour les occupants et visiteurs). 3.&4. Implications de management et de fonctionnement + de maintenance. 5. Impacts sur la communauté locale : circulation, transport local... 6. Possibilités de partage des équipements et infrastructures avec la communauté si pertinent/applicable au type de bâtiment. 7. consultations prévues par la loi	1				1	
	Champion' de la durabilité (conception)	1				1	
	Champion' de la durabilité (suivi de l'avancement)	1				1	

Ecopotential

Données générales		Résultats										
Surface totale de la parcelle (m ²)	835,87	Ecopotential du projet :										
Surface au sol des bâtiments (m ²)	583,40	Ecopotential variante 1:										
Emprise au sol du bâti	70%	Ecopotential variante 2:										
Orientation par rapport aux zones de verdierement du projet de conservation par rapport aux zones du Réseau Ecologique Rivalin		<p>Zone C : L'objectif régional est de préserver le caractère vert de cette zone</p> <p>Zone centrale : Aucune prescription contraignante à l'heure actuelle</p>										
Données spécifiques au projet		<p>Résumé des données de base</p> <p>Copier les données de base</p> <p>Copier les données de la variante 1</p>										
Habitats	Sous-catégorie	Type de surface	Facteur de pondération	Superficie (m ²)	Superficie pondérée	Variante 1	Superficie (m ²)	Superficie pondérée (m ²)	Variante 2	Superficie (m ²)	Superficie pondérée (m ²)	
Habitats humides	Plan d'eau	Plan d'eau artificiel	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Mare ou bassin artificiel (e) végétalisé(e)	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Cours d'eau	Lac, étang ou mare naturel(l)e ou semi-naturel(l)e	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Cours d'eau artificiel	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Cours d'eau naturel ou semi-naturel	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	
Habitats construits végétalisés	Noue ou fossé	Noue ou fossé engazonné(e)	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Noue ou fossé planté(e)	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zone humide	Zone humide	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Mur végétal	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Façade végétalisée	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Habitats construits peu végétalisés	Végétation sur dalle	Végétation sur dalle (ép. substrat> 20 cm)	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Végétation sur dalle (ép. substrat 10 - 20 cm)	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Aires minérales perméables	Végétation sur dalle (ép. substrat> 20 cm) avec herbes	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Végétation sur dalle (ép. substrat> 20 cm) avec herbacées érabuses/arbres	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Systèmes aéroliaires engazonnés	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Habitats cultivés	Surfaces artificielles	Surfaces artificielles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Monoculture agricole	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Champ agricole	Friche agricole	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Permaculture	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Potager	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pelouses et prairies	Prairie	Potager sur dalle	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Plantation d'arbustes	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Verger	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Pelouse	Pelouse	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Massif de fleurs (espèces horticoles)	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	
Habitats arbustifs	Massif de fleurs	Massif de fleurs (espèces indigènes)	0,7	0	0	0	0	0	0	0		
		Prairie pâturée	0,5	0	0	0	0	0	0	0		
	Prairie	Prairie fleurie (espèces horticoles)	0,6	0	0	0	0	0	0	0		
		Prairie fleurie (espèces indigènes)	0,8	0	0	0	0	0	0	0		
		Prairie de fauche	0,9	0	0	0	0	0	0	0		
Habitats arborés	Friche urbaine	Friche urbaine envahie d'espèces exotiques envahissantes	0,1	0	0	0	0	0	0	0		
		Friche urbaine	0,7	0	0	0	0	0	0	0		
	Haie basse	Haie basse monospécifique (espèces horticoles)	0,5	0	0	0	0	0	0	0		
		Haie basse mixte (espèces horticoles)	0,6	0	0	0	0	0	0	0		
		Haie basse mixte (espèces indigènes)	0,7	0	0	0	0	0	0	0		
Haies	Massif arbustif	Massif arbustif sur sol artificielé	0,6	0	0	0	0	0	0	0		
		Massif arbustif sur gazon	0,8	0	0	0	0	0	0	0		
	Haie haute	Massif arbustif sur herbacées hautes	0,9	0	0	0	0	0	0	0		
		Zone arborée sur sol artificielé	0,6	0	0	0	0	0	0	0		
		Zone arborée sur gazon	0,8	0	0	0	0	0	0	0		
Bois	Zone arborée sur herbacées hautes	0,9	0	0	0	0	0	0	0			
		Haie haute monospécifique (espèces horticoles)	0,6	0	0	0	0	0	0			
	Haie haute mixte (espèces horticoles)	0,7	0	0	0	0	0	0				
	Haie haute monospécifique (espèces indigènes)	0,8	0	0	0	0	0	0				
Total	0	0	0	0	0	0	0	0				

Figure 5.4 – Outil de calcul écopotential

OUTIL DE CALCUL DU THEME DEVELOPPEMENT DE LA NATURE			
Mesure NAT01-02 : Conservation/augmentation de la valeur écologique du site			
Surface au sol du bâtiment (m ²)			
Surface totale de la parcelle (m ²)			
Calcul du coefficient de biotope par surface (CBS) de la situation projetée			
Type de surface	Facteur de pondération	m ²	Surface utile sur le plan écologique (m ²)
Surface imperméable	0		0
Surface partiellement imperméable	0,3		0
Surface semi-ouverte	0,5		0
Surface avec végétation sur couche de substrat fine	0,5		0
Surface avec végétation sur couche de substrat épaisse	0,7		0
Surface avec végétation en pleine terre	0,8		0
Surface avec végétation variée en pleine terre	1		0
Surface de façade verte (h ≥ 1,80 m)	0,4	0	0
	TOTAL	0	
CBS situation projetée		#DIV/0!	
SCORE 1 situation projetée (sur 10)		#DIV/0!	
Calcul du coefficient de biotope par surface (CBS) de la situation existante			
Type de surface	Facteur de pondération	m ²	Surface utile sur le plan écologique (m ²)
Surface imperméable	0		0
Surface partiellement imperméable	0,3		0
Surface semi-ouverte	0,5		0
Surface avec végétation sur couche de substrat fine	0,5		0
Surface avec végétation sur couche de substrat épaisse	0,7		0
Surface avec végétation en pleine terre	0,8		0
Surface avec végétation variée en pleine terre	1		0
Surface de façade verte (h ≥ 1,80 m)	0,4		0
	TOTAL	0	
CBS situation existante		#DIV/0!	
CBS projet - CBS situation existante		#DIV/0!	
Calcul des points bonus/malus:			
-1 points	CBS projet - CBS sit ex < -0,2		
-0,5 point	-0,2 ≤ CBS projet - CBS sit ex < -0,1		
+0 point	-0,1 ≤ CBS projet - CBS sit ex ≤ 0,1		
+0,5 point	0,1 < CBS projet - CBS sit ex ≤ 0,2		
+1,5 points	0,2 < CBS projet - CBS sit ex ≤ 0,3		
+2 points	0,3 < CBS projet - CBS sit ex		
Bonus/malus accordé pour la modification de la situation		#DIV/0!	
SCORE 1+bonus/malus (sur 10)		#DIV/0!	
Type de zone	Autre		
Facteur de correction en fonction de la localisation du terrain (la plus value d'une parcelle à grande valeur écologique est supérieure dans un environnement à forte densité de construction)			
Facteur de correction zone à forte densité = 1,1			
SCORE pondéré en fonction de la densité de la zone		#DIV/0!	
Le total des points obtenus est ramené sur un score maximum de 6 points			
SCORE final (sur 6)		#DIV/0!	

Figure 5.5 – Outil de calcul CBS