
Faculté des Sciences
Département des Sciences et
Gestion de l'Environnement
Energy & Sustainable Development
(EnergySuD)

Faculté des Sciences, de la
Technologie et de la Communication
Research Unit in Engineering Science
(RUES)



Amélioration des critères de performance des bâtiments durables par l'intégration des services écosystémiques

Sébastien LUONGO

Mémoire présenté en vue de l'obtention des diplômes de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Energies Renouvelables et Bâtiments Durables (ULiège)

et

Master en Développement Durable

Finalité Energie-Environnement (Uni.lu)

Membres du jury :

Promoteur :	Prof. Jean-Marie HAUGLUSTAINE (ULiège)
Co-promoteur :	Prof . Frank SCHOLZEN (Uni.lu)
Comité de lecture :	Claudia FALZONE (ULiège)
	Dr. Stéphane MONFILS (ULiège)

Année académique 2019-2020

« Copyright »

« 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 l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg. »

« *L'autorité académique est représentée par les promoteurs membres du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.»

« Le présent document n'engage que son auteur. »

« Auteur du présent document : LUONGO Sébastien,
sebastien.luongo@hotmail.com
+32 471 76 70 40 »

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire. Je voudrais remercier tout particulièrement :

- **Yves**, pour m'avoir accompagné tout au long de ma première expérience professionnelle. Sa bienveillance et sa disponibilité à la moindre questions m'ont permis de rendre ce stage et la rédaction du mémoire des plus agréables. J'ai adoré ses blagues qui n'étaient pas drôles ;
- **Prof. Hauglustaine** pour sa confiance, qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce mémoire sur un sujet me passionnant et me permettant de jumeler mes deux cursus universitaires ;
- **Mr. Hennaut** pour l'investissement de son temps et son aide à tous les étudiants de notre finalité ;
- **Sven** pour avoir tenté de me transmettre sa passion pour le codage informatique ;
- **Alain** pour ses nombreuses soirées comblées de discussions passionnantes sur les énergies renouvelables ;
- Ma **famille** (ma mère, ma sœur, ma grand-mère et mon beau-père) pour m'avoir soutenu tout au long de mon cursus universitaire ;
- Les membres du **BIG FIVE** pour m'avoir diverti et changé les idées durant toutes mes années d'études et lors de la rédaction de mon mémoire ;
- Mon **voilier** pour toute la créativité qu'il m'inspire lorsque je le navigue.

Ainsi que toutes les autres personnes qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre à réaliser ce travail.

RÉSUMÉ

Auparavant grandement sous-estimé, le potentiel des infrastructures vertes, étant de plus en plus étudié dans la littérature scientifique, s'avère être extrêmement bénéfique à l'échelle du bâtiment. Dans cet optique, ce travail porte, dans un premier temps, sur l'étude de l'intégration directe de la biodiversité dans les critères de performance des trois principaux référentiels mondiaux concernant la promotion de l'environnement, à savoir BREEAM, LEED et HQE. Il apparait qu'en moyenne, une importance relative de 6,5 % des points leur est destinée. Dans un second temps, les services écosystémiques, rendus par les infrastructures vertes à l'échelle du bâtiment et de la zone urbaine, sont décrits. Cette analyse a permis dans un troisième temps, d'étudier à nouveau les critères de performance de ces trois référentiels. Il en ressort qu'une fois pris en compte, les aménagements verts influencent positivement en moyenne 45,8 % des points disponibles. Finalement, la dernière partie de ce travail est consacrée au développement d'un outil d'évaluation des infrastructures vertes à destination des investisseurs immobiliers. Celles-ci seront qualifiées par un impact environnemental et économique. L'outil permet, en outre, d'améliorer ces deux impacts à l'aide des critères prédéfinis.

Mots clés : Biodiversité, Critères de performance, BREEAM, LEED, HQE, Service écosystémique.

ABSTRACT

Previously greatly underestimated, the potential of green infrastructure, being increasingly studied in the scientific literature, is proving to be extremely beneficial on a building scale. From this standpoint, this work initially focuses on the study of the direct integration of biodiversity into the performance criteria of the three main global frames of references for environmental promotion, namely BREEAM, LEED and HQE. It appears that, on average, a relative importance of 6.5% of the points is dedicated to them. In a second step, the ecosystem services provided by greens infrastructures at the building and urban scale are described. This analysis made it possible to study the performance criteria of these three frames of references once again. It emerges that, once considered, greens infrastructures positively influence on average 45.8% of the available points. Finally, the last part of this work is devoted to the development of a green infrastructure evaluation tool for real estate investors. These will be qualified by their environmental and economic impact. The tool also makes it possible to improve these two impacts using predefined criteria.

Key words: Biodiversity, Performance criteria, BREEAM, LEED, HQE, Ecosystem services.

Table des matières

Liste des abréviations	7
Liste des figures	8
Liste des tableaux	9
Liste des annexes	10
Introduction.....	11
1 Contexte général	12
1.1 Environnement et biodiversité.....	12
1.2 Impact de la perte de biodiversité	19
1.3 Solutions pour répondre à la perte de biodiversité et l'urbanisation.....	20
2 Référentiels des bâtiments durables	23
2.1 Définition	23
2.2 BREEAM	25
2.3 LEED	27
2.4 HQE	30
2.5 Constat.....	33
3 Aménagements intégrant la biodiversité dans les bâtiments et services écosystémiques rendus.....	36
3.1 Introduction.....	36
3.2 Aménagements sur l'enveloppe du bâtiment.....	37
3.2.1 Les toitures végétales.....	37
3.2.2 Murs végétalisés.....	49
3.3 Aménagements dans le bâtiment	57
3.3.1 Biophilie.....	57
3.4 Aménagements autour du bâtiment.....	60
3.5 Résultats de l'étude des services écosystémiques rendus par la biodiversité	60
4 Influence des infrastructures vertes sur les indicateurs de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE.....	62
4.1 Méthodologie	62
4.2 Résultats	63
5 Développement d'un outil d'évaluation des infrastructures vertes.....	65
5.1 Cibles et objectifs.....	65

5.2	Evaluation environnementale	66
5.2.1	Introduction.....	66
5.2.2	Type de végétaux	67
5.2.3	Matériaux utilisés	67
5.2.4	Utilisation de l'eau	67
5.2.5	Innovation	67
5.3	Evaluation économique	68
5.4	Objectif fixé par impact	70
5.5	Visualisation de l'outil	70
5.6	Démonstration de l'outil	71
6	Amélioration des infrastructures vertes avec l'outil d'évaluation.....	73
	Discussions	75
	Conclusion	78
	Bibliographie	80
	Annexes	85

Liste des abréviations

BRE	Building Research Establishment
BREEAM	BRE Environmental Assessment Method
C	Concentration de polluant ambiant (Annexe3)
CO	Monoxyde de carbone
CO2	Dioxyde de carbone
COV	Composant organique volatile
DU	Unité dobson
F	Flux d'élimination des polluants (Annexe3)
FV	Façade végétale
GIEC	Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
Gt	Giga tonne
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HQE	Haute qualité environnementale
ICU	Illet de chaleur urbain
IUCN	Union internationale pour la conservation de la nature
kWh	Kilowatt heure
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MV	Mur vivant
N2	Diazote
NO2	Dioxyde d'azote
NOx	Oxyde d'azote
O3	Ozone
ONU	Organisation des Nations unies
PM10	Particule en suspension dans l'air dont le diamètre < 10 µm
PMRC	Programme de recherche climatologique mondiale
PMV	Vote moyen prévisible
POP	Polluants organiques persistants
PPD	Pourcentage de personnes insatisfaites
PPM	Partie par million
Q	Quantité de polluants atmosphériques éliminés (Annexe3)
S	Surface totale de la couverture verte (Annexe3)
SARS-CoV-2	Syndrome respiratoire aigu sévère du coronavirus 2
SBS	Syndrome des bâtiments malsains
SO2	Dioxyde de soufre
t	Tonne
T	Durée d'exposition (Annexe3)
Vd	Vitesse de dépôt

Liste des figures

Figure 1 Visualisation des 17 objectifs du développement durable [10]	13
Figure 2 Visualisation des neuf limites planétaires. La zone verte représente l'espace de fonctionnement où la pérennité du système terrestre est assurée. Les zones rouges représentent une estimation de la position de 2009 quant aux seuils établis [11].	15
Figure 3 Visualisation des couches d'une toiture végétale [42].	38
Figure 4 Les variations de température d'une toiture normale (a) et d'une toiture verte (b) à Singapour sur cinq jours d'été [3]	43
Figure 5 Illustration de l'intégration des panneaux solaires photovoltaïques sur une toiture verte [51]	48
Figure 6 Classification des façades végétales [52]	50
Figure 7 Comparaison du taux d'élimination du benzène des huit espèces végétales ornementales. Chaque valeur est la moyenne de trois répétitions [63].	59
Figure 8 Comparaison du taux d'élimination du benzène de C. comosum stérilisé et non stérilisé. Chaque valeur est la moyenne de trois répétitions [63].	59
Figure 9 Illustration de l'outil d'évaluation des infrastructures vertes selon les quatre scénarii sur le Tableau 12 , la zone verte représente la zone optimale dans laquelle devrait se trouver l'infrastructure afin de respecter les objectifs prédéfinis.....	72
Figure 10 Illustration de l'amélioration du scénario 2 en augmentant sa note environnementale de 40 % à 70 %, représenté par la flèche de couleur orange.....	74
Figure 11 Photo d'une façade verte directe.....	89
Figure 12 Photo d'une façade verte indirecte.....	89
Figure 13 Photo d'un mur vivant modulaire	89
Figure 14 Photo d'un mur vivant continu	89
Figure 15 Photo d'une façade verte continue.....	89

Liste des tableaux

Tableau 1 Classement des référentiels [32]	24
Tableau 2 Nombre de critères et de crédits disponibles en fonction des catégories dans le référentiel BREEAM pour les nouveaux bâtiments non-domestiques datant de 2018 [33] ...	25
Tableau 3 Niveau de certification BREEAM octroyé en fonction du score obtenu (%) [33]....	26
Tableau 4 Nombre de critères requis et points disponibles en fonction des catégories de critères du référentiel LEED V4, pour les nouvelles constructions [35]	28
Tableau 5 Niveau de certification LEED octroyé en fonction des points obtenus [35]	29
Tableau 6 Familles, Thèmes et cibles du référentiel HQE, version millésime 2015 [37]	31
Tableau 7 Niveau de labélisation HQE octroyé en fonction du nombre d'étoiles totales obtenues suivant la version du millésime 2015 [37]	32
Tableau 8 Classification des critères des référentiels BREEAM, LEED et HQE selon les huit familles de critères et pourcentage des points accordés [33][34][36]	34
Tableau 9 Résumé des services écosystémiques rendus par l'intégration de la biodiversité dans le bâtiment suivant les familles de critères établies dans le point 2.5	61
Tableau 10 Résultats de l'étude de l'influence des infrastructures vertes sur les critères de performance des trois référentiels BREEAM, LEED et HQE	63
Tableau 11 Classification des 17 sociétés immobilières belges selon trois groupes : Groupe A : présence d'une stratégie environnementale et mise en avant sur le site Internet de la société ; Groupe B : présence d'une stratégie environnementale sans mise en avant sur le site Internet de la société ; Groupe C : aucune stratégie environnementale présente.	65
Tableau 12 Description des quatre scénarii pour la démonstration de l'outil d'évaluation des infrastructures vertes	71
Tableau 13 Détail de la note environnementale, selon tous les critères de l'outil, du scénario 2 et de son amélioration	73
Tableau 14 Code couleur des huit familles de critères	85
Tableau 15 Classification des critères du référentiel BREEAM	86
Tableau 16 Classification des critères du référentiel LEED	87
Tableau 17 Classification des critères du référentiel HQE	88
Tableau 18 Code couleur de l'annexe 4	91
Tableau 19 Classification des critères de performance du référentiel BREEAM selon l'impact des infrastructures vertes	92
Tableau 20 Classification des critères de performance du référentiel LEED selon l'impact des infrastructures vertes	93
Tableau 21 Classification des critères de performance du référentiel HQE selon l'impact des infrastructures vertes	94

Liste des annexes

Annexe 1 Classification des critères de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE.	85
Annexe 2 Illustration des types de murs végétalisés [52].....	89
Annexe 3 Méthodologie de calcul atténuation de la pollution de l'air via une façade végétalisée [55]	90
Annexe 4 Impact des infrastructures vertes sur les critères de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE.....	91
Annexe 5 Code R permettant de développer l'outil d'évaluation des infrastructures vertes selon les quatre scénarios prédéfinis.....	95

Introduction

Le secteur de l'immobilier prenant une ampleur de plus en plus grande, est actuellement responsable, au niveau mondial, d'environ 33 % des émissions de gaz à effet de serre. L'énergie primaire dédiée à la construction des bâtiments et leur maintenance représente dorénavant entre 30 et 40 % de l'énergie mondiale. Ce secteur est, par conséquent, devenu l'une des principales causes du changement climatique devançant les secteurs du transport et de l'industrie [1][2]. Son impact sur l'environnement est également très problématique, l'accroissement des zones urbaines entraîne une diminution drastique des habitats naturels. De plus, la construction utilise environ 13 % de l'eau potable et 40 % des matières premières extraites mondialement. Cette conséquence est une réponse à l'explosion démographique qui ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle et qui, selon les prédictions, continuera d'être exponentielle jusqu'en 2050.

Il est, dès lors, urgent de mettre en place des solutions durables et environnementalement responsables. Parmi celles-ci, les infrastructures vertes, telles que les toitures végétales ou les murs végétalisés, semblent être un excellent compromis entre l'urbanisation et la préservation de la biodiversité [3]. Ainsi, les toitures peuvent représenter jusqu'à 32 % de la surface d'une zone urbaine et les façades possèdent près du double de ce potentiel de surface.

Dans cette optique, ce travail portera, dans un premier temps, sur l'étude de l'intégration directe de la biodiversité dans les critères de performance des trois principaux référentiels mondiaux concernant la promotion de l'environnement, à savoir BREEAM, LEED et HQE. Dans un second temps, les services écosystémiques, rendu par les infrastructures vertes à l'échelle du bâtiment et de la zone urbaine, seront décrits. Cette analyse permettra dans un troisième temps, d'étudier à nouveau les critères de performance de ces trois référentiels. Ceci, dans l'objectif de déterminer précisément le nombre de points disponibles influencés positivement par l'intégration de ce type d'aménagement. Finalement, la dernière partie de ce travail sera consacrée au développement d'un outil d'évaluation des infrastructures vertes à destination des investisseurs immobiliers. Celles-ci seront qualifiées par un impact environnemental et économique.

1 Contexte général

1.1 Environnement et biodiversité

Depuis bien plus de 50 ans, la majorité des scientifiques tirent la sonnette d'alarme à propos des problèmes environnementaux. Parmi les premiers rapports scientifiques, « Restoring the quality of our environment » annonce les dangers du dérèglement climatique. Il a été présenté au Président américain Lyndon Baines Johnson en 1965. Ce rapport dénonçait déjà les problématiques d'actualité telles que la fonte des glaciers, la hausse du niveau des mers et de leur température, le danger de l'acidification des océans, ... [4] S'en suit plus d'un demi-siècle de rapports tirant les mêmes conclusions. En 1979, se tient à Genève, en Suisse, une des toutes premières conférences mondiales sur le climat. L'organisation météorologique mondiale, le programme de l'Organisation des Nations-Unies (ONU) pour l'environnement et enfin le Conseil International des Unions Scientifiques s'uniront pour lancer, sous leur responsabilité, le Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PMRC). Le PMRC va diriger les travaux de recherches sur le fonctionnement et les mécanismes du système climatique terrestre, dont l'objectif final est de prédire l'évolution du climat sur le long terme [5]. Dix ans plus tard, en 1988, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) est créé. Il aura alors pour mission d'évaluer les informations scientifiques nécessaires pour mieux comprendre les risques du réchauffement climatique d'origine humaine ; de cerner les conséquences mais également d'envisager les différentes stratégies d'adaptation et d'atténuation. Le premier rapport du GIEC est sorti en 1990. Il reconnaît alors clairement la responsabilité humaine dans le dérèglement climatique [6].

Le rapport Brundtland est publié en 1987. Il deviendra le texte fondateur du développement durable et en donnera pour la première fois une définition¹ [7]. En rajoutant le terme « durable » au développement, cela lui donne un critère exogène. Ce qui signifie que, dorénavant, le développement n'est plus forcément un synonyme de progrès comme il l'a toujours sous-entendu. Un changement de perspective s'impose lorsque le « mal-développement » devient une réalité [8]. Ainsi, la protection de l'environnement doit maintenant faire partie intégrante du développement, au même titre que les deux autres piliers qui sont l'économie et le volet social [7].

¹ « Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [7].

Afin d'évoluer dans l'optique du développement durable, 17 objectifs ont été établis par l'ONU en 2015 (Figure 1), qui permettent d'assurer un avenir meilleur. Ils couvrent donc les trois piliers en passant par la pauvreté, les inégalités, le climat, la dégradation de l'environnement, la prospérité, la paix ou encore la justice. Ils sont tous liés entre eux. Chacun d'eux a des cibles spécifiques qui doivent être atteintes d'ici 2030 [9].

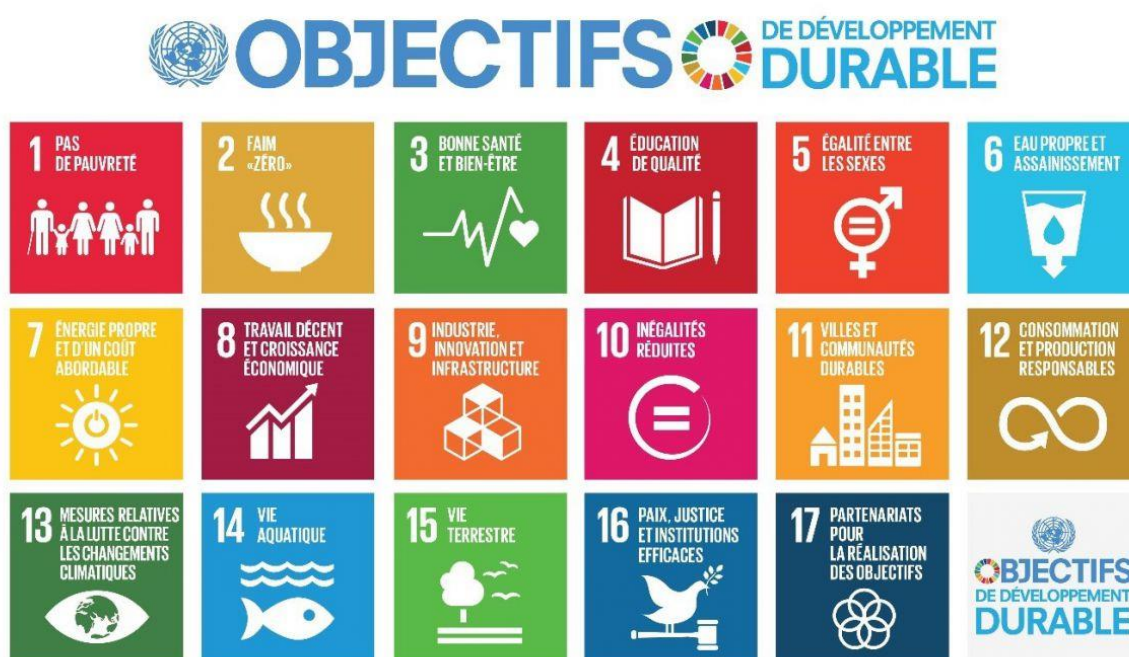


Figure 1 Visualisation des 17 objectifs du développement durable [10]

Dans le cadre de ce travail, deux objectifs en particulier seront développés :

- L'objectif numéro 13 s'intitulant « Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques ». Il a pour cible de renforcer les capacités d'adaptation face aux catastrophes naturelles qui sont liées au changement de climat ; d'incorporer ces mesures dans les politiques, les stratégies et la planification nationales ; d'améliorer l'éducation et la sensibilisation concernant l'adaptation aux changements climatiques, l'atténuation de leurs effets et la réduction de leurs impacts et les systèmes d'alerte rapide ; de mettre en œuvre l'engagement des pays développés qui était de mobiliser 100 milliards US\$ par an afin de répondre aux besoins des pays en voie de développement concernant les mesures concrètes d'atténuation et de la transparence de leur mise en œuvre.

Un point spécial dédié aux entreprises est lié à cet objectif. En effet, les Nations Unies indiquent que les entreprises peuvent jouer un rôle fondamental dans la lutte contre le réchauffement climatique. L'évolution du climat et la dégradation de l'environnement offrent, dorénavant, un nouveau marché où les entreprises peuvent se démarquer et augmenter leur compétitivité pour une meilleure croissance. Elles peuvent faire partie de la solution en s'engageant à décarboniser leurs activités et leur chaîne d'approvisionnement. Les recommandations sont : améliorer leur efficacité énergétique ; réduire l'empreinte carbone de leurs produits et services ; fixer des objectifs de réductions de leurs émissions ; augmenter leurs investissements dans des services innovants ; s'adapter au changement climatique en renforçant la résilience de leur activité. Une autre solution est d'impliquer l'entreprise dans le « programme des chefs d'entreprise pour la protection du climat ». C'est une initiative qui aide les entreprises à s'assurer d'être dans la bonne marche à suivre [11].

- L'objectif numéro 15 intitulé « Vie terrestre », a pour but de gérer durablement les forêts contre la désertification, d'inverser le processus de dégradation des sols et de mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité. Ces cibles sont entre autres de prendre d'urgence des mesures pour réduire la dégradation du milieu naturel en mettant un terme à l'appauvrissement de la biodiversité et en protégeant les espèces en voie de disparition ; de prendre des mesures pour empêcher l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, d'atténuer les effets que ces espèces ont sur les écosystèmes et également de contrôler les espèces prioritaires ; d'intégrer la protection des écosystèmes et de la biodiversité dans la planification nationale ainsi que dans les mécanismes de développement et, enfin, de mobiliser des ressources financières pour la préservation de la biodiversité et des écosystèmes [12].

En 2009, le rapport de Rocktröm et al. est publié. Celui-ci confirme également que les actions humaines sont le principal moteur du changement environnemental mondial. Neuf limites planétaires y sont établies afin d'aider à relever le défi de contrer ce changement (Figure 2). Cependant, si celles-ci se voyaient dépassées, la survie de l'être humain sur la biosphère ne serait plus assurée. L'environnement subirait, en effet, suite à ces dérèglements, des changements brutaux et imprévisibles menaçant l'espèce humaine.

Ces limites peuvent être définies par une valeur critique pour une ou plusieurs variables de contrôle. Cependant, ce n'est pas parce que les limites sont décrites via une valeur seuil individuelle ou des processus distincts qu'il faut les considérer comme isolées. En effet, elles sont toutes étroitement liées. Lorsqu'une limite est dépassée, les autres sont également impactées. L'objectif, bien qu'immense, est de se concentrer sur toutes les limites en même temps et de n'en négliger aucune [13].

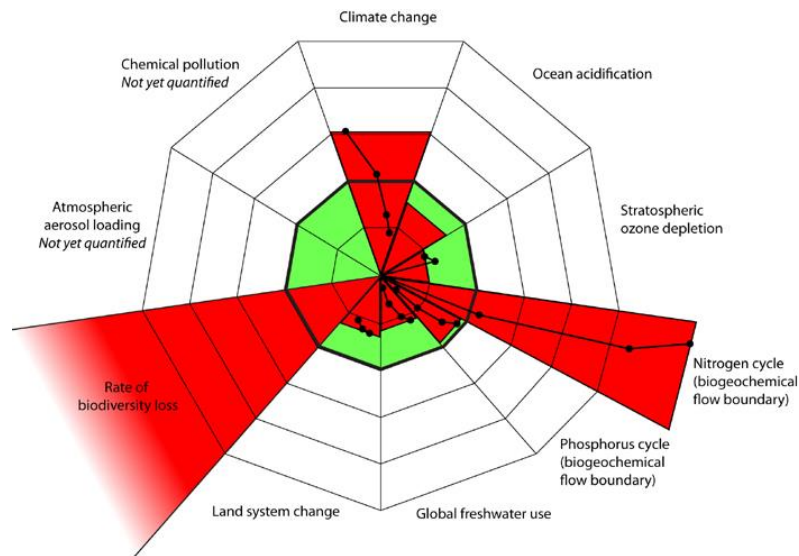


Figure 2 Visualisation des neuf limites planétaires. La zone verte représente l'espace de fonctionnement où la pérennité du système terrestre est assurée. Les zones rouges représentent une estimation de la position de 2009 quant aux seuils établis [11].

En 2009, l'impact sur les différentes limites était bien distinct. Pour deux limites, les seuils critiques étaient encore à déterminer. Il s'agit de la **Pollution Chimique**, qui peut être représentée soit par la quantité émise (ou concentration) de polluants organiques persistants (POP, molécules toxiques pour l'être humain résistantes aux dégradations biologiques naturelles), de plastiques, de perturbateurs endocriniens, de métaux lourds et de déchets nucléaires dans l'environnement, soit par les effets néfastes de ces substances sur les écosystèmes et le dérèglement engendré. La seconde limite non établie était la **charge atmosphérique des aérosols** qui mesure la concentration globale des particules dans l'atmosphère.

Cinq limites avaient des seuils critiques bien établis, mais pour lesquels ceux-ci n'étaient pas dépassés. De la moins impactée à la plus impactée :

- **L'appauvrissement de l'ozone stratosphérique.** La concentration en ozone est mesurée par l'unité Dobson (DU)². La valeur critique est de 276 DU et la valeur actuelle est de 283 DU ;
- **L'utilisation de l'eau douce dans le monde.** Elle est représentée par la quantité d'eau douce consommée par les êtres humains en km³ par an. Le seuil critique est de 4 000 km³/an et la consommation actuelle est de 2 600 km³/an ;
- **Le changement d'affectation des sols.** Il est représenté par le pourcentage de la couverture terrestre convertie en terres cultivées. Actuellement, 11,7 % de la surface terrestre est occupée par les terres agricoles et la limite est de 15 % ;
- **L'acidification des océans** qui est représentée par l'état moyen de saturation de l'aragonite (Ω_a) dans l'eau de mer de surface. La valeur seuil est de 2,90 unité et il ne faut pas atteindre les 2,75 unité ;
- **Le dérèglement du cycle du phosphore** qui est, en partie, en lien avec celui de l'azote. Il est représenté par la quantité de phosphore qui s'écoule dans les océans en millions de tonnes par an. Il ne faut pas atteindre 11 millions de t/an et l'état actuel de 8,5 à 9,5 en fonction des régions.

En revanche, trois de ces limites avaient déjà été largement dépassées :

- **Le changement climatique** est représenté soit via la concentration de CO₂ dans l'atmosphère en partie par million (ppm). La concentration était de 387 ppm et la valeur seuil est de 350. S'il est exprimé via la variation du forçage radiatif (différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise) en watt par m² (W/m²), celui-ci était de 1,5 et la limite est de 1 W/m² ;

² Une unité Dobson correspond à une couche d'ozone qui aurait 10 µm d'épaisseur dans les conditions normales de température et de pression.

276 DU = couche d'une épaisseur de 2,76 mm à la surface de la Terre

- **Le dérèglement du cycle de l'azote** qui est, en partie, en relation avec celui du phosphore. Il est quantifié en mesurant la quantité de N₂ retirée de l'atmosphère pour un usage humain en millions de tonnes par an (t/an). La quantité à ne pas dépasser est de 35 millions t/an. En 2009, 121 millions t/an de N₂ étaient extraites de l'atmosphère ;
- La dernière limite et la plus impactée sur notre planète est le **taux de perte de biodiversité**. Il est représenté par un taux d'extinction des espèces. Autrement dit, le nombre d'espèces disparues par millions d'espèces présentes sur terre par an. L'extinction des espèces est un processus naturel et se produit normalement sans intervention humaine, ce qui explique pourquoi la valeur préindustrielle est estimée entre 0,1 et 1. Cependant, le taux actuel d'extinction des espèces est présumé valoir de 100 à 1 000 fois celui qui devrait être normalement considéré comme naturel. Un tel taux n'a pas été observé depuis la dernière extinction massive mondiale qui s'est produite il y a 66 millions d'années. Certains scientifiques considèrent, dès lors, notre période actuelle comme étant la sixième grande extinction massive [14].

Afin d'être bien clair sur le terme de la biodiversité, il est tout d'abord important de le définir. En biologie, ce terme comprend toute la variabilité du monde vivant. Il existe, dès lors, plusieurs niveaux de biodiversité :

- Le tout premier est la **diversité génique ou intraspécifique**, qui explique que tous les êtres d'une même espèce sont différents ; elle résulte de la variation des allèles au sein de même gène. Elle engendre donc, à titre d'exemple, les différentes couleurs de peau chez les êtres humains issus d'ethnies variées ;
- Le second niveau est la **diversité interspécifique**, la plus connue, qui correspond à la diversité des espèces ;
- Enfin, le dernier niveau est la **diversité écosystémique** qui reprend l'ensemble des interactions entre les différentes espèces vivantes et leur milieu de vie abiotique [15].

Ces trois niveaux de diversité sont essentiels à la sélection naturelle qui, elle-même, est le principal mécanisme de la survie des espèces. En effet, sans biodiversité, les espèces ne possèderaient plus la capacité de s'adapter aux modifications environnementales naturelles. Dans le cadre de ce travail, seuls les deux derniers niveaux seront considérés dans la définition de la biodiversité.

Les raisons de ce taux d'extinction anormal sont nombreuses mais toutes sont de la même source : les activités humaines. Parmi ces activités, c'est le développement urbain (ou l'urbanisation) qui impacte le plus les espèces locales, suite à une fragmentation des écosystèmes [16]. C'est également celle qui va persister le plus longtemps car la construction des bâtiments et des villes est souvent synonyme de l'installation de l'être humain et donc que l'habitat naturel ne sera pas restauré avant des dizaines d'années voire des siècles. Bien au contraire, la zone aura même tendance à s'accroître car les villes s'étendent de plus en plus. A l'inverse, la retransformation des terres cultivables en zone naturelle est plus aisée une fois l'activité terminée [17].

Les autres activités humaines impactant les espèces découlent directement ou indirectement de l'urbanisation. En effet, lorsqu'une zone urbaine naît, les zones agricoles suivent le même rythme en périphérie de celle-ci afin de nourrir la population [17].

Le processus d'homogénéisation biotique est également une menace pour la conservation des espèces. Il représente le remplacement des espèces indigènes perdues par d'autres espèces non indigènes ubiquistes pouvant être qualifiées d'invasives pour certaines. Comme le nom du processus l'indique, il provoque une homogénéisation des communautés au sein des écosystèmes. En réduisant de la sorte leur unicité biologique, les écosystèmes sont moins résistants et plus sensibles aux variations de leur environnement [17][18]. Cette introduction peut être volontaire, cas de la perche du Nil (*Lates niloticus*) [19] ou de manière fortuite, cas de l'algue verte tropicale (*Caulerpa taxifolia*) [20].

Les incendies, bien que nécessaires chez certaines espèces qui ont co-évolué en symbiose avec ceux-ci dans certaines régions, des changements dans leurs régimes peuvent entraîner des dérèglements majeurs dans la structure des communautés. Ainsi les changements de fréquence, de durée ou dans l'ampleur des incendies causés par le changement climatique est la quatrième grande cause de perte de biodiversité, ils sont nommés « mégafeux » [21].

Si les causes de ce taux d'extinction des espèces anormal sont très étudiées dans la littérature scientifique et pour la plupart aujourd'hui, bien connues, les conséquences de ce phénomène le sont beaucoup moins. Il est en effet bien plus difficile de monétiser, quantifier ou encore estimer les impacts futurs de la perte de biodiversité sur les écosystèmes terrestres.

1.2 Impact de la perte de biodiversité

Bien que l'impact de la perte de biodiversité pourrait tenter d'être estimé ou monétisé, il faut avant tout souligner que la perte d'une espèce vivante sur terre est inestimable. C'est le fruit de millions d'années d'évolution et de sélection naturelle qui disparaît en quelques décennies. Comme expliqué précédemment, la biodiversité permet une plus grande résilience des écosystèmes et communautés face aux variations naturelles. Plus une communauté est variée, plus elle sera apte à résister et à s'adapter. La biodiversité est ainsi le premier critère de la sélection naturelle Darwinienne. Elle est donc indispensable à la survie des espèces mais également à leur évolution.

D'un point de vue plus anthropique, la biodiversité rend une quantité considérable de services à la population humaine. Ils sont nommés les « services écosystémiques ». Ils peuvent agir dans tous les domaines, tant au niveau mondial que local. Des scientifiques ont tenté de quantifier et monétiser ces services dans de nombreux domaines. A titre d'exemple, la valeur des insectes pollinisateurs tels que les abeilles et les papillons, est estimée à plus de 200 milliards de dollars américains par an pour l'économie agroalimentaire [12]. Dans le domaine pharmaceutique, les trois quarts des médicaments prescrits dans le monde sont issus de molécules extraites dans les plantes. Ainsi la célèbre « Aspirine », anti-inflammatoire non-stéroïdien, dont la molécule active est l'acide acétylsalicylique, a été découverte dans l'antiquité, extraite de l'écorce du saule blanc (*Salix Alba*) [22]. Plus les espèces disparaissent et moins les laboratoires seront aptes à trouver de nouvelles molécules permettant de nous soigner dans l'avenir. Dans un tout autre domaine, les catastrophes naturelles, provoquées par le changement climatique qui bouleverse les écosystèmes, coûteraient actuellement environ 300 milliards de dollars américains par an à la société [12]. Cette somme ne fera que croître avec l'augmentation de la fréquence de ces phénomènes. Ces catastrophes peuvent aller des incendies aux tsunamis en passant par le dérèglement des saisons au niveau des basses latitudes. Dans le domaine des forêts, leur déforestation entraîne, en plus de la perte d'habitats (pour les espèces animales, végétales mais également pour certaines tribus autochtones), une augmentation de l'érosion des sols, une diminution de la qualité de l'eau douce et une importante quantité supplémentaire d'émission de carbone dans l'atmosphère [19][20].

Telle que le souligne Idriss Aberkane, « la nature est une bibliothèque, il faut apprendre à la lire au lieu de brûler ses livres pour nous chauffer »³.

Comme expliqué ci-dessus, les services écosystémiques sont donc essentiels à notre survie sur Terre. Cependant, ceux-ci sont menacés par la perte de biodiversité qui découle des effets directs et indirects de l'urbanisation. Or, avec l'explosion démographique attendue dans les prochaines décennies (environ 9,7 milliards d'êtres humains d'ici 2050 [25]), l'expansion de l'urbanisation est inévitable. Il est avant tout nécessaire de trouver des solutions permettant de répondre à cette problématique.

1.3 Solutions pour répondre à la perte de biodiversité et l'urbanisation

Il semble que la société actuelle commence peu à peu à prendre conscience de cette problématique majeure. De plus en plus de programmes, d'actions, de projets, de plans se développent afin de préserver la biodiversité et d'en enrayer sa perte. Les plus importants d'entre eux tels que la stratégie environnementale de l'Union Européenne, les objectifs d'Aichi ou encore le programme de l'ONU pour l'année 2020 seront développés dans ce travail à titre d'exemple.

L'Union Européenne a adopté en 2011 pour l'horizon 2020 une stratégie pour protéger et améliorer l'état de la biodiversité en Europe. Elle est composée de six objectifs et de 20 actions précises qui couvrent les principaux facteurs de perte de biodiversité, et qui permettront de diminuer les pressions s'exerçant sur la nature. Cette stratégie « Biodiversité » fait partie de la stratégie de croissance « Europe 2020 » [26].

A titre d'exemple, l'objectif numéro deux est de « Préserver et rétablir les écosystèmes et leurs services » et une des actions proposées est d'étendre l'utilisation des infrastructures vertes dans les zones urbaines et rurales afin de rétablir les écosystèmes. Selon le Parlement Européen, le maintien et l'amélioration de ces infrastructures vertes représentent un outil essentiel pour soutenir et promouvoir le développement durable dans les différents secteurs.

³ Idriss Aberkane, 2018, « L'Âge de la connaissance : Traité d'écologie positive » Paris, Robert Laffont, collection. « Réponses ».

Les infrastructures vertes sont définies comme étant « un réseau stratégiquement planifié de zones naturelles et semi-naturelles, avec des caractéristiques environnementales associées, conçues et gérées pour fournir de nombreux services écosystémiques » [24][26].

La même année, les Parties de la Convention sur la diversité biologique⁴ ont également établi 20 nouveaux objectifs nommés « Les objectifs d'Aichi ». Ils constituent le nouveau « Plan stratégique pour la diversité biologique 2011-2020 ». Les 20 objectifs sont organisés en 5 buts stratégiques. Ils visent entre autres à assurer le maintien des services fournis par les écosystèmes [27].

En guise d'exemple, l'objectif C.11 indique que « les zones qui sont particulièrement importantes pour la diversité biologique et les services fournis par les écosystèmes doivent être conservées au moyen de réseaux écologiques gérés efficacement et équitablement » [27].

L'année 2020 a également été déclarée comme étant l'année internationale de la santé des végétaux par l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture. Ce lancement a pour objectif de sensibiliser le public à la protection de l'environnement ainsi que le dopage du développement économique [28].

Il existe également des Plans élaborés pour une échelle plus locale tel que le « Plan Nature 2016-2020 » de la région Bruxelles-Capitale. Ces Plans ne seront pas développés car ce travail se veut être le plus international possible.

L'année 2020 paraît donc comme étant l'année de tous les objectifs environnementaux. Un congrès devait d'ailleurs se tenir à Marseille : « le congrès mondial de la nature 2020 de l'IUCN ». Son rôle était, pour les parties prenantes, de se concerter sur l'avancement de ces objectifs. Cependant, il a malheureusement dû être annulé suite au confinement concernant la pandémie du SRAS-CoV-2.

⁴ Traité international adopté lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992

Il semble qu'une solution à la problématique de la perte de biodiversité et l'expansion de l'urbanisation soit donc l'intégration des services écosystémiques dans les bâtiments durables ainsi que la mise en place d'infrastructures vertes préservant la biodiversité dans les zones urbaines [24].

Un bâtiment durable serait donc un bâtiment dans lequel les services écosystémiques y seraient intégrés au maximum. Ce type de mesure devrait viser à améliorer simultanément les conditions environnementales, la qualité de vie des citoyens et leur santé, ainsi que de permettre une économie fiable.

Afin d'instaurer un cadre clair avec des objectifs de performance précis, les bâtiments peuvent être soumis à une évaluation. Celle-ci est réglementée et gérée par des référentiels qui, eux-mêmes, comportent toute une série de critères et d'indicateurs de performance.

2 Référentiels des bâtiments durables

2.1 Définition

Un référentiel est, par définition, un système de référence. Il sous-entend que toutes les réglementations soient respectées, qu'elles soient nationales, régionales ou locales. Sans cela un référentiel ne peut être validé. Une réglementation découle directement d'un projet de loi ou d'un règlement, la nuance entre ces deux termes est une différence de forme, la loi étant un acte voté par un Parlement tandis que le règlement émane du pouvoir exécutif [29]. C'est la raison pour laquelle l'application des réglementations est imposée.

Une fois validé, le référentiel peut octroyer soit une certification, soit un label. La nuance entre les deux est que la certification doit être fournie via un organisme accrédité et indépendant. C'est donc une procédure permettant de certifier la qualité et la conformité d'un bâtiment. Le label, quant à lui, regroupe également un ensemble d'exigences auxquelles les produits labellisés doivent répondre. Cependant, la caution technique est moindre, car le label peut être octroyé via un organisme privé ou public qui n'est pas accrédité. Il est de la sorte beaucoup moins encadré que la certification [30].

Les référentiels sont des documents composés de toute une série de normes qui, elles-mêmes, sont des documents de référence approuvés par un Institut de normalisation reconnu. Ne provenant pas d'un règlement, les normes ne sont pas obligatoires⁵. Le fait de les appliquer témoigne d'un engagement des promoteurs immobiliers afin de démontrer la qualité reconnue de leurs bâtiments [30].

Les normes sont composées d'un ensemble de critères de performance. Ceux-ci peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Lorsqu'ils sont quantitatifs, ils sont nommés indicateurs de performance [31].

⁵ Si les normes ne sont pas nécessairement obligatoires, elles appartiennent à l'état de l'art. Dès lors, un auteur de projet qui conçoit un bâtiment ne respectant pas strictement certaines normes pourrait se le voir reprocher par le maître d'ouvrage, puisque le bâtiment serait construit en ne respectant pas ces règles de l'art.

Il existe de nombreux référentiels concernant les bâtiments dont quelques-uns sont repris sur le Tableau 1. Chacun possédant son propre système d'évaluation ainsi que sa propre vision des performances indispensables. Globalement, les référentiels existants tendent à promouvoir les performances énergétiques du bâtiment, la réduction de l'empreinte carbone du bâtiment, le bien-être des occupants ou encore d'autres performances environnementales (telles que la gestion des eaux pluviales, l'utilisation durable des matériaux, ...).

Tableau 1 Classement des référentiels [32]

Nom du référentiel	Origine	Type	Classement
RT 2020	France	Réglementation	Performance énergétique
PEB	Belgique	Règlementation	Performance énergétique
Effinergie	France	Label / R	Performance énergétique
PassivHaus	Allemagne	Label / R	Performance énergétique
Minergie	Suisse	Label / R	Performance énergétique
BBCA	France	Label	Réduction empreinte carbone
Biosourcé	France	Label	Réduction empreinte carbone
WELL	USA	Label	Bien-être social
OSMOZ	France	Label	Bien-être social
HQE	France	Marque/label	Environnemental
BREEAM	Royaume-Uni	Certification	Environnemental
LEED	USA	Certification	Environnemental

La certification ou le label octroyé par le référentiel permet d'ajouter une reconnaissance au bâtiment. Ils représentent une sorte de sûreté pour les prochains acquéreurs ou les investisseurs. De plus, le coût de la construction d'un bâtiment écologique (certifié) n'est pas nécessairement supérieur à celui d'un bâtiment de conception conventionnelle comparable. Or, en tenant compte du rendement sur le marché (plus-value du bâtiment lorsque celui-ci est certifié) ainsi que du rendement opérationnel du bâtiment, il devient évident que le bâtiment conventionnel est moins rentable. Les certifications sont un avantage concurrentiel non négligeable sur le marché immobilier.

Les trois principales certifications internationales concernant les performances environnementales sont BREEAM, LEED et HQE. Ces trois référentiels vont donc être expliqués en détail dans la suite de ce travail.

2.2 BREEAM

Développé par le Building Research Establishment (BRE) en Grande-Bretagne, BREEAM est une méthode d'évaluation du comportement environnemental des bâtiments. Ce référentiel, créé en 1990, avait pour premier objectif d'établir la norme de la meilleure méthode pour la conception, la construction et le fonctionnement de bâtiments écologiques permettant, de la sorte, d'atténuer les impacts des constructions sur l'environnement.

Les cibles de ce référentiel sont les bâtiments neufs et existants de tous types de domaines : bâtiments administratifs, tertiaires, résidentiels, industriels, centres commerciaux, établissements scolaires, hôpitaux, prisons, cours de justice, ... Chaque typologie de bâtiment possède son propre référentiel d'évaluation adapté.

Les critères sont répartis selon neuf grandes catégories tout au long du cycle de vie du bâtiment, de la conception des plans du bâtiment jusqu'à sa démolition (Tableau 2) [33].

Tableau 2 Nombre de critères et de crédits disponibles en fonction des catégories dans le référentiel BREEAM pour les nouveaux bâtiments non-domestiques datant de 2018 [33]

Catégories	Nombre de critères	Crédits disponibles
<i>Gestion des opérations</i>	5	21
<i>Santé et bien-être humain</i>	6	20
<i>Energie</i>	8	31
<i>Transport</i>	2	12
<i>Eau</i>	4	11
<i>Matériaux utilisés</i>	5	14
<i>Recyclage des matériaux / déchets</i>	6	11
<i>Environnement et écologie</i>	5	13
<i>Pollution</i>	5	12
<i>Innovation</i>	1	1
<i>Total</i>	47	144

Chaque critère est évalué séparément afin de déterminer le nombre de crédits obtenus. Ensuite, le score pour chaque catégorie est calculé en fonction des différentes pondérations et importance de celles-ci. Le total de 144 crédits correspond à 100 %.

La note finale, donnée en pourcentage, permet de classer le niveau de performance du bâtiment selon cette grille d'évaluation. A partir de 30 %, la certification BREEAM est obtenue. Il est cependant important de noter que, pour chaque niveau de certification, il existe des critères minima obligatoires pour l'obtenir (Tableau 3) [33].

Tableau 3 Niveau de certification BREEAM octroyé en fonction du score obtenu (%) [33]

Niveau de certification BREEAM	Score (%)
<i>Non classé</i>	< 30
<i>Passable</i>	≥ 30
<i>Bon</i>	≥ 45
<i>Très bon</i>	≥ 55
<i>Excellent</i>	≥ 70
<i>Exceptionnel</i>	≥ 85

Aujourd'hui étant considéré, à travers le monde, comme le référentiel le plus complet et le plus utilisé à propos de la performance environnementale, BREEAM évolue chaque année afin de répondre aux nouvelles réglementations des différents pays. Près de 572 000 bâtiments sont actuellement certifiés BREEAM dans 86 pays [34].

2.3 LEED

LEED ou *Leadership in Energy and Environmental Design*, est le référentiel Américain de standardisation des bâtiments à haute qualité environnementale. Il a été créé par le *US Green Building Council* en 1998. Il est, avant tout, adapté au marché américain et canadien pour les bâtiments tertiaires neufs et existants. Le référentiel a cependant évolué, et la dernière version (V4, 2016) permet d'évaluer les bâtiments commerciaux, institutionnels, résidentiels, hospitaliers et les aménagements de quartier [35].

L'objectif premier de LEED est d'intégrer le bien-être des occupants, la performance environnementale et le rendement économique des bâtiments intégrant de la sorte les trois piliers du développement durable [35].

Dans la quatrième version du référentiel, les critères sont répartis selon neuf catégories. Pour chacune d'entre elles, il existe des critères prérequis qui sont fondamentaux à la certification LEED. Si ceux-ci ne sont pas respectés, la certification ne peut être octroyée. Les autres critères rapportent des points allant de 1 à 16 (

Tableau 4). Le nombre de points disponible par catégorie varie en fonction des différents types de bâtiments. Il existe également des critères supplémentaires propres à certains types de bâtiments ; c'est le cas notamment pour les écoles et les hôpitaux. Un point supplémentaire est attribué si un processus d'intégration a été réalisé en amont du projet. Chaque critère est évalué individuellement. S'il est acquis, le critère est validé et l'entièreté des points disponibles pour ce critère est octroyée [35].

Tableau 4 Nombre de critères requis et points disponibles en fonction des catégories de critères du référentiel LEED V4, pour les nouvelles constructions [35]

Catégories	Nombre de critères	Nombre de critères prérequis	Points disponibles
<i>Emplacement et transport</i>	8	0	32
<i>Sites écologiques</i>	7	1	10
<i>Gestion efficace de l'eau</i>	7	3	11
<i>Energie et atmosphère</i>	11	4	33
<i>Matériaux et ressources</i>	7	2	13
<i>Qualité de l'environnement intérieur</i>	11	2	16
<i>Innovation</i>	2	0	6
<i>Priorités régionales</i>	1	0	4
<i>Total</i>	54	12	125

Tableau 4 ci-dessus ne reprend que les critères pour les nouvelles constructions (ou rénovations importantes). Selon LEED, ces bâtiments sont, soit dans le domaine tertiaire, soit dans le résidentiel, mais ne doivent pas servir à l'enseignement, au commerce de détail, aux centres de données, aux entrepôts, aux centres de distribution, à l'hôtellerie ou aux soins de santé.

Le total des points disponibles est donc différent suivant les catégories de bâtiments. Pour les nouvelles constructions, il est de 125. LEED comporte quatre niveaux de certification, en fonction des seuils de points atteints (Tableau 5) [35].

Tableau 5 Niveau de certification LEED octroyé en fonction des points obtenus [35]

Niveau de certification LEED	Score (point)	Nombre de projet certifiés en 2020 (rendu public) ⁶
<i>Non certifié</i>	< 40	/
<i>Certifié</i>	40 à 49	19 615
<i>Argent</i>	50 à 59	21 437
<i>Or</i>	60 à 79	23 232
<i>Platine</i>	80 ou plus	8 318

Il y a actuellement environ 120 000 projets certifiés LEED à travers le monde [36], ce qui en fait le deuxième référentiel le plus utilisé après BREEAM.

⁶ Sur les 124 276 projets certifiés LEED en 2020, seuls 72 602 sont accessibles. Les données des projets restants sont confidentielles [36].

2.4 HQE

La Haute Qualité Environnementale (HQE) est définie comme étant une démarche de management de projet visant à obtenir la qualité environnementale d'une opération de construction ou de réhabilitation.

Le référentiel est structuré en deux volets permettant d'évaluer, d'une part le management environnemental et, d'autre part, la performance architecturale et technique de l'ouvrage. Le premier volet permet de définir la Qualité Environnementale visée pour le bâtiment et d'organiser l'opération pour l'atteindre. Le second volet est, quant à lui, divisé en 14 cibles regroupées en quatre thèmes qui, eux-mêmes, font partie de deux familles (Tableau 6).

La structure du référentiel est applicable à toute typologie de bâtiment tertiaire. Chaque cible est composée d'une première partie générique regroupant les préoccupations de base. Cette partie s'évalue donc de la même manière pour tous les bâtiments. La seconde partie additionnelle s'applique à des cas spécifiques d'utilisation du bâtiment. Certaines cibles n'ont cependant pas d'exigence additionnelle et sont donc entièrement génériques [37].

Tableau 6 Familles, Thèmes et cibles du référentiel HQE, version millésime 2015 [37]

Familles	Thèmes	Cibles	Nombre de critères
Maitriser les impacts sur environnement extérieur	Energie	Gestion de l'énergie	4
	Environnement	Le bâtiment et son environnement immédiat	4
		Choix des produits, système et procédés de construction	4
		Chantier à faible nuisance environnementale	3
		Gestion de l'eau	3
		Gestion des déchets	2
		Maintenance / pérennité des performances environnementales	3
Produire un environnement intérieur satisfaisant	Confort	Hydrothermique	4
		Acoustique	2
		Visuel	2
		Olfactif	2
	Santé	Qualité sanitaire des espaces	2
		Qualité sanitaire de l'air	2
		Qualité sanitaire de l'eau	4

Le système de cotation de HQE est plus complexe que celui des deux référentiels cités précédemment. Une moyenne pondérée en fonction des différentes importances des critères est réalisée et chacun des quatre thèmes (Energie, Environnement, Confort et Santé) est évalué sur une échelle allant de zéro à quatre étoiles. Le niveau de labélisation HQE octroyé est fonction du nombre d'étoiles totales obtenues (Tableau 7) [37].

Tableau 7 Niveau de labélisation HQE octroyé en fonction du nombre d'étoiles totales obtenues suivant la version du millésime 2015 [37]

Niveau de certification HQE	Nombre d'étoile(s)
Non labélisé	Pas d'étoile
Bon	Entre 1 et 4 étoiles
Très bon	Entre 5 et 8 étoiles
Excellent	Entre 9 et 11 étoiles
Exceptionnel	+ de 12 étoiles (et minimum 3 dans thème énergie)

2.5 Constat

Après analyse des critères de ces trois référentiels, la présence de la biodiversité dans les actions recommandées est extrêmement faible. Il y a, en tout, 142 critères, 47 dans BREEAM, 54 dans LEED et 41 dans HQE (ANNEXE 1).

A titre d'information, le terme « biodiversité » n'apparaît que 74 fois dans les 1632 pages cumulées des trois référentiels soit 46 fois dans BREEAM, 22 fois dans HQE et 6 dans LEED.

Afin de clarifier les familles de critères et d'uniformiser celles-ci entre les trois référentiels, huit catégories pouvant regrouper les 142 critères ont été établies. Elles s'organisent comme suit :

- **ADMINISTRATION** : critère portant sur toutes les réflexions en amont du projet ; le commissioning ; le suivi de projet en amont et aval de la construction ; sélection du site en fonction des différentes caractéristiques. La gestion du transport y est également incluse, telle que la mise en place de parking de vélo, l'utilisation de véhicules verts ;
- **GESTION DES MATÉRIAUX ET DÉCHETS** : critère portant sur l'utilisation durable des matériaux de construction, de leur impact sur l'environnement, des analyses de cycle de vie du bâtiment ; la gestion des déchets pendant et après la construction, ainsi que les déchets de démolition en fin de vie du bâtiment ;
- **CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES** : critère portant sur les performances acoustiques et d'éclairage. La gestion de la pollution sonore et lumineuse y est comprise. Les innovations, bien que très diverses, pouvant donc faire partie de plusieurs familles, seront reprises dans cette catégorie ;
- **ÉNERGIE** : critère portant sur les performances énergétiques d'un point de vue design, efficacité et monitoring du système énergétique ; la consommation énergétique (énergie primaire, finale et utile) et l'utilisation des énergies renouvelables ;
- **EAU** : critère portant sur l'efficacité des systèmes de gestion de l'eau (consommation, monitoring) ; système de détection des fuites, gestion et utilisation de techniques alternatives des eaux pluviales ;
- **CONFORT HUMAIN** : critère portant sur le bien-être et la santé humaine. Le confort au sein du bâtiment (thermique, visuel, acoustique, hydrothermique) et la qualité de l'air intérieur y sont donc compris ;

- **POLLUTION CHIMIQUE** : critère portant sur la pollution chimique engendrée par l'étape de construction du bâtiment ainsi que sa phase d'utilisation ;
- **BIODIVERSITÉ** : critère favorisant l'intégration des services écosystémiques au sein du bâtiment, permettant d'enrayer la perte de la biodiversité et favorable à l'écologie et à la protection de l'environnement autour du bâtiment.

La nouvelle répartition des 142 critères des trois référentiels selon ces huit familles est représentée dans le Tableau 8.

Tableau 8 Classification des critères des référentiels BREEAM, LEED et HQE selon les huit familles de critères et pourcentage des points accordés [33][34][36]

	BREEAM			LEED			HQE	
	Nombre de critères	Nombre de points	% des points	Nombre de critères	Nombre de points	% des points	Nombre de critères	% des critères
ADMINISTRATION	7	29	20,1	12	42	33,6	5	12,2
GESTION MATÉRIAUX / DÉCHETS	12	31	21,5	7	16	12,8	6	14,6
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES	5	8	5,6	6	13	10,4	5	12,2
ENERGIE	7	30	20,8	7	26	20,8	1	2,4
EAU	5	14	9,7	8	14	11,2	7	17,1
CONFORT HUMAIN	6	18	12,5	6	7	5,6	12	29,3
POLLUTION CHIMIQUE	1	3	2,1	4	1	0,8	2	4,9
BIODIVERSITÉ	4	11	7,6	4	6	4,8	3	7,3
Total	47	144	100	54	125	100	41	100

Bien que ces trois certifications soient les références mondiales en termes de promotion de l'environnement, les critères favorisant l'intégration de la biodiversité dans les infrastructures sont seulement au nombre de 11. Ceux-ci représentent, pour BREEAM et LEED, respectivement **7,6 %** et **4,8 %** des points totaux. La cotation de HQE, étant différente, l'importance des catégories n'est pas mesurée en termes de points mais en nombre de critères validés. La protection de la biodiversité est assurée par trois critères sur 41, soit **7,3 %**.

En moyenne, la biodiversité occupe donc, dans les trois référentiels, une importance relative de **6,5 %**⁷. Or, en intégrant la biodiversité dans les infrastructures, de nombreux autres critères pourraient être influencés positivement. L'importance des services écosystémiques à l'échelle mondiale a été démontrée ci-dessus et celle-ci peut être applicable à une échelle bien plus réduite, celle du bâtiment.

Dans l'objectif d'améliorer les critères de performance des bâtiments durables, l'importance de l'intégration de la biodiversité dans ceux-ci (et des services écosystémiques rendus), sera développée dans le point suivant.

⁷ Cette moyenne est rendue possible en prenant en considération qu'un critère du référentiel HQE équivaut à un point. Ce qui n'est pas le cas dans les référentiels BREEAM et LEED.

3 Aménagements intégrant la biodiversité dans les bâtiments et services écosystémiques rendus

3.1 Introduction

L'utilisation de la biodiversité dans les infrastructures humaines n'est pas une innovation. La ville de Babylone, au 5^{ème} siècle, possédait déjà des jardins suspendus [1] ; les temples de l'ancienne Mésopotamie étaient également munis de toitures végétales. Cependant, ces pratiques, bien que durables, n'ont pas connu la même croissance que l'urbanisation moderne. Longtemps oubliées, c'est au 20^{ème} siècle que ces techniques ont refait surface notamment grâce à certains architectes tels que Le Corbusier en Europe ainsi que d'autres architectes américains qui ont démocratisé l'intégration de la nature dans les bâtiments [3].

Trois catégories peuvent être établies afin de classer les différents aménagements permettant d'intégrer la biodiversité dans les infrastructures humaines :

- Les aménagements sur l'enveloppe du bâtiment ;
- Les aménagements dans le bâtiment ;
- Les aménagements autour du bâtiment.

Plusieurs exemples d'aménagements seront développés ci-dessous ; il s'agit de ceux permettant d'intégrer au mieux les services écosystémiques à l'échelle du bâtiment. Ils permettent également de répondre aux **6,5 %** des critères définis ci-dessus. La liste de actions qui seront présentées n'est pas exhaustive mais toute action intégrant la biodiversité devrait pouvoir être classée parmi ces trois catégories.

3.2 Aménagements sur l'enveloppe du bâtiment

3.2.1 Les toitures végétales

Les toitures jouent un rôle de plus en plus important dans les efforts de durabilité urbaine. De nombreuses technologies ont été développées pour réduire le ruissellement des eaux pluviales, produire de l'électricité, réduire la consommation d'énergie des bâtiments ou atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain [38]. Le projet DrawDown a été établi par plus de 70 chercheurs issus du monde entier. Il dresse la liste d'une centaine de solutions dans l'objectif d'inverser le réchauffement climatique. Les impacts potentiels de chaque solution sont dressés. Les toitures vertes et toits frais⁸ sont la 73^{ème} solution du programme. Selon ce comité de chercheurs, si l'installation des toits frais augmentaient de 10 % et les toits verts de 11 % par an, en 2050 un total de 47 à 75 milliards de m² de toitures efficaces seraient installées au niveau mondial. Ces deux technologies pourraient réduire les émissions de CO₂ de 0,6 à 1,1 Gt par an. Le coût serait de 624 à 955 milliards de dollars américains pour des économies d'exploitation à vie de 330 à 593 milliards de dollars américains [39].

Les toitures peuvent représenter aujourd'hui jusqu'à 32 % de la surface 2D d'une zone urbaine. Bien que tous les toits ne soient pas plats et adaptés structurellement à supporter une toiture végétale [40].

3.2.1.1 Structure d'une toiture végétale

Les toitures végétales ne doivent pas être confondues avec les jardins de toitures. Ceux-ci sont, en effet, de simples jardins posés sur une toiture déjà existante et ayant pour la plupart une vocation ornementale et décorative. Les toitures végétales possèdent en revanche une structure bien particulière composée de plusieurs couches [1].

⁸ Les toits frais sont des toits possédant réflexion solaire et une émissivité thermique supérieure aux toits traditionnels. Ils sont généralement de couleur très claire voire blanche.

Ces couches sont (de l'extérieur du bâtiment vers son intérieur) : la strate végétale, le substrat de croissance, le tissu filtrant, la couche de drainage, la couche de protection et d'imperméabilisation et enfin barrière raculaire (Figure 3) [1][41].

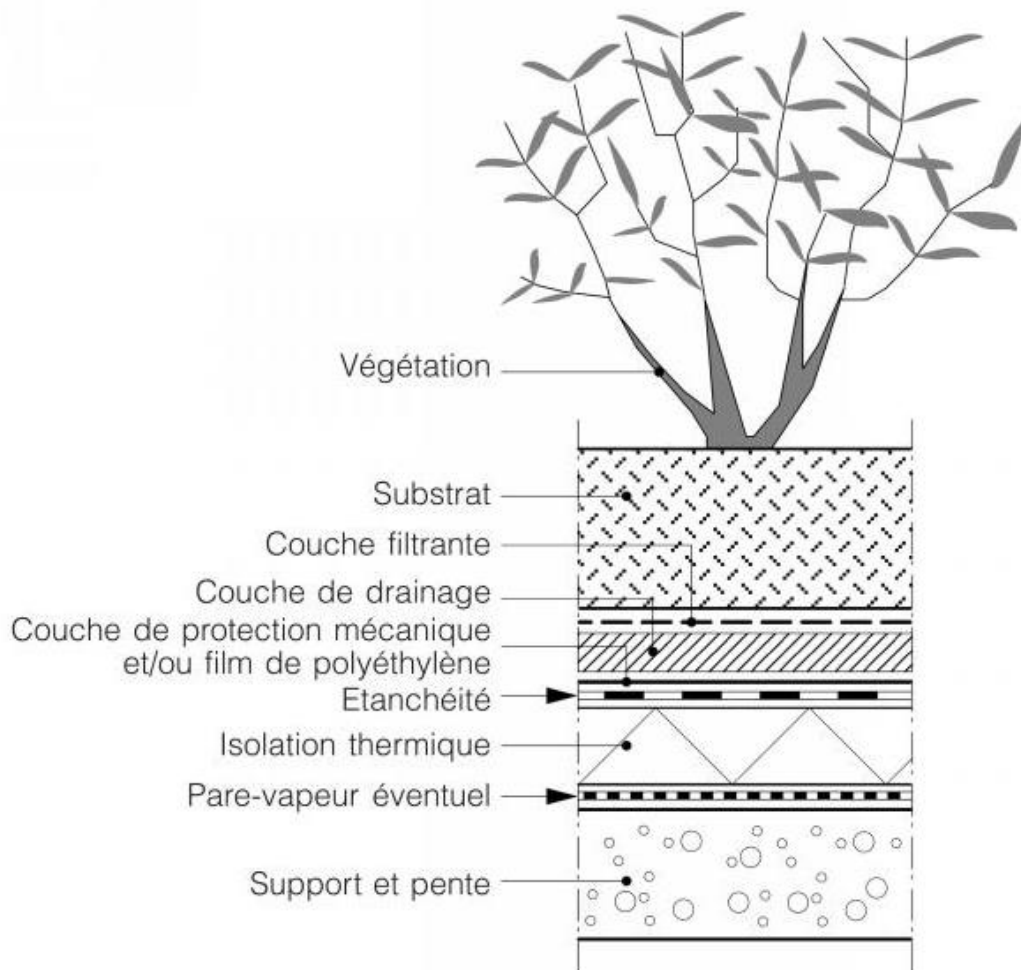


Figure 3 Visualisation des couches d'une toiture végétale [42].

Afin d'optimiser les coûts d'installation et la maintenance, le choix des composants des toitures vertes est l'un des aspects les plus importants. Il permet également, avec une sélection judicieuse de ces composants, une approche plus respectueuse de l'environnement.

a. Strate végétale

La strate végétale est certainement la couche la plus complexe et la plus intéressante à développer. Les critères de sélection des espèces végétales sont nombreux. Les principaux sont la situation géographique influençant les conditions climatiques (l'intensité des précipitations, les variations de température, l'humidité, le vent, l'exposition au soleil) ; le type de toiture végétale (intensive, semi-intensive, extensive), la profondeur et le type du milieu de croissance (substrat), ...

La santé des végétaux est primordiale pour la bonne fonctionnalité des toitures végétales. Or, il est important de noter qu'une toiture n'est pas un espace optimal à la croissance des plantes. Celle-ci peut être, en effet, comparée à un environnement extrême car les plantes n'y sont pas adaptées naturellement. L'eau et les nutriments y représentent effectivement un facteur limitant qu'il faut veiller à ne pas négliger. L'impact du choix des plantes sur la biodiversité sera détaillé au point 6 [1].

b. Couche de substrat

La couche composée du substrat de croissance est la plus déterminante quant au choix des végétaux. Plus l'épaisseur de celle-ci sera importante plus la biodiversité pouvant être accueillie sera diversifiée. Certains des avantages techniques de la toiture verte sont directement liés aux caractéristiques physico-chimiques du substrat. La sélection du complexe plante-substrat est primordiale afin de répondre au mieux aux besoins des végétaux et d'éviter, de la sorte, d'engendrer des facteurs limitants tels que l'eau et les nutriments.

L'épaisseur du substrat influencera directement le poids de la structure verte. Dès lors, des études de faisabilité sont requises afin de minimiser le risque d'effondrement des structures portantes. C'est, en effet, la couche qui est généralement la plus lourde suite à l'augmentation de la charge sur le toit pendant les précipitations. Dès lors, sa caractéristique déterminante est sa densité. Elle doit être faible aussi bien à l'état sec qu'une fois humide. Or les milieux de croissance doivent idéalement posséder une capacité de sorption élevée et un taux de lessivage faible. Il est donc très fastidieux d'identifier un substrat de croissance optimale présentant toutes ces caractéristiques [1].

c. Couche filtrante

Le rôle d'une couche filtrante est de séparer le substrat de croissance de la couche de drainage. Elle empêche de la sorte les impuretés d'obstruer cette dernière. La matière de cette couche est généralement du tissu géotextile (matière synthétique perméable aux fluides). Le rôle secondaire de la couche est d'agir comme première barrière aux racines les plus courtes et les moins résistantes. Les caractéristiques de cette couche doivent être une haute résistance à la traction (pour résister à la charge du substrat de croissance), une bonne perméabilité à l'eau et enfin bonne inhibition pour les particules moyennes de sol [1].

d. Couche de drainage

La couche de drainage permet de fournir un équilibre optimal entre l'eau et l'air dans le système de la toiture végétalisée. Etant donné que la végétation nécessite un substrat aéré et non gorgé d'eau pour une croissance optimale, la couche de drainage aide à éliminer l'excès d'eau du substrat pour garantir les conditions du substrat aérobie. Elle a également pour rôle de protéger la membrane imperméable. Il existe deux types de couche de drainage : les matériaux granulaires de drainage et les panneaux modulaires de drainage. Les premiers, destinés aux petites infrastructures, possèdent une bonne capacité de rétention de l'eau due à de grands espaces poreux tandis que les seconds sont composés de plastique formant des compartiments permettant de retenir l'eau et d'en évacuer l'excès. Ils sont plus adaptés à des installations à grandes échelles [1].

e. Couche d'étanchéité

Enfin, vient la couche d'étanchéité. Cette couche peut ne pas faire partie du système de toit vert car c'est une condition préalable à toute toiture. Son rôle principal est de rendre la construction étanche à l'eau de pluie protégeant le bâtiment et son isolation. Il existe plusieurs sortes de couche d'étanchéité : les membranes bitumineuses (80 % du marché) ; les étanchéités synthétiques, composées de polymères d'hydrocarbures insaturés ; les feuilles métalliques en zinc, cuivre ou plomb ; les enduits d'étanchéité, résine synthétiques épandues sur la toiture et enfin les revêtements épais tel que l'asphalte (mélange entre du bitume en poudre et d'agréats) [1][43].

Dans le cas d'une toiture verte intensive, une barrière racinaire est également indispensable. La principale fonction est la protection de la structure du toit contre les racines des plantes qui pourraient y pénétrer. Elle peut être constituée de feuilles de plastique dur ou de métal (généralement en cuivre) [1].

3.2.1.2 Type de toiture végétale

La classification est principalement basée sur l'épaisseur de la couche de sol, le type de végétation et enfin de l'entretien requis de la toiture verte.

a. Toiture végétale extensive

Les toitures végétales extensives se caractérisent par une couche de substrat mince. Elle doit être inférieure à 15 cm. Seule une sélection limitée de végétation peut, dès lors, y pousser telles que certaines herbacées, les mousses, les lichens et quelques plantes succulentes (plusieurs variétés de *Sedum sp.*). Ce type de plantes requiert donc un faible entretien, ce qui en fait le principal avantage des toitures vertes extensives ainsi que leur faible coût de mise en œuvre. Ce type d'infrastructure est une option pour la situation où aucun support structurel supplémentaire n'est souhaité. La surcharge est inférieure à 100 kg/m². C'est actuellement le type de toiture le plus présent sur le marché de la construction [35].

b. Toiture végétale intensive

Pour ce type de toiture végétale, la couche de substrat peut varier de minimum 30 cm jusqu'à 200 cm. Ce substrat permet la croissance de nombreux types d'espèces végétales allant des herbacées (plantes mellifères, plantes ornementales, ...) aux arbustes et arbres de faible dimension. En revanche une telle strate végétale requiert un entretien plus régulier avec des travaux périodiques comme la fertilisation du substrat, l'arrosage en période sèche, le désherbage. Les coûts de mise en œuvre ainsi que la charge sont également plus élevés. La surcharge est supérieure à 400 kg/m² [35] [42] .

c. Semi-intensive

Ce classement ne fait pas l'unanimité au sein de la littérature scientifique mais est, tout de même, cité par plusieurs auteurs. Il représente une combinaison entre les deux types précédemment présentés. La principale différence avec le type intensif est la strate végétale et, par conséquent, l'épaisseur du substrat. Celui-ci varie entre 15 cm et 30 cm.

Il permet d'accueillir les petites plantes herbacées, les petits arbustes, les graminées ornementales et les couvre-sols. Dans ce cas, la maintenance requise est fréquente et la mise en œuvre représente un coût élevé. La surcharge varie de 100 à 400 kg/m² [42].

3.2.1.3 Services écosystémiques rendus par les toitures vertes

L'équipe d'Umberto Berardi et al. (2013) a réalisé un excellent état de l'art des bénéfices environnementaux des toitures végétales. Ils ont listé tous les bénéfices et les ont regroupés en six catégories [3] :

- Réduction de la consommation énergétique ;
- Effet sur les îlots de chaleur urbains (ICU) ;
- Atténuation de la pollution de l'air ;
- Gestion de l'eau ;
- Absorption acoustique ;
- Préservation écologique.

Ces six catégories semblent exhaustives d'un point de vue classification des services écosystémiques. C'est la raison pour laquelle elles seront également reprises pour la description des bénéfices de toutes les autres infrastructures vertes.

Une septième catégorie décrivant les bénéfices sociaux sur le comportement et la santé des occupants pourrait notamment être ajoutée à cette liste. Cependant, étant un critère relativement subjectif et difficilement quantifiable, cet aspect ne sera pas entièrement développé dans le cadre de ce travail. Ce sujet sera repris dans les points d'amélioration de la discussion.

a. Réduction de la consommation énergétique

Les toits verts sont très efficaces pour augmenter l'inertie thermique du bâtiment. Cette dernière est définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit [44]. Ils permettent également de diminuer le niveau de consommation énergétique des bâtiments. Pour comprendre cet effet, il est important de rappeler le lien entre la température extérieure et intérieure du bâtiment. Ces deux températures sont directement proportionnelles entre elles. Ce phénomène est lié au transfert de chaleur au niveau des couches composant la paroi de l'enveloppe du bâtiment.

Cet impact de réduction de la consommation énergétique est, dès lors, beaucoup plus important pour les bâtiments moins bien isolés initialement. Cette efficacité dépend également fortement du climat dans lequel se situe le bâtiment.

Dans les **climats chauds et secs**, les toits verts réduisent la température sous la toiture en ombrageant le toit et en empêchant l'influence directe des radiations solaires sur les parois du bâtiment. Ils stabilisent les variations de température sur la surface du toit ainsi que la température intérieure du bâtiment. A titre d'exemple, en Grèce, les toits verts réduisent l'énergie utilisée pour la climatisation de 2 % à 48 %, selon la zone couverte par le toit vert, avec une réduction de la température intérieure jusqu'à 4 °C.

Dans les **climats chauds et humides**, les toitures végétales stabilisent également les variations de température. Cette caractéristique dépend plus largement de la profondeur de la couche de substrat. La Figure 4 représente les variations de température d'un bâtiment avec une toiture normale (a) et une toiture verte (b) à Singapour durant cinq jours d'été. Cette étude démontre l'impact positif des toits verts sur la diminution de la variation de la température de surface par rapport à la température de l'air (a) et la stabilisation de la température à différents niveaux dans le sol (b).

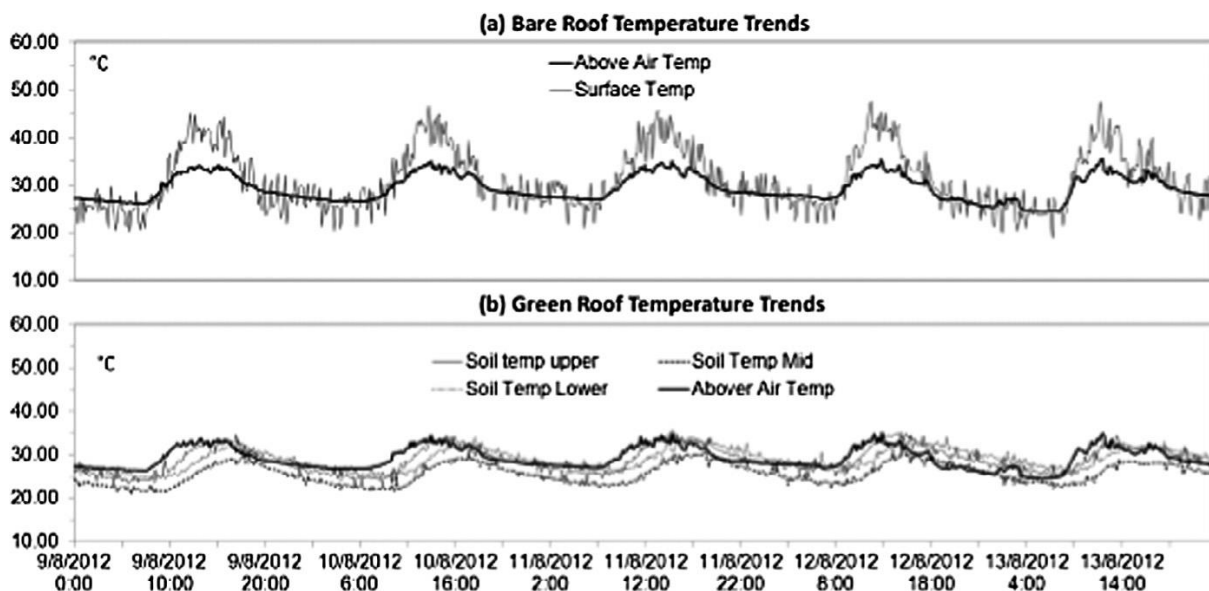


Figure 4 Les variations de température d'une toiture normale (a) et d'une toiture verte (b) à Singapour sur cinq jours d'été [3]

Dans les **climats subtropicaux**, les toits verts permettent principalement de réduire les pics élevés de températures intérieures.

Concernant les **climats froids**, ils induisent une réduction des variations journalières de température, réduisent les flux de chaleur et stabilisent la température de surface de la toiture. Lors de la saison d'hiver, l'impact sur la performance énergétique est plus controversé. Il apparaît, selon les études, que les toitures vertes peuvent impacter positivement et négativement la consommation énergétique selon la conception de la toiture et du bâtiment.

Les résultats des études démontrent l'importance de la couche de substrat dans le potentiel de refroidissement. En guise d'exemple, une couche de 10 cm de sol augmente la résistance thermique du toit de $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Notons également qu'une toiture mouillée influence les propriétés thermiques du bâtiment, ce qui apporte une évapotranspiration supplémentaire et empêche le flux de chaleur. Cet effet agit comme un refroidissement passif en extrayant la chaleur du bâtiment.

Concernant le **climat méditerranéen** en saison d'été, pour un bâtiment possédant une isolation dont le coefficient U est de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, une toiture végétale avec une strate végétale dense permettrait de réduire la consommation de refroidissement de 60 % par rapport à un toit conventionnel [3]. Il est donc maintenant bien connu et démontré que les toitures vertes sont efficaces pour réduire la charge de refroidissement. Cependant, compte tenu de l'analyse des degrés-jours des bâtiments, leur efficacité est légèrement inférieure concernant la réduction de la charge de chauffage [3].

b. Effet sur les îlots de chaleur urbain (ICU)

Le phénomène des ICU s'est accentué suite à la croissance urbaine. C'est également l'un des phénomènes les plus alarmant concernant le microclimat urbain. Les ICU sont définis comme une différence de température entre la ville et les espaces naturels environnants. Ils créent un microclimat urbain caractérisé par une température plus élevée dans les centres villes, dans les zones densément peuplées et dans les zones industrielles [45].

Les toits verts permettent de contribuer à résoudre ce problème. Leur utilisation englobe, en effet, des avantages fondamentaux à l'échelle du bâtiment comme à l'échelle de la ville.

L'albédo est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière. Il est obtenu en effectuant le rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie et l'énergie lumineuse incidente. Il varie donc de 0 à 1. Ainsi, plus l'albédo est faible, plus les rayons du soleil seront absorbés, ce qui induit par conséquent une augmentation de la température de surface de l'obstacle [46]. L'albédo des toits verts varie de 0,7 à 0,85 comparé aux toitures conventionnelles qui ont un albédo plus faible qui varie généralement de 0,1 à 0,2. Il a été démontré qu'une augmentation de 10 % d'infrastructures vertes à Manchester, pourrait éviter l'augmentation prévue de 4°C de la température ambiante au cours des 80 prochaines années [3].

Les conditions climatiques jouent un rôle sur l'efficacité de l'atténuation des ICU par les toitures. En effet, concernant uniquement ce rôle, les études indiquent que les toits frais sont généralement plus efficaces dans des conditions climatiques ensoleillées que les toits verts. Ces derniers devraient, effectivement, être préférablement installés dans des climats modérés. Afin d'optimiser les effets de réduction d'ICU, la mise en œuvre de toits verts nécessite également une analyse appropriée de la configuration géométrique de la ville [3].

Pour conclure cet impact, il est évident que les toits verts contribuent de manière significative au dégagement de chaleur latente. En moyenne pour différentes villes et différents climats, une réduction de 2°C a été constatée [3].

c. Atténuation de la pollution de l'air

Les toits verts intensifs sont capables de réduire significativement la pollution de l'air. La croissance des plantes sur les toits permet de remplacer partiellement la végétation détruite pendant la construction. Ils permettent également de réduire indirectement la pollution de l'air suite à la réduction de la consommation énergétique du bâtiment.

L'importance de cette atténuation dépend fortement du type de végétaux présents sur la toiture. Il apparaît que les arbres (*angiospermes*) sont les végétaux les plus efficaces pour réduire les concentrations de CO₂, de NO_x, de SO₂ et des PM₁₀. Une installation de 109 ha de toits verts contribuerait à l'élimination de 7,87 tonnes métriques de la pollution atmosphérique par an. Une étude à Singapour relève jusqu'à 37 % d'élimination de la pollution lors de l'utilisation intensive des toits verts concernant le SO₂ [3].

d. Gestion de l'eau

L'installation de toitures vertes permet la réduction du ruissellement des eaux pluviales de 60 % à 100 %. Les caractéristiques les plus importantes pour cet impact sont la pente qui doit être la plus faible possible et la profondeur de la couche de substrat qui doit être la plus profonde possible. Ces deux caractéristiques augmentent l'effet tampon de la toiture et induit un rejet tardif des eaux dans le réseau urbain. Des relations importantes existent également entre le type de toit vert et la qualité de l'eau rejetée dans le réseau urbain hydrologique.

Par rapport aux toits traditionnels, les toits verts intensifs permettent de réduire, dans les eaux de ruissellement, les concentrations de plomb d'un facteur 3, de zinc d'un facteur 1,5 , de cadmium d'un facteur 2,5 et de cuivre d'un facteur 3. Il apparaît cependant le risque que les concentrations en phosphates et en nitrates puissent être plus élevées dans les eaux rejetées. Cet effet est probablement dû aux engrais intégrés pour la croissance des végétaux [3].

e. Absorption acoustique

Il est prouvé que les toits verts diminuent considérablement les bruits au niveau des rues dans les zones urbaines grâce au coefficient d'absorption élevé de la couche végétale. Cet effet est plus efficace pour les toits verts de faible altitude. En effet, plus la couche de végétation est exposée directement au champ acoustique et plus son efficacité d'absorption est importante.

Les toits verts augmentent la perte de transmission de 5 à 13 dB aux basses et moyennes fréquences et de 2 dB à 8 dB aux hautes fréquences [3].

f. Préservation écologique

Il est évident que les toits verts jouent un rôle considérable sur la préservation écologique urbaine. Cependant, il faut prendre garde quant à la difficulté des méthodes de mesures de ces avantages. De plus, suite à cette difficulté d'analyse, de nombreux scientifiques proposent leur propre méthode rendant l'étude de ces impacts encore plus compliquée.

Plusieurs études proposent l'utilisation d'analyses du cycle de vie pour démontrer les avantages environnementaux des toits verts en comparant les émissions de NO₂, SO₂, O₃ et PM₁₀ dans le processus de fabrication de matériaux des toits verts et des toits conventionnels. Il apparaît avec cette technique que les toits verts sont des produits durables à long terme [3].

Les toitures végétales sont un atout majeur dans l'écologie de réconciliation. Elles peuvent être conçues pour soutenir des espèces particulières dont la conservation est préoccupante ou pour fournir un habitat à la biodiversité en général. Les habitats vivants sur les toits, dû à leur taille limitée, profitent principalement aux organismes de petite taille, qui ont la capacité de se disperser facilement et qui ont de faibles besoins en ressources. Ce qui signifie qu'ils peuvent utiliser l'habitat dans le cadre de leur aire de répartition plus large (pour les abeilles et les guêpes par exemple). La diversité des invertébrés peut être particulièrement élevée. A titre d'exemple, au Royaume-Uni, sur une toiture végétale, l'échantillonnage de seulement trois taxons (les *Araneae*, les *Hymenoptera Aculeata* et les *Coleoptera*) a relevé plus de 200 espèces [40]. A moins d'être introduites délibérément, les espèces qui ne se dispersent pas facilement sont moins susceptibles de bénéficier des toits vivants. A titre d'exemple, les toits vivants ne comportent généralement pas de vers de terre (*Lumbricina*) dans leur faune du sol car ils sont incapables de les coloniser naturellement. De plus, la plupart des substrats sont trop peu profonds (moins de 12 cm) pour les soutenir. Ce qui laisse, de la sorte, plus de place pour les autres invertébrés de la faune du sol telles que les collemboles (*Collembola*) [40].

Les toitures végétales sont davantage bénéfiques lorsqu'elles sont utilisées pour fournir un habitat spécialisé pour des espèces rares ou en voie de disparition. En guise d'exemple, des toitures végétales ont servi de lieu de nidification et d'alimentation en Suisse pour le Petit Gravelot (*Charadrius dubius*) et le Vanneau Huppé (*Vanellus vanellus*) et au Royaume-Unis pour le Rougequeue Noire (*Phoenicurus ochruros*) [47].

3.2.1.4 Intégration des panneaux solaires photovoltaïques aux toitures vertes

Bien que les toitures vertes et les panneaux solaires photovoltaïques (Figure 5) peuvent initialement paraître comme deux technologies concurrentes pour l'espace limité sur le toit, il en ressort qu'une fois combinés, cette synergie peut améliorer leurs fonctions et leur efficacité par des effets de refroidissement et d'ombrage.

Le toit vert engendre un refroidissement net du microclimat à la surface du toit via l'évapotranspiration des plantes. Ce qui aura comme effet de compenser l'effet de réchauffement des panneaux photovoltaïques. Pour maximiser cet effet de refroidissement, la disposition et l'espacement du système intégré doivent être soigneusement conçus. Le panneau photovoltaïque et la végétation doivent être placés à une distance suffisamment proche de sorte que le refroidissement par évapotranspiration puisse influencer directement les modules solaires [48]. De plus, les toits verts dotés d'une irrigation par aspersion⁹ améliore davantage le refroidissement via l'augmentation du niveau d'humidité dans l'air. L'eau peut également aider à éliminer la poussière sur les panneaux solaires. En effet, ce facteur, bien que souvent négligé, impacte fortement la production d'électricité. Une accumulation de 0,4 mg/cm² de poussière peut engendrer une réduction de 1,5 % de rendement [49]. De nombreux paramètres peuvent influencer la production supplémentaire d'électricité par les panneaux photovoltaïques. Une équipe de chercheurs a recensé toutes les études expérimentales et simulations à ce sujet. Il en ressort que selon les types de toitures végétales, les conditions climatiques et les périodes de l'année, l'augmentation de production d'électricité peut être de 0,08 à 8,3 % [50]. Le cas extrême de 8,3 % a cependant été obtenu via une simulation sur le logiciel *EnergyPlus* tandis que les autres mesures sont des mesures expérimentales.



Figure 5 Illustration de l'intégration des panneaux solaires photovoltaïques sur une toiture verte [51]

Les panneaux solaires vont, quant à eux, ombrager des parties du toit et réduire de la sorte l'exposition directe du soleil sur les végétaux. Cet ombrage permet une réduction de

⁹ Ce système est peu répandu car il n'est pas en adéquation avec le principe des toitures vertes qui se veulent être le plus autonomes possible.

l'évaporation de la strate végétale. L'ombrage réduira également le stress de sécheresse pour les plantes et améliorera la viabilité de la toiture verte [48].

3.2.2 Murs végétalisés

Le potentiel des murs végétalisés est plus important que celui des toitures végétales étant donné que dans les centres urbains, la surface de ceux-ci est généralement plus de deux fois supérieure à celle des toitures [52]. Cette technologie est très ancienne. Certaines infrastructures des jardins de Babylone et de l'empire Grec étaient déjà recouvertes de murs végétalisés. Aujourd'hui, pour 0,1 km² de surface de zone urbaine, la surface des murs est estimée à 0,01 km² [40].

Cependant, la réussite d'un mur vivant est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs tels que la gestion d'une structure de support appropriée ; la gestion d'une bonne quantité d'eau, d'oxygène, de pH, et d'autres paramètres. La croissance des plantes sur une surface verticale est donc par conséquent plus difficile à contrôler que sur une surface horizontale. Cette technologie possède encore de nombreuses lacunes qui doivent être comblées avec l'expérience de infrastructures déjà existantes [53].

3.2.2.1 Classification et définition

a. Définitions

Les murs végétalisés est le terme commun reprenant toutes sortes de murs recouverts par des végétaux. Il en existe de nombreux types. Il est possible de les classer suivant les différents systèmes de fonctionnement ainsi que par leurs caractéristiques. Cette classification est plus complexe que celle des toitures végétales (Figure 6). Les principales caractéristiques permettant de les différencier sont : les éléments de structure, le type de substrat, la strate végétale, le système de drainage et d'irrigation [52].

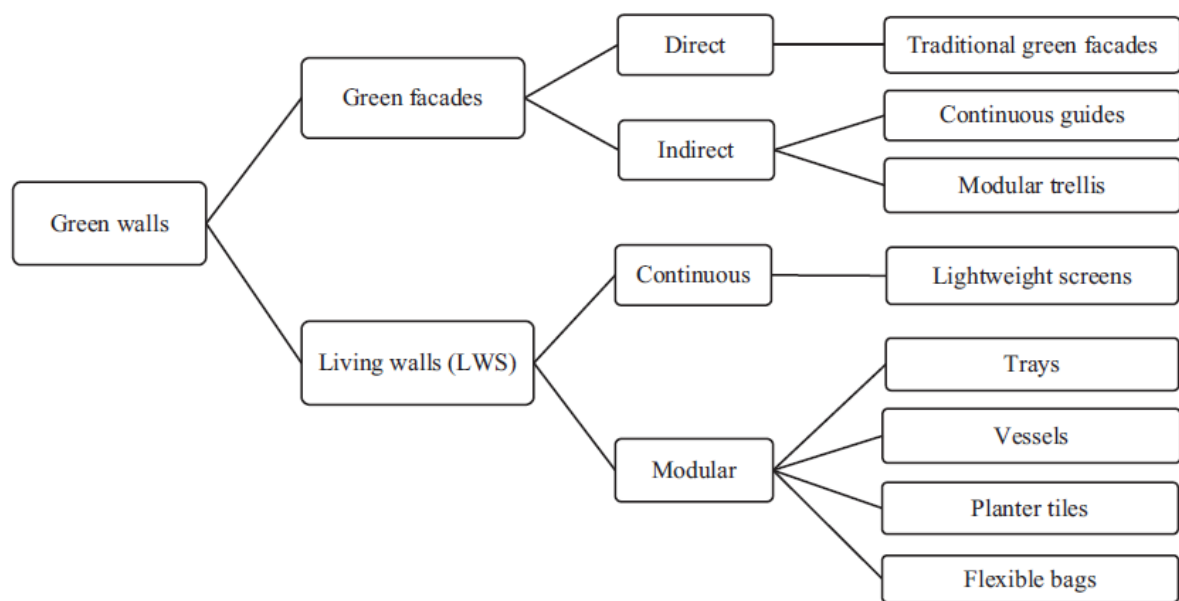


Figure 6 Classification des façades végétales [52]

Les murs végétalisés peuvent être subdivisés en deux catégories. Premièrement, les façades végétales, qui sont composées de végétaux grimpants et couvrants. La deuxième catégorie regroupe les murs vivants qui requiert des matériaux et une technologie plus récente. Ils peuvent supporter une large variété de végétaux et permettent une croissance plus uniforme tout le long de la surface du mur [52].

Etant donné la complexité de cette classification, une illustration des différents types de murs végétalisés est disponible en Annexe 2.

b. Les façades végétales (FV)

Les façades végétales sont composées de végétaux grimpants ou pendants. Les FV sont représentées par deux systèmes, direct et indirect. Sur les FV directes, les végétaux sont attachés sur le mur, leur système racinaire est dans le sol au pied du bâtiment. Les FV indirectes requièrent une structure de support vertical pour le développement de la végétation. Les plantes peuvent prendre racine directement dans le sol ou dans le support prévu à cet effet (ex : bacs), leur développement est guidé grâce au support. Le système indirect comprend une solution continue ou modulaire. Le guide continu est basé sur une simple structure de support qui dirige le développement des plantes le long de la façade.

Le système de treillis modulaires est une solution presque similaire mais est décomposée en plusieurs éléments modulaires. La différence la plus importante est également que le treillis modulaire possède des récipients pour le système racinaire des plantes et une structure de support individuelle pour le développement des plantes [52].

c. Les murs vivants (MV)

Cette technologie est plus récente que celle des FV. Ils permettent une intégration des murs végétalisés sur les bâtiments de plus haute altitude, ils sont également mieux adaptés à tout type de bâtiments. La croissance des végétaux sur les MV est plus rapide et plus uniforme. Les espèces de végétaux y sont également plus diversifiées.

Leur classification comprend deux catégories les MV continus et modulaires selon leur méthode d'application. Les MV continus sont basés sur une application de couches légères et perméables dans lesquelles les plantes sont insérées individuellement. Les MV modulaires sont composés d'éléments avec des dimensions spécifiques qui incluent directement le substrat de croissance. Chaque élément est supporté par une structure complémentaire ou fixé directement sur la surface verticale. La suite de la classification n'est pas nécessaire dans le cadre de ce travail [52].

3.2.2.2 Eléments des murs végétalisés

Le type de mur végétalisé influence fortement sa structure. La classification diversifiée entraîne, dès lors, une hétérogénéité dans leur composition. Quatre éléments structuraux communs peuvent être repris. Il s'agit des éléments de support, du substrat de croissance, de la strate végétale et enfin des systèmes d'irrigation et de drainage [52].

a. Eléments de support

Les éléments de support sont présents dans tous les types de murs végétalisés sauf les traditionnels et les FV directes. Ils dépendent directement de la capacité des plantes grimpantes à se fixer à la surface verticale.

b. Substrat de croissance

Le substrat de croissance n'est nécessaire que dans les systèmes modulaires. Il doit être léger et adapté aux conditions météorologiques et aux types de végétaux. Il est généralement composé d'éléments organiques et inorganiques.

Concernant les MV continus, il est basé sur un système hydroponique avec un apport permanent d'eau et de nutriment dû au manque de substrat. Le système hydroponique permet aux plantes de se développer sans substrat. Concernant les MV modulaires, ceux-ci possèdent un compartiment avec un substrat de croissance où les racines peuvent proliférer. Il existe également des couches composées de matériaux granulaires, expansés ou poreux permettant d'augmenter la capacité de rétention. Tout comme les toitures végétales, le substrat peut être enrichi avec des nutriments et fertilisants.

c. Strate végétale

Les végétaux dépendent principalement des conditions climatiques, des caractéristiques du bâtiment et des conditions environnantes. Le choix des plantes affecte le refroidissement des murs. Il est important de veiller à une hétérogénéité des plantes pour des raisons de consommation énergétique. Cet aspect sera développé au point 3.2.2.3.

d. Système d'irrigation

Une attention particulière est requise quant aux systèmes d'irrigation non-durables qui sont une critique considérable des murs végétalisés. Il y a très peu d'informations publiées sur ce sujet. Une plus grande transparence est nécessaire pour que les murs vivants deviennent un système de construction durable dans l'avenir. Sur le marché actuel, les systèmes extérieurs de murs vivants les plus efficaces consomment 1 l d'eau par m² et par jour [53]. D'un point de vue durabilité, cette consommation est encore trop élevée. De plus, lors de période de sécheresse, certaines régions réglementent l'utilisation de l'eau.

Des systèmes peuvent être développés pour réduire la surconsommation d'eau potable en récupérant l'eau de pluie ou en recyclant l'eau. Ce qui peut être un double avantage pour la gestion des eaux pluviales. La plupart des systèmes de murs vivants ne récupèrent cependant pas leurs eaux usées.

Premièrement, suite au surcoût nécessaire pour collecter et filtrer l'eau d'irrigation recyclée dans un réservoir et ensuite parce que l'utilisation d'eau recyclée induit que les plantes vivent dans leurs propres déchets et sont exposées à une eau moins nutritive.

A l'extrême, un système d'irrigation excessif peut engendrer le déclin des végétaux de la façade. Il existe quelques signes démontrant un surplus d'eau tels que le développement d'algues sur le substrat, la couleur des plantes allant du jaunâtre au brun.

e. Système de drainage

Le système de drainage permet d'évacuer l'eau présente dans le mur. Un dimensionnement précis est primordial car un excès d'eau peut être aussi néfaste pour la vitalité des plantes qu'un manque d'eau. Il existe certains signes permettant de visualiser un système de drainage non efficace tel que la couleur des plantes.

3.2.2.3 Services écosystémiques rendus par les murs végétalisés

Bien que la technologie des murs végétalisés soit moins élaborée et étudiée que celle des toitures végétales, de nombreux bénéfices et services écosystémiques leur sont semblables.

a. Réduction de la consommation énergétique

L'impact des toitures végétalisées est fortement dépendant de la saison. En été, l'effet d'ombrage des plantes refroidit les surfaces des murs. En revanche, en hiver, une augmentation de la température est observée entre la strate végétale et la surface du mur. Ces deux phénomènes entraînent une réduction moyenne des coûts énergétiques pouvant aller jusqu'à 38 % [53].

Les effets bénéfiques souhaités sont, par conséquent, antagonistes en fonction de la saison. Il est, dès lors, important d'éviter le problème de la monoculture en combinant des espèces végétales adéquates pour le refroidissement et d'autres efficaces pour le chauffage. Il est également nécessaire que leur disposition soit étudiée [54]. A titre d'exemple, selon l'architecture établie, il existe un effet ventilateur des tiges et des branches qui permet leur refroidissement [53].

Deux études ont été réalisées au Royaume-Uni. La première a constaté que la diminution de la température des murs pouvait atteindre jusqu'à 10°C. Pour les cavités murales, cette diminution était plus faible et atteignait jusqu'à 5°C en été. La seconde étude a mesuré la température des murs intérieurs. Celle-ci était en moyenne 2°C plus basse que les murs traditionnels en été et 2°C plus élevée en hiver [54].

Il est également possible d'étudier l'impact des murs végétalisés sur les caractéristiques thermiques du bâtiment en déterminant le confort thermique des occupants. Ce dernier peut être estimé via le modèle de Fanger. Ce modèle calcule le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) et/ou le vote moyen prévisible (PMV) gradué de -3 à 3 (trop froid à trop chaud). Un bâtiment dont le confort thermique serait optimum aurait un PPD de 5 % et un PMV de 0. Une équipe a étudié ce modèle pour un bâtiment dans la ville de Chennai en Inde. Il apparaît que le mur végétalisé améliorerait le confort thermique intérieur des occupants en abaissant la valeur du PMV de 1,73 (inconfortablement chaud) à 0,98 (confortable). Cette même étude a également calculé les économies annuelles en HVAC du bâtiment qui peuvent atteindre 93 333,3 kWh [55].

b. Impact sur les îlots de chaleur urbains

En plus d'avoir un effet sur la température de la surface des murs, la végétation peut également impacter la température autour du bâtiment. Les murs végétalisés influencent, par conséquent, l'effet d'ICU. La végétation peut refroidir l'air via plusieurs phénomènes : l'ombrage, la réduction de chaleur réfléchiée ou encore l'évaporation des plantes [56]. A titre d'exemple, l'air autour d'un mur végétalisé au Royaume-Uni peut être refroidi de 3 à 5 °C en été [53].

c. Atténuation de la pollution de l'air

Les façades vertes permettent d'éliminer efficacement les molécules en suspension dans l'air. Comme pour les toitures végétales, le choix des plantes est primordial pour une dépollution optimale. Il apparaît que cet effet est plus important pour les molécules de NO_x et SO_x émis par la combustion des véhicules dans la ville [57].

Cette combustion engendre également un grand nombre de particules en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à $10\text{ }\mu\text{m}$ (appelée PM_{10}).

L'équipe de Kumar et al. (2019) a étudié l'effet des murs végétalisés sur la dépollution urbaine de ces PM_{10} . La méthodologie utilisée pour mesurer l'élimination des PM_{10} est reprise dans l'Annexe 3 [55]. Les concentrations en PM_{10} varient d'un minimum de $26\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le mois de mai à un maximum de $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le mois de novembre, les autres mois ayant des valeurs intermédiaires. Ils ont calculé pour un mur traditionnel une quantité de polluants atmosphériques éliminés (Q) de 0,0448 g avec une vitesse de dépôt (v_d) de 0,0036 cm/s. En revanche, un mur végétalisé, monté sur une armature métallique avec une épaisseur totale de 0,2 m, donne un Q de 1,68 g pour une valeur v_d de 0,162 cm/s. Une façade verte est donc 97,3 % plus efficace qu'un mur en béton traditionnel pour la dépollution de l'air [55].

d. Gestion de l'eau

Comme expliqué au point 3.2.2.2, la gestion durable de l'eau d'irrigation des murs végétalisés peut parfois être un sujet mis de côté. Il est cependant absolument nécessaire que cette technologie soit optimale afin de respecter les objectifs de durabilité, qui peuvent dans certains cas ne pas être respectés suite à la surconsommation d'eau.

Les murs végétalisés, une fois optimisés, permettent de collecter, stocker et évaporer les eaux pluviales ce qui aboutit à la réduction du ruissellement urbain. A titre d'exemple en Australie, un mur végétalisé a été conçu pour utiliser l'eau de pluie récoltée et l'eau noire¹⁰ recyclée pour irriguer les plantes grâce à une usine de recyclage d'eau dans le sous-sol du bâtiment.

¹⁰ Dans les systèmes d'épuration, l'eau noire correspond à l'eau usée contenant les matières fécales et l'urine.

e. Absorption acoustique

Les murs végétalisés permettent d'augmenter l'isolation acoustique du bâtiment et participent également à la réduction du bruit urbain. L'étude de Perez et al. (2016) a démontré qu'une fine couche de végétation (20 à 30 cm) a permis l'augmentation de l'isolation acoustique de 1 dB pour le bruit de la circulation et une augmentation de l'isolation variant de 2 dB pour un mur vert à 3 dB pour une façade verte concernant un bruit rose¹¹. Ils concluent que pour maximiser cet effet, il est nécessaire d'optimiser d'autres facteurs tels que l'épaisseur et la composition du substrat, les joints d'étanchéité entre les modules et l'isolation de la structure de support [58].

f. Préservation écologique

En tant qu'infrastructure verte, il est évident que les murs végétalisés jouent un rôle considérable dans la préservation écologique. Cet aspect reste néanmoins encore trop peu étudié. Il apparaît cependant qu'avec une bonne gestion et conception des plantes choisies, les murs végétaux peuvent permettre premièrement de soutenir la biodiversité indigène. A titre d'exemple, en Amérique du Nord, un programme a été lancé pour développer des corridors d'habitats pour les espèces migratrices et le potentiel des murs végétaux semble prometteur pour accueillir ces espèces [56].

Les murs végétalisés permettent dans un second temps de fournir un habitat écologique. En tant qu'espace vert, ils attirent les insectes et les oiseaux. Ils peuvent également fournir de l'eau, des sources de nourriture, une protection et des endroits de nidification. Le choix des plantes reste tout de même très important pour l'attrait de certaines espèces [56].

¹¹ Bruit rose : « bruit normalisé de référence utilisé pour les mesures acoustiques des bruits aériens dans les bâtiments et caractérisé par un niveau de pression constant par bande d'octave (dB). Il est représenté par un spectre plat » [88].

3.3 Aménagements dans le bâtiment

3.3.1 Biophilie

La biophilie, qui signifie « l'amour des systèmes vivants », fait référence à la tendance psychologique chez les humains à être attirés par tout ce qui est vivant et vital. Elle semble héréditaire et avoir évolué avec la sélection naturelle [59]. L'hypothèse de la biophilie affirme l'existence d'un besoin humain fondamental à s'associer à la vie. Des études ont montré que même un lien minime avec la nature, comme la regarder à travers une fenêtre, augmente la productivité et la santé sur le lieu de travail, améliore le transfert des patients dans les hôpitaux et réduit la fréquence des maladies dans les prisons [60].

L'introduction de plantes à l'intérieur du bâtiment peut compenser le manque de vue sur l'environnement naturel extérieur à travers des fenêtres. Une autre étude prouve que le fait d'avoir une vue sur des plantes depuis le poste de travail améliore les performances, la santé ou le bien-être des employés. Le nombre de congés maladie auto-déclarés diminuent également. L'ampleur de cet impact est dépendant de nombreux facteurs aussi bien quantitatifs (nombre de plantes, durée d'exposition, ...) que qualitatif (distinction entre le feuillage fleuri et non fleuri, la taille, la forme et espèces végétales, ...). Une review concernant ce sujet a également démontré qu'aucune de ces études n'a observé de résultat négatif significatif associé à la présence de plantes [61].

Les bénéfices de la biophilie semblent donc impacter davantage l'aspect psychologique des occupants des bâtiments. Ce service écosystémique a délibérément été écarté dans le cadre de ce travail. Cependant, d'autres recherches ont étudié les plantes comme solution durable pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Il apparaît que les plantes ont la capacité d'éliminer les polluants via deux phénomènes, l'absorption stomatique et le dépôt non stomatique (adsorption) [2].

Les bâtiments actuels sont sujets à de nombreuses sources internes de pollution telles que l'activité des occupants, le mobilier, la peinture, ... Ces polluants sont essentiellement le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), les composés organiques volatils (COV; par exemple, le formaldéhyde et le benzène), les oxydes d'azote (NO_x) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Dans les nouvelles constructions, très performantes d'un point de vue étanchéité à l'air, la concentration de ces pollutions peut parfois être plus élevée qu'à l'extérieur et provoquer des maladies respiratoires et cardiovasculaires. Ce phénomène est nommé « Syndrome des bâtiments malsains (SBS) ».

A titre d'exemple, l'équipe de Zhongjun et al. (2011) a étudié les capacités d'élimination du formaldéhyde concernant trois espèces de plantes d'intérieur en pot : le Chlorophyton chevelu (*Chlorophytum comosum*), l'*Aloe vera* et le Scindapsus doré (*Epipremnum aureum*). Les résultats ont montré que les trois espèces pouvaient éliminer efficacement le formaldéhyde présent dans l'air pendant une longue période. Trois phénomènes expliquent l'élimination de la molécule : l'adsorption par les surfaces de la plante et du sol, l'absorption par les stomates de la plante et la dégradation par les micro-organismes. L'espèce la plus efficace pour l'élimination du formaldéhyde est *Chlorophytum comosum* [62].

Une autre équipe a étudié l'efficacité des plantes ornementales pour l'élimination du benzène de l'air intérieur des bâtiments. Le taux d'absorption du benzène a été analysé pour huit espèces de plantes : le syngonium (*Syngonium podophyllum*), la Langue de belle-mère (*Sansevieria trifasciata*), la couronne d'épine (*Euphorbia milii*), Chlorophyton chevelu (*Chlorophytum comosum*), le Scindapsus doré (*Epipremnum aureum*), le lucky bambou (*Dracaena sanderiana*), le lierre grimpant (*Hedera helix*) et le pois bleu (*Clitoria ternatea*). L'étude relève que l'espèce ayant le taux d'élimination le plus élevé est *Chlorophytum comosum* (Figure 7) [63].

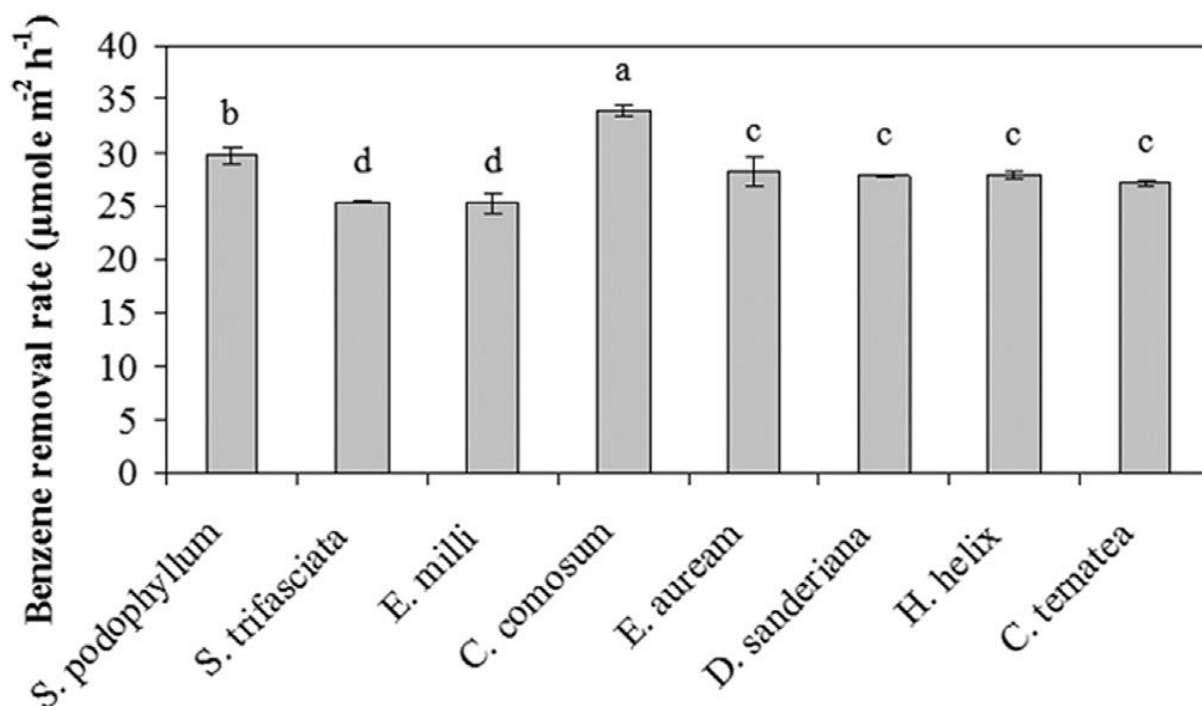


Figure 7 Comparaison du taux d'élimination du benzène des huit espèces végétales ornementales. Chaque valeur est la moyenne de trois répétitions [63].

Les résultats ont également indiqué que les taux d'élimination des plantes non stérilisées étaient plus élevés que ceux des plantes stérilisées. Cette variation est due à l'effet des bactéries présentes dans le substrat des plantes (Figure 8) [63].

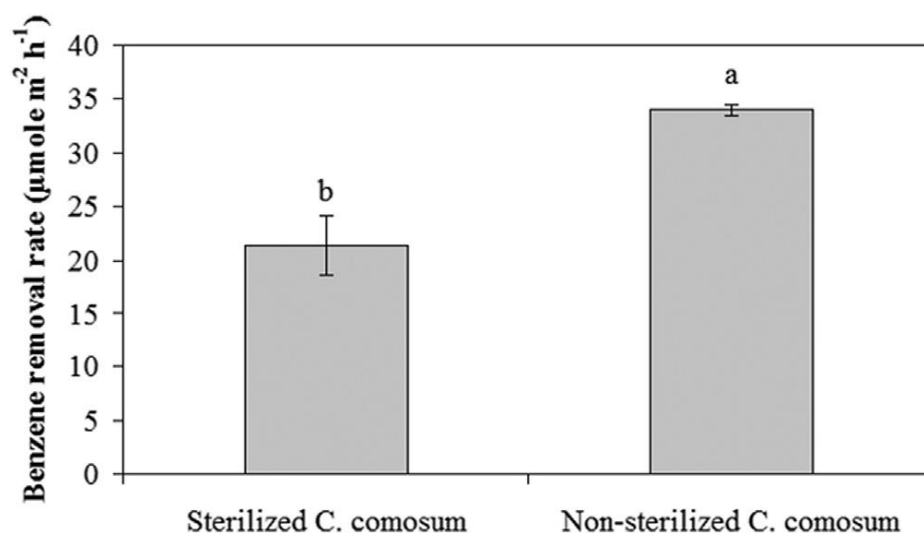


Figure 8 Comparaison du taux d'élimination du benzène de *C. comosum* stérilisé et non stérilisé. Chaque valeur est la moyenne de trois répétitions [63].

3.4 Aménagements autour du bâtiment

De nombreuses autres méthodes de végétalisation des espaces urbains sont présentes dans la littérature scientifique. Cependant, les critères de performance des référentiels sont **très faiblement** impactés par ces techniques alternatives. Effectivement, ceux-ci se concentrent grandement sur le bâtiment en tant que tel. C'est la raison pour laquelle ces aménagements ne seront pas détaillés dans le cadre de ce travail mais simplement listés :

- Ombrage des arbres sur le bâtiment [64] [65] ;
- Gestion alternatives des eaux pluviales [66];
- Plantation de jardins thérapeutiques [67][68][69] ;
- ...

3.5 Résultats de l'étude des services écosystémiques rendus par la biodiversité

Les services écosystémiques rendus par l'intégration de la biodiversité dans le bâtiment ayant été étudiés, une nouvelle analyse des critères de performance des trois référentiels BREEAM, LEED et HQE peut être réalisée.

Un résumé de tous ces services écosystémiques est présenté sur le Tableau 9. Ce dernier permettra de faciliter l'étude effectuée dans le point suivant.

Tableau 9 Résumé des services écosystémiques rendus par l'intégration de la biodiversité dans le bâtiment suivant les familles de critères établies dans le point 2.5

	Toiture végétale	Mur végétalisé	Biophilie
Administration	-	-	-
Gestion Matériaux / déchets	-	-	-
Caractéristiques techniques	- Isolation / absorption sonore	-Isolation / absorption sonore	-
Energie	-Réduction de la charge de chauffage et de refroidissement -Réduction phénomène d'ilot de chaleur urbain	-Réduction de la charge de chauffage et de refroidissement -Réduction phénomène d'ilot de chaleur urbain	-
Eau	-Gestion des eaux pluviales -Amélioration de la qualité de l'eau de pluie -Augmentation de l'utilisation de l'eau de pluie -Amélioration du réseau hydrologique urbain	- Potentiel dans la réduction du ruissellement urbain et amélioration de la qualité de l'eau (mais nécessite encore des points d'amélioration et d'étude)	-
Confort humain	-Amélioration de la température de l'air	-Amélioration de la température de l'air	-Augmentation du bien-être humain
Pollution chimique	-Augmentation de la qualité de l'air -Atténuation de la pollution de l'air	-Augmentation de la qualité de l'air -Atténuation de la pollution de l'air	-Purification de l'air intérieur
Biodiversité	-Réduction de la perte d'habitats -Amélioration de la biodiversité et des paysages urbains	-Réduction de la perte d'habitats -Amélioration de la biodiversité et des paysages urbains	-

4 Influence des infrastructures vertes sur les indicateurs de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE

4.1 Méthodologie

Les résultats de cette étude ont pour objectif d'être comparés avec le constat mis en avant dans le point 2.5 concernant les trois référentiels. Celui-ci était que seulement 6,5 % en moyenne des points disponibles accordés favorisaient directement l'intégration de la biodiversité dans le bâtiment.

Pour ce faire, les 142 critères des trois référentiels ont à nouveau été analysés séparément. Pour chacun d'entre eux, à l'aide du Tableau 9, il a été déterminé si une infrastructure verte influençait positivement ou non la validation des critères des référentiels.

A titre d'exemple, il a été prouvé, ci-dessus, que les toitures végétales amélioraient la gestion des eaux pluviales. Dans les trois référentiels, les critères évaluant cet aspect sont les suivants :

- BREEAM : POL 03 « Flood and surface water management » ;
- LEED : SS05 « Rainwater Management » ;
- HQE : 5.2 « Gestion des eaux pluviales à la parcelle ».

Ces trois critères sont, par conséquent, considérés comme étant impactés positivement par l'installation d'une infrastructure verte.

4.2 Résultats

Les résultats détaillés de cette étude sont présentés dans l'Annexe 4. Il s'avère que dans le référentiel BREEAM, 22 critères sont influencés positivement par l'installation d'infrastructures vertes. Concernant les référentiels LEED et HQE, ce sont respectivement 24 et 15 critères qui sont impactés (Tableau 10).

Sur la base de ces observations, dans les référentiels BREEAM, LEED et HQE, ce sont respectivement 52,1 %, 48,8 % et 36,6 % des points disponibles qui sont influencés positivement par les services écosystémiques.

Tableau 10 Résultats de l'étude de l'influence des infrastructures vertes sur les critères de performance des trois référentiels BREEAM, LEED et HQE

	BREEAM		LEED		HQE	Moyenne des points disponibles
	Nombre de critères	Points disponibles	Nombre de critères	Points disponibles	Nombre de critères	
Total	47	144	54	125	41	
Indicateurs de performance favorisant directement la biodiversité ¹²	4 (8,5 %)	11 (7,6 %)	4 (7,4 %)	6 (4,8 %)	3 (7,3 %)	6,5%
Indicateurs de performance influencés positivement par l'introduction des infrastructures vertes	22 (46,8 %)	75 (52,1 %)	24 (44,4 %)	61 (48,8 %)	15 (36,6 %)	45,8%

Le pourcentage plus faible observé dans le référentiel HQE (36,6 %) s'explique par le fait que, bien qu'ils soient moins nombreux, les critères de performance sont beaucoup plus ciblés et précis que ceux dans les référentiels BREEAM et LEED.

¹² Information étudiée dans le point 2.5

A l'aide de cette étude, il s'est avéré que lorsque tous les services écosystémiques rendus par l'intégration de la biodiversité dans les bâtiments sont pris en compte, le nombre de critères influencés est bien plus important que les 11 critères de base favorisant directement la biodiversité dans les trois référentiels.

En effet, la moyenne des points impactés par une infrastructure verte évolue de **6,5 % à 45,8 %**¹³. La problématique est donc que la biodiversité est bénéfique pour les bâtiments mais que les promoteurs immobiliers ne sont pas incités directement à installer ce type d'infrastructure car il n'est pas spécifié dans le référentiel que celles-ci aident à valider certains critères de performance. Il est compréhensible que ce n'est pas le rôle du référentiel de devoir préciser tous ces services écosystémiques. Cependant, cela entraîne la mise en place d'une sensibilisation quant à ce domaine aux chefs de projet de construction.

Dans l'objectif de simplifier la prise de décision des investisseurs immobiliers, quant à l'installation d'une infrastructure verte dans leurs projets de construction, un outil a été développé dans le point suivant.

¹³ Pour rappel, cette moyenne est rendue possible en prenant en considération qu'un critère de performance dans le référentiel HQE équivaut à un point, ce qui n'est pas le cas dans les référentiels BREEAM et LEED.

5 Développement d'un outil d'évaluation des infrastructures vertes

5.1 Cibles et objectifs

L'outil vise à identifier les sources d'amélioration des critères tout en intégrant au mieux la biodiversité. Il permettra donc aux promoteurs immobiliers d'identifier quelles sont les infrastructures vertes qui permettent au mieux de répondre à cela. En outre, il permettra de résoudre la problématique rencontrée qui est que ces investisseurs immobiliers ne sont pas assez incités à installer ce type d'infrastructures dans leurs projets de construction.

Les cibles de cet outil sont, par conséquent, les promoteurs immobiliers ainsi que les sociétés immobilières. Une étude a été réalisée sur les sociétés immobilières Belges cotées en bourse afin de mieux cerner leurs stratégies et engagements environnementaux. Les documents stratégiques ainsi que les sites Internet des 17 sociétés immobilières les plus importantes en Belgique ont été analysés. Suite à cette analyse, le classement suivant en ressort :

- **Groupe A** : présence d'une stratégie environnementale et mise en avant sur le site Internet de la société ;
- **Groupe B** : présence d'une stratégie environnementale sans mise en avant sur le site Internet de la société ;
- **Groupe C** : aucune stratégie environnementale présente.

Tableau 11 Classification des 17 sociétés immobilières belges selon trois groupes : Groupe A : présence d'une stratégie environnementale et mise en avant sur le site Internet de la société ; Groupe B : présence d'une stratégie environnementale sans mise en avant sur le site Internet de la société ; Groupe C : aucune stratégie environnementale présente.

Groupe A	Groupe B	Groupe C
Aedifica [70]	Ascencio [71]	Care Property Invest [72]
Befimmo [73]	Home Invest Belgium [74]	Immo Moury [75]
Cofinimmo [76]	Intervest Offices & Warehouses [77]	Leasinvest Real Estate [78]
Montea [79]	QRF City Retail [80]	Retail Estate [81]
Wereldhave [82]		Vastned Retail Belgium [83]
Warehouses De Pauw [84]		Warehouse Estate [85]
		Xior Student Housing [86]

Dix sociétés immobilières sur 17 possèdent déjà une conscience environnementale dans leurs documents stratégiques, dont six qui mettent en avant cet engagement sur leur site Internet (Tableau 11). Cette donnée est, dès lors, très encourageante pour le développement de l'outil.

A l'aide de l'outil, chaque infrastructure verte sera qualifiée suivant son impact environnemental et son impact économique sur la rentabilité du projet.

5.2 Evaluation environnementale

5.2.1 Introduction

L'unité de la notation de l'impact environnemental de l'infrastructure verte est une **note en pourcentage**. Chaque critère vaut pour un certain nombre de points et est évalué indépendamment des autres critères. Une fois le critère validé, les points disponibles correspondant sont accordés. Lorsque tous les critères ont été évalués, un nombre de points est donc obtenu. Ce nombre est converti en pourcentage en prenant en considération que le total des points disponibles équivaut à 100 %.

Le choix de ce système de notation a été motivé par le fait que l'outil se veut être le plus exhaustif possible et que celui-ci pourra être adapté à toute sorte d'infrastructure verte. Dans la même visualisation que les logiciels « open source », le nombre de critères pourra, dès lors, varier en fonction du type d'aménagement mais également en fonction des objectifs des cibles. Le nombre de points total disponibles sera, par conséquent, lui aussi variable. La mise en place de la note en pourcentage permet, alors, de généraliser et de comparer l'impact des différentes infrastructures.

L'exemple d'infrastructure verte sélectionné pour la démonstration de l'outil est une toiture végétale. Les critères listés ci-dessous sont donc propres à ce type d'aménagement. Dans le cadre de cet exemple précis, le nombre de points disponibles est de 20. Les critères peuvent être classés selon les catégories suivantes :

- Type de végétaux ;
- Matériaux utilisés ;
- Arrosage ;
- Innovation.

5.2.2 Type de végétaux

VEG 01 : Nombre d'espèces végétales adaptées au milieu ;

Entre 0 et 10 : un point ;

Entre 10 et 20 : deux points ;

Entre 20 et 30 : trois points ;

Plus de 30 : quatre points.

VEG 02 : Origine des plantes

Plantes vivaces d'origine indigène : 1 point.

VEG 03 : Mise en place de différents biotopes en faisant varier les épaisseurs de la couche de substrat. Les différents besoins des espèces végétales variées sont respectés : 2 points.

VEG 04 : Mise en place d'une stratégie performante dans la lutte contre les espèces exotique invasives.: 3 points.

Pour rappel ce type d'espèces est une des causes majeures du déclin de la biodiversité au 21^e siècle.

VEG 05 : Mise en place d'une partie de la toiture nue afin de favoriser la végétation par colonisation spontanée : 1 point.

5.2.3 Matériaux utilisés

MAT 01 : Utilisation de matériaux écologiques dans la construction de :

La couche d'étanchéité : 1 point ;

La couche de drainage : 1 point ;

La couche filtrante : 1 point ;

La couche de substrat : 1 point.

Un matériau est considéré comme écologique lorsque son analyse de cycle de vie indique un bilan environnementale positif.

5.2.4 Utilisation de l'eau

EAU 01 : Respect des réglementations régionales quant à l'utilisation de l'eau pour l'arrosage : 2 points.

EAU 02 : Recyclage de l'eau pour arroser les végétaux : 2 points.

5.2.5 Innovation

INN 01 : Mise en place de technologies innovantes : 1 point.

5.3 Evaluation économique

Le coût est actuellement le principal facteur entravant le développement des infrastructures vertes. L'estimation des coûts est complexe car il n'existe pas de solution unique, elle doit être adaptée à chaque projet et varie donc considérablement [53]. De plus, le coût ne comporte pas uniquement le prix de l'installation. La maintenance doit également être considérée mais n'est généralement pas maîtrisée.

Les infrastructures vertes ont un coût mais peuvent être, cependant, considérées comme des investissements rentables. En effet, une fois l'aménagement installé, il permet de réaliser de nombreuses réductions de dépenses suite aux services écosystémiques rendus aussi bien à l'échelle du bâtiment qu'à l'échelle de la ville entière (cf chapitre 3). A titre d'exemple, l'équipe de Niu et al. (2010) a évalué l'ensemble des avantages économiques des toitures végétales avec une explication détaillée du processus de monétisation des services écosystémiques :

- **Avantage de la gestion des eaux pluviales** : dans le cas où un système de redevance, pour la production d'eaux pluviales, est en vigueur dans la ville où se situe le bâtiment, le toit vert permet de réduire cette facture. Dans certaines villes, des programmes d'incitation pour une meilleure gestion des eaux pluviales sont également présents et octroient des primes pour l'installation de toits verts ;
- **Evaluation des économies d'énergie** : les économies d'énergie sont basées sur une diminution de la consommation de gaz naturel et d'électricité. Une fois le prix de ces deux ressources connu, l'évaluation des économies peut être réalisée. La diminution de la consommation a été mesurée via le logiciel *EnergyPlus* qui permet de modéliser les flux de chaleur à travers une toiture. Depuis la version 3.1.0, le logiciel a également la capacité d'incorporer une toiture végétale à la modélisation (module « *EcoRoof* »).

En outre de l'impact de ces aménagements sur les performances techniques du bâtiment, de plus en plus de modèles économiques sont développés permettant de monétiser la santé et le bien-être des occupants d'un bâtiment. Ainsi, la quantification des avantages économiques quant au potentiel des services écosystémiques est un argument permettant également d'amortir le coût d'investissement. Ces domaines d'études sont de plus en plus variés, et beaucoup s'écartent du sujet de travail tout en impactant la rentabilité des projets suite à

cette intégration de la biodiversité. A titre d'exemple, il existe un modèle établissant la liaison des surfaces plantées à la réduction des séjours hospitaliers [67].

A titre informatif, les recherches de Francis et al. (2011) indiquent que le coût minimum d'une toiture végétale serait de 150 €/m² et de 390 €/m² pour les façades végétales sans l'entretien [40].

La rentabilité des infrastructures vertes est donc un domaine encore trop faiblement étudié. Cependant, de plus en plus de publications à ce sujet mettent en valeur le potentiel de la biodiversité sur l'impact positif de la rentabilité des projets. Ces données sont encourageantes pour la suite de ce travail.

Dans le cadre de l'outil, l'impact économique de l'infrastructure verte sera qualifié par son **temps de retour sur investissement**. Il représente le temps nécessaire pour que les bénéfices liés à l'aménagement rentabilisent complètement le coût d'investissement. L'unité est en années. Le choix de cet indicateur a été motivé par sa simplicité d'explication comparé au retour sur investissement (%). En effet, dans le cas où l'outil servirait à qualifier l'infrastructure d'un client ne possédant pas de connaissance en économie, il est préférable de lui expliquer que son investissement sera rentable après un certain nombre d'années.

5.4 Objectif fixé par impact

Afin de déterminer si l'installation de l'infrastructure verte est justifiable ou non, des objectifs sont instaurés. Tout comme le nombre de critères, ces objectifs peuvent être modifiés selon les attentes des cibles ou encore selon les différents types d'infrastructures.

Dans le cas de **l'impact environnemental**, une note de **70 % minimum** est requise pour que l'aménagement soit acceptable d'un point de vue respect et préservation de la biodiversité.

Concernant **l'impact économique**, toutes les sociétés immobilières du Groupe A (Tableau 11) ont dans un premier temps été contactées. L'objectif de cet échange était de cerner au mieux leurs attentes vis-à-vis de la rentabilité minimale que devait avoir une éventuelle toiture végétale sur un de leurs bâtiments. Il en ressort cependant, que la rentabilité de ce type de projets n'est pas l'indicateur prioritaire dans le cas de telle prise de décision selon ces sociétés immobilières. De plus, elles sont en possession de trop peu d'indicateurs financiers pour réaliser ce genre d'études en interne. Ce qui confirme le fait que les bénéfices des infrastructures vertes sont encore trop méconnus.

Il a donc été décidé arbitrairement qu'un **temps de retour de maximum 15 ans** sera requis pour considérer que l'infrastructure soit justifiable dans le cadre d'un bâtiment tertiaire.

5.5 Visualisation de l'outil

Une fois les deux impacts (environnemental et économique) calculés, ils peuvent être intégrés dans un graphique de type « nuage de points ». L'axe des abscisses représente l'impact environnemental et son échelle varie de 0 à 100 %. L'axe des ordonnées représente l'impact économique dont l'unité est en années.

Les objectifs fixés dans le point 5.4 sont également intégrés dans le graphique. Cette action-là permet la visualisation de quatre zones prédominantes. Chaque zone sera symbolisée par un scénario fictif dans le point suivant. La zone verte caractérise toutes les infrastructures qui seront considérées comme acceptables d'un point de vue rentabilité et respect de la préservation de la biodiversité.

Dans le cadre de ce travail, l'outil a été codé avec le logiciel R (Annexe 5)

5.6 Démonstration de l'outil

L'outil devait dans un premier temps permettre de qualifier la toiture végétale d'un projet de construction devant être réalisé fin de l'année 2020. Malheureusement, suite à la pandémie actuelle du SRAS-CoV-2, ce projet fut annulé par le propriétaire du bâtiment.

Dès lors, quatre scénarii fictifs ont été conçus dans le cadre de cette démonstration (Tableau 12). L'intégration des quatre scénarii dans l'outil est représentée sur la Figure 9.

Tableau 12 Description des quatre scénarii pour la démonstration de l'outil d'évaluation des infrastructures vertes

	Impact économique (Années)	Impact environnemental (%)
Scénario 1	12	85
Scénario 2	12	40
Scénario 3	20	85
Scénario 4	20	40

Chacun des quatre scénario permet de représenter une zone particulière du graphique. Ainsi, le scénario 1 est situé dans la zone verte, la zone optimale du graphique. Cela signifie que tous les aménagements qui seront localisés dans cette zone suivant les deux impacts seront considérés comme acceptables et justifiables.

Le scénario 2 se trouve dans la zone où l'objectif économique est validé mais la note environnementale n'est pas acceptable. Tout aménagements se trouvant dans cette zone devra se soumettre à une amélioration en respectant un certain nombre de critères supplémentaires afin d'augmenter la note environnementale jusqu'au minimum souhaité dans les objectifs (70 % dans le cadre de cet exemple).

Le scénario 3, se trouve dans la zone où la note environnementale est respectée mais les objectifs de rentabilité ne sont pas acceptables. Pour ce type d'aménagement, une étude économique est requise afin d'améliorer la rentabilité de l'investissement tout en ne modifiant pas les caractéristiques environnementales de l'aménagement.

Enfin, le scénario 4 représente la pire situation où aucun des objectifs n'est rempli.

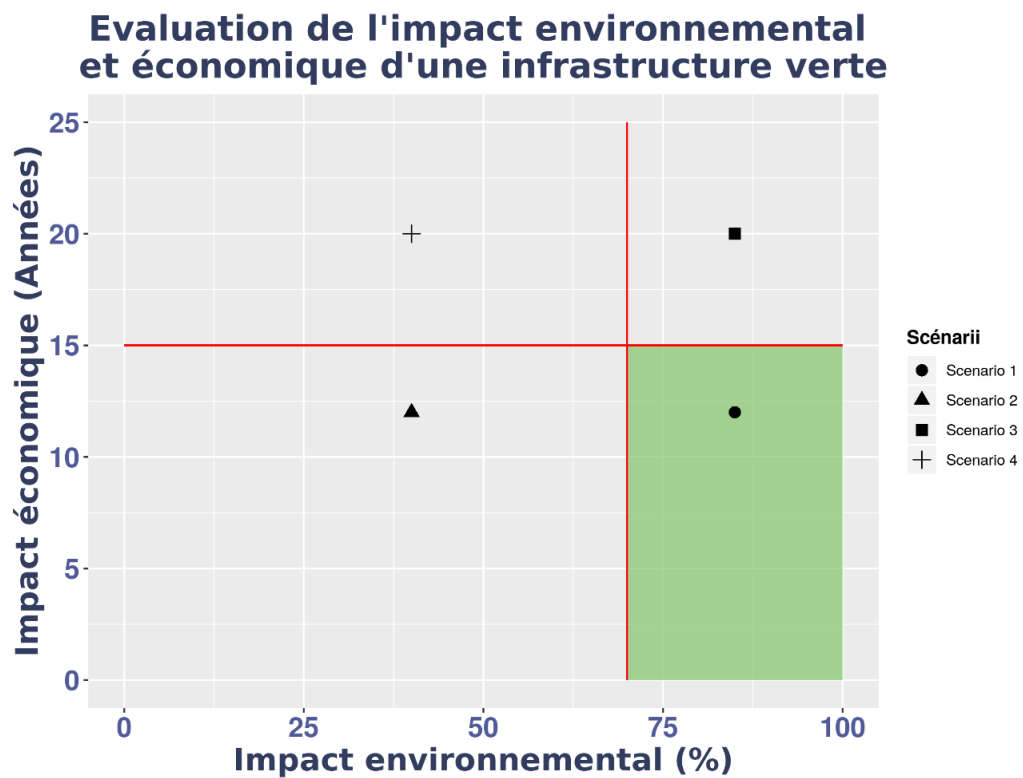


Figure 9 Illustration de l'outil d'évaluation des infrastructures vertes selon les quatre scénarii sur le Tableau 12 , la zone verte représente la zone optimale dans laquelle devrait se trouver l'infrastructure afin de respecter les objectifs prédéfinis

6 Amélioration des infrastructures vertes avec l'outil d'évaluation

L'outil a également pour vocation d'améliorer les aménagements à l'aide des critères définis. En effet, une fois l'infrastructure verte qualifiée par son impact environnemental et son impact économique, les caractéristiques de celle-ci peuvent être modifiées afin d'optimiser la note environnementale et le temps de retour sur investissement.

Ainsi, admettons une toiture végétale semblable au scénario 2. L'objectif est d'augmenter sa note environnementale, actuellement de 40 %, jusqu'à minimum 70 %. En supposant que ces changements n'affectent pas la rentabilité global de l'aménagement, il faudrait pour ce faire, combler les critères non respectés. La proposition d'amélioration du scénario 2 est détaillée sur le Tableau 13.

Tableau 13 Détail de la note environnementale, selon tous les critères de l'outil, du scénario 2 et de son amélioration

Nom du critère	Scénario 2	Scénario 2 amélioré
VEG 01	2	4
VEG 02	1	1
VEG 03	0	2
VEG 04	1	3
VEG 05	0	0
MAT 01	2	2
EAU 01	2	2
EAU 02	0	0
INN 01	0	2
Total (points)	8	14
Total (%)	40	70

La liste des améliorations proposées est la suivante :

- **[VEG 01]** L'augmentation du nombre d'espèces végétales sur la toiture pour atteindre une diversité d'au moins 30 espèces différentes. Il est important de noter que cette amélioration nécessite un respect du critère et, par conséquent, une étude du milieu et du climat. L'objectif n'est pas de planter le plus de végétaux possibles mais que ceux-ci soient bien adaptés et participent à la préservation de la biodiversité indigène du milieu ;
- **[VEG 03]** Augmentation de l'épaisseur de la couche de substrat. C'est notamment ce changement qui pourrait expliquer que la rentabilité globale du projet ne varie pas. Pour rappel, une couche de 10 cm de sol augmente la résistance thermique du toit de 0,4 m²K/W [3] et, par conséquent, une réduction de consommation énergétique destinée au chauffage et à la climatisation ;
- **[VEG 04]** Mise en place d'une stratégie performante dans la lutte contre les espèces exotique invasives.

L'évolution de la position du scénario 2 (amélioré) sur l'outil est représenté sur la Figure 10. La toiture végétale de ce scénario se trouve alors dans la zone verte. Elle est donc considérée comme acceptable aussi bien d'un point de vue économique qu'environnemental.

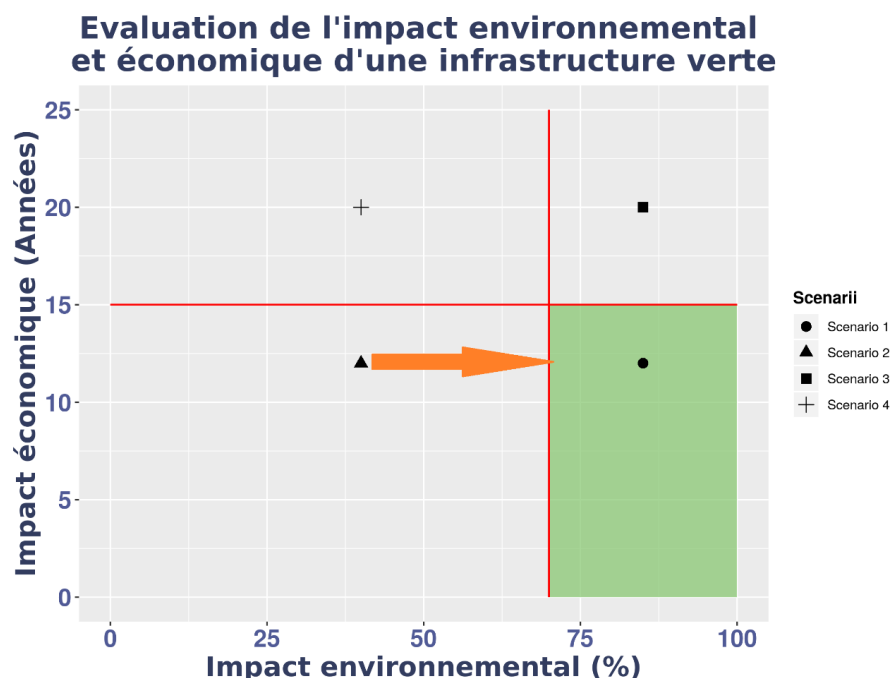


Figure 10 Illustration de l'amélioration du scénario 2 en augmentant sa note environnementale de 40 % à 70 %, représentée par la flèche de couleur orange

Discussions

Les référentiels sont devenus au fil du temps des documents d'évaluation de plus en plus importants et impactants dans le domaine de la construction. Ils permettent dorénavant, en respectant leurs critères de performance, de qualifier certains bâtiments de durables. Une reconnaissance est ainsi octroyée aux bâtiments, leur ajoutant une plus-value (économique et environnementale) et une sûreté pour les investisseurs sur le marché économique. Il existe aujourd'hui de nombreux référentiels ayant chacun leur propre spécialisation. Ainsi, les domaines d'évaluation sont très larges et peuvent varier de l'étude de la performance énergétique à la réduction de l'empreinte carbone en passant par le bien-être social ou encore l'évaluation environnementale. Plus le référentiel est reconnu mondialement et plus cette reconnaissance est valorisante financièrement parlant. Ces dernières années, de multiples petits labels et référentiels consacrés uniquement à la biodiversité ont été développés (ex. : Effinature, Ecojardin, Label Eve, Jardin Remarquable, Jardin de Noé, Refuge LPO, Biodiversity). Ils n'offrent, cependant, qu'une très faible visibilité pour les promoteurs immobiliers et sont, de la sorte, fortement délaissés au profit des trois référentiels internationaux, à savoir BREEAM, LEED et HQE.

La première problématique constatée dans ce travail découle, dès lors, que bien que ces trois certifications soient les références mondiales en termes de promotion de l'environnement, leurs critères de performance favorisant directement l'intégration de la biodiversité dans les bâtiments sont encore trop peu nombreux. A l'heure actuelle, les services écosystémiques rendus par les infrastructures vertes à l'échelle du bâtiment sont terriblement sous-estimés. Afin d'améliorer la prise de décision des investisseurs immobiliers quant à l'aménagement de ce type de structures, les référentiels devraient formuler l'influence positive de la biodiversité pour chacun de leurs critères. En effet, lorsque nous observons les critères favorisant directement l'intégration de la biodiversité dans le bâtiment, les points accordés par ceux-ci sont en moyenne de 6,5 % des points totaux. Cependant, en prenant en considération tous les impacts positifs rendus par les services écosystémiques sur ces critères, la moyenne des points accordés augmente alors jusqu'à 45,8 %.

Cette observation n'est pas valable uniquement pour les référentiels mais également dans la formation des futurs acteurs du développement durable et dans la littérature scientifique. Il est désormais nécessaire dans les études scientifiques de prendre en considération le potentiel immense de la synergie entre l'intégration de la biodiversité et l'étude du bâtiment sous toutes ses caractéristiques (performance énergétique, gestion de l'eau, qualité de l'air, ...). Des collaborations entre différents laboratoires ayant leur propre spécialisation devraient pouvoir être envisagées. A titre d'exemple, il existe au sein même de l'université de Liège, différents départements et laboratoires ayant des spécialisations variées. Une éventuelle coopération entre plusieurs spécialistes de l'étude de la performance énergétique des bâtiments et de la biodiversité serait extrêmement bénéfique quant à l'étude des synergies entre ces domaines.

De là, découle la seconde problématique constatée durant ce travail, à savoir le manque considérable d'uniformisation dans l'étude des infrastructures vertes. La conception des études et des recherches expérimentales, doit être améliorée dans l'avenir à l'aide d'une normalisation. De plus, les études de modélisation devraient également pouvoir être mieux vérifiées par les pairs ainsi que nécessiter des vérifications en cas réel.

C'est une remarque également décrite par Hunter et al. (2014) amenant les architectes, les constructeurs et les propriétaires intéressés par les infrastructures vertes à devoir filtrer une abondance d'informations qui peuvent parfois être contradictoires entre elles. Le fait que toutes les études soient réalisées, d'une part dans des pays dont les climats peuvent être fortement différents et, d'autre part sur des bâtiments dont les caractéristiques techniques sont très variables entraîne une confusion dans la littérature [54].

En plus de cette normalisation, chaque future installation dans les projets de construction devrait pouvoir être étudiée de manière individuelle. Cela entraîne un effort plus important dans la conception des équipes pluridisciplinaires travaillant dans la construction. En effet, dorénavant, des écologues devraient pouvoir travailler en collaboration avec tous les autres corps de métiers encadrant la construction tels que les architectes, les ingénieurs du bâtiment, les acousticiens, les responsables énergétiques, ... Pour permettre l'insertion de cette nouvelle fonction, l'écologue devra réussir à prouver qu'il possède un rôle à jouer dans l'équipe.

Son travail devra, en effet, faire en sorte d'améliorer la rentabilité des projets de construction tout en augmentant l'intégration environnementale de ces mêmes projets.

L'outil développé dans le cadre de ce travail permettra d'inciter les investisseurs immobiliers à installer davantage des aménagements intégrant la biodiversité. Il a pour vocation d'être amélioré en permanence suite à l'ajout de nouveaux critères suivant les attentes des différentes cibles, suivant les différents types d'infrastructures ou encore en fonction des futures découvertes dans la littérature scientifique.

Une optimisation de l'outil doit être réalisée en y intégrant le volet social, qui a délibérément été écarté dans le cadre de ce travail. Ce domaine reste toutefois très difficile à étudier étant donné sa relation avec le bien-être humain qui est un sujet d'étude moins objectif. Cependant, l'outil permettrait, dès lors, d'analyser et d'intégrer les trois piliers fondateurs du développement durable.

L'outil pourrait également jouer le rôle d'avantage concurrentiel pour un installateur d'infrastructures vertes. En l'occurrence, tout aménageur, pourra utiliser l'outil pour appuyer les communications commerciales quant à la création de valeur suite à l'intégration de la biodiversité. Leurs clients pourront, alors, avoir une visualisation de l'impact économique et environnemental de leurs infrastructures.

La vision de l'avenir quant à la préservation de biodiversité n'en reste néanmoins pas pessimiste. L'augmentation considérable du nombre d'études au cours de ces dernières années semble démontrer un intérêt grandissant pour ce domaine. L'évolution continue des stratégies inter-gouvernementales sont également une preuve de l'engouement concernant la protection de la biodiversité. Ainsi, le développement de la stratégie de la Commission Européenne en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030 (publié le 20/05/2020) est une amélioration des objectifs fixés dans la stratégie 2020 décrite dans le point 1.3 [87]. Toutes ces solutions seront des éléments clés dans l'avenir pour répondre à cette nouvelle branche de la biologie, l'écologie de réconciliation¹⁴.

¹⁴ Concept développé dans le livre de Michael Rosenzweig « Win-Win Ecology ». Cette branche étudie toutes les techniques permettant d'intégrer la biodiversité dans les écosystèmes anthropiques, autrement dit, la réconciliation de l'utilisation humaine et non humaine des régions urbanisées [40].

Conclusion

Suite à l'explosion démographique depuis la révolution industrielle, l'expansion de l'urbanisation est devenue la première cause mondiale du déclin de la biodiversité. Les services écosystémiques rendus par cette biodiversité au niveau planétaire sont aujourd'hui menacés. Il devient, dès lors, urgent de mettre en place des mesures permettant d'enrayer cette perte. La multitude de programmes, de plans et de stratégies naissant au niveau international est toutefois très encourageant.

Concernant le secteur de la construction, celui-ci est, à l'heure actuelle, de plus en plus régit par les référentiels des bâtiments durables. Les certifications octroyées deviennent des arguments commerciaux presque incontournables sur le marché immobilier. Les trois référentiels les plus importants concernant la promotion de l'environnement sont BREEAM, LEED et HQE. Il apparaît cependant que le potentiel des services écosystémiques rendus par l'intégration de la biodiversité à l'échelle du bâtiment est grandement sous-estimé dans la description de leurs critères de performance.

Dès lors, une sensibilisation approfondie des acteurs du domaine de la construction sera nécessaire dans l'avenir afin d'allier l'intégration de la biodiversité aux performances techniques des bâtiments. Dans cette optique, l'outil développé dans ce travail permettra d'une part, d'évaluer l'impact environnemental et économique d'aménagements verts et d'autre part d'améliorer ces aménagements à l'aide des critères élaborés.

Une fois ces aménagements considérées à leur juste valeur et non plus comme un élément de verdurisation dans un objectif de greenwashing, ceux-ci seront un élément clé dans l'écologie de réconciliation. Ils permettront, en outre, de répondre aux nombreux objectifs et stratégies inter-gouvernementaux qui seront, de plus en plus, en faveur d'une gestion durable de la préservation de la biodiversité.

«Permettre à la nature de redevenir saine est essentiel pour notre bien-être physique et mental et peut nous aider à lutter contre le changement climatique et l'apparition de maladies. Cette démarche est au cœur de notre stratégie de croissance, le pacte vert pour l'Europe, et s'inscrit dans le cadre d'une relance européenne qui rend à notre planète plus qu'elle ne lui prend.»

**Ursula von der Leyen, mai 2020,
Présidente de la Commission européenne**

Bibliographie

- [1] I. Roxana Baciú, M. Lucian Lupu, et S. George Maxineasa, « Principles of Green Roofs Design », *Bull. Polytech. Inst. Jassy*, vol. 65, n° 3, p. 63-76, 2019.
- [2] F. Brilli *et al.*, « Plants for Sustainable Improvement of Indoor Air Quality », *Trends in Plant Science*, vol. 23, n° 6. Elsevier Ltd, p. 507-512, 01-juin-2018.
- [3] U. Berardi, A. H. GhaffarianHoseini, et A. GhaffarianHoseini, « State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs », *Applied Energy*. 2014.
- [4] Panel, Environmental Pollution, United States President's Science Advisory Committee, et President's Science Advisory Committee, « Restoring the quality of our environment », 1965.
- [5] J. W. Zillman, « Historique des activités climatologiques », *Organ. météorologique Mond.*, vol. 58, n° 3, 2009.
- [6] GIEC, *Fiche d'information sur le GIEC: Chronologie – faits marquants de l'histoire du GIEC*. 2015.
- [7] G. H. Brundtland et K. Mansour, « Notre avenir à tous », 1988.
- [8] P. M. Stassart, « Cours d'introduction au développement durable », in *Chapitre « définition »*, 2018.
- [9] Organisation des Nations Unies, « Objectifs de développement durable », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>. [Consulté le: 20-mars-2020].
- [10] NBN, « Objectifs de développement durable et normes : un accord parfait », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nbn.be/fr/actualites/les-normes-iso-peuvent-aider-votre-organisation-a-concrétiser-ses-objectifs-de>. [Consulté le: 20-mars-2020].
- [11] Organisation des Nations Unies, « Objectif de Développement Durable - n°13- Lutte contre les Changements Climatiques », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/climate-change-2/>. [Consulté le: 21-mars-2020].
- [12] Organisation des Nations Unies, « Objectif de Développement Durable - n°15 - Vie terrestre », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/biodiversity/>. [Consulté le: 21-mars-2020].
- [13] J. Rockström *et al.*, « A safe operating space for humanity », *Nature*, vol. 461, n° 7263, p. 472-475, sept. 2009.
- [14] G. Ceballos, A. García, et P. R. Ehrlich, « The Sixth Extinction Crisis Loss of Animal Populations and Species. », *J. Cosmol.*, vol. 8, n° November 2009, p. 1821-1831, 2010.
- [15] Swingland Ian, « Biodiversity, definition of », *Encycl. Biodivers.*, vol. 1, p. 377-391, 2001.
- [16] Z. Horváth, R. Ptacnik, C. F. Vad, et J. M. Chase, « Habitat loss over six decades accelerates regional and local biodiversity loss via changing landscape connectance », *Ecology Letters*, vol. 22, n° 6. Blackwell Publishing Ltd, p. 1019-1027, 01-juin-2019.
- [17] M. Michael L., « Urbanization, Biodiversity, and Conservation », *Bioscience*, vol. 52, p. 883-890, févr. 2009.
- [18] D. Blouin, « Homogénéisation biotique de la flore spontanée urbaine », Université de Montréal, Montréal, 2017.
- [19] K. Goudswaard, F. Witte, et E. F. B. Katunzi, « The invasion of an introduced predator, Nile perch (*Lates niloticus*, L.) in Lake Victoria (East Africa): Chronology and causes », *Environ. Biol. Fishes*, vol. 81, n° 2, p. 127-139, févr. 2008.

- [20] A. Meinesz *et al.*, « The introduced green alga *Caulerpa taxifolia* continues to spread in the Mediterranean », *Biol. Invasions*, vol. 3, n° 2, p. 201-210, 2001.
- [21] D. A. Driscoll *et al.*, « Fire management for biodiversity conservation: Key research questions and our capacity to answer them », *Biol. Conserv.*, vol. 143, n° 9, p. 1928-1939, sept. 2010.
- [22] O. Lafont, « Du saule à l'aspirine », *Rev. Hist. Pharm. (Paris)*, vol. 55, n° 354, p. 209-216, 2007.
- [23] G. M. Mace, K. Norris, et A. H. Fitter, « Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 27, n° 1. Elsevier Ltd, p. 19-26, 01-janv-2012.
- [24] G. Capotorti *et al.*, « Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning: A case study from the metropolitan area of Rome (Italy) », *Urban For. Urban Green.*, vol. 37, p. 87-96, janv. 2019.
- [25] ONU, « Deux milliards de personnes de plus sur la Terre en 2050, selon l'ONU », 20-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://news.un.org/fr/story/2019/06/1045681>. [Consulté le: 13-avr-2020].
- [26] Commission européenne, « La stratégie de l'UE en matière de biodiversité à l'horizon 2020 », Office des publications de l'Union européenne, 2011.
- [27] Programme des Nations unies pour l'environnement, « Plan stratégique 2011-2020 pour la diversité biologique », Montréal, 2011.
- [28] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), « Lancement à la FAO de l'Année internationale de la santé des végétaux 2020 », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fao.org/news/story/fr/item/1253764/icode/>. [Consulté le: 31-mars-2020].
- [29] Assemblée Nationale Française, « Fiche de synthèse n°31 : Le domaine de la loi », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www2.assemblee-nationale.fr/decouvrir-l-assemblee/role-et-pouvoirs-de-l-assemblee-nationale/les-fonctions-de-l-assemblee-nationale/les-fonctions-legislatives/le-domaine-de-la-loi>. [Consulté le: 13-avr-2020].
- [30] Meuble Qualité Certifié, « Les différences entre réglementation, norme, label, certification », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meuble-qualite-certifie.fr/actualite/quelles-differences-entre-reglementation-norme-label-et-certification>. [Consulté le: 13-avr-2020].
- [31] L. Janicot, « Les systèmes d'indicateurs de performance environnementale (IPE), entre communication et contrôle », *Comptab. - Contrôle - Audit*, vol. 13, n° 1, p. 47, 2007.
- [32] CSTB-Formations, « Savoir choisir le label ou la certification pour un bâtiment performant », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://formations.cstb.fr/formations/?etp=166>. [Consulté le: 22-août-2020].
- [33] Building Research Establishment (BRE), « BREEAM UK New Construction - Non domestic Buildings- Technical Manual - SD5078 », 2018.
- [34] Building Research Establishment (BRE), « BREEAM: the world's leading sustainability assessment method for masterplanning projects, infrastructure and buildings », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.breeam.com/>. [Consulté le: 30-mars-2020].
- [35] US Green Building Council, « LEED - Reference guide for building design and construction- V4 », 2014.
- [36] U.S. Green Building Council, « Projects », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usgbc.org/projects>. [Consulté le: 30-mars-2020].
- [37] Certivea et Groupe CSTB, « Guide pratique du référentiel pour la qualité

- environnementale des bâtiments - Bâtiments tertiaires », 2015.
- [38] A. Scherba, D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel, et C. C. Wamser, « Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment », *Build. Environ.*, vol. 46, n° 12, p. 2542-2551, déc. 2011.
 - [39] P. Hawken, *Drawdown Project - Comment inverser le cours du réchauffement planétaire*. 2018.
 - [40] R. A. Francis et J. Lorimer, « Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls », *Journal of Environmental Management*, vol. 92, n° 6. Academic Press, p. 1429-1437, 01-juin-2011.
 - [41] N. Kamarulzaman, S. Z. Hashim, H. Hashim, et A. A. Saleh, « Green Roof Concepts as a Passive Cooling Approach in Tropical Climate- An Overview », *E3S Web Conf.*, vol. 3, p. 01028, 2014.
 - [42] Bruxelles Environnement, « Dispositif | Toiture verte intensive et semi-intensive | Guide Bâtiment Durable », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/toiture-verte-intensive-et-semi-intensive.html?IDC=10899#>. [Consulté le: 07-mai-2020].
 - [43] « Etanchéités – Energie Plus Le Site », 25-sept-2007. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/composants-de-l-enveloppe/composants-divers/etancheites/>. [Consulté le: 04-mai-2020].
 - [44] Energie Plus Le Site, « Inertie thermique », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/>. [Consulté le: 22-août-2020].
 - [45] H. Bahi, H. Mastouri, et H. Radoine, « Review of methods for retrieving urban heat islands », *Mater. Today Proc.*, vol. 27, p. 3004-3009, avr. 2020.
 - [46] J. R. Simpson et E. G. McPherson, « The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona », *Energy Build.*, vol. 25, n° 2, p. 127-137, janv. 1997.
 - [47] Grant Gary, « Extensive Green Roofs in London », *Urban Habitats*, vol. 4, n° 1, p. 51-65, janv. 2005.
 - [48] S. C. M. Hui et S. C. Chan, « Integration of green roof and solar photovoltaic systems », 2011.
 - [49] J. K. Kaldellis et P. Fragos, « Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators », *J. Clean. Prod.*, vol. 19, n° 4, p. 311-317, mars 2011.
 - [50] C. Lamnatou et D. Chemisana, « A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Elsevier Ltd, p. 264-280, 01-mars-2015.
 - [51] ZinCo Benelux, « Energie solaire et toit végétal - Manuel technique », 2020.
 - [52] M. Manso et J. Castro-Gomes, « Green wall systems: A review of their characteristics », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41. Elsevier Ltd, p. 863-871, 01-janv-2015.
 - [53] B. Riley, « The state of the art of living walls: Lessons learned », *Building and Environment*. 2017.
 - [54] A. M. Hunter, N. S. G. Williams, J. P. Rayner, L. Aye, D. Hes, et S. J. Livesley, « Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review », *Ecological Engineering*, vol. 63. Elsevier, p. 102-113, 01-févr-2014.
 - [55] C. R. S. Kumar, S. Ghosh, S. Gumber, R. Mishra, J. Thangaraja, et H. Yang, « Carbonaceous particle scavenging and thermal comfort augmentation with an

- extended green facade draped with *Vernonia elaeagnifolia* », *EnvironmentAsia*, vol. 12, n° 3, p. 62-74, sept. 2019.
- [56] E. M. Elgizawy, « The Effect of Green Facades in Landscape Ecology », *Procedia Environ. Sci.*, vol. 34, p. 119-130, janv. 2016.
- [57] A. R. Carrico, P. Padgett, M. P. Vandenberg, J. Gilligan, et K. A. Wallston, « Costly myths: An analysis of idling beliefs and behavior in personal motor vehicles », *Energy Policy*, vol. 37, n° 8, p. 2881-2888, août 2009.
- [58] G. Pérez *et al.*, « Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings », *Appl. Acoust.*, vol. 110, p. 218-226, sept. 2016.
- [59] J. P. Simaika et M. J. Samways, « Biophilia as a universal ethic for conserving biodiversity », *Conserv. Biol.*, vol. 24, n° 3, p. 903-906, juin 2010.
- [60] P. H. Kahn, « Developmental Psychology and the Biophilia Hypothesis: Children's Affiliation with Nature », *Dev. Rev.*, vol. 17, n° 1, p. 1-61, mars 1997.
- [61] B. Grinde et G. Patil, « Biophilia: Does Visual Contact with Nature Impact on Health and Well-Being? », *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 6, n° 9, p. 2332-2343, août 2009.
- [62] Z. Xu, L. Wang, et H. Hou, « Formaldehyde removal by potted plant-soil systems », *J. Hazard. Mater.*, vol. 192, n° 1, p. 314-318, août 2011.
- [63] W. Sriprapat et P. Thiravetyan, « Efficacy of ornamental plants for benzene removal from contaminated air and water: Effect of plant associated bacteria », *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 113, p. 262-268, sept. 2016.
- [64] F. Lindberg et C. S. B. Grimmond, « The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation », *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 105, n° 3, p. 311-323, janv. 2011.
- [65] H. Akbari et H. Taha, « The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities », *Energy*, vol. 17, n° 2, p. 141-149, 1992.
- [66] G. MARKOVIČ, D. KAPOŠTÁSOVÁ, et Z. VRANAYOVÁ, « Rainwater as a alternative source of water supply in building - Measurements and evaluation », *J. Civ. Eng. Environ. Archit.*, 2016.
- [67] Walter Robin et Shackell Aileen, « Greenspace design for health and well-being : Practice Guide », *For. Comm.*, 2012.
- [68] EnergiePlus, « Monotone de chaleur [cogen] - Energie Plus Le Site », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/cogeneration10/monotone-de-chaleur/>. [Consulté le: 04-janv-2020].
- [69] S. Horowitz, « Therapeutic Gardens and Horticultural Therapy: Growing Roles in Health Care », *Altern. Complement. Ther.*, vol. 18, n° 2, p. 78-83, avr. 2012.
- [70] « Aedifica - Accueil ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aedifica.be/fr/accueil>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [71] « Accueil | Ascencio ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ascencio.be/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [72] « Care Property Invest – Construire dans le domaine des soins en toute confiance ». [En ligne]. Disponible sur: <https://carepropertyinvest.be/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [73] « Befimmo | Befimmo est une SIR ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.befimmo.be/fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [74] « Home Invest Belgium - Accueil (FR) ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.homeinvestbelgium.be/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [75] « Immo Moury - Home - Exploitant de biens immobiliers ». [En ligne]. Disponible sur:

- <https://www.immomoury.com/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [76] « Cofinimmo - Together in real estate ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cofinimmo.com/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [77] « Intervest Offices & Warehouses ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.intervest.be/fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [78] « Leasinvest Real Estate ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.leasinvest.be/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [79] « Montea | Entrepôts logistiques ». [En ligne]. Disponible sur: <https://montea.com/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [80] « Homepage - FR | Qrf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qrf.be/fr/homepage-fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [81] « Retail Estates|Page d'accueil ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.retailstates.com/fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [82] « Wereldhave ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wereldhave.com/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [83] « Vastned Retail Belgium ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vastned.be/fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [84] « Warehouses De Pauw ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wdp.eu/fr>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [85] « warehouse estates - Accueil ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.w-e-b.be/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [86] « Xior Student Housing, une chambre d'étudiant en toute sécurité ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.xior.be/fr/>. [Consulté le: 23-août-2020].
- [87] Commission européenne, « Stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030 », Bruxelles, mai 2020.
- [88] Editions EYROLLES, « Le dictionnaire du BTP », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=1617>. [Consulté le: 17-août-2020].

Annexes

Annexe 1 Classification des critères de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE.

Tableau 14 Code couleur des huit familles de critères

ADMINISTRATION
ENERGIE
UTILISATION EAU
CONFORT DES OCCUPANTS
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES
GESTION MATÉRIAUX / DÉCHETS
POLLUTION CHIMIQUE
BIODIVERSITÉ

Tableau 15 Classification des critères du référentiel BREEAM

1) Gestion		6) Matériaux	
Projet et conception concis	4	Impacts environnementaux des produits de construction – LCA bâtiment	7
Planification du cycle de vie et de la durée de vie	4	Impacts environnementaux des produits de construction- EPD	1
Pratique de constructions responsables	6	Sources responsables des matériaux	4
Commissioning and handover	4	Design pour une durabilité / résilience	1
Suivi du projet	3	Efficacité des matériaux	1
2) Santé		7) Déchet	
Confort visuel	6	Gestion des déchets de construction	5
Qualité air intérieur	4	Utilisation d'agrégats de source recyclée et durable	1
Confort thermique	3	Déchets opérationnels	1
Performances acoustiques	4	Finitions spéculatives	1
Sécurité	1	Adaptation au changement climatique	1
Sureté et santé aux alentours	2	Design pour un désassemblage / adaptation	2
3) Energie		8) Utilisation des sols et écologie	
Reduction de l'énergie et carbone utilisé	13	Sélection du site	2
Monitoring de l'énergie	2	Identification / compréhension des risques et opportunités pour le site	2
Lumière externe	1	Gestion des impacts négatifs sur l'écologie	3
Design carbone faible	3	Modification et amélioration de l'écologie	4
Efficacité énergétique du stockage de froid	2	Gestion/maintenance à long termes de l'écologie	2
Efficacité énergétique des systèmes de transport	3	9) Pollution	
Efficacité énergétique des systèmes de laboratoire	5	Impact des réfrigérants	3
Efficacité énergétique des équipements	2	Qualité air local	2
4) Transport		Gestion des inondations et de l'eau de surface	5
Evaluation du transport et plan de voyage	2	Réduction de la pollution lumineuse nocturne	1
Mesures durables de transport	10	Réduction de la pollution sonore	1
5) Gestion eau		10) Innovation	
Consommation d'eau	5	Innovation	1
Monitoring de l'eau	1		
Détection des fuites d'eau	2		
Efficacité des équipements d'eau	1		

Tableau 16 Classification des critères du référentiel LEED

1) Emplacement / transport		5) Matériaux et ressources	
Emplacement dans un aménagement de quartier	16	Collecte et entreposage des matériaux recyclables	Pré requis
Protection des habitations protégées	1	Planification de la gestion des déchets de construction et de démolition	Pré requis
Site priorisé	2	Réduction de l'impact du cycle de vie du bâtiment	5
Densité de l'environnement et diverses utilisations	5	Déclaration et optimisation des produits de construction (DEP)	2
Accès aux transports en commun de qualité	5	DEP – Approvisionnement de matière premières	2
Emplacement pour les vélos	1	DEP – ingrédients des matériaux	2
Réduction de la surface de stationnement	1	Gestion des déchets de construction et de démolition	2
Véhicules à faible émissions et à haut rendement	1	6) Qualité des environnements intérieurs	
2) Sites écologiques		Performance minimale en matière de QAI	Pré requis
Prévention de la pollution durant la construction	Pré requis	Contrôle de la fumée de tabac ambiante	Pré requis
Evaluation des sites	1	Stratégie d'amélioration de la QAI	2
Aménagement des sites protégé et restaurer l'habitat	2	Matériaux à faibles émissions	3
Espaces ouverts	1	Plan de gestion de QAI pendant la construction	1
Gestion des eaux pluviales	3	Evaluation de la QAI	2
Réduction des îlots de chaleurs	2	Confort thermique	1
Réduction de la pollution lumineuse	1	Eclairage intérieur	2
3) Gestion efficace de l'eau		Lumière naturelle	3
Réduction de la consommation d'eau extérieure	Pré requis	Qualité des vues sur l'extérieur	1
Réduction de la consommation d'eau intérieure	Pré requis	Performance acoustique	1
Installation de compteurs d'eau au niveau du bâtiment	Pré requis	7) Innovation	
Réduction de la consommation d'eau extérieure	2	Innovation	5
Réduction de la consommation d'eau intérieure	6	LEED Accredited Professional	1
Tours de refroidissements utilisation de l'eau	2	8) Priorité régionale	
Installation de compteurs d'eau pour les sous systèmes	1	Priorité régionale	4
4) Energie et atmosphère			
Mise en service et vérification de base des systèmes énergétiques du bâtiment	Pré requis		
Performance énergétique minimale	Pré requis		
Comptage d'énergie électrique au niveau du bâtiment	Pré requis		
Gestion fondamentale des frigorigènes	Pré requis		
Mise en services améliorée	6		
Optimiser la performance énergétique	18		
Mesures d'énergie avancées	1		
Réaction de la demande aux prix de l'électricité	2		
Production d'énergie renouvelable	3		
Gestion améliorée des frigorigènes	1		
Énergie verte et les crédits compensatoires	2		

Tableau 17 Classification des critères du référentiel HQE

1. Relation du bâtiment avec son environnement immédiat	8. Confort hygrothermique
1.1. AMÉNAGEMENT DE LA PARCELLE POUR UN DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE	8.1. Dispositions architecturales visant à optimiser le confort hygrothermique, en hiver comme en été
1.2. Aménagement de la parcelle et prise en compte de la biodiversité	8.2. Création de conditions de confort hygrothermique en hiver (ccch)
1.3. Qualité d'ambiance des espaces extérieurs pour les usagers	8.3. Ccch d'été dans les locaux n'ayant pas recours à un système de refroidissement
1.4. Impacts du bâtiment sur les riverains	8.4. Ccch d'été dans les locaux ayant recours à un système de refroidissement
2. Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction	9. Confort acoustique
2.1. Choix constructifs pour la durabilité et l'adaptabilité de l'ouvrage	9.1. Optimisation des dispositions architecturales pour la qualité acoustique
2.2. Choix constructifs pour la facilité d'accès lors de l'entretien et la maintenance de l'ouvrage	9.2. Création d'une qualité d'ambiance acoustique adaptée aux différents locaux
2.3. Choix des produits de construction afin de limiter les impacts environnementaux de l'ouvrage	10. Confort visuel
2.4. Choix des produits de construction afin de limiter les impacts sanitaires	10.1. Optimisation de l'éclairage naturel
3. Chantier à faible impact environnemental	10.2. Optimisation de l'éclairage artificiel
3.1. Optimisation de la gestion des déchets de chantier	11. Confort olfactif
3.2. Limitation des nuisances et des pollutions sur le chantier	11.1. Garantir une ventilation efficace
3.3. Limitation des consommations de ressource sur le chantier	11.2. Maîtriser les sources d'odeurs désagréables
4. Gestion de l'énergie	12. Qualité sanitaire des espaces
4.1. Réduction de la demande énergétique par la conception architecturale	12.1. Limitation de l'exposition électromagnétique
4.2. Réduction de la consommation d'énergie primaire	12.2. Création des conditions d'hygiène spécifique
4.3. Réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère	13. Qualité sanitaire de l'air
4.4. Conception de l'installation frigorifique	13.1. Garantie d'une ventilation efficace
5. Gestion de l'eau	13.2. Maîtrise des sources de pollution de l'air intérieur
5.1. Réduction de la consommation d'eau potable	14. Qualité sanitaire de l'eau
5.2. Gestion des eaux pluviales à la parcelle	14.1. Qualité de conception du réseau intérieur
5.3. Gestion des eaux usées	14.2. Maîtrise de la température dans le réseau intérieur
6. Gestion des déchets d'activité	14.3. Maîtrise des traitements
6.1. Optimisation de la valorisation des déchets d'activité	14.4. Qualité de l'eau des espaces de baignade
6.2. Qualité du système de gestion des déchets d'activité	
7. Maintenance, pérennité des performances environnementales	
7.1. Conception de l'ouvrage pour un entretien et une maintenance simplifiés des systèmes	
7.2. Conception de l'ouvrage pour le suivi et le contrôle des consommations	
7.3. Conception de l'ouvrage pour le suivi et le contrôle des conditions de confort et maintenance simplifiée	

Annexe 2 Illustration des types de murs végétalisés [52]



Figure 11 Photo d'une façade verte directe



Figure 12 Photo d'une façade verte indirecte



Figure 13 Photo d'un mur vivant modulaire



Figure 14 Photo d'un mur vivant continu



Figure 15 Photo d'une façade verte continue

Annexe 3 Méthodologie de calcul atténuation de la pollution de l'air via une façade végétalisée [55]

L'élimination des particules de polluants atmosphériques à un endroit donné peut être exprimée comme suit:

$$Q = F * S * T$$

Où

Q (kg) est la quantité de polluants atmosphériques éliminés par les plantes en un temps donné ;

F est le flux d'élimination des polluants ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ s}$) ;

S est la surface totale de la couverture verte (m^2) ;

T est la durée d'exposition en secondes (s).

F est calculé comme suit :

$$F = -V_d * C$$

Où

V_d est la vitesse de dépôt (m/s) ;

C est la concentration de polluant ambiant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Annexe 4 Impact des infrastructures vertes sur les critères de performance des référentiels BREEAM, LEED et HQE

Tableau 18 Code couleur de l'annexe 4

Titre de la catégorie de critères
Critères impactés positivement par l'installation d'un type d'infrastructure verte
Critères non impactés par l'installation d'une infrastructure verte

Tableau 19 Classification des critères de performance du référentiel BREEAM selon l'impact des infrastructures vertes

1) Gestion		6) Matériaux	
Project concis et design	4	Impacts environnementaux des produits de construction – LCA bâtiment	7
Life cycle and service life planning	4	Impacts environnementaux des produits de - EPD	1
Pratique de constructions responsables	6	Sources responsables des matériaux	4
Commissioning and handover	4	Design pour une durabilité / résilience	1
Suivi	3	Efficacité des matériaux	1
2) Santé		7) Déchet	
Confort visuel	6	Gestion des déchets de construction	5
Qualité air intérieur	4	Utilisation d'agréats de source recyclée et durable	1
Confort thermique	3	Déchets opérationnels	1
Performances acoustiques	4	Finitions spéculatives	1
Sécurité	1	Adaptation au changement climatique	1
Sureté et santé aux alentours	2	Design pour un désassemblage / adaptation	2
3) Energie		8) Utilisation des sols et écologie	
Reduction de l'énergie et carbone utilisé	13	Sélection du site	2
Monitoring de l'énergie	2	Identification / compréhension des risques et opportunités pour le site	2
Lumière externe	1	Gestion des impacts négatifs sur l'écologie	3
Design carbone faible	3	Modification et amélioration de l'écologie	4
Efficacité énergétique du stockage de froid	2	Gestion/maintenance à long termes de l'écologie	2
Efficacité énergétique des systèmes de transport	3	9) Pollution	
Efficacité énergétique des systèmes de laboratoire	5	Impact des réfrigérants	3
Efficacité énergétique des équipements	2	Qualité air local	2
4) Transport		Gestion des inondations et de l'eau de surface	5
Evaluation du transport et plan de voyage	2	Réduction de la pollution lumineuse nocturne	1
Mesures durables de transport	10	Réduction de la pollution sonore	1
5) Gestion eau		10) Innovation	
Consommation d'eau	5	Innovation	1
Monitoring de l'eau	1		
Détection des fuites d'eau	2		
Efficacité des équipements d'eau	1		

Tableau 20 Classification des critères de performance du référentiel LEED selon l'impact des infrastructures vertes

1) Emplacement / transport		5) Matériaux et ressources	
Emplacement dans un aménagement de quartier	16	Collecte et entreposage des matériaux recyclables	Prérequis
Protection des habitations protégées	1	Planification de la gestion des déchets de construction et de démolition	Prérequis
Site priorisé	2	Réduction de l'impact du cycle de vie du bâtiment	5
Densité de l'environnement et diverses utilisations	5	Déclaration et optimisation des produits de construction (DEP)	2
Accès aux transports en commun de qualité	5	DEP - Approvisionnement de matière premières	2
Emplacement pour les vélos	1	DEP - ingrédients des matériaux	2
Réduction de la surface de stationnement	1	Gestion des déchets de construction et de démolition	2
Véhicules à faible émissions et à haut rendement	1	6) Qualité des environnements intérieurs	
2) Sites écologiques		Performance minimale en matière de QAI	Prérequis
Prévention de la pollution durant la construction	Prérequis	Contrôle de la fumée de tabac ambiante	Prérequis
Evaluation des sites	1	Stratégie d'amélioration de la QAI	2
Aménagement des sites protégés et restaurer l'habitat	2	Matériaux à faibles émissions	3
Espaces ouverts	1	Plan de gestion de QAI pendant la construction	1
Gestion des eaux pluviales	3	Evaluation de la QAI	2
Réduction des îlots de chaleur	2	Confort thermique	1
Réduction de la pollution lumineuse	1	Eclairage intérieur	2
3) Gestion efficace de l'eau		Lumière naturelle	3
Réduction de la consommation d'eau extérieure	Prérequis	Qualité des vues sur l'extérieur	1
Réduction de la consommation d'eau intérieure	Prérequis	Performance acoustique	1
Installation de compteurs d'eau au niveau du bâtiment	Prérequis	7) Innovation	
Réduction de la consommation d'eau extérieure	2	Innovation	5
Réduction de la consommation d'eau intérieure	6	LEED Accredited Professional	1
Tours de refroidissements utilisation de l'eau	2	8) Priorité régionale	
Installation de compteurs d'eau pour les sous-systèmes	1	Priorité régionale	4
4) Energie et atmosphère			
Mise en service et vérification de base des systèmes énergétiques du bâtiment	Prérequis		
Performance énergétique minimale	Prérequis		
Comptage d'énergie électrique au niveau du bâtiment	Prérequis		
Gestion fondamentale des frigorigènes	Prérequis		
Mise en service améliorée	6		
Optimiser la performance énergétique	18		
Mesures d'énergie avancées	1		
Réaction de la demande aux prix de l'électricité	2		
Production d'énergies renouvelables	3		
Gestion améliorée des frigorigènes	1		
Énergie verte et les crédits compensatoires	2		

Tableau 21 Classification des critères de performance du référentiel HQE selon l'impact des infrastructures vertes

1. Relation du bâtiment avec son environnement immédiat	8. Confort hygrothermique
1.1. Aménagement de la parcelle pour un développement urbain durable	8.1. Dispositions architecturales visant à optimiser le confort hygrothermique, en hiver comme en été
1.2. Aménagement de la parcelle et prise en compte de la biodiversité	8.2. Création de conditions de confort hygrothermique en hiver (ccch)
1.3. Qualité d'ambiance des espaces extérieurs pour les usagers	8.3. Ccch d'été dans les locaux n'ayant pas recours à un système de refroidissement
1.4. Impacts du bâtiment sur les riverains	8.4. Ccch d'été dans les locaux ayant recours à un système de refroidissement
2. Choix intègre des produits, systèmes et procédés de construction	9. Confort acoustique
2.1. Choix constructifs pour la durabilité et l'adaptabilité de l'ouvrage	9.1. Optimisation des dispositions architecturales pour la qualité acoustique
2.2. Choix constructifs pour la facilité d'accès lors de l'entretien et la maintenance de l'ouvrage	9.2. Création d'une qualité d'ambiance acoustique adaptée aux différents locaux
2.3. Choix des produits de construction afin de limiter les impacts environnementaux de l'ouvrage	10. Confort visuel
2.4. Choix des produits de construction afin de limiter les impacts sanitaires	10.1. Optimisation de l'éclairage naturel
3. Chantier à faible impact environnemental	10.2. Optimisation de l'éclairage artificiel
3.1. Optimisation de la gestion des déchets de chantier	11. Confort olfactif
3.2. Limitation des nuisances et des pollutions sur le chantier	11.1. Garantir une ventilation efficace
3.3. Limitation des consommations de ressources sur le chantier	11.2. Maîtriser les sources d'odeurs désagréables
4. Gestion de l'Energie	12. Qualité sanitaire des espaces
4.1. Réduction de la demande énergétique par la conception architecturale	12.1. Limitation de l'exposition électromagnétique
4.2. Réduction de la consommation d'énergie primaire	12.2. Création des conditions d'hygiène spécifique
4.3. Réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère	13. Qualité sanitaire de l'air
4.4. Conception de l'installation frigorifique	13.1. Garantie d'une ventilation efficace
5. Gestion de l'eau	13.2. Maîtrise des sources de pollution de l'air intérieur
5.1. Réduction de la consommation d'eau potable	14. Qualité sanitaire de l'eau
5.2. Gestion des eaux pluviales à la parcelle	14.1. Qualité de conception du réseau intérieur
5.3. Gestion des eaux usées	14.2. Maîtrise de la température dans le réseau intérieur
6. Gestion des déchets d'activité	14.3. Maîtrise des traitements
6.1. Optimisation de la valorisation des déchets d'activité	14.4. Qualité de l'eau des espaces de baignade
6.2. Qualité du système de gestion des déchets d'activité	
7. Maintenance, pérennité des performances environnementales	
7.1. Conception de l'ouvrage pour un entretien et une maintenance simplifiés des systèmes	
7.2. Conception de l'ouvrage pour le suivi et le contrôle des consommations	
7.3. Conception de l'ouvrage pour le suivi et le contrôle des conditions de confort et maintenance simplifiée	

Annexe 5 Code R permettant de développer l'outil d'évaluation des infrastructures vertes selon les quatre scénarios prédéfinis

```

1
2 setwd("D:\\ETUDES\\STAGE + MEMOIRE V2\\Outil décisionnel")
3
4
5 library(ggplot2)
6 table<- data.frame("impact_economique"=c(12,12,20,20), "scoreenvironnemental"=c(85,40,85,40),
7
8                     row.names=c("Scenario 1", "Scenario 2","Scenario 3","Scenario 4"))
9
10 obj1 = 70
11 obj2 = 15
12
13
14 g<-ggplot(data=table, aes(x=scoreenvironnemental, y=impact_economique))+
15   geom_rect(mapping=aes(xmin=obj1, xmax=100, ymin=0, ymax=obj2), alpha=0.25, fill= "#82c369") +
16
17   geom_point(aes(shape=rownames(table)), size = 3) +
18
19   theme(axis.title.x = element_text( colour = "#323C5F", size=18, face = "bold"),
20         axis.title.y = element_text( colour = "#323C5F", size=18, face = "bold"),
21         plot.title = element_text( colour = "#323C5F", size=20, face = "bold",hjust=0.5),
22         axis.text = element_text(size = 16,face = "bold", colour = "#505A96"),
23         legend.title = element_text(face = "bold"))+
24
25   theme(plot.margin=unit(c(1.1,1.1,1.1,1.1),"cm"))+
26
27   theme(legend.position="right")+
28
29   ylab("Impact économique (Années)") + xlab("Impact environnemental (%)")+
30   ggtitle("Evaluation de l'impact environnemental \net économique d'une infrastructure verte")+
31   geom_segment(aes(x = 0 , y = obj2, xend = 100,yend = obj2), color = "red", size = 0.5)+
32   geom_segment(aes(x = obj1, y = 0, xend = obj1,yend = 25), color = "red", size = 0.5)+
33   xlim(0, 100) + ylim(0, 25)+
34   scale_shape_discrete("Scénarios")
35
36 g
37

```