



HAL
open science

Modélisation des impacts environnementaux et énergétiques des toitures dans le cadre du projet de recherche Proof (Photovoltaic and green roofs)

Diana Decilap

► **To cite this version:**

Diana Decilap. Modélisation des impacts environnementaux et énergétiques des toitures dans le cadre du projet de recherche Proof (Photovoltaic and green roofs). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04525024

HAL Id: dumas-04525024

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04525024>

Submitted on 28 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2022-2023

Voie d'approfondissement :
Bâtiment

Soutenu le lundi 04 septembre 2023

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Dominique Dumortier
- Maître de TFE : Marie Frapin (Julien Bouyer excusé)
- Experte : Flavia Barone

Par

Diana DECILAP

Étudiante fonctionnaire

Modélisation des impacts environnementaux et énergétiques des toitures dans le cadre du projet de recherche Proof (*Photovoltaic and Green roofs*)



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	DECILAP		
Prénom	DIANA		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	CEREMA à Nancy et Efficacity à Champs-sur-Marne		
Nom des Tuteurs	Julien BOUYER (CEREMA) & Marie FRAPIN (Efficacity)		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Modélisation des impacts environnementaux et énergétiques des toitures dans le cadre du projet de recherche Proof (<i>Photovoltaic and Green roofs</i>)		
Titre (anglais)	Modelling the environmental and energetical impacts of roofs, as part of the research program Proof "Photovoltaic and Green roofs"		
Résumé (français)	<p>Le recours aux énergies renouvelables et aux produits de construction décarbonés doit être massifié afin que le secteur du Bâtiment remplisse ses objectifs dans la Stratégie Nationale Bas Carbone 2030. Les toitures biosolaires combinent l'énergie renouvelable qu'est le photovoltaïque, et la végétalisation, qui réalise de nombreuses fonctions dont celles de stockage et de séquestration carbone. Cette étude se propose de mettre au point et d'étudier la modélisation des toitures à l'échelle du bâtiment et du quartier dans un outil d'analyse de cycle de vie des impacts environnementaux. Ce travail se fera sur la base d'un état de l'art scientifique approfondi et des travaux de recherche Proof. Il s'agira de discuter le positionnement des toitures végétalisées et biosolaires vis-à-vis des toitures conventionnelles, en termes d'énergie produite, de biodiversité de bilan carbone et à la lumière des potentielles futures exigences réglementaires en la matière.</p>		
Résumé (anglais)	<p>The use of renewable energies and low-carbon construction products must be massively increased if the building sector is to meet its decarbonization targets. Biosolar roofs combine photovoltaic renewable energy with green, which performs a number of functions, including carbon storage and sequestration. The aim of this study is to develop and to study the modelling of roofs at building and district scales, using a life-cycle impact assessment tool. This work will be based on an in-depth scientific state of the art and on the Proof research program. It deals with discussing the positioning of green and biosolar roofs in relation to conventional roofs, in terms of energy produced, biodiversity and carbon footprint, and in the light of potential future regulatory requirements in this area.</p>		
Mots-clés (français)	photovoltaïque, toiture biosolaire, toiture végétalisée extensive (TVE), stockage carbone, Coefficient de Biotope de Surface, ACV		
Mots-clés (anglais)	Photovoltaics, biosolar roof, extensive green roofs (EGRs), carbon storage, Biotope Area Factor (ratio), LCA		
Termes géographiques	France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. bibliographiques
	128	8 (21 pages)	35

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. À ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le réseau d'offres de stages de l'ENTPE qui m'a permis d'avoir connaissance de cette offre de stage. À l'ENTPE, je remercie le personnel de la Direction de la Formation Initiale, mon responsable de voie d'approfondissement Richard CANTIN, mon tuteur pédagogique Dominique DUMORTIER, pour l'encadrement administratif et pédagogique et Flavia BARONE intervenante de la formation sur l'unité d'enseignement Bâtiment Durable et experte du jury.

Je remercie ensuite Julien BOUYER et Rémy CLAVERIE, Chargés de recherche de la structure CEREMA DTerEst, Agence de Nancy et Marie FRAPIN, *Product Owner*, Morgane COLOMBERT, Directrice de projets de la structure Efficacy.

Je remercie également tous les interlocuteurs qui ont contribué à mon avancement de près ou de loin durant cette mission : l'équipe de chercheurs du projet de recherche PHOTOVOLTAÏC AND GREEN ROOFS (PROOF) : Julien BOUYER et Rémy CLAVERIE précités, Estelle PICHENOT, Chargée d'études nature en ville (CEREMA), Geoffroy SÉRÉ (LESE) et Gilles PARENT, Professeurs des Universités, Luis Antonio GARCIA GUTTIEREZ, post-doctorant et Thomas VILLEMIN, doctorant (université de Lorraine) ; Nicoleta SCHIOPU, Aline BRACHET, Laurent REYNIER, Kamel ZIBOUCHE, Adélaïde AUBLET, Emilien PARON, Enora GARREAU et Maëva SABRE (CSTB). L'équipe au sein d'Efficacy : Marie FRAPIN et Morgane COLOMBERT précitées, Mahaut VAUCHEZ, Giovanna TOGO, Yannick DUPUIS, Bryan GATAY, Adrien MONPEYSEN et Luc BARROVECCHIO (prestataire externe).

J'ai aussi pu croiser et côtoyer différentes personnes durant cette mission au sein des deux structures principales, mais aussi lors d'un séminaire et de la soutenance de thèse de Thomas VILLEMIN le 7 juin dernier. Je souhaite les remercier pour la qualité de nos échanges : Ewen MONNIER, Lou BLANCHARD, Sophie CARO LEDARD, Gersende MENONVILLE, Axelle ROBERT, Luc NGUYEN, Chunxiao WANG, Isabelle DENNIEAU, Sarah NABYL CAILLOU, Kian SHAHMAEL et encore tant d'autres.

Je commence en octobre prochain une thèse sur le sujet suivant : « TRANSFERT DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES AUX INTERFACES DU BÂTIMENT : IMPACT SANITAIRE ET STRATÉGIES D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR ». Pour m'avoir fait confiance et laissé choisir cette courte aventure de travail de fin d'études avant la grande aventure de la thèse, je souhaite remercier Benjamin GOLLY, Jean-Luc BESOMBES et Gaëlle GUYOT (CEREMA DTer Centre Est). Ces cinq mois m'ont permis de développer des compétences d'élaboration d'un état de l'art et de modélisation avec des outils tels que python.

Enfin, je remercie les personnes qui m'ont hébergée en Ile-de-France, ainsi que tout mon entourage pour son soutien : Yvrine, Daniel, Vicky, Arnaud, Elyana, Naomy et Geoffrey.

Sommaire

Table des illustrations.....	9
Table des tableaux.....	11
Introduction	13
1 Mise en contexte.....	15
1.1 Les enjeux d'une énergie renouvelable produite localement et de la végétalisation urbaine	15
1.2 Premières définitions	18
1.3 Problématique de l'étude	27
1.4 Axes d'orientation de l'étude	28
1.5 Les modalités de toiture pour l'étude.....	29
1.6 Outil de référence pour l'étude.....	29
2 État de l'art scientifique et technique.....	31
2.1 La toiture et la thermique du bâtiment	31
2.2 Le photovoltaïque.....	34
2.3 La végétalisation des toitures	39
2.4 Les toitures végétalisées et photovoltaïques (biosolaires).....	63
3 Axe d'étude n° 1 : Toiture, production photovoltaïque.....	69
3.1 Méthodologie	69
3.2 Modélisation	70
4 Axe d'étude n°2 : Toiture, enjeu de biodiversité	81
4.1 Méthodologie	81
4.2 Modélisation	84
5 Analyse des cas d'étude et discussion.....	85
5.1 Scénarios et cas d'étude	85
5.2 Résultats sur les cas d'étude à l'échelle quartier	89
5.3 Discussion.....	96
Conclusion.....	99
6 Annexes	101
6.1 Végétalisation, biodiversité, quelques lieux et opérations	103
6.2 Présentation de la méthode Quartier Energie Carbone (QEC)	105
6.3 RE2020, labels et certifications environnementaux.....	111
6.4 Approche carbone des toitures végétalisées, complément	113
6.5 Toitures végétalisées, photographies personnelles	115
6.6 Bibliographie.....	117
6.7 Sitographie	120
6.8 Glossaire	123

Table des illustrations

Figure 1 : Le changement climatique, le problème, les impacts et les solutions énoncés par le 6 ^{ème} rapport du GIEC	15
Figure 2 : RE2020, phases du cycle de vie du bâtiment (module D manquant ici : Bénéfices et charges au-delà des frontières du système) et liste des lots de construction considérés	22
Figure 3 : RE2020 méthode d'ACV dynamique, courbe des coefficients de relargage des gaz à effet de serre sur 50 ans	22
Figure 4 : Représentation des flux de chaleur au niveau de la toiture végétalisée (CATALANO AND BAUMANN, 2017, figure 2)	24
Figure 5 : Différentes surfaces de sol et les coefficients de biotope par surface (CBS) associés	26
Figure 6 : Capacité de composants disponibles en toiture végétalisée à constituer des structures à biotope pour la faune et flore	27
Figure 7 : Illustration de deux composants à disposer en toiture pour constituer des structures à biotopes (tas de branches et souches), Suisse.	27
Figure 8 : Les modalités de toiture dans le projet de recherche Proof	29
Figure 9 : L'albédo de l'environnement urbain Source: U.S. Environmental Protection Agency	32
Figure 10 : RE2020, Notion de Facteur de transmission solaire	34
Figure 11 : Energie photovoltaïque, notion d'autoconsommation (Forum photovoltaïque).....	35
Figure 12 : Photovoltaïque, Technologies à cellules cristallines, à cellules à couches minces	36
Figure 13 : Hauteur minimale d'un équipement solaire rapporté à l'étanchéité d'une sur étanchéité de toiture (Recommandations professionnelles de la CFSE, 2011)	37
Figure 14 : Modules photovoltaïques à cellules en silicium cristallin, base INIES au 18/04/2023	37
Figure 15 : Modules photovoltaïques à couches minces, base INIES au 18/04/2023	38
Figure 16 : Facteur de correction du gisement solaire pour la latitude de Lyon, selon le Bureau d'études Soléis.....	39
Figure 17 : Évolution des températures toiture/air/dos du panneau PV/station météo (ALSHAYEB ET AL., 2016).....	40
Figure 18 : Couches composant une toiture végétalisée (Règles Professionnelles TTV 2018).....	43
Figure 19 : Toitures végétalisées, exemples de plantes (Ecovegetal, Atec n° 5.2/19-2655_V2)	46
Figure 20 : Toiture composée de graminées (Suisse)	46
Figure 21 : Toiture composée de <i>Sedum</i> et de mousse (France)	46
Figure 22 : Capture d'écran des titulaires et du nombre de produits sous FDES sous la classe "Éléments de toiture végétalisée" (rubrique couverture/étanchéité) ; base INIES au 14/04/2023	52
Figure 23 : Impacts <i>ex-situ</i> en termes de biodiversité des systèmes de toiture végétalisée par rapport à la toiture conventionnelle (Brachet et al., 2019, figure 3)	58
Figure 24 : Plateforme expérimentale de toiture biosolaire et toiture conventionnelle, les capteurs de températures (Alshayeb Ali et al., 2016).....	67
Figure 25 : Température moyenne en face arrière de panneau photovoltaïque en fonction du revêtement de toiture entre le 1 ^{er} juin et le 23 décembre 2022 (projet Proof, Villemin Thomas, 2023)	68
Figure 26 : Méthodologie axe n°1, simulation des différentes modalités de toiture pour un bâtiment muni d'une installation photovoltaïque	69
Figure 27 : Moteur de calcul thermique DIMOSIM, structuration des objets.....	72
Figure 28 : Méthode QEC, étapes dans le calcul de la puissance électrique produite par une installation photovoltaïque en toiture	72
Figure 29 : Méthodologie axe n°1, besoins et production d'énergie, première allure des grandeurs pour un bâtiment	74
Figure 30 : Méthodologie axe n°1, besoins et production d'énergie, 2 ^{ème} allure des grandeurs pour un bâtiment	74
Figure 31 : Modélisation avancée axe n°1, schéma de principe.....	76
Figure 32 : Modélisation avancée – profil thermique horaire appliqué sur zone climatique H1a (RE2020, 1 année).....	76
Figure 33 : Modélisation avancée – températures de module comparées aux résultats UrbanPrint	77
Figure 34 : Modélisation avancée – profils thermiques conçus pour les 4 modalités de toiture	78
Figure 35 : Modélisation avancée de l'interaction revêtement de toiture/panneau PV - répartition des données de températures dos PV par classe de température d'air (données expérimentales projet Proof, Villemin T., 2023)	79
Figure 36 : Méthodologie axe n°2, Nomenclature CBSH	83
Figure 37 : Méthodologie axe n°2, représentation d'un quartier avec la typologie de sol de ses bâtiments et espaces extérieurs	84

Figure 38 : Cas d'étude, répartition des usages de bâtiment	85
Figure 39 : Cas d'étude axe n°1, Proportion de surface de toiture dédiée au PV pour chaque scénario d'étude	90
Figure 40 : Cas d'étude A axe n° 1, résultats de production d'énergie des bâtiments, dans le scénario 3.....	91
Figure 41 : Cas d'étude axe n°1, résultats d'indicateurs énergie à l'échelle du quartier dans le scénario 1	92
Figure 42 : Cas d'étude A [variante] axe n°1, comparatif des productions d'énergie PV sur les 4 scénarios pour les modalités Cool Roof et végétalisée.....	94
Figure 43 : Cas d'étude axe n°2, le CBSH au périmètre des espaces extérieurs seuls	95
Figure 44 : Le jardin botanique (Strasbourg), Le jardin des retrouvailles (Lille).....	103
Figure 45 : « <i>Toits vivants</i> », Jardin potager sur un toit de Paris (Espace Jean Dame (Paris 2 ^{ème}).....	103
Figure 46 : Opérations labellisées Biodivercity. Issy Cœur de Ville (92, vue aérienne), Les Fabriques (13, vue en perspectives)	104
Figure 47 : RE2020; carte des zones climatiques.....	111
Figure 48 : Les certifications HQE pour le bâtiment, cas du neuf (Certivea)	112
Figure 49 : Méthode QEC, logiciel UrbanPrint et le calcul de l'empreinte carbone Usager	112
Figure 50 : Toitures végétalisées, synthèse de l'approche carbone menée en parallèle de l'étude énergie PV/biodiversité (substrat de 4 cm puis de 10 cm).....	114
Figure 51 : Une toiture végétalisée non irriguée (77), photographies personnelles prises à différentes dates entre avril et août 2023	115

Table des tableaux

Tableau 1.2-1 : Les toitures, différents systèmes constructifs en fonction des types d'élément porteur et d'isolation (illustrations Iko).....	19
Tableau 2.1-1 : Albédo, classement du rayonnement de longue longueur d'onde en fonction du revêtement de toiture, selon Coutts et al. (2013).....	33
Tableau 2.2-1 : Technologie de panneau PV à 60 cellules monocristallines, quelques indicateurs de réchauffement climatique (6 éco-passeports PEP sous base INIES).....	38
Tableau 2.2-2 : Cellules photovoltaïques, les deux approches des conditions de fonctionnement dans la littérature	39
Tableau 2.2-3 : Modélisation du photovoltaïque, équations et formules	41
Tableau 2.3-1 : Toitures végétalisées, les guides et normes pour quelques pays	44
Tableau 2.3-2 : Toitures végétalisées, projet réglementaire d'exigences minimales sur le substrat, les végétaux et la rétention en eau.....	45
Tableau 2.3-3 : Approche multicritère de sélection des plantes pour la végétalisation extensive de toiture (Lamnatou et al., 2015, tables 3, 4,5 et 6).....	49
Tableau 2.3-4 : Caractéristiques de solutions pour toitures végétalisées sous FDES dans un échantillon du marché français ...	54
Tableau 2.3-5 : Listes des espèces des données environnementales collectives, Aline Brachet, base FloraDE (thèse, 2020, Annexe 8).....	57
Tableau 2.3-6 : Quelques caractéristiques physiques d'un substrat sec ou saturé en humidité (Sailor D. J., 2008)	60
Tableau 2.3-7 : Méthode RE2020 Règles Th-Bat, Détermination du facteur solaire des parois opaques en conditions d'hiver et en conditions d'été	61
Tableau 2.4-1 : Toitures biosolaires, identification d'acteurs durant l'étude (2023)	64
Tableau 2.4-2 : État de l'art de travaux scientifiques datant de 2007 à 2014 portant sur les toitures biosolaires (Lamnatou et al. 2015, Table1).....	66
Tableau 2.4-3 : État de l'art de travaux scientifiques datant de 2007 à 2022 portant sur les toitures biosolaires (Fleck et al. 2022, Table2)	67
Tableau 3.2-1 : Modélisation, coefficients d'absorption et albédos considérés pour les modalités de toiture à l'étude.....	73
Tableau 3.2-2 : Modélisation avancée de l'interaction revêtement de toiture/panneau PV, plateforme expérimentale Proof, quantités et périodes des données considérées.....	78
Tableau 4.1-1 : Méthodologie axe n°2, les typologies exhaustives de sol.....	81
Tableau 4.1-2 : Méthodologie axe n°2, les scénarios de CBSH pour les typologies de sol utiles.....	82
Tableau 5.1-1 : Cas d'étude axe n°1, caractéristiques principales	86
Tableau 5.1-2 : Cas d'étude axe n°1, description des 4 scénarios	88
Tableau 5.1-3 : Cas d'étude axe n°1, stratégie de végétalisation des bâtiments en application des scénarios	88
Tableau 5.1-4 : Cas d'étude axe n°2, surfaces et typologies de sol pour le calcul du CBSH.....	89
Tableau 5.2-1 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de production photovoltaïque sur toiture végétalisée par rapport à une toiture Cool Roof.....	91
Tableau 5.2-2 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de production photovoltaïque annuelle moyenne en fonction de trois modalités de toiture et écart à la modalité de référence	91
Tableau 5.2-3 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de l'indicateur d'autoconsommation de l'énergie photovoltaïque à l'échelle du quartier	92
Tableau 5.2-4 : Cas d'étude axe n°1, détails de l'application de la stratégie de végétalisation/installation PV	93
Tableau 5.2-5 : Cas d'étude axe n°2, résultat intermédiaire de CBSH au périmètre des bâtiments.....	95
Tableau 5.3-1 : Cas d'étude axe n°2, résultats des CBSH avec les scénarios croisés Bâtiment (4)/Espaces extérieurs (3).....	97
Tableau 5.3-2 : Cas d'étude A, discussion sur l'investissement économique des toitures biosolaires	98
Tableau 6.2-1: UrbanPrint, niveaux d'exigence de la performance énergétique d'un bâtiment (méthode QEC, § 3.5.1.1, p.80)	105
Tableau 6.2-2 : Méthode QEC, caractéristiques principales du panneau photovoltaïque implémenté	105
Tableau 6.2-3 : Méthode QEC, pourcentage de toiture considéré par défaut pour le PV en fonction du type de bâtiment et de l'objectif de performance énergétique	106
Tableau 6.2-4 : Méthode QEC, rendement moyen annuel des systèmes de chaud.....	106
Tableau 6.2-5 : Méthode QEC, rendement moyen annuel des systèmes de froid	106
Tableau 6.2-6 : Méthode QEC, synthèse sur les deux approches de calcul de l'impact carbone d'un produit de construction (ou d'un équipement).....	107

Introduction

La végétalisation qui s'invite désormais sur les façades et les toitures du bâtiment, est au centre de nombreux travaux scientifiques depuis plusieurs décennies, sur des thématiques telles que : la réduction du phénomène d'îlot de chaleur, les économies d'énergie et la gestion des eaux pluvieuses et orageuses.

En termes de capacité à absorber le dioxyde carbone, les océans sont en première position, suivis par les sols et enfin les forêts (et autres végétaux) ¹. Ce sont nos puits de carbone naturels.

Selon l'association CITEPA et le Ministère de la Transition Écologique : en France, 546 MtCO_{2eq} étaient émises en 1990, et en 2017 le secteur du Bâtiment représentait 19% des émissions. Au-delà de la compensation carbone des puits naturels de carbone (8% en 2017), et en vue d'une neutralité carbone à l'horizon 2050 (80 Mt d'émissions), le gouvernement compte parmi ses objectifs celui de réduire de 40% les émissions nationales à l'horizon 2030 par rapport à 1990. Dans les moyens envisagés pour atteindre la décarbonation complète du secteur du Bâtiment, le gouvernement vise le recours aux énergies décarbonées, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la promotion des produits de construction et des équipements à plus faible empreinte carbone ².

Dans l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets aménagés, l'analyse du cycle de vie selon notamment la série des normes NF EN ISO 14040 (amendement A1 2020), la NF EN 15804 (amendement A2 2022), la NF C08-100-1 (2022), couvre les produits de construction et les produits électriques, électroniques et de génie climatique. Nous le verrons en détails dans ce qui suit, les éléments pour toiture végétalisée sont recensés dans la base des analyses du cycle de vie INIES, depuis 2018 ³. D'autre part, la littérature scientifique désigne de plus en plus par l'expression SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES les nombreux avantages rendus par cet élément constructif. En termes de performance environnementale, l'on observe ainsi une évolution des indicateurs dans la certification des conceptions. La réglementation thermique et environnementale RE2020 intègre par exemple désormais l'ANALYSE EN CYCLE DE VIE des matériaux et des équipements, en prenant la base INIES pour référence. De plus, comme nous le verrons dans l'état de l'art, des indicateurs de biodiversité émergent, tels que le coefficient de biotope par surface (CBS), que l'on retrouve dans certains PLU(i), ou l'indicateur BiodiverCity, sans pour autant intégrer encore fortement la réglementation de la construction des bâtiments ⁴.

En hybridation du concept de toiture solaire et de toiture végétale, celui de TOITURES BIOSOLAIRES émerge depuis plusieurs années et repose sur le fait que la baisse de température offerte par l'évapotranspiration des végétaux contribuerait à l'amélioration des performances de production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques. La SOUS-SECTION 2.4 CI-DESSOUS permettra de préciser les conditions du gain de production sur la base d'une revue de travaux scientifiques.

La présente étude traite de la modélisation des toitures et s'intéresse à analyser la valorisation possible des bénéfices de la végétalisation en termes de :

¹ « *Sols, terres et changements climatiques* », Agence européenne pour l'environnement, publié le 12 novembre 2019 avec dernière modification en date du 21 mars 2023 [en ligne] <https://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2019/articles/sols-terres-et-changements-climatiques> , consulté le 21 juillet 2023

² « *Stratégie nationale bas carbone résumée en 4 pages* », Ministère de la Transition écologique, 2020 [en ligne] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/19092_strategie-carbone-FR_oct-20.pdf

³ 2018 pour les déclarations environnementales par défaut du Ministère de la Transition Écologique et respectivement 2020 et 2022 pour les fabricants SOPREMA et ECOVEGETAL [en ligne] www.inies.fr.

⁴ L'on peut aussi rappeler que la garantie décennale qui est obligatoire pour le bâtiment, pour l'étanchéité, ne l'est pas encore pour les toitures végétalisées. Cependant il existe une garantie simple de ces dernières. (PEIGER P. ET BAUMANN N., 2018 ; PAGE 7, PP. 219-220 ET P. 258).

- AXE D'ÉTUDE N°1, amélioration de la productivité des installations photovoltaïques ;
- AXE D'ÉTUDE N°2, restauration de la nature en ville et lutte contre la perte de biodiversité.

La première section du présent mémoire permettra de poser les enjeux du sujet, d'introduire quelques définitions associées et d'annoncer la problématique à traiter. La deuxième section sera consacrée à un état de l'art sur le photovoltaïque, les toitures végétalisées et les toitures biosolaires. Ensuite, les troisième et quatrième sections du document seront chacune dédiées à l'un des deux axes d'étude ci-dessus en termes de méthodologie et de modélisation d'étude. La cinquième section traitera de l'application des modélisations sur des cas d'étude et permettra d'en analyser les résultats. La conclusion permettra enfin de discuter globalement des résultats, dans un contexte plus large, en présentant les limites et perspectives du travail effectué.

1 Mise en contexte

1.1 Les enjeux d'une énergie renouvelable produite localement et de la végétalisation urbaine

Le sixième rapport du GIEC est paru le 23 mars dernier. Dans tous ses scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, ce panel d'experts sur le changement climatique indique que dans moins de dix ans, la planète connaîtra une élévation de 1,5 °C par rapport à la période pré-industrielle ⁵.

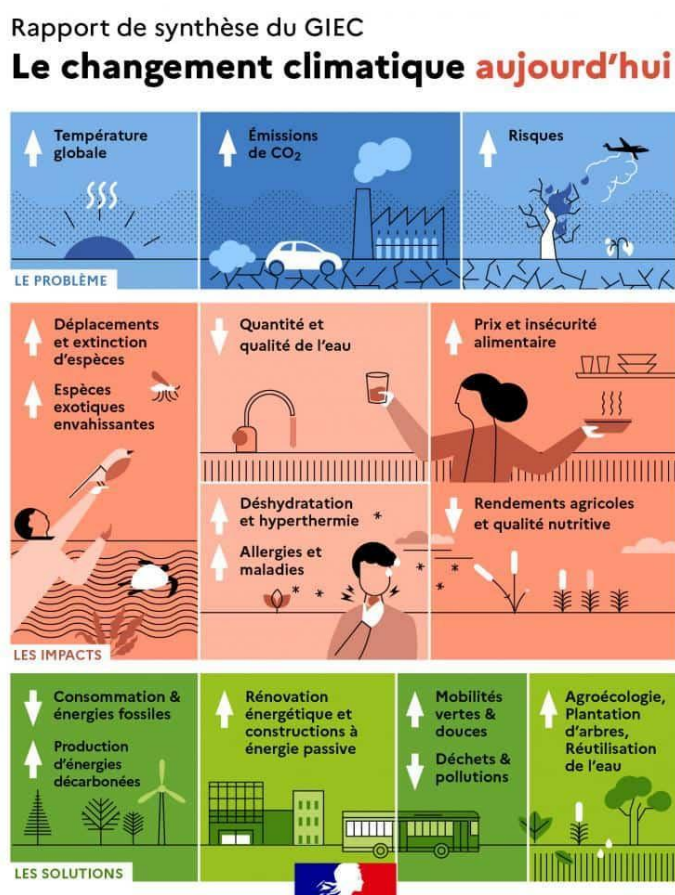


Figure 1 : Le changement climatique, le problème, les impacts et les solutions énoncés par le 6^{ème} rapport du GIEC

Selon le suivi de la Stratégie Nationale Bas Carbone ⁶ :

- POUR LA PREMIÈRE PÉRIODE 2015-2018, la diminution annuelle moyenne des émissions était de 1,1% contre un objectif de 1,9% par an. Le secteur du Bâtiment dépasse ses objectifs de 11% (soit 34 MtCO_{2eq}) ;

⁵ Publication du 6^{ème} rapport du GIEC [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec> [consulté le 01^{er} juillet 2023]

⁶ « Suivi de la Stratégie Nationale Bas-Carbone », Ministère de la Transition Écologique [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone> , consulté le 1^{er} juillet 2023.

- POUR LA DEUXIÈME PÉRIODE en cours (2019-2023) : les émissions de la France se réduisent de 1,3% par an en moyenne entre 2019 et 2021 ⁷.

Il reste donc encore des leviers à employer, secteur du Bâtiment compris. Et comme l'illustre l'infographie dans la FIGURE 1 CI-DESSUS, la végétalisation et la production d'énergie décarbonée font partie des solutions à mobiliser pour lutter contre le réchauffement climatique. Un réchauffement qui induit des impacts tels que le déplacement et l'extinction d'espèces. Une perte qui est très en lien avec celle d'espaces naturels.

En France, après de longues décennies d'imperméabilisation dans et autour des villes, les surfaces artificialisées (bâtiments et infrastructures), représentent 5,7% du territoire métropolitain selon les données LUCAS 2018 sur Eurostat ⁸. L'observatoire de la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers (espaces dits ENAF), estime que 254 718 hectares ont été consommés en France sur la période 2010-2020, dont 67,4% pour l'habitat, et 25, pour les activités ⁹. En 2022, WEN LIU ET AL. rappellent que les très grandes villes comptent entre 40 et 50% de surfaces imperméabilisées (STOVIN ET AL., 2012) ¹⁰.

Cependant, comme illustré en ANNEXE 6.1, PAGE 103, l'on observe différentes initiatives et formes de retour de la nature en ville autour du début du XXI^{ème} siècle :

- Des premiers jardins partagés font leur apparition à Paris et dans des villes du nord ;
- Sur un plan de politique territoriale des dispositifs émergent, tels que le label « *Nature en ville* » et la plantation en pied d'arbres est soutenue, notamment au travers des actions de démocratie participative ;
- Pour ne citer qu'elle, la ville de Paris a une politique assez forte avec le lancement d'appels à projets comme « *Végétalisations innovantes* » en 2013 ¹¹ et Parisculteurs en 2016 ¹². Leur objectif est de promouvoir la reconquête des toits, murs et espaces interstitiels dans le premier cas, et l'intégration de l'agriculture sur les toits et façades urbains dans le deuxième. Le jardin potager illustré à l'ANNEXE 6.1, PAGE 103, est lauréat de tels appels à projets ;
- Sur un plan de politique nationale, le premier plan Biodiversité est lancé en 2018, et le label d'Etat Écoquartier en 2019.

En 2023, Paris ne faiblit pas sur son ambition en faveur de la végétalisation et de la biodiversité et fait de son PLU un outil de planification prévoyant l'ajout de 300 hectares d'espaces verts. La ville compte

⁷ « Indicateurs complets de suivi de la SNBC 2 – édition printemps 2023 (pdf – 4.81 Mo) », Ministère de la Transition écologique [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone>, consulté le 1er juillet 2023 (indicateur E-C IR2)

⁸ « *Land cover statistics* » [en ligne] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Land_cover_statistics#Land_cover_in_the_EU_Member_States, consulté le 26 juillet 2023. LUCAS : Land Use and Cover Area frame Survey

⁹ « Tableau de bord de la consommations des espaces NAF 2009-2020 » [en ligne] <https://kartes.cerema.fr/portal/apps/opsdashboard/index.html#/3feb8bd2b14d449eb03bb3f7fee9d849>, consulté le 30 juin 2023.

« *Artificialisation des sols* », Ministère de la Transition écologique, [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>, consulté le 30 juin 2023.

¹⁰ Liu, Wen, et al. « Identifying City-Scale Potential and Priority Areas for Retrofitting Green Roofs and Assessing Their Runoff Reduction Effectiveness in Urban Functional Zones ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 332, 2022, p. 130064, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130064>.

¹¹ Bled, Jacques-Olivier. « *L'appel à projets « végétalisations innovantes » à Paris* ». *Pour*, vol. 224, no 4, 2014, p. 371, <https://doi.org/10.3917/pour.224.0371>.

¹² « *Parisculteurs 1: Découvrez les lauréats retenus pour végétaliser et cultiver 5,5 hectares de la capitale* », Communiqué de presse de la Ville de Paris, 3 novembre 2016 [en ligne] https://www.parisculteurs.paris/data/actualites_93873/categorie/17/cp_decouvrez_les_laureats_parisculteurs_52fc0bd896.pdf, consulté le 07 juin 2023.

atteindre cet objectif par trois moyens : la création par la transformation de friches, la DÉSIMPERMÉABILISATION de l'espace public et la préservation des cours intérieures d'immeuble et autres cœurs d'îlot¹³. Ainsi, par exemple, dans le cadre d'une rénovation, la délivrance d'un permis de construire sera conditionné par une DÉSIMPERMÉABILISATION au profit de la plantation d'espaces verts.

En termes de décarbonation des énergies, dans la RE2020, l'indicateur de besoins bioclimatiques (Bbio)¹⁴ et l'indicateur des consommations d'énergie primaire sur 5 usages (CEP) sont conservés¹⁵, et se voient renforcés par un coefficient des consommations d'énergie primaire non renouvelable (CEP,NR). Par ce CEP,NR venant donc distinguer la part d'énergie primaire renouvelable et la part non renouvelable, l'ambition de la RE2020 est bien d'atteindre une diminution du recours aux énergies fossiles et une augmentation de l'apport d'énergies renouvelables dans les bâtiments tout en contrôlant le niveau de consommation global (sobriété énergétique).

En ligne avec ces nouvelles tendances politiques, l'on peut retenir un certain nombre de mesures nationales en préparation :

Les actions de végétalisation, si elles ne sont pas demandées par des exigences réglementaires au niveau du bâtiment, le seront à court terme au périmètre des collectivités territoriales, dans le cadre de la mise en application de la loi n° 2021-1104¹⁶. S'agissant de la nomenclature Zéro Artificialisation Nette (ZAN), applicable à compter de 2031 pour évaluer et suivre l'artificialisation des sols, elle dessert clairement une DIMENSION SUPRATERRITORIALE, avec des seuils de surface fixés à 2 500 m² d'emprise pour les catégories de surface ne relevant pas du bâti et de ses installations annexes¹⁷. En effet, c'est ce que présente en substance le projet de décret de la politique ZAN, en consultation publique à l'été 2023 :

« Cette nomenclature n'a pas non plus vocation à s'appliquer au niveau d'un projet, pour lequel l'artificialisation induite est appréciée directement au regard de l'altération durable des fonctions écologiques ainsi que du potentiel agronomique du sol ».

Cependant, cette nomenclature permettra de considérer comme non artificialisées :

« Les surfaces végétalisées à usage de parc ou jardin public, quel que soit le type de couvert (boisé ou herbacé) »¹⁸.

¹³ "50 °C dystopie in Paris", article, Journal Libération, p. 4, n° 13010, parution du 22-23/04/2023 - consulté le 28 avril 2023.

¹⁴ Dans la RE2020, le B_{bio} quantifie les besoins de chauffage, de refroidissement (avec ou sans climatisation) et d'éclairage.

¹⁵ Les cinq usages énergétiques considérés dans la RE2020 sont : l'éclairage, le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire et les auxiliaires (pompes, ventilateurs).

¹⁶ Loi 2021-1104 : loi dite « résilience et climat », loi du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, consulté le 01^{er} juillet 2023 (voir SITOGRAPHIE, PAGE 120).

¹⁷ Voir consultation publique en lien avec l'artificialisation des sols dans la SITOGRAPHIE, PAGE 120.

¹⁸ Consultation publique sur le projet de décret relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols [en ligne] https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/trel2307502d_pid-nomenclature-rapport-local-zan.pdf , consulté le 30 juin 2023.

L'on comprend alors aisément que toute mesure de végétalisation dans la ville, contribuera à un effort d'ensemble et à l'appréciation, *in fine*, du solde d'artificialisation nette des sols. Tous les trois ans, ce flux fera l'objet d'un suivi au niveau territorial compétent sur les documents d'urbanisme (commune ou intercommunalité) ¹⁹. Ce projet de décret prévoit également d'inclure dans cette catégorie des surfaces artificialisées et sous certaines conditions, les espaces végétalisés sur lesquels sont implantés des MODULES PHOTOVOLTAÏQUES.

L'article L171-4 du Code de la Construction et de l'Habitation et son projet de décret et d'arrêtés d'application, qui vise une part obligatoire progressive d'installation en énergie renouvelable et/ou de végétalisation sur les bâtiments neufs et rénovés s'inscrit aussi dans le contexte de la présente étude. Il sera détaillé en SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSOUS.

Ainsi les enjeux de décarbonation de l'énergie et de végétalisation sont ciblés dans les politiques publiques de lutte contre le réchauffement climatique en France. Après avoir observé cela, intéressons-nous à présent à quelques définitions pour appréhender l'état de l'art de la SECTION 2.

1.2 Premières définitions

1.2.1 Les toitures

La série de DTU 43 relative aux travaux d'étanchéité des toitures distingue les « *toitures plates* » des « *toitures inclinées* ». En effet, une toiture est dite inclinée dès lors que sa pente dépasse 15% (PEIGER P. ET BAUMANN N., 2018) ²⁰ et une toiture plate présente une pente inférieure à 3%. LUCKET, KELLY ET AL. (2011) considèrent que les toitures sont de "pente raide" quand leur pente est supérieure à 16% ²¹. En termes de pente de toit, l'on peut aussi se référer à la classification suivante ²² :

- nulle, faible (3 à 5%) ;
- intermédiaire (5 à 35 %. Classe que l'on voit diviser en deux sous-classes : 5 à 20% puis supérieur à 20%) ;
- moyenne (35 à 60%) ;
- forte (60 à 100%).

Les toitures avec dalle béton ressortent de la catégorie « *toiture plate* » (toiture-terrasse). Les toitures en charpente bois peuvent se présenter sur plusieurs pans, deux par exemple.

Dans les systèmes constructifs de bâtiment, une distinction est faite entre système par isolation par l'intérieur (ITI) et système d'isolation par l'extérieur (ITE).

Aujourd'hui, la technique de la toiture chaude est la technique la plus courante. Elle consiste à poser la membrane d'étanchéité sur l'isolation thermique qui est extérieure et placée sur la dalle directement ou avec un pare-vapeur intermédiaire. Les principales solutions de revêtement d'étanchéité sont à base de bitume-polymère (SBS), d'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM), d'asphalte ou encore de polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P).

Dans les toitures classiques, l'étanchéité est ensuite recouverte d'une protection dite :

- lourde (exemple : couche de 5 cm de gravillons ou dalles de béton sur plots) ;

¹⁹ Le dispositif d'évaluation et de suivi de l'artificialisation des sols entre en application trois ans après l'entrée en vigueur de la loi dite « résilience et climat », datant de 2021, soit à partir de 2024.

²⁰ Peiger, Philippe, et Nathalie Baumann. *Végétalisation biodiversée et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018, p.36.


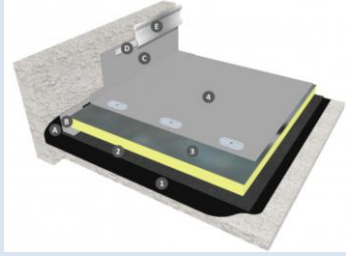
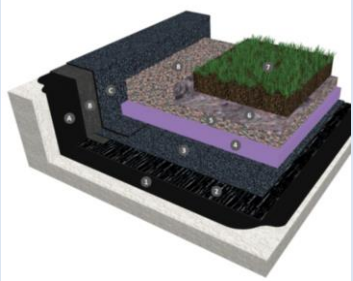
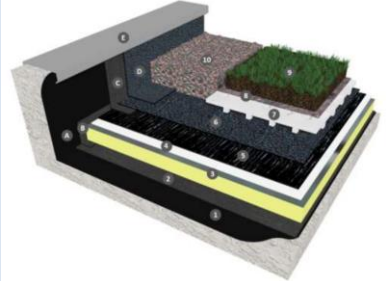
²¹ Lockett, Kelly, et Daniel Gouadec. *Toits verts, construction et maintenance*. Dunod, 2011.

²² Lassalle, François. « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures: conception et mise en œuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions* ». 2e éd, Éd. « Le Moniteur », 2008, pp. 69-74, § 3.1.1 « *Les contraintes liées aux bâtiments* ».

- ou légère (exemple : couche de peinture).


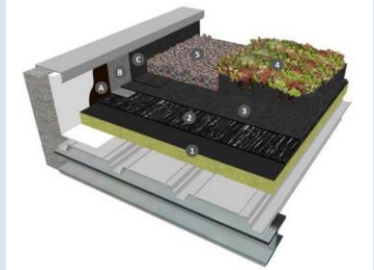

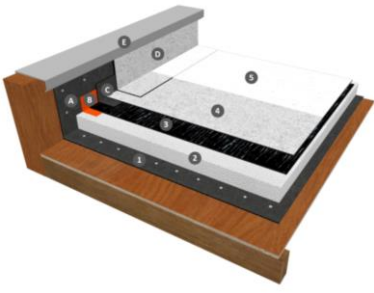

Les systèmes de toiture sont illustrés dans le TABLEAU 1.2-1 CI-DESSOUS. Nous observons la cohérence de l'outil de prescription duquel sont tirés les illustrations avec la réglementation technique française : isolation inversée sur élément porteur type maçonnerie uniquement ²³ ; isolation par l'intérieur (ITI) très peu préconisée ²⁴.

Tableau 1.2-1 : Les toitures, différents systèmes constructifs en fonction des types d'élément porteur et d'isolation (illustrations Iko)

Élément porteur maçonnerie			
Type d'isolation	Isolation inversée (XPS)	ITI	ITE
Couverture conventionnelle	 <p>lourde dalle (ou gravier) Iko TIPG/1/4/1/01A Iko TIPG/1/4/1/02B (ou 02A)</p>		 <p>Revêtement PVC-P apparent Iko TIAP/1/2/1/24</p>
Couverture végétalisée	 <p>Iko TJAR/1/4/1/10A</p>		 <p>Iko TJAR/1/2/1/11</p>

²³ Règles professionnelles Isolation inversée de toiture-terrasse (CFSE, juin 2021).

²⁴ Document Technique Unifié DTU 20.12 Maçonnerie des toitures et d'étanchéité - Gros œuvre en maçonnerie des toitures destinées à recevoir un revêtement d'étanchéité (§ 5.4.3 Isolation thermique placée en sous-face de l'élément porteur).

Élément porteur tôle d'acier nervurée			
Type d'isolation	Isolation inversée (XPS)	ITI	ITE
Couverture conventionnelle	X		 <p>lourde dalle et gravier Iko TTPD/3/2/3/01</p>
Couverture végétalisée			 <p>Iko TJAR/3/2/1/10A-M</p>
Élément porteur bois ou dérivés du bois			
Type d'isolation	Isolation inversée (XPS)	ITI	ITE
Couverture conventionnelle	X	 <p>lourde dalle et gravier Iko TTPD/2/1/1/01</p>	 <p>Revêtement réfléchif (ou revêtement avec ou sans gravier) Iko TIAP/2/3/1/27</p>
Couverture végétalisée			 <p>Iko TJAR/2/2/1/10A-M</p>

1.2.2 Le carbone

Parmi les indicateurs environnementaux de l'ACV ²⁵, L'INDICATEUR DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE est celui qui rend compte de l'impact carbone par UNITÉ FONCTIONNELLE de produit ou système considéré ²⁶. Il s'exprime en kg_{eq}CO₂. Cet indicateur comptabilise donc les quantités de gaz à effet de serre émises sur le cycle de vie du système observé. C'est le premier indicateur visible dans les tableaux d'ACV présentés dans les FDES en France. L'on y voit également apparaître de manière moins formelle une indication sur le « *carbone biogénique* ». Le carbone biogénique est le carbone présent de manière intrinsèque dans le produit du fait des matières qui le composent et qui ré-émettent du carbone au cours de son cycle de vie (vie en œuvre et fin de vie principalement). Dans la littérature des FDES, l'on trouve une expression de la distinction entre l'indicateur de réchauffement climatique commun et l'indicateur de carbone biogénique : « *réchauffement climatique - fossile* » opposé à « *réchauffement climatique - biogénique* » ²⁷. Ce dernier indicateur additionnel est particulièrement pertinent pour les produits à base de composants organiques. Il s'exprime en kg de carbone (kgC par unité fonctionnelle de produit). Il est à mettre en lien avec le stockage et la séquestration carbone définis ci-dessous.

Selon le livre « *Une ville verte, les rôles du végétal en ville* » ²⁸ :

« LE STOCKAGE DE CARBONE correspond à la masse de carbone déjà capturée par la végétalisation (PAOLETTI ET AL., 2011), généralement exprimée en tonnes (t) de carbone par hectare (ha), parfois en tonnes de CO₂. »

Selon la même source :

« LE CARBONE SÉQUESTRÉ est la capture annuelle de carbone par la masse de végétation étudiée. Cette capture de carbone est associée à la photosynthèse et servira comme énergie et comme biomasse élémentaire de l'arbre ou du végétal. »

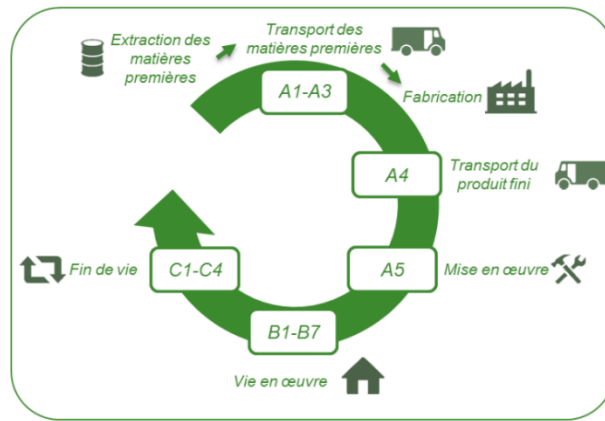
Le bilan carbone consiste en un calcul d'impact environnemental d'un produit de construction ou d'un équipement sur les différentes phases du cycle de vie du bâtiment. La base INIES est à la source de ces données. La FIGURE 2 CI-DESSOUS rappelle le découpage en phases du cycle de vie selon la norme que reprend la RE2020, et la liste les différents lots également issus de la RE2020 et qui sont pris en considération pour le calcul :

²⁵ Indicateurs environnementaux d'ACV : définition dans la série de normes NF EN ISO 14040. Une liste exhaustive est détaillée dans l'annexe A de la norme NF C 08-100-1 (mai 2022).

²⁶ La notion d'unité fonctionnelle est explicitée dans le GLOSSAIRE, PAGE 123.

²⁷ La FDES du substrat de culture pour toiture végétalisée SOPRAFLOR X de Soprema. www.inies.fr

²⁸ Musy, Marjorie. *Une ville verte : les rôles du végétal en ville*. Éditions Quae, 2014.



1. Voirie et Réseaux Divers (hors lot 1.3 comptabilité dans les espaces extérieurs)
2. Fondations et infrastructures,
3. Superstructure – Maçonnerie,
4. Couverture – Étanchéité – Charpente – Zinguerie,
5. Cloisonnement – Doublage – Plafonds suspendus – Menuiseries intérieures,
6. Façades et menuiseries extérieures,
7. Revêtements des sols, murs et plafonds – Chape – Peintures – Produits de décoration,
8. CVC (Chauffage – Ventilation – Refroidissement – eau chaude sanitaire – Fluides frigorigènes),
9. Installations sanitaires,
10. Réseaux d'énergie (courant fort),
11. Réseaux de communication (courant faible),
12. Appareils élévateurs et autres équipements de transport intérieur.
13. Équipements de production locale d'électricité.

Figure 2 : RE2020, phases du cycle de vie du bâtiment (module D manquant ici : Bénéfices et charges au-delà des frontières du système) et liste des lots de construction considérés

Source liste : Méthode QEC de l'Ademe (<https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5802-methode-quartier-energie-carbone.html>)

Source schéma : une FDES disponible en base INIES par l'identifiant 30802 (www.inies.fr)

Pour préciser le périmètre d'une ACV, l'on retrouve aussi les formulations « du berceau à la porte/*cradle-to-gate* » (phases A1 à A3) ; « du berceau à la tombe/*cradle-to-grave* » (phases A1 à C4) et « du berceau au berceau/*cradle-to-cradle* » (phases A1 à A1). Voir SOUS-SECTION 2.3.8.1 CI-DESSOUS.

La RE2020 met en œuvre une méthode de calcul dite « d'ACV DYNAMIQUE » où les émissions équivalent CO₂ selon la phase du cycle de vie sont distribuées par année de vie du système, à l'aide des coefficients annuels de relargage de GES sur les 50 ans de durée vie considérée pour le bâtiment. Le relargage s'atténue dans le temps, comme l'illustre la FIGURE 3 CI-DESSOUS :

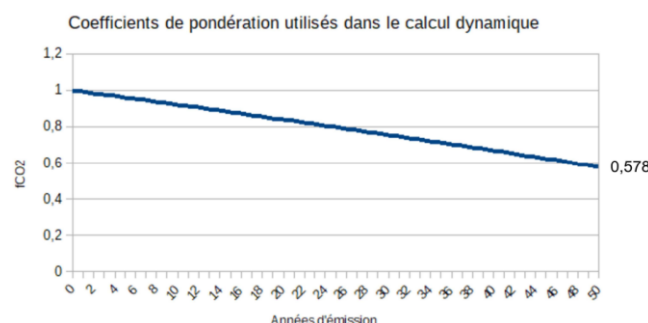


Figure 3 : RE2020 méthode d'ACV dynamique, courbe des coefficients de relargage des gaz à effet de serre sur 50 ans

Intéressons-nous à présent au traitement qui est apporté au carbone dans une des certifications environnementales :

Une brève présentation des certifications de Haute Qualité Environnementale (HQE) est insérée à L'ANNEXE 6.3, PAGE 111. Dans l'évaluation HQE, les impacts carbone sont étudiés au travers des thèmes CARBONE et ANALYSE DU CYCLE DE VIE qui abordent respectivement :

- La comptabilisation des émissions de GES liées aux consommations d'énergie sur le plan de l'exploitation du bâtiment et de la mobilité (déplacements) ;
- La comptabilisation des impacts environnementaux selon la RE2020 (indicateurs I_c).

1.2.3 Évapotranspiration des plantes

La littérature scientifique reconnaît la végétation comme vecteur de refroidissement par convection. Le terme utilisé pour identifier cette notion est l'évapotranspiration (SMALLS-MANTEY ET AL., 2021)²⁹. L'humidité dispose en effet de trois moyens pour quitter un sol : le ruissellement, l'évaporation à la surface du sol et l'évapotranspiration à la surface des plantes (SAILOR D. J., 2008 ; VILLEMIN T., 2023³⁰). Comme le décrit MORGANE COLOMBERT dans sa thèse³¹ :

« l'évapotranspiration correspond à l'ensemble des phénomènes d'évaporation de l'eau du sol et des nappes liquides, et de transpiration des végétaux. Elle participe au sein du bilan d'énergie au flux de chaleur latente. »

L'augmentation de l'imperméabilisation en ville a favorisé le phénomène de ruissellement des eaux de pluie tombées, au détriment de celui de leur évaporation locale. Or, le phénomène d'évaporation contribue à abaisser la chaleur de l'environnement local et à augmenter son humidité relative (apport de fraîcheur). L'on observe ainsi un plus faible flux de chaleur latente en milieu urbanisé qu'en milieu rural, sauf en cas de gel où ce sera l'inverse.

Au niveau de son état de l'art, MORGANE COLOMBERT souligne encore que parmi les termes intervenant dans le bilan thermique que l'on peut établir à l'échelle de la ville [³²], ce sont les flux de chaleur latente et de chaleur sensible qui sont les plus impactés par l'imperméabilisation et la raréfaction de végétation en milieu urbain. Le flux de chaleur sensible y est plus fort et compte comme l'un des principaux facteurs d'îlot de chaleur (chaleur anthropique, stock de chaleur par le milieu urbain).

D'autres travaux permettent ici de mieux expliciter l'évapotranspiration de la végétation et son bilan thermique de manière générale. CATALANO ET BAUMANN³³, rappellent qu'au niveau de la végétation, le feuillage et le substrat contribuent tous deux au phénomène d'évapotranspiration et de convection. Les flux de chaleur de la végétation avec son environnement sont représentés sur la FIGURE 4 CI-DESSOUS. C'est

²⁹ Smalls-Mantey, Lauren, et Franco Montalto. « The Seasonal Microclimate Trends of a Large Scale Extensive Green Roof ». *Building and Environment*, vol. 197, 2021, p. 107792, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107792>.

³⁰ Villemin, Thomas. *Modélisation des échanges énergétiques entre la surface d'une toiture végétalisée extensive et un panneau photovoltaïque*. Université de Lorraine, 2020, <https://www.theses.fr/s292895>. Dans le cadre du projet Proof.

³¹ Colombert, Morgane. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Université Paris-Est, 8 décembre 2008, <https://theses.hal.science/tel-00470536>.

³² Ces termes sont les flux de chaleur anthropique, sensible, latente, advectif et la variation de stock de chaleur de la zone urbaine.

³³ C. Catalano et N. Baumann, « *Biosolar Roofs: A Symbiosis between Biodiverse Green Roofs and Renewable Energy* », *City Green*, p. 42-49, nov. 2017.

le rayonnement solaire de courte longueur d'onde (SW sur la FIGURE 4 CI-DESSOUS), qui est à l'origine de flux de chaleur latente et de chaleur sensible qui viennent d'être évoqués (H et L sur la FIGURE 4 CI-DESSOUS). Cependant, ce rayonnement est aussi la source de la conduction de chaleur vers le substrat (puis vers la toiture), et du rayonnement de longue longueur d'onde (LW sur la FIGURE 4 CI-DESSOUS).

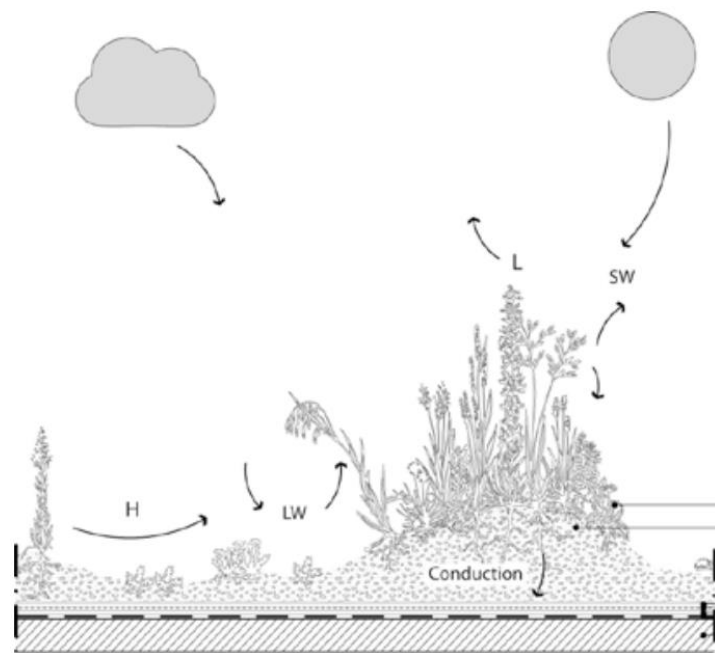


Figure 4 : Représentation des flux de chaleur au niveau de la toiture végétalisée (CATALANO AND BAUMANN, 2017, figure 2)

1.2.4 Indicateurs de biodiversité

Le développement d'axes sur la biodiversité au sein des labels et certifications de l'urbanisation est riche. Nous développons ici l'exemple du label Biodiversity et de la certification Haute Qualité Environnementale (HQE). Le coefficient de biotope par surface, CBS, est également présenté :

BIODIVERSITY est un label développé par le Conseil International Biodiversité et Immobilier (CIBI). Il porte sur les projets immobiliers et vise à compléter les certifications environnementales BREEAM, LEED et HQE. Pour qu'un projet soit labellisé Biodiversity, il devra être évalué conforme sur quatre performances dont le potentiel écologique : « *Préserver au mieux les éléments naturels existants dans le projet et le chantier et maximiser les biotopes utiles et les fonctionnalités écologiques* ». Chaque performance étant notée de A à E, le label ne peut être obtenu que si aucune des quatre notes ne vaut D ou E ³⁴. L'ANNEXE 6.1, PAGE 103, présente un certain nombre de projets labellisés BiodiverCity, selon le CIBI ³⁵ et selon un Retour d'expérience des projets pilotes Quartiers Energie Carbone 2021 ³⁶.

LA CERTIFICATION HQE intègre différents indicateurs d'évaluation comme l'Indice de Valeur Écologique (IVE), le Témoin de Cohérence Écologique (ITCE) via la certification Effinature ³⁷. Tout comme dans le label Eco-Quartier, Effinature calcule le Coefficient de Biotope par Surface et l'indicateur est aussi repris par HQE.

Le CBS voit une première mise en œuvre opérationnelle en 1990 à Berlin, une ville qui souhaite définir un standard minimal de la construction et de la rénovation, pour préserver l'équilibre naturel des espaces.

³⁴ CIBI (IBPC), label BiodiverCity®, qu'est-ce que la biodiversité urbaine [en ligne] <http://cibi-biodiversity.com/biodiversity/>

³⁵ Le CIBI : le Conseil International Biodiversité et Immobilier.

³⁶ Quartiers Energie Carbone, pour des opérations d'aménagement à énergie positive et bas carbone, 2021 [en ligne] https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/3209/QEC_PublicationFinale_Oct2021_HD.pdf

³⁷ Effinature : <http://www.effinature.fr/>

La dernière mise à jour du CBS berlinois intègre de nouvelles surfaces telles que les façades et les toitures végétalisés ³⁸. GÓMEZ-BAGGETHUN, E ET GREN, Å. (2013), ont suivi des initiatives à Malmö en Suède et à Kent Thameside au Royaume-Uni, sur la base du Green Space Factor ³⁹.

Le CBS est arrivé en France par la suite. Il se retrouve d'abord dans la loi ALUR en 2014, sur la trame du CBS berlinois ⁴⁰, puis les PLU les intègrent spécifiquement sur les territoires. L'Ademe en donne la définition suivante ⁴¹ :

« Le CBS est un coefficient qui décrit la proportion des surfaces favorables à la biodiversité (surface éco-aménageable), par rapport à la surface totale d'une parcelle. Le calcul du CBS permet d'évaluer la qualité environnementale d'une parcelle, d'un îlot, d'un quartier, ou d'un plus vaste territoire. »

La FIGURE 5 CI-DESSOUS illustre les typologies d'occupation des sols et les coefficients de pondération associés. Pour obtenir le CBS d'un projet, il s'agit donc de sommer les surfaces pondérées du projet et de diviser le résultat par la surface totale du projet. Un principe de calcul qui sera utilisé dans la présente étude (voir SOUS-SECTION 4.2 CI-DESSOUS) :

³⁸ Der Biotopflächenfaktor "BFF" benennt das Verhältnis naturhaushaltwirksamer Flächen zur gesamten Grundstücksfläche. février 2021, http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/fr/bff_berechnung.shtml.

³⁹ Gómez-Baggethun, Erik, et al. « Urban Ecosystem Services ». *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*, édité par Thomas Elmqvist et al., Springer Netherlands, 2013, p. 175-251, https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_11.

⁴⁰ Peiger et Baumann, 2018, annexe 2 p. 251, pp.259-260.

⁴¹ ADEME, *Agence de la transition écologique. Le coefficient de biotope par surface (CBS)*. janvier 2015, <https://multimedia.ademe.fr/catalogues/CTecosystemes/fiches/outil11p6364.pdf>.

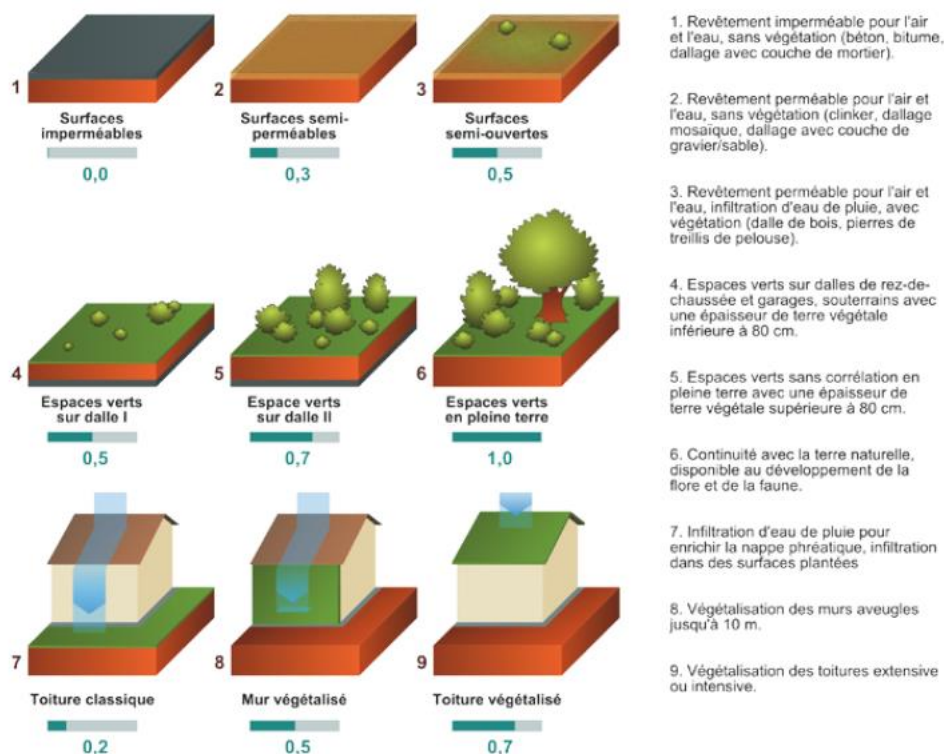


Figure 5 : Différentes surfaces de sol et les coefficients de biotope par surface (CBS) associés

Source : Ademe. "RÉUSSIR LA PLANIFICATION ET L'AMÉNAGEMENT DURABLES, CAHIER TECHNIQUE ÉCOSYSTÈMES DANS LES TERRITOIRES, LE COEFFICIENT DE BIOTOPE par surface (CBS)". [en ligne] <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/CTecosystemes/fiches/outil11p6364.pdf>.

Notamment sur cette base, différentes approches méthodologiques ont vu le jour au fil des ans, et dans un but d'unification, un CBS harmonisé, est en cours de finalisation avant diffusion (CBSH) ⁴². C'est un groupe de travail, le GT7 Biodiversité de la SNB 2030, qui a mis au point cette nouvelle nomenclature. Il est composé d'entités issues d'une diversité de domaines dont des aménageurs ⁴³.

L'ouvrage de PEIGER ET BAUMANN (2018) propose une compréhension du potentiel à biotope pour certains éléments qui peuvent venir constituer une toiture végétalisée. Celle-ci est restituée dans la FIGURE 6 CI-DESSOUS. Et l'ensemble de photographies, FIGURE 7 CI-DESSOUS illustre des mises en œuvre favorables à la faune et à la flore :

⁴² <https://experimentationsurbaines.ademe.fr/territoires-zero-artificialisation-nette/workshop/webinaire-flash-n-2-coefficient-de-biotope-surfacique-harmonise/>

⁴³ « Un label pour éclairer la route au-delà de la RE2020 », SNB2030, GT7 Biodiversité, mars 2021 [en ligne] https://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/gt7_biodiversite_vf2.pdf , consulté le 14 avril 2023.

	Zone sablée	Tas de branches	Système de racines, souches	Graviers, sable	Blocs de pierre	Flaque d'eau
Plantes						
Champignons en mycorhize						
ANIMAUX						
Oiseaux						
Papillons						
Abeilles sauvages						
Araignées						
Coléoptères						
Sauterelles						
Lézards*						

■ Fonction remplie ■ Fonction en partie remplie ■ Fonction peu remplie
★ Si l'accès au toit est possible, par un corridor écologique sol/toit, un mur végétalisé, un mur de pierres sèches...

Figure 6 : Capacité de composants disponibles en toiture végétalisée à constituer des structures à biotope pour la faune et flore



Figure 7 : Illustration de deux composants à disposer en toiture pour constituer des structures à biotopes (tas de branches et souches), Suisse.

Source : ouvrage PEIGER ET BAUMANN, 2018

1.3 Problématique de l'étude

Dans cette étude, l'interaction de la végétalisation avec le bâti va pouvoir être interrogée selon différents axes. LE PROJET DE RECHERCHE PROOF en partenariat avec l'institut Efficacy et le CSTB constitue l'opportunité d'analyser les résultats scientifiques et techniques les plus récents (SOUS-SECTION 2.3.2), et de mener une réflexion pour sa modélisation dans un outil d'aide à la décision pour les aménageurs, comme UrbanPrint ⁴⁴.

⁴⁴ UrbanPrint : logiciel de simulation des impacts environnementaux du quartier, co-développé par le CSTB et Efficacy.

Ainsi, ayant rejoint la structure Efficacity, et en étroite collaboration avec l'équipe de recherche du projet Proof ⁴⁵, je propose un travail d'approfondissement des nouveaux axes associables aux enjeux de préservation de la biodiversité et de décarbonation des énergies du bâtiment en retenant la PROBLÉMATIQUE SUIVANTE :

ÉCO-CONCEPTION DES ESPACES BÂTIS : LA VÉGÉTALISATION EST-ELLE UN LEVIER DE PERFORMANCE POUR L'ÉNERGIE ET LA BIODIVERSITÉ LOCALES ? CAS DES TOITURES BIOSOLAIRES

Le secteur du Bâtiment a d'ores et déjà amorcé sa transition afin de mener à bien les objectifs de décarbonation qui lui sont fixés. Cela passe notamment par le recours à des produits de construction et des systèmes énergétiques à plus faible impact environnemental, comme certains matériaux d'origine biosourcée ou le raccordement à un réseau de chaleur géothermique urbain pour diminuer le recours à un chauffage alimenté par énergie fossile. Ces leviers sont proposés dans l'outil de simulation qui vient en support de cette étude : URBANPRINT. Il y a ici l'opportunité d'explorer l'implémentation de nouveaux leviers, pour que l'outil soit toujours plus riche dans les moyens de décarbonation qu'il propose.

Par la problématique ici retenue, il s'agit notamment de déterminer dans quelle mesure la végétalisation peut :

- Servir l'objectif d'intensification de la production locale d'énergie décarbonée et plus spécifiquement de l'énergie photovoltaïque ;
- Contribuer à la lutte contre la perte de biodiversité et à la renaturation des villes.

Pour clore la définition du cadre d'étude, les SOUS-SECTIONS 1.4 à 1.6 CI-DESSOUS exposent respectivement les axes d'orientation poursuivis, les modalités de toiture considérées et l'outil principalement mis en œuvre.

1.4 Axes d'orientation de l'étude

La problématique choisie portant sur la végétalisation, le photovoltaïque et la biodiversité au sein des milieux construits, le projet d'étude a demandé la collecte d'un certain nombre d'informations sur différentes disciplines et thématiques.

En effet, pour mieux appréhender la modélisation des TOITURES VÉGÉTALISÉES, il s'est avéré nécessaire d'étudier les TOITURES AU SENS LARGE et sur les plans suivants :

- Analyse du cycle de vie de produits et équipements ;
- État de l'art sur les toitures d'un point de vue général (système constructif classique) à un point de vue spécifique (les toitures végétalisées, les toitures biosolaires) ;
- Contexte réglementaire et trajectoire des politiques relatives en termes de construction, d'urbanisme et d'environnement.

Par ailleurs, la thématique de la BIODIVERSITÉ demandait à être maîtrisée également, sur le plan général bien sûr, mais aussi dans les aspects de conception, avec une approche de sa prise en compte dans les indicateurs, labels et certifications existants, en lien avec la conception de l'aménagement. Enfin, la dimension énergétique demandait quant à elle de recenser le contexte du PHOTOVOLTAÏQUE, tant d'un point de vue technico-scientifique que politico-économique.

L'état de l'art élaboré durant l'étude et qui sera présenté plus en détails à la SECTION 2 a contribué à une orientation sur le questionnement suivant :

voir ANNEXE 6.2 PAGE 105.

⁴⁵ Des informations sur le Projet Proof sont consultables à partir des liens de la SITOGRAFIE, PAGE 120.

1. Le rôle du REVÊTEMENT DE TOITURE dans les besoins de chauffage, de refroidissement et dans la production d'énergie locale (photovoltaïque) ;
2. La capacité à atteindre les NOUVEAUX STANDARDS D'INSTALLATION photovoltaïque et/ou végétalisée visant les toitures ;
3. La portée d'un INDICATEUR DE BIODIVERSITÉ inspiré d'un indicateur expérimenté depuis les années 80 en Allemagne, pour apprécier sa significativité et son poids relativement aux indicateurs carbone (C) ou énergie (E).

Afin de présenter le travail mené sur le rôle de la végétalisation des toitures vis-à-vis des deux enjeux ciblés à la SOUS-SECTION 1.1 CI-DESSUS, la SECTION 3 sera consacrée à la production d'énergie photovoltaïque (axe n°1 d'étude) et la SECTION 4 à l'indicateur de biodiversité (axe n° 2).

Mais tout d'abord, les SOUS-SECTION 1.5 ET 1.6 CI-DESSOUS permettent d'appréhender les modalités de toiture considérées au périmètre de l'étude et l'outil principal utilisé pour mener à bien les simulations de cas d'étude : URBANPRINT.

1.5 Les modalités de toiture pour l'étude

Les modalités de toiture retenues pour cette étude sont tirées du champ d'étude du projet de recherche Proof, telles qu'illustrées sur la FIGURE 8 CI-DESSOUS :

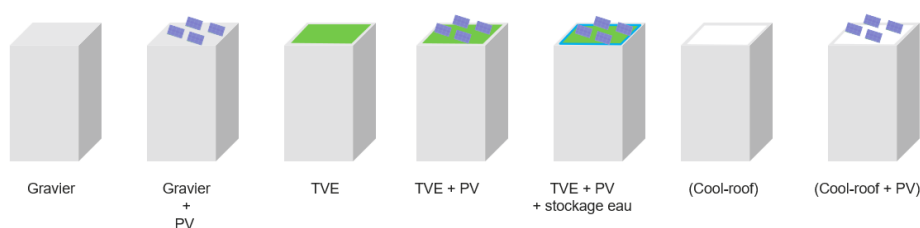


Figure 8 : Les modalités de toiture dans le projet de recherche Proof

Dans ce qui suit, l'expression « MODALITÉ DE TOITURE » fera référence au périmètre de types de revêtement et couverture de toiture suivant :

- MODALITÉ BITUMINEUSE : la toiture revêtue de feuilles bitumineuses apparentes ;
- MODALITÉ GRAVIER : la toiture revêtue de feuilles bitumineuses et recouverte de gravier ;
- MODALITÉ VÉGÉTALISATION EXTENSIVE (TVE) : la toiture revêtue d'une étanchéité bitumineuse et recouverte d'un système végétalisé extensif ;
- MODALITÉ COOL ROOF : la toiture revêtue d'une étanchéité bitumineuse et recouverte d'une double couche de peinture réfléchissante Cool Roof ⁴⁶.

1.6 Outil de référence pour l'étude

1.6.1 L'outil et ses caractéristiques principales

En amont de la RE2020, il y a eu l'expérimentation E+C- qui visait à associer un indicateur carbone et un indicateur de performance énergétique aux bâtiments. Cette méthode, Efficacity ⁴⁷ et différents partenaires se sont employés à la décliner à l'échelle du quartier, en se basant sur les règles d'analyse de cycle de vie (ACV) ⁴⁸. C'est la naissance de la méthode Quartier Energie Carbone (méthode QEC). L'outil

⁴⁶ Voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

⁴⁷ Efficacity est un ITE : Institut pour la Transition Écologique des Villes. Il compte parmi ses membres des partenaires privés et des partenaires publics, comme le CSTB et le Cerema. [Efficacity - https://efficacity.com/](https://efficacity.com/)

⁴⁸ Analyse du cycle de vie selon la NF EN15804, avec 24 indicateurs environnementaux calculés dans UrbanPrint.

UrbanPrint a été développé pour déployer la méthode et ainsi proposer un outil d'aide à la décision aux acteurs de l'aménagement. Une première version de la méthode est mise au point en 2021, sous le pilotage de l'Ademe, l'Agence pour la Transition énergétique. Une première phase pilote réalisée entre 2020 et 2022 avec des porteurs de projets d'aménagement a permis de faire les développements complémentaires avant le lancement public de l'outil, fin 2022 ⁴⁹.

Pour aboutir aux résultats énergie et carbone d'un projet d'aménagement à l'échelle d'un quartier, différentes informations doivent être renseignées dans l'interface utilisateur, concernant : les produits de construction, les systèmes énergétiques, la gestion de l'eau, la gestion des déchets, etc. ⁵⁰.

Aujourd'hui, UrbanPrint est un outil qui permet notamment de :

- Modéliser les bâtiments d'un projet d'aménagement, en termes de matériaux, géométrie d'emprise, hauteur, surface vitrée, isolation, usage etc.
- Calculer les impacts des bâtiments et des espaces extérieurs, en ACV statique ou en ACV dynamique (RE2020 : pondération des émissions dans le temps) ;
- Calculer la production et la consommation d'énergie ;
- Intégrer le recours à un réseau pour les besoins de chaud et de refroidissement et calculer la production d'énergie photovoltaïque (installation en toiture) ;
- Recenser la typologie d'usage des sols pour le calcul du stockage carbone.

À l'échelle d'un projet d'aménagement, cet outil ne permet pas à ce jour de :

- Modéliser la végétalisation du bâti ;
- Quantifier les éventuels bénéfices de la coexistence de végétalisation et de production d'électricité photovoltaïque en toiture ;
- Caractériser la qualité de biodiversité atteinte.

La méthode QEC est décrite dans un document qui a été publié en 2022 ⁵¹. Certains des éléments de la méthode les plus utiles à la compréhension de l'étude sont insérés en ANNEXE 6.2, PAGE 105.

1.6.2 Fonctionnalités complémentaires de l'outil

LE CHANGEMENT D'AFFECTATION DU SOL a été implémenté dans UrbanPrint en 2021. Le logiciel possède actuellement une nomenclature des usages du sol, qui permet de calculer la séquestration du carbone avant et après le projet d'aménagement. Cette nomenclature est inspirée de ALDO ⁵². Le changement d'affectation du sol est pris en compte dans l'analyse du cycle de vie.

En fin de simulation, les résultats qui sont présentés de manière graphique dans l'outil sont téléchargeables au format JSON (*JavaScript Object Notation*). De même, pour les utilisateurs qui le souhaitent, UrbanPrint prend en charge les fichiers dans ce format en entrée de projet.

D'autre part, l'outil propose un calcul de l'empreinte carbone usager au sens du label BBCA, tel qu'illustré à l'ANNEXE 6.3 PAGE 111.

Nous entrons à présent dans la SECTION 2 pour aborder de plus près les techniques constructives de végétalisation et « *solarisation* » des toitures ainsi qu'aux méthodes de modélisation qui s'y rapportent.

⁴⁹ La brochure commerciale de l'outil UrbanPrint est insérée en ANNEXE 6.2, PAGE 105.

⁵⁰ Et aussi la mobilité des usagers et habitants pour l'approche Usagers ("vue Usagers" par opposition à "vue Aménageur").

⁵¹ Voir SITOGRAPHIE du mémoire, PAGE 120.

⁵² Aldo est un outil Ademe sur les stocks et flux carbone dans les sols et forêts. Voir SITOGRAPHIE du mémoire, PAGE 120.

2 État de l'art scientifique et technique

2.1 La toiture et la thermique du bâtiment

Au vu de la littérature scientifique, différentes caractéristiques physiques entrent en ligne de compte pour optimiser les performances du bâtiment (acoustiques, de résistance au feu, thermiques, de bilan environnemental, etc.). Celles qui vont particulièrement nous intéresser dans le cadre de cette étude sont les deux dernières.

Dans l'optique de contrôler les déperditions et les apports d'énergie qui ont lieu à travers la toiture, l'on peut s'intéresser à l'ALBÉDO des surfaces, qui est le coefficient de réflexion d'une surface, d'un matériau. Nous le noterons ρ dans ce qui suit. Le COEFFICIENT D'ABSORPTION SOLAIRE sera noté α . Les deux propriétés sont liées comme suit :

$$\rho = 1 - \alpha.$$

En s'appuyant ci-dessous sur la thèse de MORGANE COLOMBERT (2008) ⁵³ :

L'albédo d'une surface est obtenu en divisant la part de rayonnement solaire incident réfléchi par l'énergie du rayonnement solaire incident. La FIGURE 9 CI-DESSOUS présente différentes valeurs possibles d'albédo pour des matériaux et surfaces présentes en milieu urbain. Les surfaces qui ont tendance à devenir les plus chaudes sont celles présentant un faible albédo. L'albédo connu, cela permet donc d'appréhender le réchauffement relatif à chaque matériau.

Cela est en lien avec une autre propriété intéressante à considérer, l'ÉMISSIVITÉ, que nous notons ϵ . Elle correspond au rapport de la part de rayonnement émise par un corps quelconque à une température donnée sur la part de rayonnement émise par le corps noir à la même température, et est donc comprise entre 0 et 1 ⁵⁴. Le rayonnement émis par les matériaux ressort majoritairement des longues longueurs d'onde (voir flux LW sur la FIGURE 4 CI-DESSUS) ⁵⁵. En observant conjointement albédo et émissivité, il faut noter que les matériaux détenant des valeurs élevées pour les deux grandeurs sont ceux sur lesquels l'exposition solaire induit le réchauffement le plus lent. Un albédo élevé est à mettre en lien avec la conservation d'une température de surface faible et une émissivité élevée, avec l'évacuation de l'énergie stockée auparavant par le matériau. C'est une propriété des *cool roofs* que nous verrons un peu plus bas.

D'autre part, en termes de stock de chaleur des matériaux, c'est aux propriétés de conductivité thermique et de capacité thermique qu'il faut s'intéresser. Elles s'expriment respectivement en W/m.K et en W/m².K. Durant leur exposition solaire, l'enveloppe du bâtiment et les toitures en particulier absorbent et stockent une quantité de chaleur. La restitution de cette chaleur s'opère pendant la nuit.

Ce qui précède contribue à expliquer que des surfaces de même couleur n'ont pas nécessairement le même comportement thermique (albédo, température de surface, etc.).

⁵³ Colombert, Morgane. "Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville." Phdthesis, Université Paris-Est, 2008. Accessed July 10, 2023. <https://theses.hal.science/tel-00470536>.

⁵⁴ "Émissivité" et "Corps noir" [en ligne], [Émissivité - https://fr.wikipedia.org/wiki/Émissivité](https://fr.wikipedia.org/wiki/Émissivité) et [Corps noir - https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir) - consultés le 12 juillet 2023.

⁵⁵ Emissions dans le domaine infrarouge, en rapport avec la loi de Stefan-Boltzmann : $E = \epsilon\sigma T^4$.

Dans sa bibliographie support, l'auteure s'appuie sur POMERANTZ ET AL. (2000) et sur ASAEDA ET AL. (1996), et rapporte les éléments suivants sur l'asphalte et le béton :

- Asphalte de couleur noire : albédo de 0,1 ;
- Béton de surface noire : 0,45.

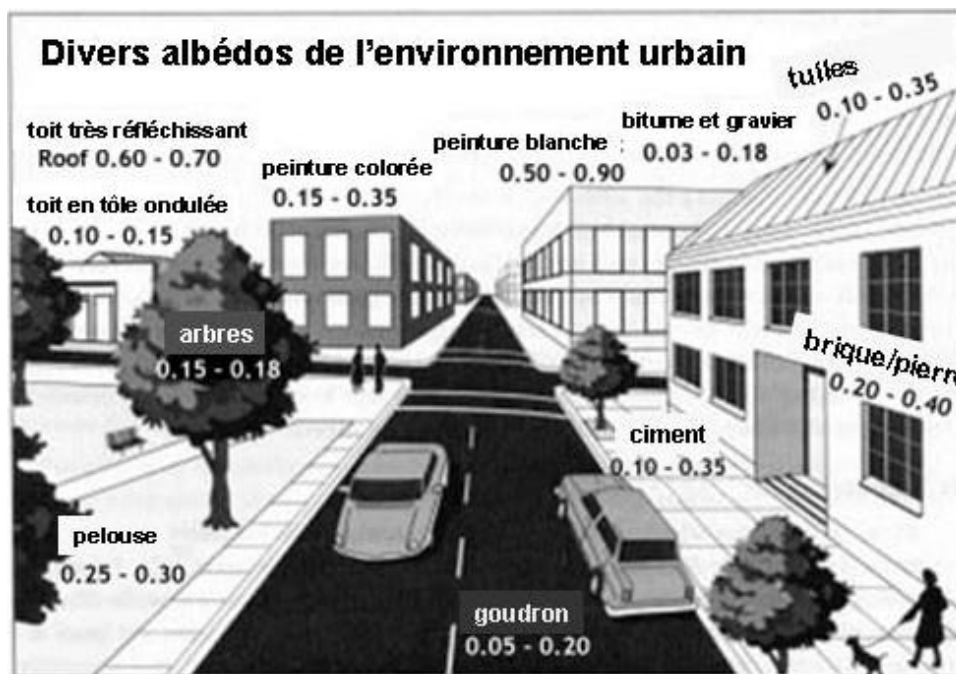


Figure 9 : L'albédo de l'environnement urbain Source: U.S. Environmental Protection Agency

<http://yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/content/ActionsLocalHeatIslandEffect> (Schéma des albédos dans l'environnement urbain : "[Climate in cities Basics What controls the urban climate?](#)" [en ligne] http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/2_Urban_Climate/-_What_controls_it_3rk.html), consulté le 10 juillet 2023

Sur la FIGURE 9 CI-DESSUS, l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis classe le gravier et le bitume dans une classe d'albédo de 0,03-0,18 ⁵⁶. PVGIS donne une valeur d'albédo de 0,2 pour un sol sablé clair ⁵⁷.

Cela n'est pas présenté sur la FIGURE 9 CI-DESSUS, mais le zinc, qui est une couverture typique des toitures à Paris présente un albédo de 0,6 et une émissivité de 0,1 ⁵⁸. Dans une expérimentation menée à Melbourne en 2013, COUTS ET AL. ⁵⁹ exposent des valeurs d'albédo pour différents toits : sol de terre (0,10), sol de terre couvert de végétaux (0,15), tôle d'acier (0,21) et tôle d'acier couverte d'une peinture blanche hautement réfléchissante (0,71 à midi solaire en janvier ⁶⁰). Pour ces différentes couvertures de toit, le

⁵⁶ Voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

⁵⁷ Voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

⁵⁸ Thèse de Morgane Colombert (2008). Se référer aux page 185 (tableau 15) et page 188 (tableau 17) du document source.

⁵⁹ Coutts, Andrew M., Edoardo Daly, Jason Beringer, and Nigel J. Tapper. "Assessing Practical Measures to Reduce Urban Heat: Green and Cool Roofs." *Building and Environment* 70 (2013): 266–276. Accessed July 13, 2023. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313002473>.

⁶⁰ Donc en été pour l'Australie situé en hémisphère sud.

TABLEAU 2.1-1 CI-DESSOUS donne leur classement les uns par rapport aux autres, en termes d'émission du rayonnement de longue longueur d'onde :

Tableau 2.1-1 : Albédo, classement du rayonnement de longue longueur d'onde en fonction du revêtement de toiture, selon Coutts et al. (2013)

	Sol de terre	Sol de terre couvert de végétaux	Tôle acier	Tôle acier couverte de peinture blanche « hautement réfléchissante »
albédo	0,10	0,15	0,21	0,71
Rayonnement de longue longueur d'onde (émission)	En-dessous de celui de la tôle acier, car l'acier monte plus facilement en température	En-dessous de celui du sol de terre	Le plus important parmi les 4 toits	Le plus faible parmi les 4 toits

En parcourant la littérature scientifique dédiée aux revêtements de toiture, l'on peut découvrir d'autres grandeurs et appellations qui caractérisent la réflectivité des surfaces. Par exemple le SR est une autre désignation de l'albédo et SRI est le *Solar Reflectance Index*, normalisé selon l'ASTM-E1980 aux Etats-Unis d'Amérique. Il s'obtient par le calcul suivant :

$$SRI = \frac{T_{black} - T_{surface}}{T_{black} - T_{white}}$$

Où T_{black} est la température du noir standard (SR = 0,05, $\varepsilon = 0,9$: SRI = 0)

T_{white} est la température du blanc standard (SR = 0,8, $\varepsilon = 0,9$: SRI = 100)

$T_{surface}$ est la température de la surface dans les conditions de référence ⁶¹

Dans la littérature scientifique, il est fait mention aux toitures « *rafraîchissantes* » ou « *cool roofs* » (à haute réflectivité solaire) par le terme « *cool roofs* ». MORGANE COLOMBERT précise qu'ils se caractérisent par une haute réflexion vis-à-vis des courtes longueurs d'onde (et une émissivité élevée) permettant ainsi de faibles températures de surface (et l'évacuation de l'énergie déjà absorbée) ⁶². KEIVAN BAMDAD rappelle que si les *cool roofs* permettent d'éviter significativement la transmission du rayonnement solaire vers l'intérieur du bâtiment, à l'inverse ils empêchent la bonne acquisition des calories extérieures en dehors de l'été. Ainsi, ce type de toitures contribuent d'une part à réduire les consommations d'énergie en lien avec le rafraîchissement de l'air (été) et augmentent les consommations d'énergie pour le chauffer (hiver). D'autre part, si dans les pays les plus chauds, il est mis en évidence qu'il y a bien un bénéfice à l'exploitation d'un *cool roof*, des travaux scientifiques cités dans l'article cherchent à quantifier le bénéfice économique selon la zone géographique ⁶³. À l'horizon 2090, pour répondre aux besoins de chauffage et de climatisation selon le scénario climatique RCP8,5 du 5^{ème} rapport du GIEC, VIRK G. ET AL. (AUSTRALIE, 2023)

⁶¹ [Solar Reflectance - an overview | https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance)

⁶² Thèse de Morgane Colombert. Se référer aux pp. 120-121 du document cité.

⁶³ Bamdad, Keivan. « Cool Roofs: A Climate Change Mitigation and Adaptation Strategy for Residential Buildings ». *Building and Environment*, vol. 236, 2023, p. 110271, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110271>. Et ses références [39- 41]

déterminent une économie d'énergie par l'emploi de *cool roofs* qui commence à être significative à l'horizon 2050 (4,5% à Canberra) et d'ici 2070 (8% à Melbourne) ⁶⁴.

En thermique du bâtiment, les Règles Th-Bat de la réglementation thermique RE2020 considèrent le facteur solaire, qu'elles définissent comme :

« Le facteur solaire global correspond au rapport entre l'énergie pénétrant par une paroi à l'intérieur du local et l'énergie solaire incidente sur la face extérieure de la paroi. » ⁶⁵

Elles proposent la FIGURE 10 CI-DESSOUS en accompagnement de cette définition :

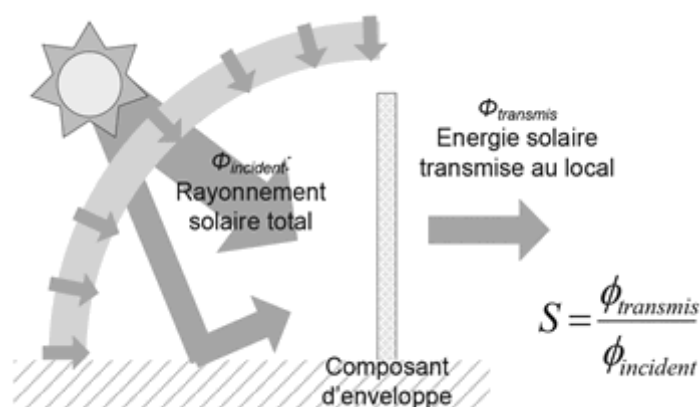


Figure 10 : RE2020, Notion de Facteur de transmission solaire

Source : RE2020, Règles Th-Bat, Fascicule 3, § 3.1.2, figure 9.

Bien que la méthode du facteur de transmission solaire de la réglementation thermique RE2020 ne soit pas été utilisée durant l'étude, la SOUS-SECTION 2.3.9 CI-DESSOUS exposera son approche pour distinguer une toiture classique d'une toiture végétalisée.

2.2 Le photovoltaïque

2.2.1 Photovoltaïque et indicateurs de consommation d'énergie

La réglementation thermique RE2020 fixe des exigences de moyens en thermique du bâtiment et mettre en œuvre des installations photovoltaïques participe de ces moyens.

Comme vu à la SOUS-SECTION 1.1 CI-DESSUS, la RE2020 considère deux indicateurs sur la consommation d'énergie, le C_{ep} et le $C_{ep, nr}$. Il est donc important de revenir sur la NOTION D'AUTOCONSOMMATION.

⁶⁴ Virk, Gurdane, Antonia Jansz, Anna Mavrogianni, Anastasia Mylona, Jenny Stocker, and Michael Davies. "Microclimatic Effects of Green and Cool Roofs in London and Their Impacts on Energy Use for a Typical Office Building." *Energy and Buildings* 88 (2015): 214–228. Accessed July 10, 2023. <https://doi-org/10.1016/j.enbuild.2014.11.039>

⁶⁵ RE2020, Règles Th-Bat, Fascicule 3 "Parois vitrées" Annexe IV à l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, Août 2021. (§ 3.1.2).

Au périmètre des usages électriques considérés par la RE2020, l'énergie autoconsommée par un bâtiment est l'énergie produite localement par le bâtiment et qu'il consomme lui-même. Cette autoconsommation peut être déduite de l'indicateur C_{ep} calculée pour le bâtiment. *A contrario*, l'énergie produite localement mais exportée hors du bâtiment ne peut l'être. La FIGURE 11 CI-DESSOUS illustre ces notions :

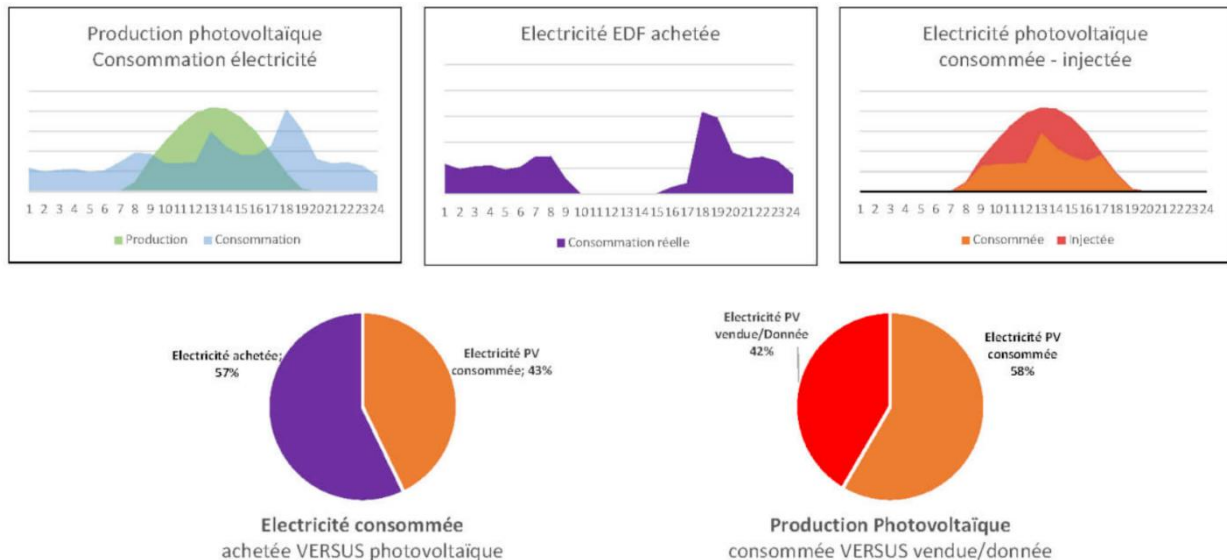


Figure 11 : Énergie photovoltaïque, notion d'autoconsommation (Forum photovoltaïque)

Source : "[Comprendre l'autoconsommation photovoltaïque : Je consomme quoi de ma production ?](https://www.forum-photovoltaïque.fr/viewtopic.php?f=90&t=37214&sid=724e7350d4c8abd53baf5d0939763faf)" Forum photovoltaïque, 2017 [en ligne] <https://www.forum-photovoltaïque.fr/viewtopic.php?f=90&t=37214&sid=724e7350d4c8abd53baf5d0939763faf>

2.2.2 Les technologies de panneaux photovoltaïques

Les technologies de cellule les plus répandues sur le marché sont LES CELLULES CRISTALLINES (monocristallines ou polycristallines), qui représentent 85% du marché mondial, et les CELLULES À COUCHES MINCES (CIGS, CdTE, cellule amorphe) qui représentent 10% du marché. (PEIGER ET BAUMANN, 2018 ⁶⁶; ALSHAYEB ET YANG, 2016 ⁶⁷). Elles sont illustrées en installation à la FIGURE 12 CI-DESSOUS.

En termes de rendement électrique, la première technologie citée ci-dessus peut aller jusqu'à 22% aujourd'hui (PEIGER ET BAUMANN, 2018 ; KALLIO SONJA ET AL., 2022 ⁶⁸). Certains travaux évoquent même des valeurs plus élevées, comme ALSHAYEB ET YANG en 2016 (27%). Pour la deuxième technologie, ces derniers auteurs font appel à une bibliographie qui place le rendement entre 13 et 19%.

Alors que l'on retrouve la TECHNOLOGIE CRISTALLINE dans les applications connectées au réseau électrique (injection) ou d'autoconsommation, la TECHNOLOGIE À COUCHES MINCES se retrouve spécifiquement dans les applications nomades ⁶⁹. La puissance crête d'un panneau solaire est la puissance optimale qu'il peut dégager dans les CONDITIONS STANDARD (STC), sur lesquelles nous reviendrons en SOUS-SECTION 2.2.6 CI-

⁶⁶ Peiger, Philippe, et Nathalie Baumann. *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018, p.139.

⁶⁷ Alshayeb, Mohammed, et Jae D. Chang. « *Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice* ». *Procedia Engineering*, vol. 145, 2016, p. 1104-09, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.143>.

⁶⁸ Kallio, Sonja, et Monica Siroux. « *Photovoltaic Power Prediction for Solar Micro-Grid Optimal Control* ». *Energy Reports*, vol. 9, 2023, p. 594-601, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.081>.

⁶⁹ Peiger et Baumann (2018), p.142.

DESSOUS. Au sein de l'Union Européenne, le contenu de la fiche technique d'un panneau photovoltaïque doit être conforme à la norme EN 50380.

Pour convertir l'énergie photovoltaïque, continue (DC) en courant alternatif (AC), l'on a recours à :

- un onduleur pour un ensemble de panneaux raccordés en série ou en parallèle ;
- ou à un micro-onduleur connecté en face arrière de chaque panneau.



Figure 12 : Photovoltaïque, Technologies à cellules cristallines, à cellules à couches minces

Sources : <https://www.ecovegetal.com/toitures-vegetales/heliovert-photovoltaique/>

<http://www.enerzine.com/1/12999+saint-gobain-lance-un-panneau-photovoltaique-a-couche-mince+.html>

2.2.3 Intégration des panneaux photovoltaïques en toiture

Comme le rapporte le site Internet de la Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité (CFSE) : les panneaux photovoltaïques sont intégrés ou surimposés sur le sol ou le bâti. La surimposition est le mode de pose le plus répandu en toiture. L'étanchéité n'est pas percée.⁷⁰ La CFSE précise un certain nombre de prescriptions, parmi lesquelles⁷¹ :

- Les éléments porteurs sont les éléments maçonnés, en tôle d'acier nervurées ou en bois/panneaux dérivés du bois (§ 6.1 des Recommandations) ;
- La nécessité de la réfection du système d'étanchéité dans le cas d'un bâtiment existant (§ 6.3) ;
- Le respect d'une hauteur minimale entre le bas de l'équipement photovoltaïque et le revêtement de toiture. Selon la largeur de panneau, cette hauteur vaut 0,4 ou 0,8 mètres (§ 8.1.1 des Recommandations), comme indiqué sur la FIGURE 13 CI-DESSOUS .

⁷⁰ Energie : les systèmes photovoltaïques sur toiture-terrasse [en ligne] <https://etancheiteinfo.fr/technique/energie-les-systemes-photovoltaïques-sur-toiture-terrasse>

⁷¹ Recommandations professionnelles sur la Mise en œuvre traditionnelle de capteurs solaires rapportés sur revêtement d'étanchéité en toiture-terrasse de la Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité, février 2011

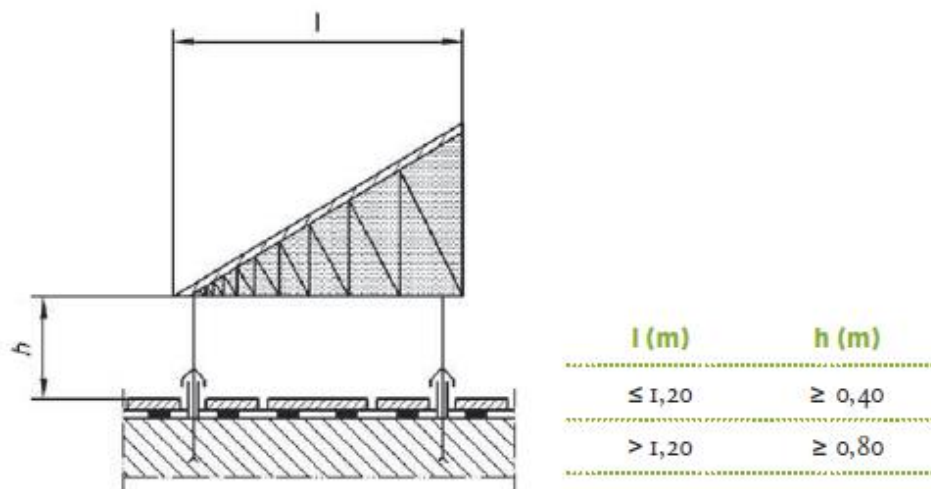


Figure 13 : Hauteur minimale d'un équipement solaire rapportée à l'étanchéité d'une sur étanchéité de toiture (Recommandations professionnelles de la CFSE, 2011)

2.2.4 Déclarations environnementales des systèmes photovoltaïques

Pour les panneaux photovoltaïques apparentés aux équipements électriques, électroniques ou de génie climatique, le document qui fait référence en matière d'analyse de cycle de vie n'est pas la FDES mais le PEP ÉCOPASSPORT®, aussi valide 5 ans. Les calculs conduisant au PEP se rapportent à la norme ISO 14 025, la NF C08-100-1 (2022) et selon le *Product Category Rules* PCR-ed3-FR-2015 04 02 (l'édition 3 est la plus rencontrée, l'édition 4 date de 2021).

En termes de modules, l'on retrouve un certain nombre de systèmes dans la base de données INIES. Au 04/05/2023, 7 déposants sont référencés pour les panneaux à cellules de silicium mono ou polycristallin⁷². Le Ministère de la Transition écologique y est également présent, pour ce qui est des données environnementales par défaut (DED), comme illustré sur la FIGURE 14 CI-DESSOUS :

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE – MINISTÈRE EN CHARGE DU LOGEMENT

Site internet: Pour toute demande de création et/ou de mise à jour de la DED, merci d'utiliser la plateforme Mlab disponible à l'adresse suivante : www.mdegd.dimn-cstb.fr

- ▼ Bâtiment 5
 - ▼ Équipements électriques, électroniques et de génie climatique 5
 - ▼ Production locale d'énergie 5
 - ▼ Générateur d'électricité 5
 - ▼ Modules photovoltaïques 5
 - ▼ Silicium cristallin (monocristallin, polycristallin) 5
 - Donnée par défaut Kit de fixation pour panneaux photovoltaïques [1 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Module photovoltaïque silicium monocristallin en surimposition [surface 5,38 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Module photovoltaïque silicium monocristallin intégré au bâti [surface 6,67 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Module photovoltaïque silicium multicristallin intégré au bâti [surface 12,14 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Tuiles solaires silicium monocristallin [surface 6,67 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT

Figure 14 : Modules photovoltaïques à cellules en silicium cristallin, base INIES au 18/04/2023

⁷² Les fabricants et leur localisation indiqués dans INIES sont : DUALSUN (13), EDILIANS (69), Photowatt EDF ENR PWT (38), SYSTOVI (44), VOLTEC SOLAR (67) et hors France REC SOLAR EMEA GmbH (Allemagne), JA SOLAR (Chine).

L'autre famille technologique aussi représentée est le module à couche mince. Pour celui-ci, INIES recense 1 déposant ⁷³ et le Ministère de la Transition écologique pour les DED, comme illustré à la FIGURE 15 CI-DESSOUS :

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE – MINISTÈRE EN CHARGE DU LOGEMENT

Site internet: Pour toute demande de création et/ou de mise à jour de la DED, merci d'utiliser la plateforme Mlab disponible à l'adresse suivante : www.mdegd.dimn-cstb.fr

- ▼ Bâtiment 3
 - ▼ Équipements électriques, électroniques et de génie climatique 3
 - ▼ Production locale d'énergie 3
 - ▼ Générateur d'électricité 3
 - ▼ Modules photovoltaïques 3
 - ▼ Couches minces 3
 - Donnée par défaut Module photovoltaïque organique [surface 25 m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Panneau photovoltaïque à couches minces CIS [surface=7,7m²] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT
 - Donnée par défaut Parement Photovoltaïque pour façade - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT

Figure 15 : Modules photovoltaïques à couches minces, base INIES au 18/04/2023

Nous revenons sur la notion d'unité fonctionnelle introduite à la SOUS-SECTION 1.2.2 CI-DESSUS et au GLOSSAIRE PAGE 123 : pour ces équipements photovoltaïques, l'unité fonctionnelle est variable. L'on peut retrouver : le mètre carré, le kilowatt crête, des valeurs spécifiques de puissance en watt crête. Une fois toutes les FDES présentes ramenées à l'unité fonctionnelle du kilowatt crête, l'indicateur de réchauffement climatique se situe entre 510 et 1 450 kg-eqCO₂ pour les panneaux photovoltaïques à technologie de cellules monocristallines. Le TABLEAU 2.2-1 CI-DESSOUS détaille les panneaux PV et les calculs effectués :

Tableau 2.2-1 : Technologie de panneau PV à 60 cellules monocristallines, quelques indicateurs de réchauffement climatique (6 éco-passeports PEP sous base INIES)

Fabricant de panneau	Impact carbone (kg-eqCO ₂ /UF)	Impact carbone (kg-eqCO ₂ /kWc)	Id PEP sur INIES
DUALSUN	694 (1 kWc)	694	30972 (2022)
SUNPOWER	204 (400 Wc)	510	34153 (2023)
JA SOLAR	418 (300 Wc)	1 390	11060 (2020)
VOLTEC SOLAR	776(1 kWc)	776	14125 (2020)
SYSTOVI	414 (300 Wc)	1 380	19757 (2020)
JINKO	485 (335 Wc)	1 450	34166 (2023)

La base INIES recense également d'autres types d'équipement rattachés à la production locale d'énergie à partir du Soleil, tels que les fixations, les tuiles solaires (2 fabricants et 6 documents au 04/05/2023). Les équipements comme les ONDULEURS sont également présents, par la présence de données mises à disposition par le Ministère de la Transition écologiques (DED).

⁷³ Le fabricant et sa localisation indiqués dans INIES sont : SUNPARTNER TECHNOLOGIES (13).

2.2.5 L'énergie solaire

La constante solaire donne la quantité d'énergie du Soleil à chaque seconde et reçue par 1 mètre carré. Elle vaut 1 367 W/m². En tenant compte des conditions atmosphériques et géographiques, le rayonnement reçu par une unité de surface horizontale peut être déterminé. À titre d'exemple, elle est 1 130 kWh/m²/an pour la ville de Paris, 945 pour Londres et 2 350 au Sahara. C'est dans une orientation plein sud et avec une inclinaison du panneau à 30 ° que la conversion en électricité est optimale dans un pays comme la France. Dans le cas de Lyon, par rapport à cette configuration optimale (plein sud, 30° d'inclinaison), l'on peut appliquer les coefficients de correction du gisement solaire présentés sur la FIGURE 16 CI-DESSOUS, (PEIGER ET BAUMANN, 2018) :

Orientation Inclinaison	O	SO	S	SE	E
0°	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
30°	0,90	0,96	1,00	0,96	0,90
60°	0,78	0,88	0,91	0,88	0,78
90°	0,55	0,66	0,68	0,66	0,55

Figure 16 : Facteur de correction du gisement solaire pour la latitude de Lyon, selon le Bureau d'études Soléis

Dans des pays au nord, comme la Norvège, l'inclinaison optimale se situe entre 30 et 60°, car l'exposition au soleil est plus faible, (PEIGER ET BAUMANN, 2018).

2.2.6 Modélisation des panneaux photovoltaïques

Le TABLEAU 2.2-2 CI-DESSOUS décrit les deux grandes approches que l'on peut retrouver dans la littérature, concernant les conditions de fonctionnement des cellules photovoltaïques :

- APPROCHE RÉALISTE (approche fabricants) : par le *NOCT* (température nominale de fonctionnement des cellules photovoltaïques) et qui se situe en moyenne entre 45 et 48 °C (état de l'art des technologies actuel) ;
- APPROCHE THÉORIQUE : les conditions *STC* pour conditions standard d'essai.

Tableau 2.2-2 : Cellules photovoltaïques, les deux approches des conditions de fonctionnement dans la littérature

Grandeur considérée	Conditions <i>NOCT</i>	Conditions <i>STC</i>
Éclairement des cellules (W/m ²)	800	1000
Température (°C)	20 (ambiante)	25 (cellules)
Vitesse de vent (m/s)	1	(prise en compte dans la température des cellules)
Type de répartition du rayonnement solaire (G)	Air mass = 1,5 x G	-

L'AM 1.5 global est l'un des spectres solaires de référence selon la norme ASTM G-173-03 (ISO 9845-1, 1992) pour pouvoir comparer les technologies photovoltaïques. AM signifie Air mass et 1,5 correspond au rapport entre le chemin optique du rayonnement solaire à travers l'atmosphère terrestre et ce chemin pour un soleil au zénith. Intégré sur l'ensemble des longueurs d'onde, il vaut 1000 W/m². (VILLEMIN, 2023 figure 2.33 « Spectre solaire AM1.5 »).

Les fabricants ont proposé cette approche car ils estimaient l'éclairement surestimé et la température des cellules (silicium) sous-estimée par les *STC*. Cette température de cellules peut désormais être estimée à partir du *NOCT* indiqué sur la fiche technique du module photovoltaïque. La formule est présentée à l'ÉQUATION 5 dans le TABLEAU 2.2-3 CI-DESSOUS. Les fabricants indiquent également la perte de puissance du panneau par degré Celsius au-dessus la température de cellules *STC* de 25 °C. Cette perte est exprimée en %/ °C et pour 1000 W/m² reçus.

Le panneau photovoltaïque atteint vite 50 °C, voire 75 °C (la température d'utilisation d'un panneau solaire varie de - 40 à + 85 °C)⁷⁴. De nombreux travaux ont contribué à mettre au point des modélisations prédictives pour la température de cellules et la production photovoltaïque sous forme de régressions linéaires (TAMIZHMANI L. JI, 2003 ; KING D.L., 2004 ; SKOPLAKI E. ET AL., 2009). La FIGURE 17 CI-DESSOUS illustre l'évolution un 26 septembre, des profils de température de l'air ambiant, au dos du panneau photovoltaïque⁷⁵ :

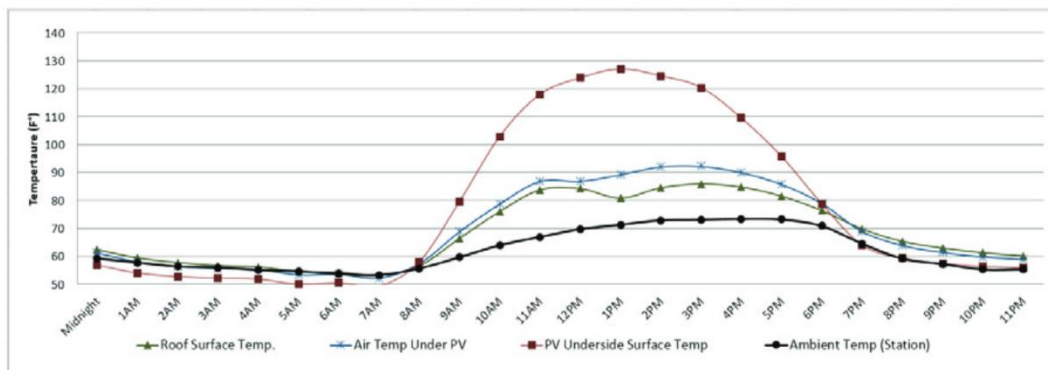


Figure 4: PV-green thermal performance

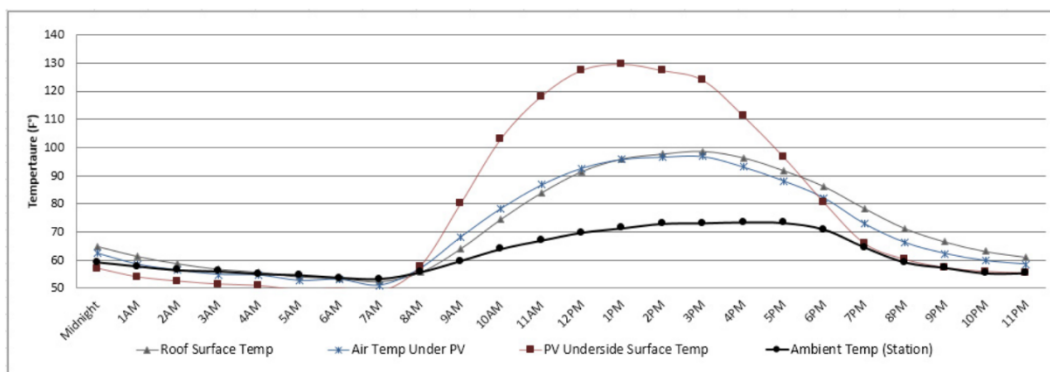


Figure 5: PV-black thermal performance

Figure 17 : Évolution des températures toiture/air/dos du panneau PV/station météo (ALSHAYEB ET AL., 2016)

En 2013, NAGENGAST E. ET AL. publient également des travaux basés sur ce type de régression, avec une forte corrélation entre la température au dos du panneau PV et la température de cellule. Les équations exploitées sont les suivantes :

- $y_1 = \beta_0 + \beta_1 \times x_1$, où y_1 et x_1 sont respectivement la température au dos du panneau PV et la température ambiante. β_0 et β_1 sont des coefficients.

⁷⁴ "Qu'est-ce que le coefficient de température d'un panneau photovoltaïque ?" [en ligne] <https://www.jade-technologie.com/coefficient-de-temperature-panneau-photovoltaique/>

⁷⁵ . Pour rappel, pour obtenir la température en °C, on retranche 32 à la valeur en ° F, puis on divise par 1,8. Soit au pic de la courbe « *PV underside surface temperature* » pour la toiture végétalisée : 54 °C en face arrière de panneau, 35 °C de l'air sous le panneau et à la surface de la toiture et 22 °C à la station météo de référence.

- $y_2 = y_1 + \frac{x_2}{x_0} \Delta T$ (reprise de KING ET AL., 2004), où y_2 , y_1 , x_2 et x_0 et ΔT sont respectivement la température de cellule, la température au dos du panneau PV, le rayonnement solaire, le rayonnement solaire de référence (1000 W/m²) et l'écart en température pour un rayonnement de 1000 W/m² entre le dos du panneau et la cellule du panneau PV ;
- $y_3 = \beta_2 + \beta_3 \times y_2 + \beta_4 \times x_2$, où y_3 , β_2 et β_3 et β_4 y_2 et x_2 sont respectivement la production électrique en sortie d'installation photovoltaïque, des coefficients, la température de cellule et le rayonnement solaire incident sur le panneau PV ;

Ces chercheurs qualifient le coefficient de température de la puissance crête (μ exprimé en °C⁻¹), comme impropre à estimer la production d'énergie photovoltaïque d'une installation, car les 1 000 W/m² ne sont pas représentatifs des climats réels. Par exemple, dans le cas de l'expérimentation qui est restituée par les chercheurs, le rayonnement solaire moyen est de 335 W/m² en journée, à l'échelle de 17 343 mesures sur un an (Pittsburg, États-Unis).

Dans la littérature scientifique, l'on retrouve aussi les modélisations sur lesquelles s'appuie PVGIS et ses moteurs de calcul, comme :

- l'estimation de l'énergie en sortie d'un système photovoltaïque (HULD ET AL., 2011) ⁷⁶ ;
- l'estimation de la température du module photovoltaïque (FAIMAN, 2008) ⁷⁷ ;
- l'estimation d'un coefficient de perte de performance due au systèmes et à leur vieillissement (JORDAN ET AL., 2013) ⁷⁸.

Quelques formules liées à l'énergie photovoltaïque sont reportées dans le TABLEAU 2.2-3 CI-DESSOUS :

Tableau 2.2-3 : Modélisation du photovoltaïque, équations et formules

Grandeur	Modélisation littérature scientifique
Rayonnement solaire incident	$G = G_{direct} + G_{diffus} + G_{réfléchi}$ <p style="text-align: center;">Équation 1</p>
Température en face arrière du module	$y_1 = \beta_0 + \beta_1 \times x_1$ <p style="text-align: center;">Équation 2 (NAGENGAST ET AL., 2013)</p> <p>où y_1 et x_1 sont respectivement la température au dos du panneau PV et la température ambiante. β_0 et β_1 sont des coefficients</p>
Température du module	$T_m = T_a + \frac{G}{(U_0 + U_1 \times W)}$ <p style="text-align: center;">Équation 3 (FAIMAN, 2008)</p> <p>où T_a est la température ambiante et W la vitesse du vent U_0 et U_1 sont des coefficients qui s'expriment respectivement en W/(°C.m²) et W.s/(°C.m³)</p>
	$T_m = T_{dosPV} + \frac{G}{G_{ref}} \times \Delta T_{1000 W/m^2}$ <p style="text-align: center;">Équation 4</p>

⁷⁶ Huld, Thomas, et al. « A Power-Rating Model for Crystalline Silicon PV Modules ». Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 95, no 12, 2011, p. 3359-69, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.026>.

⁷⁷ Faiman, D. « Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules ». Prog. Photovolt. Res. Appl. 2008

⁷⁸ Jordan D.C. and Kurtz S. R. « Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review ». Prog. Photovolt. Res. Appl. 2013

	(KING ET AL., 2004)
	$T_m = T_{air} + \frac{(NOCT - 20) \times IRR}{800}$ <p style="text-align: center;">Équation 5</p> <p>Où IRR est le produit du rayonnement horizontal, du coefficient air mass (1,5) et d'un coefficient basé sur le coefficient de transmission-absorption du panneau PV et de son rendement de puissance crête par m².</p>
Energie en sortie du panneau PV	$P = \frac{G}{1000} \times A_{eff}[G, T_m] = \frac{G}{1000} \times A_{eff_nom} \times eff_{rel}[G, T_m]$ <p style="text-align: center;">Équation 6</p> <p>Où $eff_{rel}[G', T'_m] = 1 + k_1 \times \ln(G') + k_2 \times \ln(G')^2 + k_3 \times T'_m + k_4 \times \ln(G') + k_5 \times T'_m \ln(G') + k_6 \times T'_m^2$ et $G' = \frac{G}{1000}$ et $T'_m = T_m - 25$</p> <p style="text-align: center;">(HULD ET AL., 2011)</p>
	$P_{PV} = \eta_{STC} \times S_{PV} \times F_m \times G \times (1 - \mu \times (T_m - T_{m_STC}))$ <p style="text-align: center;">Équation 7</p> <p>(source : UrbanPrint, voir caractéristiques du panneau PV, à L'ANNEXE 6.2, PAGE 105)</p> <p>Où est η_{STC} le rendement STC (en Wc/m²), F_m le coefficient de modulation vis-à-vis des pertes de connectique et écart entre les points de puissance maximale des panneaux ⁷⁹, μ est le coefficient de température de la puissance crête (en °C⁻¹), T_{m_STC} vaut 25 °C</p>
Energie en sortie d'onduleur	$P_{ond} = \eta_{ond} \times P_{PV}$ <p style="text-align: center;">Équation 8</p> <p>Où η_{ond} est le rendement de l'onduleur</p>

2.3 La végétalisation des toitures

2.3.1 Système constructif d'une toiture végétalisée

2.3.1.1 Structure en couches de la toiture

La toiture végétalisée est un complexe multicouche mis en place au-dessus d'une toiture. Ses composants fondamentaux sont :

- la membrane anti-racines qui complète ou fait partie de l'étanchéité de la toiture ;
- la couche de drainage ;
- le filtre ;
- le substrat ;
- et la couche végétale.

En s'appuyant sur les Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées ⁸⁰, l'on peut illustrer la composition d'une toiture végétalisée comme sur la FIGURE 18 CI-DESSOUS :

⁷⁹ Notion de « mismatch » : voir « Qu'est-ce qu'un mismatch ? », Atelier solaire, 2019. [en ligne] <https://ateliersolaire.ch/le-mismatch/>

⁸⁰ La plus récente édition : Edition N°3, ADIVET, CFSE et AFPPS, 2018.

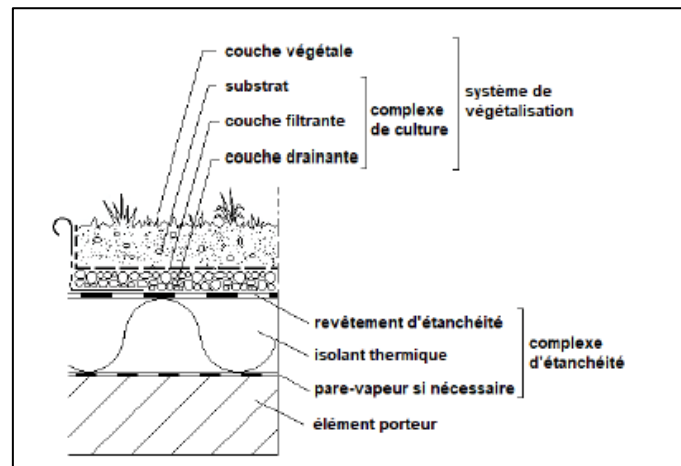


Figure 18 : Couches composant une toiture végétalisée (Règles Professionnelles TTV 2018)

Dans ces mêmes Règles professionnelles, l'on peut retrouver le découpage observé à la SOUS-SECTION 1.2.1 CI-DESSUS : toitures (pente inclinée) et terrasses (pente faible). Ainsi les terrasses sont de pente inférieure à 3% et les toitures inclinées sont de pente supérieure ou égale à 3%. La fourchette de pente joue un rôle déterminant dans la conception des toitures végétalisées. En effet, par exemple LUCKETT, K. ET GOUADEC D. (2011), soulignent qu'à partir de 16-20% de pente, il faut prévenir le glissement du substrat ⁸¹. Ils indiquent qu'à cette fin, le substrat est compartimenté.

La végétalisation extensive est plus appropriée que l'intensive pour une application avec une installation photovoltaïque pour trois raisons (LAMANATOU ET AL., 2015) :

- La hauteur des plantes ;
- Leur poids ;
- Et autres facteurs (esthétique, intégration du bâtiment).

2.3.1.2 Approche structurelle

La transformation de toitures existantes en toitures végétalisées intensives suppose une augmentation d'armatures structurelles, car les nouvelles charges mécaniques ne sont pas négligeables (OBERNDORFER ET AL., 2007). Différentes recherches se sont intéressées à comparer divers types de toiture de ce point de vue structurel et ont quantifié les conséquences sur le dimensionnement (BRACHET A., 2016 ; COMA ET AL., 2016 ; EL BACHAWATI ET AL., 2016 ; KOURA ET AL., 2020). Il faut compter 224 kg/m² de plus en rapportant de la végétalisation selon BRACHET A. (2016) et 290 selon EL BACHAWATI ET AL. (2016), dans un cas d'étude d'une surface de 834 m² de toiture. L'article d'ALINE BRACHET ET AL. (2019) ⁸², indique que l'épaisseur de la dalle béton en toiture végétalisée extensive est de même épaisseur que pour la toiture conventionnelle (20 cm). Dans le cas d'une pose de toiture végétalisée semi-intensive, il faut 5 cm additionnels et 10 additionnels pour la toiture végétalisée intensive.

Dans ses travaux d'analyse des impacts en biodiversité de la construction, ALINE BRACHET (2020), identifie également le complément de matériaux nécessaire pour le renforcement des structures dans le cas des toitures semi-intensives et intensives (sujet des impacts en biodiversité abordés à la SOUS-SECTION 2.3.8.1 CI-DESSOUS).

⁸¹ Lockett, K., Gouadec D. « *Toits verts, construction et maintenance* ». Dunod, 2011. § 5.2 « Pente du toit » p.75.

⁸² Brachet, Aline, et al. « Biodiversity Impact Assessment of Building's Roofs Based on Life Cycle Assessment Methods ». *Building and Environment*, vol. 158, 2019, p. 133-44, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.014>.

2.3.1.3 La protection anti-racines

Pour assurer la fonction anti-racines entre le système racinaire des végétaux et la structure du bâtiment, l'on trouve sur le marché :

- Des membranes d'étanchéité à base de bitume-polymère (SBS) avec incorporation de dés herbant à la fabrication ;
- Des membranes d'étanchéité à base d'EPDM, dont la fonction anti-racines est intrinsèque, mais au-dessus desquelles on vient dans la pratique poser un géotextile pour prolonger leur longévité (selon PEIGER P. ET BAUMANN N., 2018, p. 30).

Les Règles Professionnelles TTV s'appuient sur le classement FIT ⁸³. La résistance du revêtement au poinçonnement peut être classé de I1 à I5 (5 étant la meilleure classe). Elle se décompose en deux sous-classes de résistance statique et dynamique au poinçonnement. Les Règles Professionnelles spécifient une classe I5 de l'étanchéité pour toitures végétalisées, ce qui correspond à une résistance au poinçonnement statique L4 et dynamique D3.

2.3.1.4 Guides, normes et codes

Nous proposons ici un bref tour d'horizon des normes à travers quelques pays :

Tableau 2.3-1 : Toitures végétalisées, les guides et normes pour quelques pays

Pays	Norme ou référentiel technique
Allemagne	FLL guidelines
Royaume-Uni	the Gro Green Roof Code
Italie	the UNI11235
États-Unis	the ASTM standards
Suisse	SIA 312
France	RP TTV

Le guide FLL a un fort rayonnement international. Il est brièvement présenté au TABLEAU 2.4-1 CI-DESSOUS. C'est aussi ce guide qui est porteur du CBS décrit à la SOUS-SECTION 1.2.4 CI-DESSUS.

L'article L171-4 du Code de la Construction et de l'Habitation, ajouté au code par la loi dite « *climat et résilience* » en 2021, prévoit des seuils d'installation de systèmes de production d'énergie renouvelable et/ou de la végétalisation sur certains bâtiments et parties de bâtiments, en neuf et en rénovation. Il fixe des seuils de proportion de la surface de toiture pour trois échéances :

- 30% au 1^{er} juillet 2023 ;
- 40% en 2026 ;
- Et 50% en 2027 ⁸⁴.

En application de cet article, il y a actuellement en France un projet de décret en Conseil d'Etat et ses deux arrêtés ⁸⁵. Les exigences qui ressortent sont présentées dans le TABLEAU 2.3-2 CI-DESSOUS :

⁸³ FIT : classement des étanchéités sur leurs performances de résistance à la fatigue (« f »), au poinçonnement (« i » : *indentation* en anglais) et à la température (« t »).

⁸⁴ Sur la loi « *climat et résilience* » et l'article L171-4 du CCH, voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

⁸⁵ Sur la base des documents joints à la consultation publique qui était ouverte du 13 juin au 04 juillet 2023 intitulée « *Projet d'un décret et deux arrêtés précisant les conditions d'application de l'article L171-4 du code de la construction et de l'habitation et demandant l'installation d'énergies renouvelables ou de végétalisation en toiture de bâtiment* ». Voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

Tableau 2.3-2 : Toitures végétalisées, projet réglementaire d'exigences minimales sur le substrat, les végétaux et la rétention en eau

Thème	Exigence en neuf	Exigence en rénovation
substrat	10 cm minimum	8 cm minimum
végétaux	Au moins 10 espèces végétales	
Rétention d'eau	Capacité de rétention maximale en eau de 35% minimum en volume (CME)	

2.3.2 Les plantes

Originellement, les *Sedum* ont été les premières espèces à être considérées pour les toitures végétalisées (PEIGER P. ET BAUMANN N., 2018). Cela tient notamment à leurs faibles besoins en eau, en maintenance, en apport solaire et à leur capacité à résister aux températures extrêmes. SEYEDABADI ET AL. ont publié une étude en 2021 sur 50 plantes pour déterminer leur applicabilité en toitures végétalisées ⁸⁶, en se basant sur les travaux de AGRA ET AL. (2017), RICKARD (2011) ET WEINSTEIN (1999) :

- 5 sont exclues du fait de leurs besoins en lumière solaire ;
- 19 du fait de leurs besoins en eau ;
- et 12 du fait de leur manque d'adaptation aux climats froids et secs.

La FIGURE 19 CI-DESSOUS présente quelques plantes pour la végétalisation des toitures, dont les *Sedum* :

⁸⁶ Seyedabadi, Mohammad Reza, et al. « Plant Selection for Green Roofs and Their Impact on Carbon Sequestration and the Building Carbon Footprint ». *Environmental Challenges*, vol. 4, 2021, p. 100119, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>.



Figure 19 : Toitures végétalisées, exemples de plantes (Ecovegetal, Atec n° 5.2/19-2655_V2)

2.3.2.1 Capacité à évapotranspirer

La définition de l'évapotranspiration a été donnée à la SOUS-SECTION 1.2.3 CI-DESSUS. Il faut noter qu'elle est fonction du type de plante. L'ouvrage de PEIGER ET BAUMANN rapporte en effet que les *Sedum* (plantes grasses), transpirent peu. Les graminées et les arbustes évapotranspirent plus. Que ce soient les *Sedum* ou les graminées, ces espèces ont toutes les deux un mécanisme d'autoprotection en cas de forte chaleur. Les premières adaptent leur feuillage pour faire des réserves en eau et les secondes s'assèchent pour reprendre leur cycle à la sortie de la forte chaleur.

Toit de graminées
(Suisse).
©Jonatan
Malmberg



Figure 20 : Toiture composée de graminées (Suisse)

Sédum et mousse
en toiture
(France).
©Karine Peiger



Figure 21 : Toiture composée de *Sedum* et de mousse (France)

source : PEIGER P. ET BAUMANN N. (2018)

La capacité d'évapotranspiration est un critère pris en compte dans l'analyse multicritère qui sera présentée à la SOUS-SECTION 2.3.2.3 CI-DESSOUS (LAMNATOU ET AL. 2015) ⁸⁷.

2.3.2.2 Capacité à réfléchir les rayons

Selon LAMNATOU ET AL. (2015), l'albédo des plantes est en lien avec la couleur du feuillage. Les feuillages les plus clairs présentent les plus hauts albédos. De plus, en s'appuyant sur MACIVOR ET AL. ⁸⁸, les auteurs précisent que sur une végétalisation mêlant plantes à sol sec et plantes à sol humide, augmenter la présence des premières amène une amélioration de l'albédo de la surface, et à l'inverse, augmenter les plantes à sol humide, le dégradent. Concernant les *Sedum*, plantes à sol sec ⁸⁹, ils rapportent un résultat d'albédo de 0,15, mesuré au Japon sur 2 jours à ciel dégagés en septembre (YUJIRO ET AL., 2006) ⁹⁰ et un résultat de 0,19 correspondant à la moyenne de mesures réalisées sur un mois de juillet à New-York (GAFFIN SR ET AL., 2009). L'on peut essayer de rapprocher cet ordre de grandeur :

- À la valeur d'albédo qui valait 0,3 dans le cas d'étude de SAILOR D. J. en 2008 (voir SOUS-SECTION 2.3.9 CI-DESSOUS). Les valeurs sont ici plus faibles ;
- Et au coefficient d'absorption solaire affiché par les Règles Th-Bat de la RE2020. En effet, ces dernières donnent à considérer une valeur de 0,7 pour les toitures extensives et de 0,4 pour les toitures intensives ⁹¹. L'albédo en toiture végétalisée extensive correspond alors exactement au cas d'étude SAILOR D. J. précité.

Enfin, une autre assertion importante tirée des travaux de LAMNATOU ET AL. (2015) est la suivante : une végétalisation clairsemée réduit l'albédo de la végétalisation. Ainsi le taux de couverture végétal est primordial.

Nous revenons plus en détails sur la grandeur d'albédo à la SOUS-SECTION 2.1 CI-DESSUS.

2.3.2.3 Analyse multicritère pour le choix des plantes d'une toiture végétalisée

LAMNATOU ET AL., qui ont publié plusieurs études en 2014 et 2015 proposent une approche multicritère de quatorze plantes, pour la conception d'une toiture végétalisée extensive ou biosolaire ⁹² (LAMNATOU ET AL., 2015). Elle se fonde sur quatre critères eux-mêmes décomposés en deux à quatre sous-critères. Le résultat de l'analyse selon ces critères est reporté dans le TABLEAU 2.3-3 CI-DESSOUS :

En synthèse, l'analyse multicritère menée par ces chercheurs démontre que :

- Les *Sedum clavatum*, *G. rigens* sont les plus adaptées pour les toitures végétalisées extensives et biosolaires ⁹³ ;
- Les *A. maritimus* et *Geranium molle* peuvent être envisagées en alternative ;
- Les *Lobularia maritima*, les *Cynodon dactylon* également, mais par rapport aux variétés ci-dessus, elles présentent une moins bonne résistance aux conditions climatiques extrêmes et un plus fort besoin de maintenance ;

⁸⁷ Lamnatou, Chr., et D. Chemisana. « A Critical Analysis of Factors Affecting Photovoltaic-Green Roof Performance ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, 2015, p. 264-80, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.

⁸⁸ MacIvor, J. Scott, Melissa A. Ranalli, and Jeremy T. Lundholm. "Performance of Dryland and Wetland Plant Species on Extensive Green Roofs." *Annals of Botany* 107, no. 4 (2011): 671-679. Accessed July 13, 2023. <https://academic.oup.com/aob/article-lookup/doi/10.1093/aob/mcr007>.

⁸⁹ Sédum, Plante d'extérieur [en ligne] <https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/sedum>

⁹⁰ Yujiro H, Toshiaki I. "Observation and characterization of the surface heat budget on a rooftop planted with Sedum"

⁹¹ RE2020, Règles Th-Bat, sous-section 4.3.1.3.3. Voir SITOGRAPHIE, PAGE 120.

⁹² Une toiture biosolaire est une toiture végétalisée où des panneaux photovoltaïques sont implantés. La SOUS-SECTION 2.4 est consacrée à cette technique.

⁹³ Voir note de bas de page précédente.

- *Dianthus fruticosus* est plutôt envisageable en toiture végétalisée simple, étant donné sa hauteur de plante ;
- Les *Coreopsis pubescens*, *Rosmarinus officinalis*, *Organum vulgare* sont plus adaptées à la VÉGÉTALISATION SEMI-INTENSIVE des toitures ;
- Les *Trifolium* ne sont appropriées ni pour la végétalisation extensive, ni pour le biosolaire en toiture, notamment en raison de leur faible résistance au stress hydrique.

L'on peut aussi retrouver une liste des plantes adaptées dans :

- Les Règles Professionnelles Toitures-terrasses végétalisées en France, qui présentent une liste des végétaux disposant d'un retour d'expertise significatif (TTVE et TTVSI) ;
- L'ouvrage de PEIGER P. ET BAUMANN N. (2018) pour la France (voir pp. 230-237) et pour la Suisse (voir pp. 238-245).

Dans la SOUS-SECTION 2.3.10 CI-DESSOUS, les solutions appropriées au type de climat seront évoquées (hautes températures).

La sélection des plantes mises en œuvre sur une toiture végétalisée est cruciale, la revue de littérature ci-dessus l'a énoncé. Cependant, nous allons voir dans la section suivante qu'elles ne font pas encore partie des composants sous Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES).

ECO-CONCEPTION DES ESPACES BÂTIS : LA VÉGÉTALISATION EST-ELLE UN LEVIER DE PERFORMANCE POUR L'ÉNERGIE ET LA BIODIVERSITÉ LOCALES ? CAS DES TOITURES BIOSOLAIRES

Tableau 2.3-3 : Approche multicritère de sélection des plantes pour la végétalisation extensive de toiture (Lamnatou et al., 2015, tables 3, 4,5 et 6)

Critère	Sous-critère	<i>Gazania rigens</i>	<i>Asteriscus maritimus</i>	<i>Coreopsis pubescens</i>	<i>Rosmarinus officinalis</i>	<i>Origanum vulgare</i>	<i>Lamium maculatum</i>	<i>Sedum clavatum</i>	<i>Lobularia maritima</i>	<i>Dianthus fruticosus</i>	<i>Geranium molle</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Trifolium repens</i>	<i>Trifolium rubens</i>
Interaction plantes/PV	Albédo	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	1	3	3
	Évapotranspiration	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	3	1	3	1
	Hauteur	3	3	2	1	2	3	3	3	1	3	3	2	3	1
	Compacité	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	3	1	3	2
Interaction plantes/bâtiment	Teneur en eau du feuillage	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
	Densité du feuillage	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3
Compatibilité avec TTVE	Racines superficielles	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1
	Besoins en nutriments	3	3	3	2	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3
	Besoins en irrigation	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2
	Résistance aux maladies	3	3	3	2	3	3	3	3	3	1	3	2	2	3
Résistance aux conditions climatiques extrêmes	Rayonnement direct	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	3	3	2	3
	Sécheresse	3	3	3	2	3	1	3	2	2	3	2	2	2	2
	Gel	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3	3
	Vent	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	3
Interaction avec l'environnement	Réduction de la température urbaine	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3
	Attraction insectes, pollinisateurs, augmentation de biodiversité urbaine	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Autres facteurs	Bénéfices acoustiques	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3
	Intérêt médicinal	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
	Esthétique	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	3
TOTAL		52	52	49	44	49	49	54	48	46	52	47	36	49	46

2.3.3 Discussion sur la qualité environnementale des composants dans la littérature

Nous avons pu trouver des positions émettant quelques critiques sur quatre types de produit du marché actuel que sont l'étanchéité anti-racines, le substrat, la couche drainante et une des formes de la couche végétale, le « tapis » précultivé » :

1 - Dans leur ouvrage paru en 2018, PEIGER P. ET BAUMANN N. affichent une opposition à l'étanchéité bitumineuse et sa variante anti-racinaire obtenue par l'adjonction de désherbant, voué à se libérer dans le temps, par l'effet du ruissellement des eaux qui érodent les membranes, étude de l'Eawag et de l'Office fédéral de l'environnement suisse à l'appui. Les auteurs rappellent que leur durabilité n'est assurée que pour 20 ans, contre 30 pour les étanchéités EPDM. La membrane EPDM qui présente un anti-racines mécanique est donc à privilégier. Cependant, en termes de durabilité inégalable, les auteurs évoquent les étanchéités en écorce de bouleau, dont on a des exemples dans des toitures végétalisées en Islande et en Norvège, en place depuis plus de 500 ans. En termes de marché, les auteurs précisent que l'écorce de bouleau mériterait un développement pour cet usage. Une autre perspective évoquée par les auteurs est le recours à l'étanchéité liquide, à base d'eau, tels que les produits développés par le fournisseur Pazkar Nor (Norvège). Les auteurs qualifient ce produit de plus écologique du marché de l'étanchéité ⁹⁴.

2 - Les auteurs reviennent sur la composition possible pour le substrat en recommandant qu'il contienne idéalement 70 à 90% de matière minérale ou inorganique et 10 à 30% de matière organique. Les auteurs prônent l'éviction des substrats de composition essentiellement minérale, qu'ils qualifient de "très mauvaise qualité", généralement à base de tourbe qui provient de loin « *Irlande et pays de l'Est* » et qui est extraite de « *milieux humides asséchés* ». De plus, elle est « *très vite dégradable* » ⁹⁵.

3 - Ils détaillent aussi la couche drainante pour laquelle ils demandent d'éviter le modèle en plaques de polystyrène, voire ils invitent à se passer de cette couche par le choix d'un substrat plus épais qui réalisera cette fonction ⁹⁶.

4 - Enfin, les auteurs décrivent les systèmes de tapis précultivés comme à proscrire, car ils présentent une épaisseur de substrat comprise entre 2 et 6 cm. Ces gammes végétales sont composées de 1 à 5 espèces différentes et sont donc très peu favorables à la biodiversité et au développement des services écosystémiques ⁹⁷. Nous reviendrons sur cette notion de services écosystémiques à la SOUS-SECTION 2.3.8 CI-DESSOUS.

En écho au point 1 ci-dessus, la ville de Paris expose la recommandation suivante dans un de ses documents guide : « *Les membranes avec protection anti-racines mécanique sont à préférer aux membranes avec une protection chimique pour éviter tout risque de pollution des eaux de pluies par les produits chimiques* » ⁹⁸.

Une autre approche possible de la qualité environnementale est celle des impacts sur la biodiversité, elle est décrite à la SOUS-SECTION 2.3.8.1 CI-DESSOUS.

⁹⁴ Peiger, Philippe, et Nathalie Baumann. *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018, p.13, 30, 16, 128, 45 et 46 (dans l'ordre d'utilisation pour la rédaction du présent mémoire).

⁹⁵ Op. cit., Peiger P. et Baumann N., p.21, pp. 100-110, 161.

⁹⁶ Op. cit., Peiger P. et Baumann N., pp. 110-115, p. 128.

⁹⁷ Op. cit., Peiger P. et Baumann N., p.5, 14, 21 et 91.

⁹⁸ « Guide des toitures végétalisées et cultivées, toutes les étapes pour un projet de qualité », Ville de Paris, 2022 [en ligne] [LTV-LVR-A4-ToituresVegetalisees-220907.indd \(paris.fr\)](#).

2.3.4 Introduction au macro-composant « toiture végétalisée » dans la base INIES

En matière d'éléments de toiture végétalisée, la base INIES recense 13 produits pour 7 fabricants, comme l'illustre la FIGURE 22 CI-DESSOUS. Le huitième déposant est le Ministère de la Transition Écologique qui détient 5 Données environnementales par défaut (DED), depuis 2018 et elles font l'objet d'une mise à jour régulière pour rester valides (5 ans). La FIGURE 22 CI-DESSOUS illustre aussi le découpage actuel de la famille de produits « Couverture/étanchéité ». Il est à noter qu'en dehors de la rubrique bien nommée « *Éléments de toiture végétalisée* », l'on retrouve les produits se rapportant spécifiquement ou indirectement aux toitures végétalisées dans une autre rubrique libellée « *Produits pour étanchéité de toiture* ». En effet, l'on peut y trouver deux « *Feuilles à base de bitume* » du fabricant INDEX⁹⁹, à base d'adjuvants chimiques anti-racinaires ainsi que les feuilles EPDM sous marque Firestone¹⁰⁰. Il a été vérifié que ces étanchéités EPDM et SBS présentes dans INIES sont conformes au classement FIT I5 demandé par les Règles Professionnelles Toitures-terrasses végétalisées¹⁰¹. Comme présenté à la SOUS-SECTION 2.3.1.3 CI-DESSUS, une classe I5 est prescrite pour les étanchéités de toitures végétalisées.

En synthèse, dans la base INIES nous trouvons :

- 2 étanchéités anti-racinaires chimiques (INDEX, iD INIES 35815 et 35616) ;
- 2 étanchéités mécaniques (Firestone, iD 18587 et 18588) ;
- 2 couches de drainage en polystyrène expansé (DED du ministère de la transition écologique) ;
- 1 couche de drainage minérale/matières organiques du marché (SOPREMA, iD 30801) ;
- 1 filtre trouvé en dehors de la rubrique toiture végétalisée mais qui réunit des caractéristiques similaires à ce qui se rencontre dans les fiches et Atec de solutions végétalisées (géotextile en polypropylène, 300 g/m², DED iD 31398 du Ministère de la transition écologique) ;
- 8 substrats (Ministère TE ; Ecovegetal, Soprema, Sika, Primevère et EVTm) ;
- 0 couche végétale indépendamment de systèmes végétalisés tout faits ;
- 2 systèmes tout-en-un pour toiture végétalisée (Knauf Insulation, iD 29973 et Vertige, iD 29555).

Toutes les FDES et DED concernent majoritairement la toiture végétalisée extensive, hormis les DED de toitures végétalisées semi-intensive (iD 31650) et intensive (iD 31651) et 3 FDES qui sont TVE/TVSI (données équivalentes dans les fiches d'iD 27394, 27981 et 27539).

Pour rebondir sur les préceptes exposés dans la SOUS-SECTION 2.3.3 CI-DESSUS :

- 1 ÉTANCHÉITÉ : nous avons trouvé un produit d'étanchéité avec une fonction anti-racinaire mécanique ;
- 2 SUBSTRAT : Il y en a 8, mais 3 sont de la même origine (Primevère, Sika et EVTm). Le substrat de SOPREMA assurerait les fonctions de couche drainante ;
- 3 COUCHE DRAINANTE : seul le produit de SOPREMA n'est pas en polystyrène expansé. Les couches drainantes présentes sont distinctes du substrat, sauf pour le produit SOPREMA qui assurerait également des fonctions de substrat comme vu ci-dessus ;
- 4 TAPIS PRÉCULTIVÉ : omniprésent parmi les formes de couche végétale des complexes complets de végétalisation de toiture (d'après les fiches techniques associées aux éléments de toitures végétalisées sous FDES).

⁹⁹ Feuilles à base de bitume du fabricant INDEX : FDES d'iD 35815 et 35616 dans la base INIES au 14/04/2023.

¹⁰⁰ Feuille à base d'EPDM sous marque Firestone : FDES d'iD 18587 et 18588 dans la base INIES au 14/04/2023.

¹⁰¹ En se référant à la fiche technique pour INDEX https://www.indexspa.it/Indexspacom/Tecnoplan/Pdf/FLEXTER_TESTUDO_ANTIRACINE-FR.pdf consulté le 25 mai 2023 et à l'Atec 5.2/18-2618_V1 pour Firestone : https://www.cstb.fr/pdf/atec/GS05-F/AF2182618_V1.pdf.

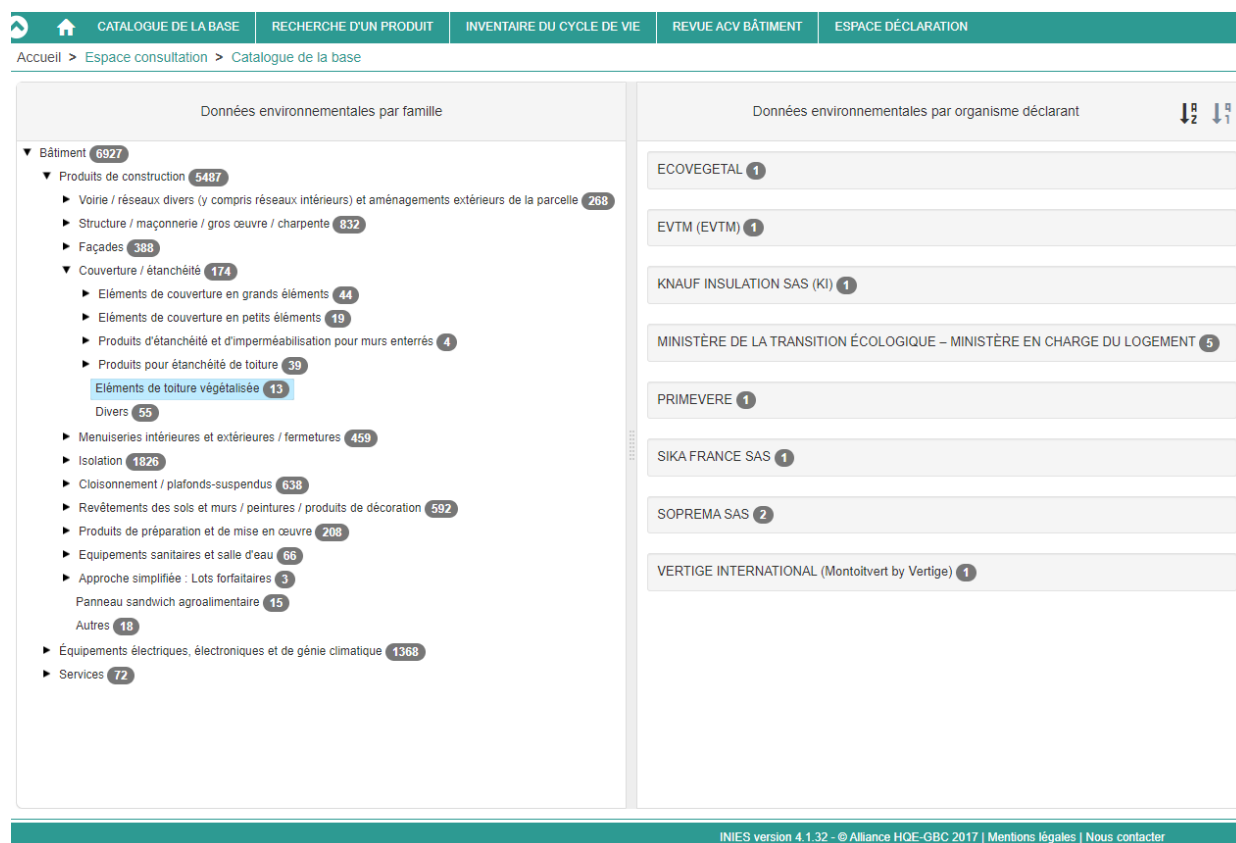


Figure 22 : Capture d'écran des titulaires et du nombre de produits sous FDES sous la classe "Éléments de toiture végétalisée" (rubrique couverture/étanchéité) ; base INIES au 14/04/2023

Source : base INIES [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> - consulté le 14/04/2023

L'UNITÉ FONCTIONNELLE est l'unité à laquelle se rapporte les différents indicateurs environnementaux indiqués dans la FDES. En consultant les FDES disponibles dans INIES pour les étanchéités avec fonction anti-racines, couche de drainage, filtre non spécifique de type géotextile, substrat de toitures végétalisée, l'on relève deux UNITÉS FONCTIONNELLES distinctes :

- le m² de toiture : étanchéité, drainage, filtre et quelques substrats ;
- le m³ : pour un substrat de la base.

Les impacts environnementaux du substrat exprimés au m² de surface de toiture, le sont en fait pour une épaisseur de substrat indiqué dans la FDES. L'on comprend donc bien que la quantification des impacts environnementaux de la toiture végétalisée soit fortement liée à l'épaisseur du substrat. Et comme celle-ci varie avec le volume apporté (épaisseur), l'idée développée dans la thèse d'ALINE BRACHET en 2020 est bien vérifiée : en termes d'impacts *ex-situ*, la toiture végétalisée extensive est moins impactante que ne le sont la semi-intensive et l'intensive (le volume de substrat augmente) ¹⁰².

¹⁰² Brachet, Aline, thèse. *Méthodologie d'évaluation hybride des interactions entre la biodiversité et les systèmes urbains : vers une synergie entre l'Analyse de Cycle de Vie, l'expertise écologie et la data science*. Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS, 16 juillet 2020, <https://theses.hal.science/tel-03433005>.

2.3.5 Performance environnementale selon l'analyse des FDES et selon la littérature scientifique

Ce qui suit est une analyse de FDES de quatre produits : deux substrats et deux systèmes de toiture végétalisée tout-en-un.

SAXALIS 1.1 est un produit dont la FDES disponible sur INIES indique qu'il assure la fonction de substrat pour 1 m² de toiture végétalisée et 4 cm d'épaisseur. Il est composé de terre cuite concassée, pouzzolane, billes d'argile et compost de déchets verts. Il s'agit donc d'un substrat minéral enrichi en matières organiques ¹⁰³. La FDES ne donne pas d'information sur l'irrigation ou sur une quelconque consommation d'eau ou d'énergie durant la vie en œuvre. En effet : « *Aucune opération d'entretien, ni utilisation d'eau ou d'énergie ne sont nécessaires pendant la vie en œuvre du SAXALIS 1.1. Les flux d'inventaire, et donc les impacts des modules B2-B7 sont donc nuls.* »

Le second produit qui sera ici décrit est SOPRAFLOR X, sous Atec, et pour lequel la FDES disponible sur INIES considère 1 m³ d'unité fonctionnelle. Toujours selon ce document, SOPRAFLOR X peut à la fois assurer la fonction de couche de drainage et celle de substrat de culture. La pouzzolane, la ponce et l'écorce de résineux entre dans sa composition. Il s'agit donc également d'un substrat minéral enrichi en matières organiques ¹⁰⁴. La FDES ne donne pas d'information sur l'irrigation. Il n'y a aucune mention de consommation d'eau ou d'énergie et la justification à cela est : « *les substrats SOPRAFLOR X étant des supports de culture de plantes, un entretien régulier sous forme d'arrosage [...]. En revanche, cet entretien est relatif aux plantes, et non aux produits SOPRAFLOR X en tant que tel. Il est donc considéré que les substrats peuvent assurer leur fonction de couche de drainage et de culture durant toute leur durée de vie sans entretien particulier* ».

Intéressons-nous ensuite à un troisième produit, le procédé complet Vertige, sous Atec, qui pour un mètre carré de toiture assure la fonction de « *système de végétalisation extensive d'épaisseur 60 mm, accueillant une ou plusieurs variétés de sedum, intégrant un dispositif d'irrigation autonome* ». Le procédé est principalement fabriqué à partir de pouzzolane (63,1%) et tourbe pour le substrat, de fibre de coco et *Sedum* pour la couche végétale, de chanvre et jute, Polyéthylène (PE) et Polyéthylène haute densité (PEHD) pour l'irrigation et la rétention, de Polypropylène (PP), pour la couche de drainage ¹⁰⁵. Pour la vie en œuvre du produit, la FDES mentionne que la seule utilisation d'énergie et d'eau concerne l'irrigation. Cela concerne la phase B7 du cycle de vie ¹⁰⁶. À l'échelle de l'unité fonctionnelle (1 m² de toiture), il y a ainsi une utilisation de 7,09 Mégajoules d'énergie primaire renouvelable, 58,0 MJ d'énergie primaire non renouvelable. La consommation d'eau pour l'irrigation se répartit entre trois sources différentes : l'eau de ville (75%), les eaux pluviales (15%) et l'eau de puits (10%), soit un scénario de consommation de 250 L/m²/an. Il en résulte une utilisation nette d'eau douce de 12,6 m³ par unité fonctionnelle de produit.

Enfin, considérons le produit tout-en-un Urbanscape, sous Atec, qui peut présenter jusqu'à 10 cm d'épaisseur totale, et dont la couche végétale se compose de rouleaux pré-cultivés comptant « *jusqu'à 12 espèces de Sedum différentes [...], d'un filet biodégradable et d'une couche à base de pierre ponce et de fibre de coco* ». Sous cette couche végétale se trouve une couche assurant les fonctions de substrat de culture

¹⁰³ « DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Substrat SAXALIS 1.1 », ECOVEGETAL, mars 2023 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

¹⁰⁴ « Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire Substrat de culture pour toiture végétalisée », SOPRAFLOR X », Soprema, Mai 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

¹⁰⁵ « Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire Procédé de végétalisation des toitures Vertige classique », Vertige, Avril 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

¹⁰⁶ Voir phases du cycle de vie sur la FIGURE 2, PAGE 22.

et de rétention d'eau. Elle est à base de laine de roche. Le substrat est donc minéral. Cette couche recouvre à son tour la couche de drainage à base de polypropylène ¹⁰⁷.

Pour illustrer la performance environnementale sur un dernier point, LE TABLEAU 2.3-4 CI-DESSOUS présente les caractéristiques environnementales des quatre produits ci-dessus sur la base de 3 critères pressentis par le projet d'arrêté décrit à la SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSUS (épaisseur de substrat, CME et nombre d'espèces) :

Tableau 2.3-4 : Caractéristiques de solutions pour toitures végétalisées sous FDES dans un échantillon du marché français

Base INIES		Matières premières et Fabrication			Vie en œuvre			Critères de la future réglementation	
Dénomination commerciale de produit	ID de FDES	Type de substrat	Épaisseur de substrat dans la FDES	Pays d'origine des	irrigation	énergie	fertilisation	CME du substrat	Nombre d'espèces végétales
Substrat Saxalis 1.1 de Ecovegetal	33839 (v1.2)	minéral enrichi en matières organiques	4 cm (10 dans l'Atec)	NI	0	0	oui (selon Atec)	52,2 ou 61,5 L/m ²	NA
Substrat Sopraflor X de Soprema	30802 (v1.3)		Entre 4 et 9 cm en semis/planté et entre 3 et 8 cm en tapis (cf Atec)	NI	0*	0*	Non*	≥ 35% selon Atec	NA
TTV Vertige classique de Vertige	29555 (v1.1)		3 cm	NI	12 m ³ /UF	65 MJ/UF	oui	40,7 L/m ² (FT ¹⁰⁸)	1 à 2 <i>Sedums</i> (6 à 10 selon FT)
TTV UrbanScape de Knauf Insulation	29973 (v1.1)	minéral	2 ou 4 cm selon FT ¹⁰⁹	Pays-Bas, Slovaquie	2,2.10 ⁻⁴ m ³ /UF	0,32+2,98 MJ/UF	Tous les 5 ans	25 ou 37 L/m ² (contre 31,1 ou 44,2 sur FT)	≤ 12

* : est imputée aux plantes, qui ne sont pas au périmètre de la FDES ; « **NI** » : signifie « non indiqué » ; « **NA** » : « ne s'applique pas » ; **PT** : pas trouvé dans l'avis technique ; **FT** : fiche technique.

¹⁰⁷ FDES d'ID 29973 sous INIES : « Knauf Insulation Urbanscape® Green Roof Air (Incluant une végétation extensive, hors éléments de pose et membrane d'étanchéité) », Knauf Insulation, mai 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

¹⁰⁸ <https://www.montoitvert.fr/wp-content/uploads/2019/12/classeur-technique-mon-toit-vert-by-vertige-lt.pdf>

¹⁰⁹ « Urbanscape GreenRoof, le concept innovant pour la végétalisation des toitures », Knauf Insulation, septembre 2019 [en ligne] <https://pim.knaufinsulation.com/files/download/knauf-insulation-toits-vegetaux-maquette-29-08.pdf>

D'un point de vue quantitatif et pour ce qui est des complexes complets Vertige Classique et Urbanscape seuls, le critère de 10 espèces végétales minimum du projet d'exigences présenté à la SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSUS semble atteignable. En revanche, les substrats rencontrés dans l'échantillon considéré sont :

- Dans tous les cas, d'épaisseur ne répondant ni aux préconisations de PEIGER P. ET BAUMANN N. (voir SOUS-SECTION 2.3.3 CI-DESSUS), ni au projet d'exigences minimales présenté à la SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSUS ;
- Soit seulement minéraux, soit minéraux mais plus (compost) ou moins (tourbe) enrichis en matières organiques. Ainsi, ces substrats se trouvent plutôt loin des standards préconisés par les auteurs précités, tels qu'un enrichissement en matières organiques entre 20 et 30%.

De plus, nous avons mis en avant les probables exigences minimales à venir en France, mais PHILIPPE PEIGER ET NATHALIE BAUMANN (2018) avancent que la présence de 10 à 50 espèces minimum par mètre carré est l'une des garanties du bon fonctionnement de la toiture végétalisée et que l'épaisseur de son sol ne doit pas être inférieure à 6 cm ¹¹⁰.

VOICI UNE PRÉSENTATION NON EXHAUSTIVE DE L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES DANS LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE ET PLUS PRÉCISÉMENT EN MATIÈRE D'ACV :

Dans les travaux scientifiques, l'on trouve une disparité des périmètres des phases prises en compte pour élaborer l'analyse du cycle de vie. Les résultats sont bien différents en fonction du type de TTV (épaisseur de substrat), des matériaux composant les couches fonctionnelles, etc.

Dans une revue de littérature sur les travaux scientifiques en matière d'ACV, PICCININI SCOLARO T. ET GHISI E. (2022) ¹¹¹ relèvent quelques alternatives aux composants d'impact carbone les plus importants dans certaines approches :

- Une toiture végétalisée évitant les matières premières usuelles en polymère et privilégiant les matériaux polymères recyclés pour la couche drainante conduit à une meilleure ACV que si cette couche était en gravier, perlite ou pouzzolane. Il n'y a ni filtre ni membrane anti-racines dans cette étude (RINCÓN ET AL., 2014) ;
- Une toiture végétalisée la plus simple possible et sans couche drainante ni membrane anti-racines (KURONUMA ET AL., 2018).

De plus, trois études sont citées pour avoir démontré des impacts environnementaux des toitures végétalisées plus importants sur les phases de fabrication (CARPENTER ET ZHOU, 2013 ; YAO ET AL., 2018), mise en œuvre et fin de vie (YAO ET AL., 2018). Des résultats qui seraient compensés par leurs performances en phase de vie en œuvre telles que les économies d'énergie induites sur les besoins de chauffage (CARPENTER ET ZHOU, 2013 ; CUBI ET AL., 2016 ; YAO ET AL., 2018). Enfin, dans l'ACV à l'échelle du bâtiment et concernant sa phase de vie en œuvre, les auteurs citent SAIZ ET AL. (2006), qui insistent sur l'importance de considérer la fertilisation, et l'alimentation du substrat, ses besoins en eau ainsi que les consommations d'énergie pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment. ALINE BRACHET ET AL. (2019) évoquent aussi quelques exemples de matériaux recyclés employés dans les toitures végétalisées pour le substrat : compost et terre cuite concassée.

La durée de vie des plantes est à prendre en considération dans l'analyse du cycle de vie d'une toiture végétalisée. La durée de vie d'une toiture végétalisée est située entre 30 et 50 ans par la littérature scientifique, cependant, la fin de vie des plantes installées dans la toiture végétalisée amène à des

¹¹⁰ Peiger, Philippe, et Nathalie Baumann. *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018

¹¹¹ Scolaro, Taylana Piccinini, et Enedir Ghisi. « Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Literature Review of Layers Materials and Purposes ». *Science of The Total Environment*, vol. 829, 2022, p. 154650, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>.

contrôles de la qualité des autres composants de la végétalisation, en vue de poursuivre son exploitation et avant de remplacer ces plantes asséchées (PERI G. ET AL., 2022) ¹¹² ou d'envisager le réemploi des composants si le système doit complètement être déposé. Toujours dans ces mêmes travaux, l'équipe de chercheurs vise une proposition pour le démantèlement d'une toiture végétalisée. Cela avant sa fin de vie justement, quand elle est encore en bon état, afin que des analyses chimiques approfondies ne soient pas nécessaires avant élimination. L'équipe a également mené un décryptage du référentiel législatif en vigueur sur les déchets et leurs traitements. Et pour ce qui concerne notre pays voisin, l'Italie, il n'existe pas de filière de traitement de la couche de drainage, qui n'est répertoriée dans aucune famille de déchets plastiques prise en charge (après emploi, car le recyclage en process industriel existe).

Dans leur revue des travaux scientifiques en matière d'analyse de cycle de vie des toitures végétalisées, PICCININI SCOLARO T. ET GHISI E. (2022) ¹¹³ identifient que les méthodologies d'analyse n'incluent pas systématiquement la structure au périmètre, car elle est commune à toutes les toitures, qu'elles soient conventionnelles ou végétalisées. Elle n'est prise en compte que dans 43% des travaux scientifiques englobés dans cette revue de littérature.

2.3.6 Cas spécifique de la couche végétale

Nous l'avons vu plus haut, la couche végétale ne dispose pas de FDES à ce jour, sauf à considérer les systèmes complets et leurs tapis précultivés, mais les FDES ne distinguent pas les couches fonctionnelles. Par sa thèse en 2020, ALINE BRACHET a amorcé un travail d'élaboration des données environnementales pour les végétaux (impacts *ex situ*), avec une identification préalable dans la base FloraCity. La base FloraDE ainsi initiée met à disposition les fiches environnementales collectives de :

- 8 espèces de plantes succulentes ;
- 39 espèces d'herbacées ;
- 8 espèces d'arbustes ;
- 1 espèce d'arbre (l'érable du Japon).

Le

TABLEAU 2.3-5 CI-DESSOUS détaille les espèces au périmètre de ces travaux scientifiques, pour chaque famille de plantes :

¹¹² Peri, Giorgia, et al. « Disposal of Green Roofs: A Contribution to Identifying an "Allowed by Legislation" End-of-Life Scenario and Facilitating Their Environmental Analysis ». *Building and Environment*, vol. 226, 2022, p. 109739, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109739>.

¹¹³ Scolaro, Taylana Piccinini, et Enedir Ghisi. « Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Literature Review of Layers Materials and Purposes ». *Science of The Total Environment*, vol. 829, 2022, p. 154650, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>.

Tableau 2.3-5 : Listes des espèces des données environnementales collectives, Aline Brachet, base FloraDE (thèse, 2020, Annexe 8)

Famille	Espèces
Plantes succulentes	<i>Sedum reflexum, Sedum album, Sedum floriferum, Sedum lydium, Sedum sexangulare, Sedum acre, Euphorbia Myrsinites, Delosperma Cooperi</i>
Herbacées	<i>Achillea Umbellata, Achillea crithmifolia, Achillea millefolium, Achillea tomentosa, Epimedium grandiflorum, Dianthus geltoides, Hosta hybrida, Lamium gaculatum, Petasites hybridus, Rodgersia pinnata, Erigeron karvinskianus, Duchesnea indica, Pachysandra terminalis, Deschampsia cespitosa, Cerastium tomentosum, Koeleria glauca, Alyssum montanum, Festuca glauca, Festuca gautieri, Carex Ornithopoda, Carex Oshimensis, Koeleria Glauca, Silene Schafta, Festuca Ovina, Fragaria Vesca, Origanum Vulgare, Geranium Macrorrhizum, Vinca Minor, Bergenia Cordifolia, Acaena microphylla, Ajuga Reptans, Heuchera Cassandra, Artemisia Schmidtiana 'Nana', Alchemilla Mollis, Vinca Major, Arabis Caucasica, Cerastium Tomentosum, Fragaria Vesca, Armeria Maritima</i>
Arbustes	<i>Thym serpyllum, Thym Pseudolanuginosus, Potentilla Nepalensis 'MissWillmott', Potentilla Aurea, Satureja Montana, Hyssopus officinalis, Salvia Officinalis, Santolina Chamaecyparissus</i>

Après information, ces données sont en cours de re-traitement par l'intéressée au sein et pour se conformer au format normatif attendu par le CSTB.

Pour éclairer l'aménagement du territoire et de sa favorisation de la biodiversité, ALINE BRACHET esquisse la perspective de valoriser les services écosystémiques rendus par la nature à l'être humain par l'intermédiaire de flux de pollution négatifs dans l'ACV.

2.3.7 Séquestration et stockage carbone

Les plantes *Sedum acre, Frankenia thymifolia, and Vinca Major* absorbent respectivement 0,143 ; **2,070** et 0,607 kg de carbone par m² de toiture végétalisée sur une année et réduisent les émissions de GES respectivement de 28,16 ; 26,48 et 23,44 kg-eqCO₂/m² par an (SEYEDABADI, MOHAMMAD REZA ET AL., 2021 ¹¹⁴).

2.3.8 Approche des autres services écosystémiques

Nous avons traité le service de séquestration et de stockage carbone rendu par la végétalisation à la SOUS-SECTION 2.3.7 CI-DESSUS. Les autres services sont : les bénéfiques pour la biodiversité, l'inertie thermique, les économies d'énergie et bien d'autres. Une présentation de ces services est proposée ci-dessous.

2.3.8.1 Bénéfices pour la biodiversité

De nombreux travaux ont voulu montrer l'intérêt des toitures végétalisées pour favoriser la biodiversité (WILLIAMS, LUNDHOLM, MACIVOR, 2014 ; BERARDI ET AL., 2014 ; SHAFIQUE, 2018). ALINE BRACHET (2020) propose une analyse des impacts des systèmes urbains sur la biodiversité par l'étude des impacts certes *in-situ* mais aussi *ex-situ* :

¹¹⁴ Seyedabadi, Mohammad Reza, et al. « Plant Selection for Green Roofs and Their Impact on Carbon Sequestration and the Building Carbon Footprint ». *Environmental Challenges*, vol. 4, 2021, p. 100119, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>.

- D'UN POINT DE VUE *EX-SITU*, la toiture végétalisée intensive présente des impacts les plus importants et la TVE les moins importants (plus de matériaux dans la TVI) ;
- ET A *CONTRARIO*, D'UN POINT DE VUE *IN-SITU*, la TVI présente les impacts les plus faibles et la TVE les plus importants (plus de variétés de plantes dans la TVI).

Déjà en 2019, ALINE BRACHET ET AL. ¹¹⁵, qui ont calculé l'analyse de cycle de vie du berceau à la porte¹¹⁶ de différentes toitures, à l'aide des méthodes ReCipe 2016 et Impact World + ¹¹⁷, observent que :

- Parmi les 3 types de toitures végétalisées, la TVE est celle causant la perte en biodiversité la plus faible (un tiers de moins que la TVI) ;
- Toutes les TTV ont un impact sur la biodiversité inférieur à celui des toitures conventionnelles (couverture dalle béton ou gravier).

La FIGURE 23 CI-DESSOUS synthétise le résultat de la comparaison menée par ces chercheurs :

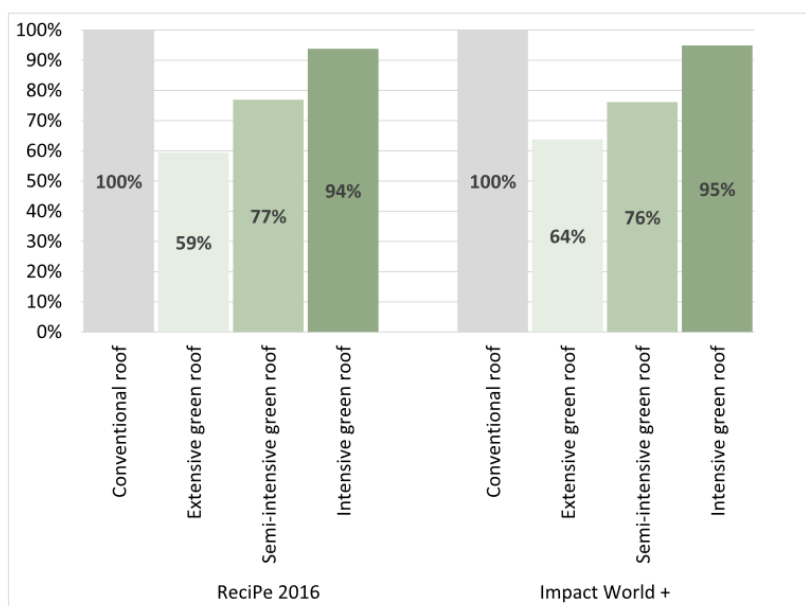


Figure 23 : Impacts *ex-situ* en termes de biodiversité des systèmes de toiture végétalisée par rapport à la toiture conventionnelle (Brachet et al., 2019, figure 3)

À noter que dans le substrat modélisé pour le calcul (argile, compost, briques concassées), c'est l'argile qui cause le plus d'impact sur la biodiversité hors du site, notamment de par la cuisson au charbon considérée pour sa production. Dans ces travaux, les impacts sur la biodiversité sont aussi souvent exprimés en pdf.m².an. Une valeur exprimée en pdf (Potentialy Disappeared Fraction of Species) représente « *la fraction d'espèces potentiellement disparues pour un espace et un temps donné (Humbert, De Schryver, Margni, & Jolliet, 2002)* ».

2.3.8.2 Inertie thermique et économies d'énergie

Il existe également de très nombreux travaux scientifiques sur le gain D'INERTIE THERMIQUE ou de performance thermique offerts par les toitures végétalisées :

¹¹⁵ Brachet, Aline, et al. « Biodiversity Impact Assessment of Building's Roofs Based on Life Cycle Assessment Methods ». *Building and Environment*, vol. 158, 2019, p. 133-44, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.014>.

¹¹⁶ NF EN ISO 14040 et 14044, normes qui cadrent l'Analyse du Cycle de Vie et avec les 16 modules identifiés par la NF EN 15798 (Évaluation de la performance environnementale des bâtiments).

Le périmètre ACV « du berceau à la porte » est décrit à la SOUS-SECTION 1.2.2 CI-DESSUS.

¹¹⁷ Pour rappel, ces calculs n'englobent que les impacts négatifs et donc pas le gain en biodiversité apporté par la couche végétale ni le gain de capacité à recevoir des espèces (habitat potentiel).

- Pour un substrat qui passe de 20 à 30 cm, SAILOR D. J. (2008) aboutit à une baisse de consommation d'énergie de 2800 MJ au mois de décembre et de 200 MJ sur l'été, dans une simulation d'un bâtiment sur deux niveaux, 4 000 m² dans la ville de Chicago.
- Dans leur article, LAMNATOU ET AL. (2015) exposent qu'un parterre de plantes succulentes contribue à l'inertie thermique du toit.
- CASCONI ET AL., (2018) ET COMA ET AL., (2016) comparent la PERFORMANCE THERMIQUE des bâtiments, entre la toiture végétalisée et la toiture conventionnelle ¹¹⁸ ;
- La contribution des toitures végétalisées au rafraîchissement de l'air intérieur (climat chaud) et à son chauffage (hiver), avec de meilleurs résultats quand l'épaisseur d'isolation est réduite (JAFFAL I., OULDBOUKHITINE S.E., BELARBI R., 2012 ; SILVA CRISTINA M. ET AL., 2016) ¹¹⁹.

En termes de choix de plantes, SEYEDABADI, MOHAMMAD REZA ET AL. (2021) démontrent une certaine économie d'énergie par la toiture végétalisée, en fonction des variétés de plantes sélectionnées. Respectivement pour les trois plantes considérées *Vinca Major*, *Frankenian thmifolia* et *Sedum acre*, la consommation d'énergie chute de 7,1 ; 8 et 8,5% pour un bâtiment de 150 m² sur 4 niveaux.

2.3.8.3 Autres bénéfiques

Les autres services écosystémiques sont :

- La lutte contre le PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (Wang, Xun, et al., 2022 ¹²⁰ ; GELETIČ ET AL., 2022 ¹²¹). La combinaison murs et toitures végétalisées est aussi étudiée (FEITOSA R.C. ET AL., 2020) ;
- L'amélioration de la QUALITÉ DE L'AIR (ouvrage LUCKETT, K. ET GOUADEC D., *Toits verts, construction et maintenance*. Dunod, 2011) ;
- La gestion des EAUX DE PLUIE ET D'ORAGE (CRISTIANO E. ET AL., 2022 ; ALIM MOHAMMAD A. ET AL., 2022 ; ouvrage PEIGER P. ET BAUMANN ET AL., 2018 ; NICHOLSON ET AL., 2012) ;
- L'amélioration de la PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE (grâce aux propriétés du feuillage), qui sera abordée dans la SOUS-SECTION 2.4 CI-DESSOUS.

2.3.9 Modélisation dans les outils de simulation énergétique

Cette modélisation repose principalement sur l'albédo, introduit plus haut. Un deuxième paramètre identifié est le LAI. Le *Leaf Area Index*, rapport adimensionnel de la surface projetée de feuillage par unité de surface de sol couverte. Il entre en ligne de compte pour intégrer le phénomène d'évapotranspiration des feuilles (SAILOR D. J., 2008 ; CATALANO C. ET BAUMANN N., 2017). Il dépend du type de plantes. Pour les toitures végétalisées, le LAI est généralement compris entre 0,5 et 5,0. SAILOR D. J. (2008) a développé un module spécifique à la simulation énergétique des toitures végétalisées dans l'outil EnergyPlus ¹²². L'utilisateur doit saisir un certain nombre de paramètres d'entrée tels que la hauteur des plantes, le LAI, l'albédo des feuilles, l'épaisseur de substrat, sa masse volumique/sa conductivité thermique/sa capacité de chaleur massique à sec, etc. Le chercheur a ensuite simulé un cas d'étude dans ce module, en considérant un scénario de référence et six scénarios de variation sur le LAI, l'épaisseur de substrat et les conditions d'irrigation. En définitive, il démontre que ces trois paramètres et l'augmentation

¹¹⁸ Rapport de stage interne de Michel Tannous, Master M1, 2020, Efficacity.

¹¹⁹ Cossou, Béline. *Végétalisation sur structure bois*. Master 2, Ministère de la Transition Ecologique (DGALN/DHUP/QC2), 3 septembre 2020 (TFE ENTPE).

¹²⁰ Wang, Xun, et al. « The Effectiveness of Cool and Green Roofs in Mitigating Urban Heat Island and Improving Human Thermal Comfort ». *Building and Environment*, vol. 217, 2022, p. 109082, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>.

¹²¹ Geletič, J., et al. « High-Fidelity Simulation of the Effects of Street Trees, Green Roofs and Green Walls on the Distribution of Thermal Exposure in Prague-Dejvice ». *Building and Environment*, vol. 223, 2022, p. 109484, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109484>.

¹²² Energyplus : <https://energyplus.net>

d'épaisseur en particulier, ont un impact significatif sur la consommation d'énergie en été et en hiver. Tout en permettant l'abaissement de la consommation annuelle, le LAI en passant de 2 à 5, induit une surconsommation d'énergie en hiver, due à l'ombrage qui diminue l'absorption d'apport solaire par la toiture dans le bâtiment. SAILOR D. J. a validé son modèle de détermination de la température de surface du toit végétalisé à partir d'un an de données sur une plateforme expérimentale située en Floride. Il obtient un biais moyen de 2,9°C et une erreur quadratique moyenne de 4,1 °C par rapport à ces données expérimentales ¹²³. Le calcul de transfert thermique par la toiture végétalisée est ensuite réalisé.

Dans ce cas d'étude, l'albédo de la surface végétalisée est pris égal à 0,3. L'épaisseur de substrat est, elle, prise à 20 cm dans le scénario de référence. Les propriétés considérées pour le substrat sont exposées dans le TABLEAU 2.3-6 CI-DESSOUS :

Tableau 2.3-6 : Quelques caractéristiques physiques d'un substrat sec ou saturé en humidité (Sailor D. J., 2008)

Caractéristique	Substrat sec dans le cas d'étude	Modélisation du substrat saturé en humidité
Conductivité thermique (W/m.K)	0,4	+ 50%
Masse volumique (kg/m ³)	500	-
Capacité de chaleur massique (J/kg.K)	1000	+ 40%

D'autre part, suite à l'introduction de la définition générale du facteur de transmission solaire au sens des Règles Th-Bat la RE2020 à la SOUS-SECTION 2.1 CI-DESSUS, le

Tableau 2.3-7 CI-DESSOUS présente les formules à appliquer selon cette méthode pour déterminer celui des toitures végétalisées. Ses règles Th-Bat proposent des valeurs par défaut pour le gain en résistance thermique apporté par la toiture végétalisée, en différenciant l'épaisseur de substrat sec (6 ou 14 cm) et le type de drainage (en polystyrène ou autre) ¹²⁴. Les valeurs par défaut indiquées par la méthode sont 0,15 et 0,30 m².K/W⁻¹ pour l'épaisseur de 6 cm de substrat contre 0,30 et 0,45 pour 14 cm de substrat :

¹²³ Sailor, D. J. « A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs ». *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 8, 2008, p. 1466-78, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.

¹²⁴ RE2020, Règles Th-Bat [en ligne] https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/annexeiv_arrete_4_aout_2021.pdf, § 4.3.1.3.3, consulté le 03 août 2023.

Tableau 2.3-7 : Méthode RE2020 Règles Th-Bat, Détermination du facteur solaire des parois opaques en conditions d'hiver et en conditions d'été

	Paroi opaque classique	Paroi opaque végétalisée
Hiver (condition C) ¹²⁵	$S_{p-c} = \alpha_p \times U_{p-c} \times R_{se-c}$ <p style="text-align: center;">Équation 9</p>	$S_{c,p} = \frac{1}{2} \times S_{E,p}$ <p style="text-align: center;">Équation 10</p>
Été (condition E) ¹²⁶	$\frac{1}{U_{p-E}} = \frac{1}{U_{p-c}} - (R_{se-c} + R_{si-c}) + (R_{se-E} + R_{si-E})$ $S_{p-E} = \alpha_p \times U_{p-E} \times R_{se-E}$ <p style="text-align: center;">Équation 11</p>	$\frac{1}{U_{p-E,veg sec}} = \frac{1}{U_{p-c}} - (R_{se-c} + R_{si-c}) + (R_{se-E} + R_{si-E}) + \Delta R_{veg}$ $S_{E,p} = \alpha_{p,veg} \times U_{p-E,veg sec} \times R_{se-E} \times [100 - \Delta t_{hum}]$ <p style="text-align: center;">Équation 12</p>
Description des grandeurs	<p>S : facteur solaire de la paroi</p> <p>α : coefficient d'absorption solaire de la paroi</p> <p>U : coefficient de transmission thermique surfacique de la paroi</p> <p>R_{se} : la résistance thermique superficielle extérieure de la paroi</p> <p>R_{si} : la résistance thermique superficielle intérieure de la paroi</p> <p>Δt_{hum} : pourcentage du temps où le substrat reste humide durant l'été</p> <p>ΔR_{veg} : gain de résistance thermique additionnelle dû aux couches de drainage et de substrat de la végétalisation</p>	

Pour les toitures végétalisées, l'humidité du substrat variant en fonction des conditions météorologiques, le terme Δt_{hum} permet de moduler la valeur de facteur solaire obtenue. Les règles Th-Bat de la RE2020 proposent des valeurs par défaut pour ce terme de modulation, selon l'épaisseur de substrat, selon qu'il y ait irrigation ou non et selon la zone climatique du projet. Ainsi, par exemple à Mâcon (zone climatique H1c), Δt_{hum} vaut :

- 25% sans irrigation pour une végétalisation extensive contre 20 quand elle est semi-intensive ;
- 75% avec irrigation automatique de 20 mm d'eau par semaine à l'année (végétalisation extensive), contre 50 (végétalisation semi-intensive).

La RE2020 explicite également d'autres valeurs comme celles de résistance superficielle extérieure¹²⁷. Des formules et les grandeurs étant explicitées ci-dessus, l'on comprend qu'au sens de la RE2020 :

- la durée d'humidité de substrat augmentant, le facteur solaire diminue ;
- et l'augmentation du gain de résistance thermique par la végétalisation a le même effet¹²⁸.

À défaut de pouvoir mettre en œuvre la méthode de calcul ci-dessus, la RE2020 et ses règles Th-Bat proposent des valeurs par défaut en alternative. Ces valeurs par défaut sont fonction de la résistance

¹²⁵ Pour les parois opaques, la RE2020 définit les conditions aux limites "C" comme les "conditions pour le calcul des consommations d'énergie, à retenir à la fois pour les locaux climatisés et non-climatisés".

¹²⁶ Pour les parois opaques, la RE2020 définit les conditions aux limites "E" comme les "conditions pour le calcul du confort thermique d'été et le dimensionnement des systèmes de refroidissement".

¹²⁷ Pour aller plus loin, voir guide RE2020 « Saisie des facteurs solaires » des parois opaques de l'enveloppe bâtiment [en ligne] https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09_parois_opaques_sp.pdf

¹²⁸ La notion de performance thermique et épaisseur d'isolation dans le cas d'une toiture végétalisée est évoquée à la SOUS-SECTION 2.3.8.2 CI-DESSUS.

thermique de l'isolant de toiture (0, 2, 5 ou 7 m².K/W), du type de toiture végétalisée (extensive ou semi-intensive) et de la zone climatique du projet ¹²⁹.

Dans la littérature scientifique nous pouvons nous référer à (SAILOR D. J., 2008), qui explicite un lien linéaire entre la variation d'humidité et celle de propriétés thermiques du sol. Suite à des essais de laboratoire sur 8 substrats différents, deux règles générales ont été établies pour les substrats saturés en humidité par rapport aux substrats secs :

- la capacité de chaleur spécifique est 40% plus importante ;
- la conductivité thermique, 50% ;
- l'albédo admet une limite basse de 0,08 (ajout progressif d'humidité).

Pour construire sa modélisation d'une construction végétalisée, SAILOR D. J. a paramétré un bâtiment de référence en considérant entre autres :

- une isolation de toiture de 12,5 cm et une conductivité thermique de 0,049 W/m.K ;
- une surface de toiture existante présentant un albédo de 0,3 ;
- un scénario d'irrigation avec 20 mm d'eau par semaine ¹³⁰.

2.3.10 Discussion

La limite des toitures extensives est que l'épaisseur de substrat étant la plus faible, c'est la typologie de TTV qui est la moins favorable à la biodiversité *in-situ*. La limite des toitures intensive est sa forte épaisseur, d'un point de vue des impacts environnementaux des matériaux.

Les toitures végétalisées ont toujours été conçues pour pouvoir se suffire des eaux de pluie comme apport d'eau. Mais avec la raréfaction des pluies, la problématique de l'irrigation devient cruciale en matière de toiture végétalisée. Même pour les toitures végétalisées où l'irrigation n'est pas prévue, les premiers temps de mise en place impliquent un arrosage, une irrigation. Dans les localités à faible pluviométrie, la solution d'irrigation est souvent indispensable. En effet, l'irrigation des plantes confère alors un contrôle de température et contribue à la survie des plantes (C. VAN MECHELEN ET AL., 2015). Une étude d'une toiture végétalisée en Israël – où la plus large partie de la pluviométrie, 680 mm annuels, se concentre entre novembre et mars - conclut que de meilleurs bénéfices en termes de biodiversité et production photovoltaïque seraient prévisibles avec la mise en place d'une irrigation (SCHINDLER Y. BRACHA ET AL., 2018) ¹³¹. De même, selon les simulations de SAILOR D. J. (2008), dans l'hypothèse d'une irrigation uniquement en été, passer de 10 mm d'eau par semaine à 20 a pour effet de baisser légèrement la consommation électrique ¹³². LAMNATOU ET AL. (2015) avancent par ailleurs que l'évapotranspiration est améliorée par l'irrigation. Des études montrent cependant que la non-irrigation est envisageable par le choix de plantes plus résistantes aux variations climatiques extrêmes (LAMNATOU ET AL. 2015 ; SEYEDABADI ET AL. 2021 ; RAZIEH EBADATI ESFAHANI ET AL., 2022).

PICCININI SCOLARO T. ET GHISI E. (2022) ¹³³ et BRACHET ALINE (2020) citent des études rapportant une approche économique. Il en ressort que les toitures végétalisées peuvent se révéler plus chères à l'investissement que les toitures conventionnelles, mais si les services écosystémiques vus ci-dessus qu'elles rendent

¹²⁹ Se référer à la RE2020, Règles Th-Bat, tableau 74.

¹³⁰ 20 mm d'eau par semaine : comme la méthode RE2020, Règles Th-Bat ci-dessus.

¹³¹ B. Y. Schindler, L. Blaustein, R. Lotan, H. Shalom, G. J. Kadas, et M. Seifan, « *Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production* », J. Environ. Manage., vol. 225, p. 288-299, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.017.

¹³² Simulation de Sailor D. J. (2008) : une centaine de MégaJoules en juillet, en rapport avec les besoins de climatisation, Chicago.

¹³³ Scolaro, Taylana Piccinini, et Enedir Ghisi. « Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Literature Review of Layers Materials and Purposes ». *Science of The Total Environment*, vol. 829, 2022, p. 154650, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>.



étaient monétisés, ces toitures se classeraient parmi les solutions les plus intéressantes (BIANCHINI & HEWAGE, 2012 ; CARTER & KEELER, 2008).

2.4 Les toitures végétalisées et photovoltaïques (biosolaires)

La toiture biosolaire est l'appellation qui tend à se généraliser pour désigner une toiture végétalisée et photovoltaïque (*biosolar roof* ou *biosolar green roof* en anglais).

Les acteurs des toitures biosolaires sont issus de différents secteurs comme la végétalisation et l'étanchéité. Le TABLEAU 2.4-1 CI-DESSOUS, sans être exhaustif donne rapidement une idée de ces différents acteurs :

Tableau 2.4-1 : Toitures biosolaires, identification d'acteurs durant l'étude (2023)

Nom	Implantation	Description
ECOVEGETAL		produit HELIOVERT une FDES sur INIES pour son substrat de culture pour toiture végétalisée SAXALIS 1.1 Responsable technique : Laura CARILLO
Le Prieuré		produit Biosolar OASIS Directeur R&D : Jean-Christophe GRIMARD
Soprema		Fabricant de produits d'étanchéité et systèmes pour la végétalisation des toitures Produit : Sopranature
	France	Anciennement <i>l'association pour le développement et l'innovation de la végétalisation extensive des toitures</i> , Participe à la rédaction des Règles professionnelles des toitures-terrasses végétalisées. Porteur du Green Roof Score, référentiel d'évaluation des performances des toitures végétalisées en termes de services écosystémiques (lancé en avril 2023). Président : Frédéric Madre, spécialiste de la biodiversité des bâtiments végétalisés et de l'agro-écologie urbaine
CSFE	France	Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité Participe à la rédaction des Règles professionnelles des toitures-terrasses végétalisées. Autre porteur du Green Roof Score
UNEP	France	Union nationale des entreprises du paysage Participe à la rédaction des Règles professionnelles des toitures-terrasses végétalisées.
	Allemagne	La FLL : Société de recherche pour le développement du paysage et l'aménagement du paysage dont les directives ont un rayonnement qui dépasse l'unique Allemagne (première édition 1982, dernière en 2018).

Les références Internet utilisées pour produire cette section sont indiquées dans la sitographie, à la SECTION 6.7, PAGE 120.

2.4.1 Couche végétale, performances recherchées pour les plantes

Les choix de conception en ce qui concerne les plantes peuvent reposer sur les résultats de l'approche multicritère à la SOUS-SECTION 2.3.2.3 CI-DESSUS, mais aussi sur les modélisations des systèmes de ce type de toiture (SOUS-SECTIONS 2.2.6 ET 2.3.9 CI-DESSUS). Les travaux scientifiques sur le système complet sont présentés à la SOUS-SECTION 2.4.4 CI-DESSOUS.

2.4.2 Cadre réglementaire et législatif

Il peut être mis en lien avec l'article L171-4 du Code de la Construction ainsi qu'à son projet de décret et de deux arrêtés d'application (voir SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSUS). Il n'y a ni DTU, ni Recommandations ou Règles professionnelles relatives aux toitures biosolaires.

2.4.3 Approche économique

Selon PEIGER P. ET BAUMANN N. (2018), le marché de la végétalisation de toiture représente un peu plus de 100 M€ par an. Les auteurs proposent également un ordre de grandeur pour le coût d'une toiture biosolaire d'une puissance annuelle moyenne de 3 kW. Le coût est alors de 10 000 € (surface moyenne de 20 m² de panneaux). Ce montant correspondrait à 2,5 à 3,5 € HT/Wc installé. Ces considérations prennent en compte, les couches matérielles à partir de la couche de désolidarisation ¹³⁴, jusqu'au branchement des panneaux PV. En termes de raccordement au réseau, renforcement structurel du bâtiment ou réfection de la couverture ou de l'étanchéité, le coût est évalué par les auteurs à 500 à 600 €/m².

En France, le coût fourni-posé d'une TOITURE BIODIVERSE est de l'ordre de 50 à 80 €/m², ce qui peut monter à 150 €/m², quand l'accès se complexifie ¹³⁵. A l'inverse, un accès simplifié peut abaisser le coût. Ce ratio prend en compte les couches matérielles à partir de la couche de désolidarisation, il comprend les butées, protections, substrats plantations et les structures à biotope. En Suisse, qui est un marché déjà stabilisé, le coût est légèrement inférieur. En solution « *précultivée* », le coût est ramené à 80-90€/m² en France et compris entre 25 et 50 €/m² en Suisse ¹³⁶.

2.4.4 État de l'art scientifique

Nous avons abordé séparément l'installation photovoltaïque en SOUS-SECTION 2.2 CI-DESSUS et les toitures végétalisées en SOUS-SECTION 2.2.6 CI-DESSUS. Il s'agit ici de relever les travaux scientifiques qui étudient la combinaison dite « *toiture biosolaire* ». Il serait incongru de comparer les expérimentations et modélisations issus des travaux scientifiques entre elles, tant l'ensemble de paramètres est fluctuant et fondamental à la fois en la matière : la configuration et le nombre de panneaux (hauteur à la toiture, entraxe, inclinaison, orientation, localité, puissance, installation électrique), la période considérée, la

¹³⁴ Trois définitions ont été collectées durant la présente étude, respectivement dans les RP TTV, les RP Isolation inversée (XPS) et le DTU 43.5 : 1) « Dans le cas d'une toiture inversée, le système de végétalisation est posé sur l'isolation thermique avec éventuellement une couche d'interposition décrite dans le Document Technique d'Application » ; 2) « écran de désolidarisation », « Lorsque nécessaire, cet écran a pour fonction de réaliser l'indépendance des panneaux isolants vis-à-vis du revêtement d'étanchéité » ; 3) « couche d'indépendance » à voir au § 7.3.3.2.1 et son tableau 7 (DTU 43.5).

¹³⁵ Peiger P. et Baumann N. décrivent la toiture biodiverse comme « *la mise en place d'une diversité biologique sur une toiture. Une diversité de variétés d'organismes vivants (flore, faune, sol) joue un rôle essentiel pour assurer la persistance de la vie sur le toit. La diversité biologique fait référence à la variété des organismes vivants de toute origine : celles des écosystèmes* » (voir p. 22-23 de leur ouvrage).

¹³⁶ Peiger, Philippe, et Baumann, Nathalie. *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018, p.17, 166, 167, 124, 166 (dans l'ordre d'utilisation pour la rédaction du présent mémoire).

variété de plantes, etc. LAMNATOU ET AL. (2015) ¹³⁷ se sont cependant prêtés à l'exercice, ce qui permet d'appréhender, sans chercher de comparaison directe, l'écart de production entre les revêtements de toiture classiques et les toitures végétalisées. Le récapitulatif est présenté au TABLEAU 2.4-2 CI-DESSOUS. Quelques récents travaux scientifiques peuvent venir compléter cet état de l'art de LAMNATOU ET AL., tels que ceux de ALSHAYEB ALI ET AL. (2018) ¹³⁸, JAHANFAR ALI ET AL. (2019) ¹³⁹, FLECK R. ET AL. (2022) ¹⁴⁰ et VILLEMEN (thèse, 2023) ¹⁴¹.

ALSHAYEB ALI ET AL. (2018) ont mené des travaux qui démontrent expérimentalement l'impact des matériaux de revêtement de toiture sur l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques qui y sont installés. Ces chercheurs observent que la production d'énergie est influencée par les variations de températures en surface de toiture et d'ambiance des panneaux. Une corrélation existe entre la température de l'air et l'énergie produite et les périodes de plus grandes variations de la température de l'air coïncident avec celles de l'énergie produite (juin, juillet). Ces travaux soulignent également un autre facteur pouvant impacter la performance des panneaux qui est la distance entre les panneaux et la surface de toiture, encore très peu traité.

Tableau 2.4-2 : État de l'art de travaux scientifiques datant de 2007 à 2014 portant sur les toitures biosolaires (Lamnatou et al. 2015, Table1)

Reference	Type of study	System	Region	Time period considered	Plant species	Findings about PV output increase	Systems which were compared
Köhler et al.	Experimental	Large-scale	Berlin, Germany	5-year data	Mainly <i>Sedum</i> species	Depending on the configuration	PV-green vs. several configurations
Hui and Chan	Experimental	Large-scale	Hong Kong, China	Sunny summer day, 11-2 pm	<i>Sedum</i>	4.3%	PV-green vs. PV-bare roof
Perez et al.	Experimental	Small-scale	New York, USA	June	Varietal <i>Sedum</i>	2.56%	PV-green vs. PV-gravel
Chemisana and Lamnatou	Experimental	Small-scale	Lleida, Catalonia, Spain	June-July	<i>Gazania rigens</i> , <i>Sedum clavatum</i>	1.29% (<i>G. rigens</i>), 3.33% (<i>S. clavatum</i>)	PV-green vs. PV-gravel
Nagengast et al.	Experimental	Large-scale	Pittsburg, PA, USA	July	Mosses	0.5%	PV-green vs. PV-black
Witmer	Modeling		Different locations in USA			0.08-0.55%	
Hui and Chan	Modeling		Hong Kong, China	1 year		8.3%	PV-green vs. PV roof mounted

FLECK R. ET AL. (2022) ont à leur tour dressé un état de l'art des travaux scientifiques en distinguant la performance « tot » de la performance « syst », c'est-à-dire respectivement l'énergie totale en valeur absolue et l'écart moyen dans la performance des systèmes. C'est ce qui est présenté au

TABLEAU 2.4-3 CI-DESSOUS. Par rapport au TABLEAU 2.4-2 CI-DESSUS, celui-ci cite d'autres travaux intervenus entre temps et précisent la surface des installations lorsqu'il s'agit de travaux expérimentaux.

¹³⁷ Lamnatou, Chr., et D. Chemisana. « A Critical Analysis of Factors Affecting Photovoltaic-Green Roof Performance ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, 2015, p. 264-80, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.

¹³⁸ Alshayeb, Mohammed J., et Jae D. Chang. « Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof ». *Energies*, vol. 11, n° 5, mai 2018, p. 1110, <https://doi.org/10.3390/en11051110>.

¹³⁹ Jahanfar, Ali, et al. « Evaluating the Shading Effect of Photovoltaic Panels on Green Roof Discharge Reduction and Plant Growth ». *Journal of Hydrology*, vol. 568, 2019, p. 919-28, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.019>.

¹⁴⁰ Fleck, R., et al. « Bio-Solar Green Roofs Increase Solar Energy Output: The Sunny Side of Integrating Sustainable Technologies ». *Building and Environment*, vol. 226, 2022, p. 109703, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109703>.

¹⁴¹ Villemin, Thomas. *Modélisation des échanges énergétiques entre la surface d'une toiture végétalisée extensive et un panneau photovoltaïque*. Université de Lorraine, 2023, <https://www.theses.fr/s292895>. Dans le cadre du projet Proof.

Tableau 2.4-3 : État de l'art de travaux scientifiques datant de 2007 à 2022 portant sur les toitures biosolaires (Fleck et al. 2022, Table2)

Study	Location	Köppen	Type	Duration	Size	Comparison	Result
This study	Sydney, Australia	Cfa	Experimental & Simulation	8 months (237 days)	593.96 m ²	Commercial bio-solar vs independent conventional PV	4.5% (sys) 23.83% (tot)
Nagengast et al.	Pittsburgh, USA	Cfa	Experimental & Simulation	16 months	87 m ²	Model bio-solar vs internal PV-black roof	0.8-1.5% (tot)
Köhler et al.	Germany	Cfb	Pilot Experiment	12 months	Undisclosed	Variable model bio-solar vs internal PV-bitumen roofs	6.5% (tot)
Perez et al.	New York City, USA	Cfa	Pilot Experiment & Simulation	10 months	Undisclosed	Bio-solar vs internal PV gravel	2.42% (tot)
Hui & Chan	Hong Kong	Cfa	Pilot Experiment & Simulation	1 days 12 months	Undisclosed 2494 m ²	Bio-solar vs internal conventional PV	4.3% (sys) 8.3% (tot)
Chemisana & Lamnatou	Spain	BSk	Pilot Experiment	5 days	1.69 m ²	Model bio-solar vs internal PV gravel	1.29-3.33% (tot)
Osma-Pinto & Ordóñez-Plata	Colombia	Af	Pilot Experiment	Undisclosed	15 m ²	Model bio-solar vs internal PV-black roof	0.9-1.7% (sys)
Ogaili & Sailor	Portland, USA	Csb	Pilot Experiment	3 months	6.6 m ²	Model bio-solar vs internal PV-black/white roof	0.8-1.2% (sys)
Alshayeb & Chang	Kansas, USA	BSk	Pilot Experiment	12 months	14.7 m ²	Model bio-solar vs internal PV-black roof	3.3% (sys) 1.4% (tot)
Kaewpraek et al.	Thailand	Am	Pilot Experiment	1 months	13.58 m ²	Model bio-solar vs internal PV-grey roof	2% (sys) 5% (tot)

Parmi les toitures conventionnelles auxquelles sont comparées les toitures biosolaires l'on retrouve :

- les toitures à couverture gravier (CHEMISANA ET AL., 2014) ;
- les toitures à revêtement bitumineux (KÖHLER ET AL., 2007) ;
- les toitures revêtues d'une protection blanche (OGAILI ET AL., 2016).

Dans l'ensemble, les travaux démontrent qu'une meilleure production est possible en préférant les toitures biosolaires aux toitures conventionnelles et que le gain peut représenter plusieurs pour cent.

Comme évoqué plus haut et comme illustré en FIGURE 24 ET FIGURE 25 CI-DESSOUS, dans les travaux partiellement ou totalement expérimentaux, différents types de température sont mesurées dans l'environnement des panneaux photovoltaïques : la température de l'air sous le panneau, la température en face arrière du panneau, la température de surface de la toiture, la température dans les premiers centimètres du substrat de toiture végétalisée (ALSHAYEB ALI ET AL. 2018 ; FLECK ET AL., 2022 ; VILLEMEN T., 2023). Un certain nombre de travaux établissent une régression linéaire entre différentes températures ou en croisant différentes données (NAGENGAST ET AL., 2013 ; FLECK R. ET AL., 2022). En dehors de l'évaluation des écarts de production d'énergie photovoltaïque selon le type de revêtement/couverture de toiture, les chercheurs s'intéressent à quantifier les émissions de gaz à effet de serre que les toitures biosolaires permettent d'éviter (CHEMISANA ET AL., 2014 ¹⁴² ; FLECK R. ET AL., 2022), leur performance dans la gestion des eaux de pluie (JAHANFAR ET AL., 2019), et bien d'autres thèmes encore comme les économies d'énergie (BAMDAD A., 2023).

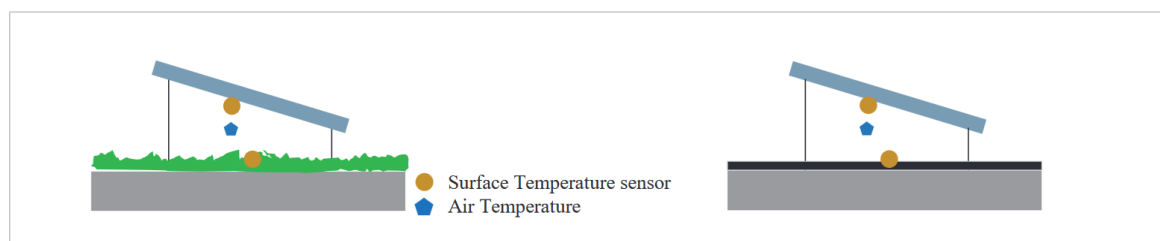
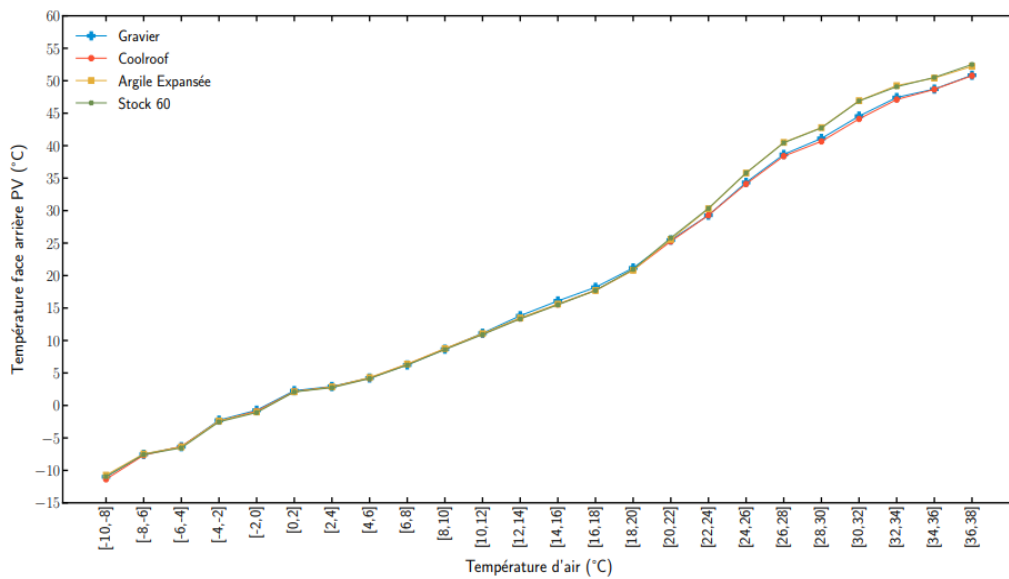


Figure 24 : Plateforme expérimentale de toiture biosolaire et toiture conventionnelle, les capteurs de températures (Alshayeb Ali et al., 2016)

¹⁴² Chemisana, D., et Chr. Lamnatou. « Photovoltaic-Green Roofs: A Life Cycle Assessment Approach with Emphasis on Warm Months of Mediterranean Climate ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 72, 2014, p. 57-75, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.006>.



3 Axe d'étude n° 1 : Toiture, production photovoltaïque

3.1 Méthodologie

Cette méthodologie couvre les deux premiers points de questionnement exposés dans les orientations d'étude, à la SOUS-SECTION 1.4 CI-DESSUS. Pour rappel :

- Le rôle du REVÊTEMENT DE TOITURE dans les besoins de chauffage, de refroidissement et dans la production d'énergie locale (photovoltaïque) ;
- Les moyens d'atteindre les NOUVEAUX STANDARDS D'INSTALLATION photovoltaïque et/ou végétalisée.

Les éléments de l'état de l'art qui vont s'avérer concrètement utiles pour la méthode d'analyse sont :

1. Les caractéristiques liées à L'ABSORPTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE par l'enveloppe du bâti en toiture, qui intervient dans les résultats des besoins d'énergie (variation des apports externes et donc du bilan thermique par bâtiment) ;
2. Les grandeurs intervenant dans le calcul de la production photovoltaïque, comme l'albédo, les différents rayonnements absorbés par le panneau PV, la température de module, etc. ;
3. Les grandeurs qui permettent de modéliser l'impact de L'INTERACTION ENTRE LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE ET LA VÉGÉTALISATION DE TOITURE sur la production d'électricité.

Pour mener l'étude, l'outil UrbanPrint sera utilisé et des projets accompagnés par Efficacity ces dernières années seront exploités et simulés au sein de l'outil UrbanPrint. Le test de sensibilité est réalisé sur les données obtenues en sortie de simulation : besoins thermiques, énergie photovoltaïque en sortie d'onduleur, etc.

Le traitement d'un cas d'étude consistera à lancer autant de simulations qu'il y a de modalités de toiture à l'étude. C'est-à-dire quatre, comme illustré sur la FIGURE 26 CI-DESSOUS :

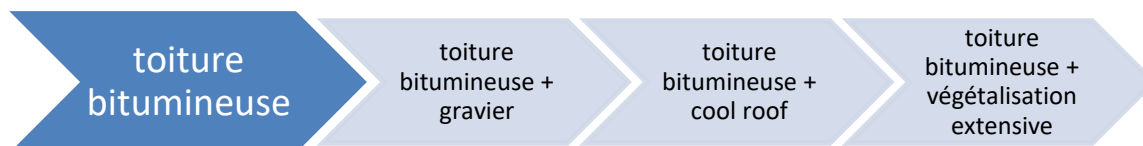


Figure 26 : Méthodologie axe n°1, simulation des différentes modalités de toiture pour un bâtiment muni d'une installation photovoltaïque

Afin de qualifier le bénéfice de production électrique, nous avons décidé de mener des tests de sensibilité selon les paramètres de typologie de revêtement de la toiture (absorption solaire, albédo). Pour chaque modalité de toiture (voir FIGURE 26 CI-DESSUS), un couple de coefficients absorption/réflexion solaires sera appliqué aux cas d'étude « quartier » et nous retiendrons au préalable une référence parmi ces modalités, après un test à l'échelle d'un seul bâtiment. Nous verrons cela plus en détails à la SOUS-SECTION 3.2.3 CI-DESSOUS.

Lors de la phase de cas d'étude « quartier » (SECTION 5 CI-DESSOUS), l'idée sera de mesurer l'écart des modalités à la modalité de référence en termes d'énergie renouvelable produite et d'en proposer une analyse (niveau de production d'électricité d'origine photovoltaïque, part d'autoconsommation, d'autoproduction).

Dans le cadre de la recherche du paramètre le plus pertinent pour modéliser l'interaction revêtement de toiture/panneau PV qui est notre troisième paramètre de travail, nous nous appuyerons sur des travaux scientifiques et nous souhaitons mettre au point et analyser une modélisation basée sur des données et/ou méthodes expérimentales. Plusieurs pistes ont d'abord été identifiées :

- Le développement d'un PROFIL DE COEFFICIENTS D'ABAISSEMENT/ÉLEVATION À APPLIQUER SUR LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE PV de la modalité de toiture de référence, pour déterminer les productions à attendre pour les autres modalités. Il s'agit d'étudier les résultats du modèle pour différentes granulométries (mois, jour, heure), en partant de la plus grossière à la plus fine ;
- Le développement d'un PROFIL THERMIQUE DE LA TEMPÉRATURE AU DOS DU PANNEAU PV pour toutes les modalités de toiture, détermination de la TEMPÉRATURE DE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE et calcul de la production PV pour chaque modalité.

C'est la seconde méthode qui sera ici décrite (voir SOUS-SECTION 3.2.3.2 CI-DESSOUS), car elle est mobilisée plus en amont. Elle peut permettre de modéliser plus finement le bénéfice de l'évapotranspiration des plantes sur la température du module. L'étude de la méthode se fait en test sur un fichier météo de l'outil UrbanPrint pour la zone climatique H1a. C'est l'un des fichiers météo de la réglementation thermique RE2020. Nous allons ensuite appliquer :

- la première modélisation des coefficients solaires sur les cas d'étude « *quartier* » ;
- et si le temps et les résultats le permettent, la méthode combinant les première et deuxième modélisations.

Après la simulation, les informations utiles à l'analyse d'un cas d'étude sont recueillies de manière automatisée à l'aide de l'écriture et l'exécution d'un script python sur ces fichiers de sortie. L'ensemble est ensuite traité, hors du code UrbanPrint, au sein d'un tableur (Microsoft Excel). Les grandes étapes du process mis en œuvre pour la simulation sont les suivantes :

- Configuration du fichier d'entrée et des valeurs pour les variables globales d'entrée dans le code en plateforme de tests (outil pyCharm ¹⁴³) ;
- Lancement de l'exécution du module de calcul ;
- Collecte des données dans le fichier de sortie via un script élaboré ;
- Exploitation dans un tableur.

L'analyse portera sur des cas d'étude à l'échelle du quartier comprenant différents bâtiments pour différents usages. Cela représente un échantillon potentiel de 139 bâtiments en tout (travail sur des projets réels). Nous ferons varier les modalités de toiture pour les bâtiments pourvus de panneaux photovoltaïques dans leur conception initiale. Les cas d'étude seront présentés à la SOUS-SECTION 5.1 CI-DESSOUS. Retenir les projets au niveau du quartier permettra d'effectuer une analyse à deux niveaux, celui du bâtiment et celui du quartier. Pour prolonger l'analyse de ces cas d'étude, ils seront aussi utilisés pour l'axe d'étude « *biodiversité* » (présentation à la SECTION 4 CI-DESSOUS). Enfin, cela permettra d'aborder les résultats pour les deux axes de manière conjointe à la SOUS-SECTION 5.2 CI-DESSOUS.

3.2 Modélisation

3.2.1 Généralités

La modélisation au cœur de ce volet d'étude porte en particulier sur les trois PARAMÈTRES DE TRAVAIL RAPPELÉS à la SOUS-SECTION 3.1. Ainsi :

- MODÉLISATION DES COEFFICIENTS SOLAIRES :
 - Concernant le COEFFICIENT D'ABSORPTION SOLAIRE, il s'agit de lui faire prendre différentes valeurs associées aux différentes modalités de toiture en entrée de simulation dans l'outil (voir SOUS-SECTION 3.2.3.1 CI-DESSOUS) ;
 - De même pour L'ALBÉDO. La relation $\rho = 1 - \alpha$ est considérée (voir même SOUS-SECTION) ;
- MODÉLISATION BASÉE SUR LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES : concernant la quantification du gain de production électrique imputable à L'INTERACTION PANNEAU PV/VÉGÉTALISATION DE TOITURE, la modélisation sera développée à la SOUS-SECTION 3.2.3.2 CI-DESSOUS.

¹⁴³ « PyCharm, l'IDE Python » <https://www.jetbrains.com/fr-fr/pycharm/>

Nous rappelons tout d'abord dans ce qui suit la modélisation en place dans l'outil UrbanPrint en termes de calcul thermique, ce qui sera admis et ce qui ne le sera pas dans le cadre de l'étude.

3.2.2 Modélisation admise

Dans ce qui suit, nous admettons les données météorologiques du logiciel ¹⁴⁴, ses scénarios d'occupation ¹⁴⁵, ainsi que des modules de calcul explicités ci-dessous. Pour tous ces éléments, cela signifie que leur analyse ou leur étude est hors périmètre.

Les principes fondamentaux de calcul qui touchent au questionnement identifié pour l'étude et qui seront exposés dans cette sous-section sont les :

- calcul des besoins thermiques ;
- calcul de l'irradiation solaire ;
- et calcul de la production d'énergie photovoltaïque (électricité en sortie d'onduleur).

3.2.2.1 Les besoins thermiques

L'outil UrbanPrint calcule les besoins d'énergie dus aux usages du bâtiment, classiquement ceux de la réglementation thermique RE2020 : le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation, la ventilation (bâtiment versus parking), l'éclairage (bâtiment versus parking) et les autres usages électriques. Les besoins sont calculés au pas de temps horaire dans UrbanPrint. Le calcul repose sur un certain nombre de paramètres comme :

- fichier de données météo par zone climatique de la réglementation thermique RE2020 (rayonnements solaires direct normal et diffus, température de l'air, vent, etc.) ;
- modèles d'éclairage ;
- modèles thermiques ;
- modèles de ventilation.

Certains calculs thermiques dans UrbanPrint se font en appelant DIMOSIM. DIMOSIM signifie "District MOdeller and SIMulator". C'est un outil de conception énergétique. Il permet de concevoir et d'optimiser les systèmes énergétiques à l'échelle du quartier. Il est orienté objet sous package Python 3. En la lisant de gauche à droite, la FIGURE 27 CI-DESSOUS, montre qu'un domaine comporte des zones climatiques (*climateZone*) qui contiennent à leur tour un ou plusieurs quartiers (*District*), eux-mêmes composés de bâtiments (*Building*). Les zones thermiques d'un bâtiment (*ThermalZone*), sont des groupes aux données et paramètres spécifiques, comme les propriétés thermiques et l'occupation. L'on peut retrouver les solutions énergétiques à différents niveaux : la zone climatique (global) ou le quartier voire le bâtiment (local) ¹⁴⁶.

¹⁴⁴ Les fichiers météorologiques du logiciel sont établis au pas de temps horaire, par zone climatique au sens de la RE2020 (voir carte des zones climatiques à L'ANNEXE 6.3, PAGE 111).

¹⁴⁵ UrbanPrint met en œuvre des scénarios d'apports internes, d'éclairage, de températures de chauffage, etc.

¹⁴⁶ Garreau, Enora, et al. « District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings*, vol. 251, 2021, p. 111354, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.

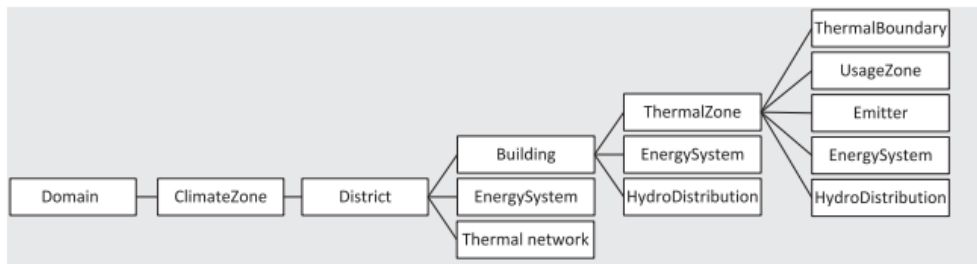


Figure 27 : Moteur de calcul thermique DIMOSIM, structuration des objets

Source : "figure 1 Part of the object structure of DIMOSIM" de l'article signifié en note de bas de page n°146.

Le calcul actuel des besoins d'énergie est admis pour la présente étude.

3.2.2.2 Irradiation solaire et production d'énergie photovoltaïque

L'outil réalise un calcul de la production électrique en sortie de panneau et en sortie d'onduleur en considérant les coefficients de perte usuels. Les paramètres d'entrée comprennent le fichier météo de la zone climatique correspondant à la ville d'implantation du projet simulé ¹⁴⁷. Après un comparatif avec les formules de la littérature scientifique (SOUS-SECTION 2.2.6 CI-DESSUS), nous avons admis le processus de calcul de l'outil. La FIGURE 28 CI-DESSOUS en expose les étapes :

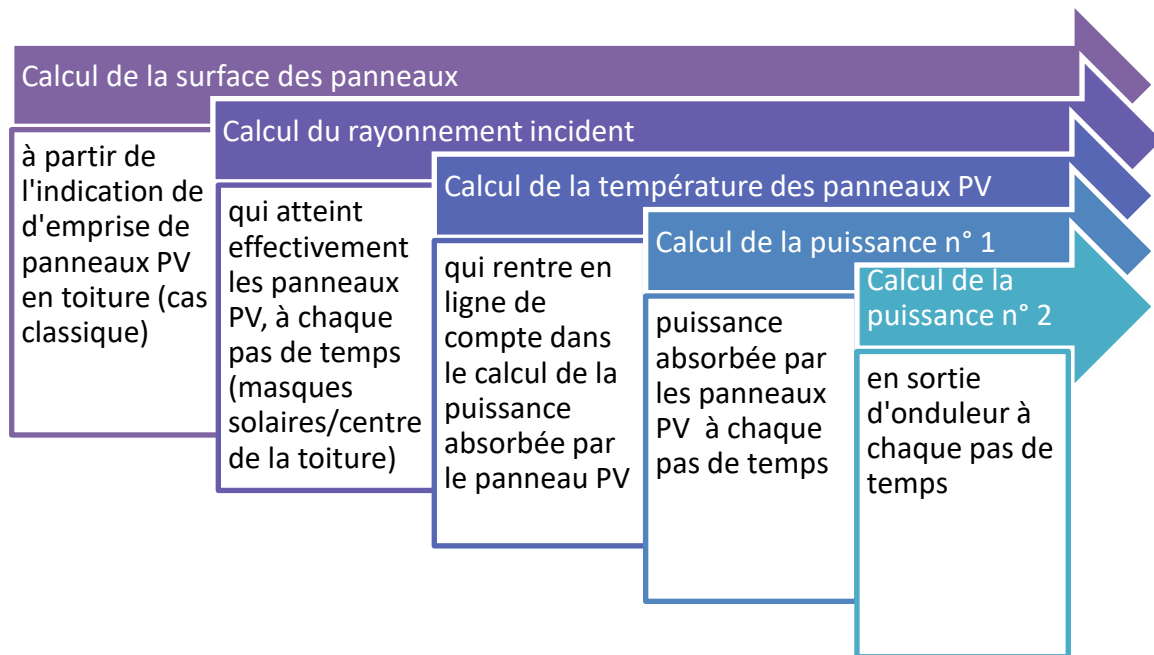


Figure 28 : Méthode QEC, étapes dans le calcul de la puissance électrique produite par une installation photovoltaïque en toiture

Source : Méthode QEC, § 3.4.1.3. Systèmes : productions solaires, page 55

Les caractéristiques du panneau photovoltaïque ainsi que quelques paramètres complémentaires de la méthode QEC et en base dans UrbanPrint sont présentés à L'ANNEXE 6.2, PAGE 105. Toujours selon la

¹⁴⁷ Ce sont les fichiers météo réglementaires de la RE2020. Les stations météo de référence sont par exemple Tours pour la zone climatiques H2b et Marignane pour la zone H3. Voir les sites Internet <https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/rt2012-re2020-evolution-comparatif> et <https://www.cerema.fr/fr/actualites/reglementation-environnementale-2020-quelles-evolutions-1> consultés le 16 août 2023.

méthode QEC, les panneaux sont orientés plein sud et inclinés 30 °. Un calcul de masques solaires intervient pour déterminer la surface de panneau effective pour les calculs d'énergie.

Dans le code, le coefficient d'absorption solaire et l'albédo sont des paramètres d'entrée sur lesquels nous allons donc pouvoir jouer pour modéliser les modalités de toiture. Selon notre état de l'art, nous pourrions considérer un albédo de 0,7 pour la toiture végétalisée extensive (SOUS-SECTION 2.3.2.2 CI-DESSUS). Nous verrons à la sous-section suivante que nous allons adopter un couple de coefficients pour chaque modalité de toiture à l'étude (voir TABLEAU 3.2-1 CI-DESSOUS).

En revanche, nous allons concevoir un recalcul de la TEMPÉRATURE DU MODULE, pour proposer une modélisation caractéristique de l'interaction panneau PV/revêtement de toiture et pas seulement des conditions standard de fonctionnement (STC).

3.2.3 Modélisation de l'impact de l'interaction revêtement/PV

Compte tenu des fonctionnalités actuelles de l'outil, énoncées dans la SOUS-SECTION 1.6 CI-DESSUS, son évolution était nécessaire avant toute analyse de cas d'étude. Après une prise en main du code et une analyse de fonctionnement ciblée, le code logiciel a été mis à jour pour la prise en compte des scénarios d'étude et des besoins d'analyse. Pour l'albédo et le coefficient d'absorption solaire, il s'agit d'une modification de valeur.

En ce qui concerne l'étape d'approfondissement autour de l'interaction panneau PV/végétalisation de toiture, il s'agit d'une modification plus conséquente du code, où nous allons intervenir au pas de temps. Sur la base de l'état de l'art scientifique présenté à LA SECTION 2 CI-DESSUS, des tests ont permis d'aboutir à une modélisation de l'interaction PV/toiture, en fonction de la modalité de toiture dans l'environnement du panneau PV.

3.2.3.1 Modélisation par l'absorption et de la réflexion solaires des toitures

Différentes modalités de toiture ont été décrites dans la SOUS-SECTION 1.5 CI-DESSUS. Elles vont servir de fil conducteur tout au long de la démarche. Pour fixer les configurations de coefficient d'absorption solaire et d'albédo pour ces différents revêtements et couvertures, ce sont les valeurs présentées au TABLEAU 3.2-1 CI-DESSOUS qui ont été utilisées. Elles proviennent de choix effectués sur les différentes sources de données exposées dans l'état de l'art (SOUS-SECTIONS 2.2 À 2.4 CI-DESSUS) :

Tableau 3.2-1 : Modélisation, coefficients d'absorption et albédos considérés pour les modalités de toiture à l'étude

Modalité de toiture	α (coefficient d'absorption solaire)	ρ (albédo)
Bitumineuse	0,97	0,03
Bitumineuse et gravier	0,8	0,2
Végétalisée extensive	0,7	0,3
Bitumineuse et Cool Roof	0,2	0,8

Nous avons considéré le cas fictif d'un bâtiment de logements collectifs, sur 4 niveaux, situé en zone climatique H1a. Nous avons d'abord fait une simulation en nous appuyant sur le paramétrage par défaut de l'outil. Le chauffage est sur chaudière gaz à condensation et la climatisation sur pompe à chaleur air/eau. Cela a d'abord donné un bâtiment doté de chauffage, sans climatisation avec le premier résultat illustré sur la FIGURE 29 CI-DESSOUS :

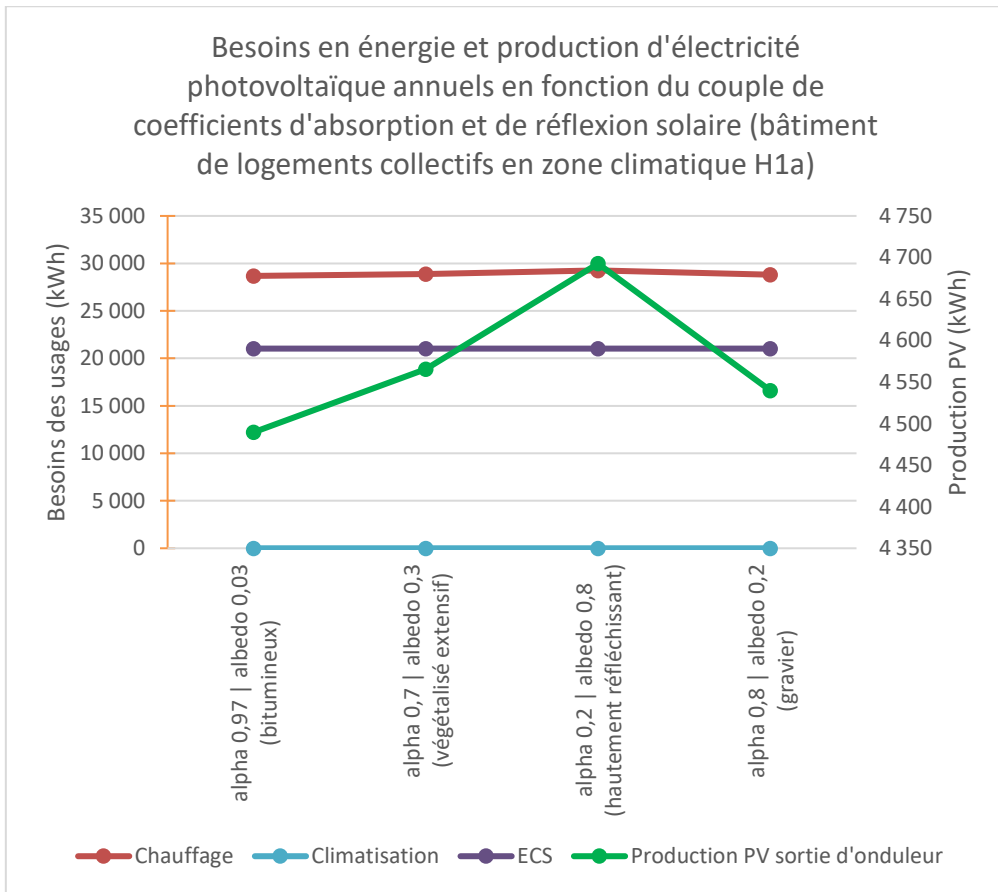


Figure 29 : Méthodologie axe n°1, besoins et production d'énergie, première allure des grandeurs pour un bâtiment

Comme ils peuvent être non négligeables dans les consommations énergétiques, nous avons réitéré la simulation des scénarios en incluant des besoins de climatisation. Dans cette configuration, l'on observe les besoins et la production d'énergie indiqués sur la FIGURE 30 CI-DESSOUS :

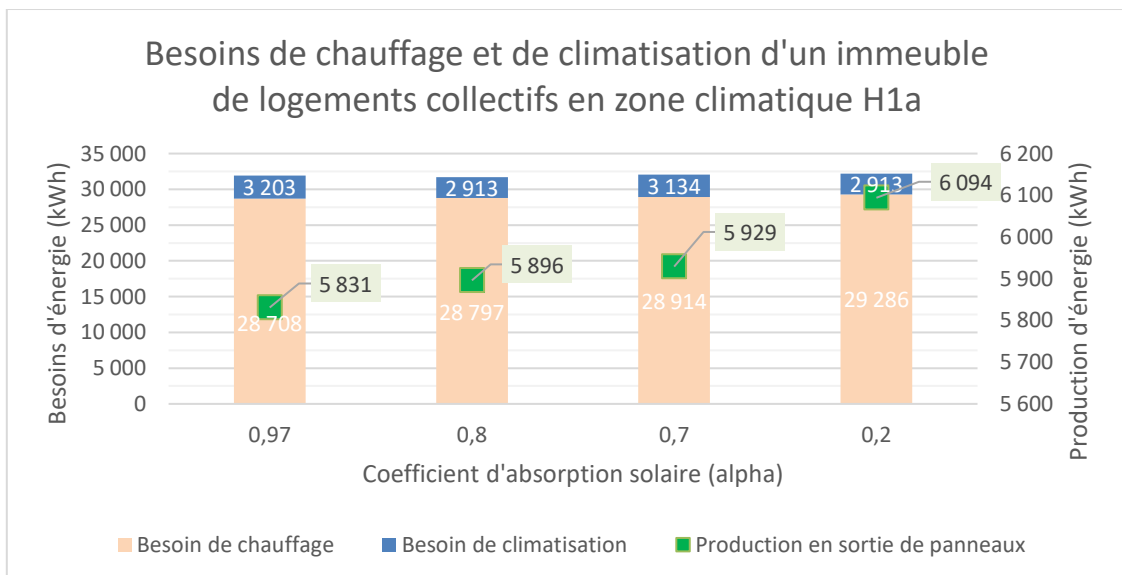


Figure 30 : Méthodologie axe n°1, besoins et production d'énergie, 2^{ème} allure des grandeurs pour un bâtiment

Nous constatons donc une variation de ces deux besoins thermiques et de la production électrique en fonction de la modalité de toiture. En fait, nous observons :

- Les besoins thermiques les plus faibles avec les paramètres de REVÊTEMENT BITUMINEUX AVEC OU SANS COUVERTURE GRAVIER (écart de 1,5% avec le cas de besoins les plus hauts : paramètre du revêtement Cool Roof) ;
- Et la production électrique la plus élevée pour les paramètres de REVÊTEMENT COOL ROOF (un écart de 4,3% avec la production la plus faible : paramètre du revêtement bitumineux).

Cette modélisation donne donc la modalité Cool Roof gagnante sur la modalité végétalisée alors que dans littérature, la modalité toiture végétalisée permettait un gain, aussi faible soit-il par rapport à une toiture blanche. En revanche, les résultats des toitures bitumineuses ou gravier vis-à-vis de la toiture végétalisée se tiennent, compte tenu de l'état de l'art des travaux scientifiques décrit en SOUS-SECTION 2.4.4 CI-DESSUS.

Sur la base des coefficients retenus pour modéliser les revêtements/couvertures de toiture et d'après cette étude préalable, nous présentons que le revêtement Cool Roof est optimal pour la production électrique. Nous retenons la modalité Cool Roof comme référence pour l'étape des cas d'étude (SECTION 5 CI-DESSOUS).

3.2.3.2 Modélisation avancée

Dans la littérature scientifique, en dehors des matériaux standards, nous ne trouvons pas de méthode qui attribuerait une formule à chaque type de revêtement de toiture pour intégrer leur effet sur la température du module photovoltaïque (voir SOUS-SECTION 2.4.4 CI-DESSUS). Les formules s'appuient le plus souvent sur des grandeurs relatives aux conditions standards de fonctionnement des modules photovoltaïques (*STC*), ou aux conditions *NOCT* (voir SOUS-SECTION 2.2.6 CI-DESSUS). Cependant, sur la base des résultats expérimentaux tels que ceux de VILLEMEN (2023) ou de ALSHAYEB ET AL. (2016 ET 2018), nous proposons la mise au point d'une modélisation plus avancée qu'en SOUS-SECTION 3.2.3.1 CI-DESSUS. Elle se baserait sur un PROFIL THERMIQUE à concevoir à partir de données expérimentales. Comme sur la FIGURE 25 CI-DESSUS, chaque courbe du profil représenterait la TEMPÉRATURE EN FACE ARRIÈRE DU PANNEAU implanté sur un revêtement de toiture donné. Elle est fonction de la classe de température d'air (classes de température en abscisses). Nous cherchons à valider un processus de détermination des TEMPÉRATURES DE MODULE, à partir d'un profil thermique des températures de face arrière de panneau photovoltaïque. En effet, nous allons ensuite calculer les températures de module en fonction des températures de face arrière obtenues, à l'aide de la formule de régression linéaire présentée à l'ÉQUATION 4 EN PAGE 41 (KING ET AL., 2004).

En attendant que la communauté scientifique diffuse des jeux de données plus complets et issus de différentes expérimentations pour mieux évaluer les impacts sur le modèle, cette présente version se basera sur le jeu de données de l'expérimentation Proof à Nancy. Il porte sur la période du 1^{er} juin 2022 0h00 au 22 décembre 2022 23h59, trois modalités de toiture ¹⁴⁸ et comprend :

- températures d'air mesurées toutes les 15 minutes, par la station météorologique à proximité 20 781 données ;
- températures de face arrière du panneau photovoltaïque en 9 points de mesure, toutes les minutes. Utilisation de la moyenne des 9 mesures. (341 725 données).

Les données ont été extraites des tables à l'aide du script python mis au point par THOMAS VILLEMEN (2023). Elles ont ensuite été exploitées dans un tableur afin d'obtenir les températures moyennes de face arrière

¹⁴⁸ Modalités de toiture gravier, végétalisée extensive (substrat à base d'argile expansée, 10 cm d'épaisseur) et cool roof (mesures commencées le 28 mai 2022).

du panneau par classe de Température d'air, à la manière de la FIGURE 25 CI-DESSUS. Le profil thermique a ainsi été reconstitué et pour chaque température d'air du fichier météo dans UrbanUprint, nous pouvons désormais appliquer un nouveau mode de calcul de la température de module. Le process de pré-traitement des données expérimentales qui a été validé et la phase de recalcul des températures de module photovoltaïque sont représentés sur LA FIGURE 31 CI-DESSOUS :

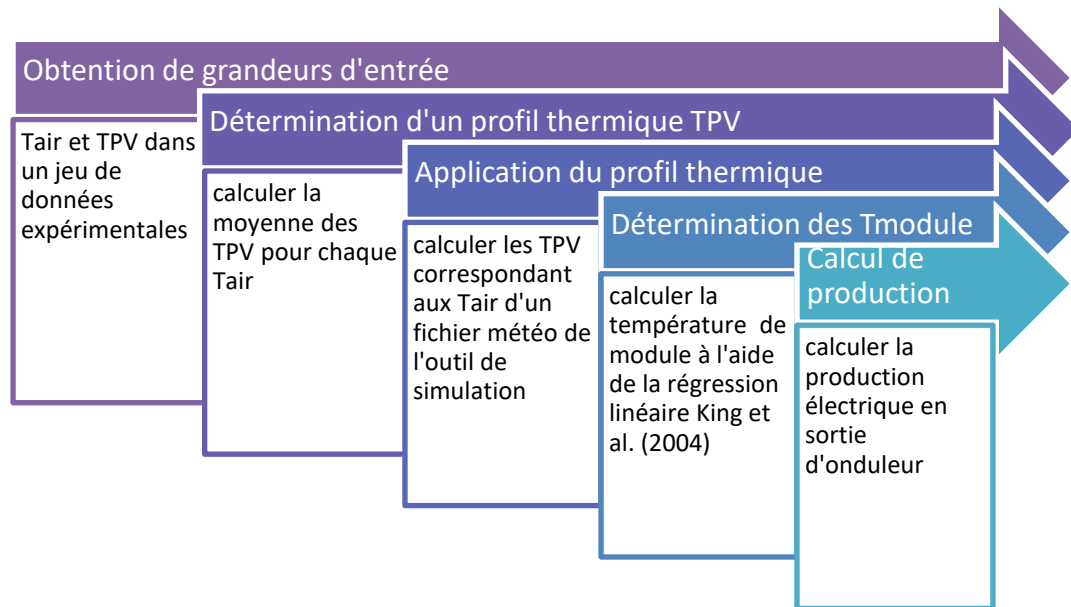


Figure 31 : Modélisation avancée axe n°1, schéma de principe

La FIGURE 32 CI-DESSOUS superpose les températures de dos de panneau obtenus par le profil thermique déterminé (courbe orange), et les températures de module calculées par la formule de KING ET AL. (courbe jaune). Comme illustré en FIGURE 32 et FIGURE 33 CI-DESSOUS, après application du profil thermique et de la formule KING ET AL. sur le fichier météo H1a, nous observons une plage de température peu représentative des températures de panneau attendues (voir SOUS-SECTION 2.2.6 CI-DESSUS). Cela peut s'expliquer par le fait que la température prise comme T_{air} (te_0), n'est pas une température prise dans l'environnement du panneau. C'est une température d'air de la station météo de référence pour la zone climatique (ville de Trappes). Or, nous l'avons vu dans l'état de l'art, les scientifiques se réfèrent le plus souvent à la TEMPÉRATURE AMBIANTE du panneau dans les formules d'approximation.

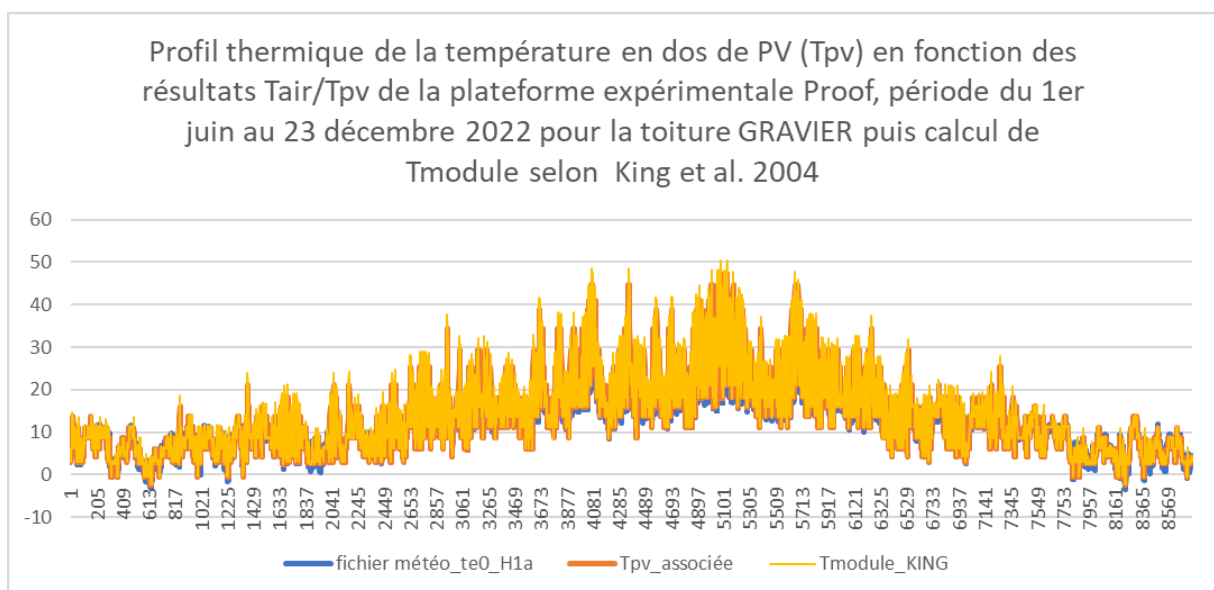


Figure 32 : Modélisation avancée – profil thermique horaire appliqué sur zone climatique H1a (RE2020, 1 année)

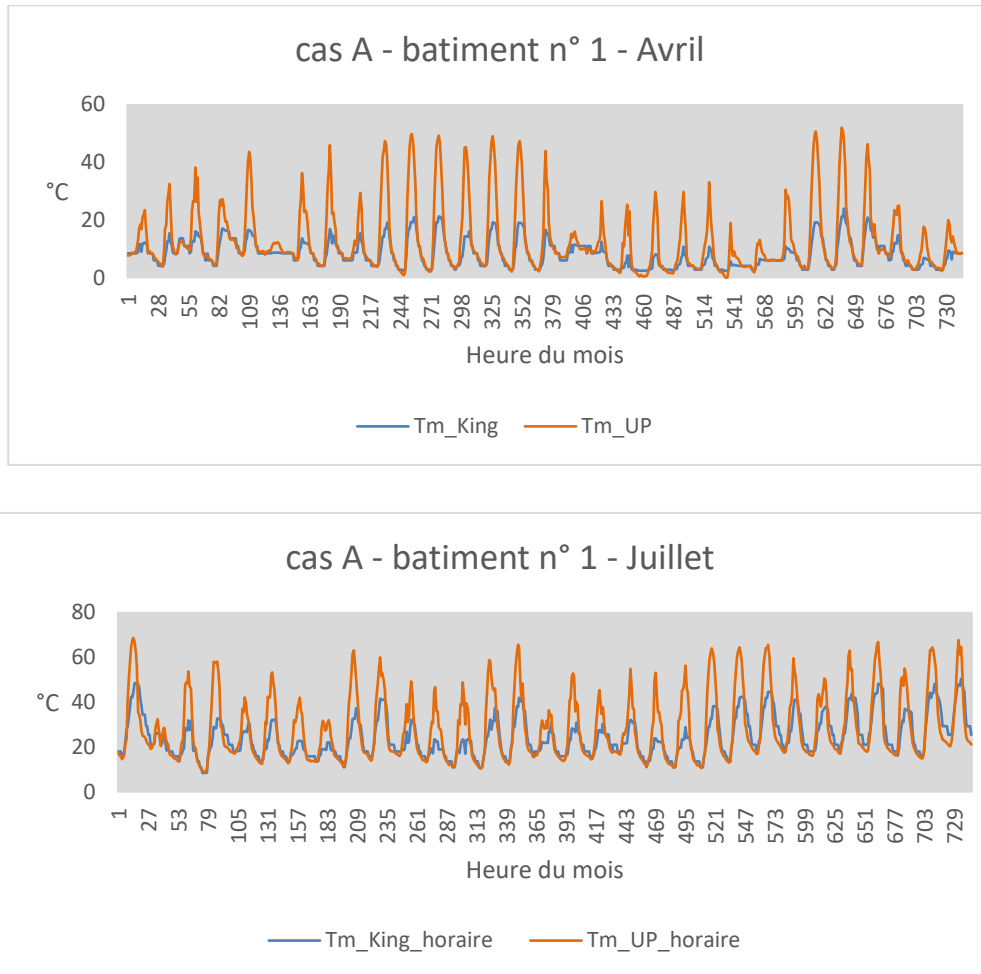


Figure 33 : Modélisation avancée – températures de module comparées aux résultats UrbanPrint

Nous avons reproduit le même processus avec les données expérimentales de la toiture végétalisée et de la peinture hautement réfléchissante pour les mêmes observations.

Afin d'inclure la modalité bitumineuse, nous avons extrait les mesures des tables de la plateforme expérimentale. Cela porte sur une période du 1^{er} juin 2021 au 09 mai 2022, car le 10 mai, la zone a été recouverte de Cool Roof. Cette période ne nous donnant pas d'éléments sur les classes de température d'air [-12,-10], [-10,-8], [-8,-6] et [34,36], [36,38], [38,40] et les courbes déjà obtenues pour les modalités gravier, Cool Roof et végétalisée précédentes étant proches et de même allure, nous construisons les extrémités du profil thermique du revêtement bitumineux comme étant la moyenne des résultats des 3 autres modalités. Ce qui donne les profils tels que présentés sur la FIGURE 34 CI-DESSOUS. De plus, le TABLEAU 3.2-2 CI-DESSOUS indique les périodes et le nombre de valeurs pour chaque modalité de toiture (hormis le complément empirique pour le bitumineux).

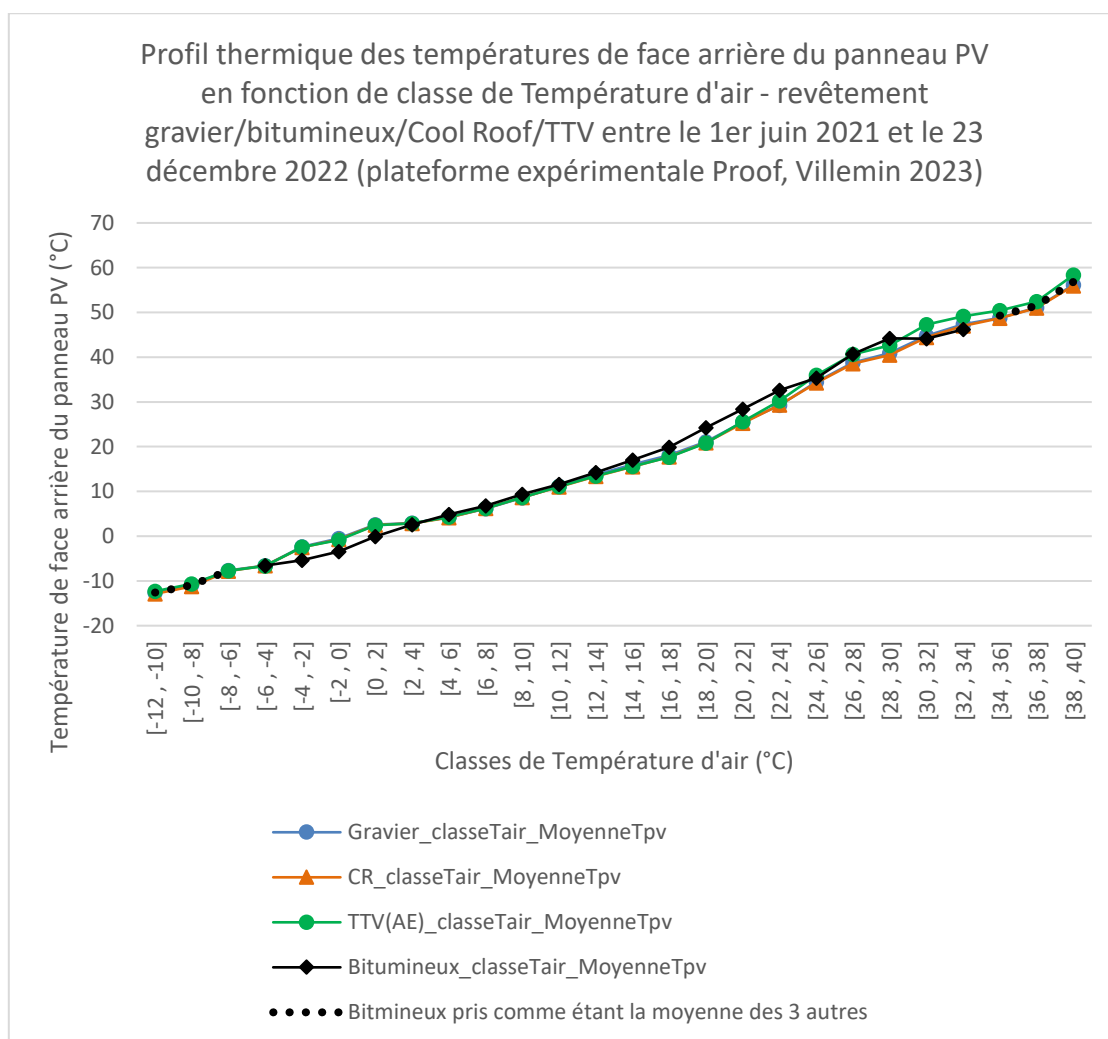


Figure 34 : Modélisation avancée – profils thermiques conçus pour les 4 modalités de toiture

Nous constatons des séries de classes de températures d'air de la station météo de référence de l'expérimentation où la température au dos du panneau PV pour la modalité végétalisée se trouve :

- au-dessus des autres : classes de T_{air} de -4 à 2 °C et de 30 à 40 °C ;
- sous les autres : classes de T_{air} de 4 à 30 °C ;
- au même niveau que les autres ou presque : dans les autres classes de T_{air} du profil thermique.

Tableau 3.2-2 : Modélisation avancée de l'interaction revêtement de toiture/panneau PV, plateforme expérimentale Proof, quantités et périodes des données considérées

Modalité de toiture	Nombre de valeurs	Période de données (manques compris)
Cool Roof	3 755	01/06/2022 au 23/12/2022
Bitumineuse	3 287	01/06/2021 au 09/05/2022
Gravier	3 755	01/06/2021 au 23/12/2022
végétalisée	3 755	01/06/2021 au 23/12/2022

Étant données les faiblesses observées dans la modélisation ci-dessus et afin de la rendre plus robuste, nous entrevoyons au moins deux pistes. Il serait intéressant de la calibrer avec plusieurs jeux de données, sur une année-type ou plusieurs années. En termes de données, ici, elles étaient plutôt

conséquentes, pour les classes du milieu et beaucoup moins aux extrêmes, comme le présente la FIGURE 35 CI-DESSOUS. Cela tient à la nature de la météorologie, mais aussi au fait que l'on considère un jeu de données contenant moins qu'une année civile. D'autre part, il faudrait faire fonctionner ce modèle sur la base de températures d'air dans l'environnement du panneau, pour être au plus près de conditions réelles en termes d'approximation de la température au dos des panneaux PV. Il ne nous semble pas cohérent de valider le modèle et de l'utiliser pour la phase d'analyse de cas d'étude à suivre.

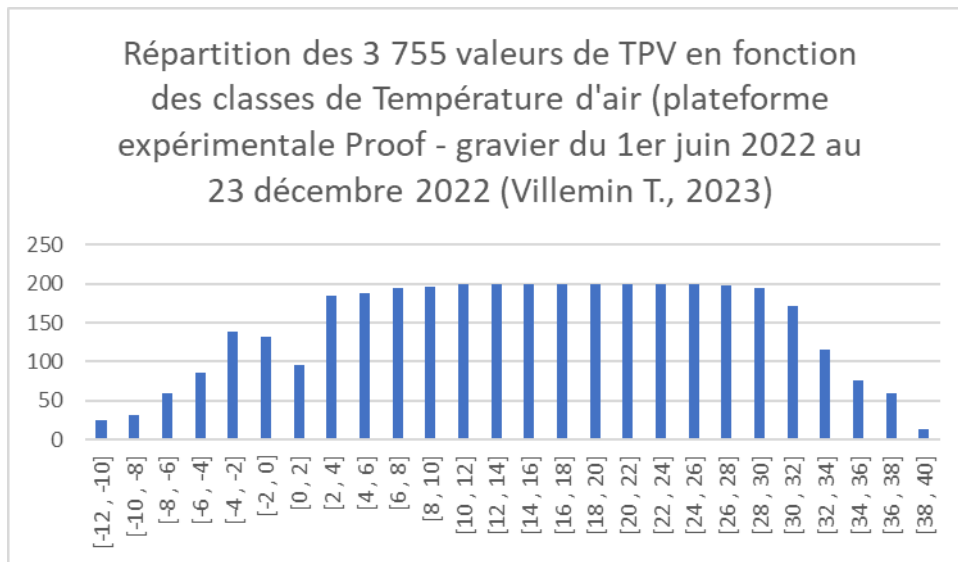


Figure 35 : Modélisation avancée de l'interaction revêtement de toiture/panneau PV - répartition des données de températures dos PV par classe de température d'air (données expérimentales projet Proof, Villemin T., 2023)

Comme indiqué ci-dessus, c'est la méthode des coefficients d'absorption et de réflexion solaires qui sera mise en œuvre et appliquée sur des cas d'étude (SECTION 5 CI-DESSOUS).

4 Axe d'étude n°2 : Toiture, enjeu de biodiversité

4.1 Méthodologie

Comme présenté dans les premières définitions à la SOUS-SECTION 1.2.4 CI-DESSUS, un certain nombre d'indicateurs existent aujourd'hui en France et proposent différentes méthodes de quantification de l'intensité de biodiversité porté par un projet d'aménagement.

Compte tenu de l'objectif de l'axe d'étude n°2 de caractériser le levier de la végétalisation pour la reconquête de la biodiversité dans les aménagements, il s'agit de déterminer comment appliquer la méthode du CBSH sur un certain nombre de cas d'étude à simuler dans le logiciel UrbanPrint, et ainsi analyser le potentiel de cet indicateur pour valoriser l'intégration de la végétalisation. Nous allons ici réfléchir aux moyens de transposer les données de simulation dans un calcul de « CBSH quartier ». Il a été choisi pour cela d'utiliser la connaissance de l'actuelle nomenclature implémentée dans le logiciel et celle du CBSH, qui est présentée à la FIGURE 36 CI-DESSOUS. Les sous-objectifs de l'étude sont :

- d'abord définir le process à effectuer pour passer de la première à la deuxième nomenclature ;
- ensuite de mettre au point un process d'extraction des données projet ;
- d'implémenter le calcul du CBSH ;
- et enfin d'appliquer ce « process CBSH » sur plusieurs cas d'étude, pour analyse.

Nous procéderons en trois étapes :

1- Test préalable du concept CBSH sur les espaces extérieurs de nos cas d'étude, en considérant 3 scénarios de typologies de sol extérieur. Les différentes typologies possibles sont présentées dans le TABLEAU 4.1-1 et les scénarios de typologie au

Tableau 4.1-2 CI-DESSOUS ;

2- Application de la nomenclature du CBSH sur le périmètre des bâtiments de chaque cas d'étude. La démarche de modélisation est présentée à la SOUS-SECTION 4.2 CI-DESSOUS ;

3- En appui à cette deuxième approche, application conjointe des 3 scénarios de typologie de sol aux espaces extérieurs. Ce sont ceux présentés au

Tableau 4.1-2 CI-DESSOUS.

Les résultats pour ces différentes étapes sont présentés aux SOUS-SECTIONS 5.2 ET 5.3 CI-DESSOUS.

Le SCÉNARIO 1 porte les typologies de sol les plus défavorables à la biodiversité, avec une surreprésentation des surfaces imperméables. Le SCÉNARIO 2 évolue vers une certaine mixité des surfaces. Le SCÉNARIO 2BIS diffère du scénario 2 de par le CBSH de l'espace vert artificiel, qui passe de 0,4 à 0,7.

Tableau 4.1-1 : Méthodologie axe n°2, les typologies exhaustives de sol

N° de type	Typologie de sol	N° de type	Typologie de sol
1	Espace piétonnier artificialisé	6	Autres surface imperméabilisées
2	Espace vert artificiel	7	Prairie
3	Parking	8	Forêt
4	Piste cyclable	9	Espace agricole
5	Voirie	10	Zone humide

Tableau 4.1-2 : Méthodologie axe n°2, les scénarios de CBSH pour les typologies de sol utiles

Typologie de sol	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2bis
Espace piétonnier artificialisé	0	0,25	0,25
Espace vert artificiel	0,1	0,4	0,7
Parking	0	0,2	0,2
Piste cyclable	0	0,1	0,1
Voirie	0	0,15	0,15
Autres surface imperméabilisées	-	-	-
Prairie	-	-	-
Forêt	-	-	-
Espace agricole	-	-	-
Zone humide	-	-	-

Les cinq dernières typologies d'usage des sols ne sont pas sollicitées par les cas d'étude sélectionnés, c'est pourquoi ils n'ont pas été pris en compte dans les scénarios à ce stade (en gris dans le tableau).

Après la simulation des cas d'étude pour l'axe d'étude n°1, les informations utiles à l'axe n° 2 sont recueillies de manière automatisée à l'aide de l'écriture et l'exécution d'un script python sur les fichiers de sortie. L'ensemble est ensuite traité, hors du code UrbanPrint, au sein d'un tableur (Microsoft Excel). Les données d'espaces extérieurs sont leurs surfaces et leur répartition dans les typologies de sol ci-dessus. Les quatre cas d'étude sont introduits à la SOUS-SECTION 5.1 CI-DESSOUS, ainsi que les informations spécifiquement nécessaires à l'étude de l'axe n°2.

Nous ne modifierons pas la structure en espaces extérieurs des cas d'étude (jardins, parcs, etc.). Nous nous laissons seulement la possibilité d'ajouter des toitures végétalisées et d'en faire varier les paramètres (épaisseur de substrat notamment). L'atteignabilité des scénarios de végétalisation et les retombées en termes de CBSH seront commentées.

Nomenclature du CBSH

Zones bâties, places et voiries			Coefficients	Espaces végétalisés pleine terre			Coefficients	
Surfaces minérales imperméables			0	1 unique strate végétale : herbacées ou arbustes			0,7	
Surfaces minérales semi-perméables			0,05	Combinaison de 2 strates végétales : herbacées + arbustes ou herbacées + arbres ou arbustes + arbres			0,8	
Surfaces minérales perméables			0,1	Combinaison de 3 strates végétales : herbacées + arbustes + arbres			0,9	
Surfaces minérales imperméables avec arbres			0,15	Friche industrielle polluée			0,4	
Surfaces minérales semi-perméables avec arbres			0,2	Grande culture			0,6	
Surfaces minérales perméables avec arbres			0,25	Prairie			0,8	
Surfaces végétalisées sur bâti et sous-sol (sur toiture, terrasse ou sur dalle)			Coefficients	Friche agricole			0,9	
Surface mixtes			0,2	Espaces naturels			1	
Surface mixte avec arbres			0,25	Masse d'eau			Coefficients	
Bâtiments avec toitures végétalisées ou Espaces verts urbains au sol sur dalle	Extensif - (- de 4 cm de substrat)	1 unique strate végétale : sédums	0,1	Bassin d'eau			0,2	
		1 unique strate végétale : sédums	0,2	Masse d'eau temporaire			Etanche	0,3
	Extensif + (de 7 à 12 cm de substrat)	1 unique strate végétale : sédums ou herbacées ou arbustes	0,3	Non étanche			0,4	
		Combinaison de 2 strates végétales : sédums + herbacées ou sédums + arbustes ou herbacées + arbustes	0,4	Masse d'eau permanente			Etanche	0,5
		Combinaison de 3 strates végétales : sédums + herbacées + arbustes	0,5	Non étanche			0,6	
	Semi-intensif (de 13 à 30 cm de substrat)	1 unique strate végétale : sédums ou herbacées ou arbustes	0,4	<p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">Typologies d'occupation des sols</p> <p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">Coefficients de pondération</p>				
		Combinaison de 2 strates végétales : sédums + herbacées ou sédums + arbustes ou herbacées + arbustes	0,5					
		Combinaison de 3 strates végétales : sédums + herbacées + arbustes	0,6					
	Intensif - (de 31 à 60 cm de substrat)	1 unique strate végétale : herbacées ou arbustes ou arbres	0,5					
		Combinaison de 2 strates végétales : herbacées + arbustes ou herbacées + arbres ou arbustes + arbres	0,6					
		Combinaison de 3 strates végétales : herbacées + arbustes + arbres	0,7					
	Intensif + (+ de 60 cm de substrat)	1 unique strate végétale : herbacées ou arbustes ou arbres	0,6					
Combinaison de 2 strates végétales : herbacées + arbustes ou herbacées + arbres ou arbustes + arbres		0,7						
Combinaison de 3 strates végétales : herbacées + arbustes + arbres		0,8						

Figure 36 : Méthodologie axe n°2, Nomenclature CBSH

4.2 Modélisation

Nous l'avons vu dans l'état de l'art, le calcul du CBSH consiste à multiplier chaque surface constituant le projet par le coefficient CBSH correspondant dans la nomenclature, puis à sommer les termes ainsi obtenus avant de faire une division par la surface totale du projet.

$$\frac{\sum_1^N S_i \times CBSH_i}{S_{tot}}$$

Équation 13

Nous adaptons cette équation à la structuration des données en sortie de simulation de l'outil UrbanPrint. De plus :

- dans le cas de toitures végétalisées, nous retranchons 10% de leur surface pour le calcul (maintenance, équipements, etc.). Hypothèse est prise d'un espace vert artificiel sur dalle avec le substrat compris en 7 et 12 cm et le CBSH le plus faible (0,3 parmi 0,3 ; 0,4 et 0,5) ¹⁴⁹ ;
- les toitures conventionnelles étant imperméables, le CBSH associé vaudra 0.

L'ÉQUATION 13 devient donc :

$$\frac{\sum_1^{N_{EspExt}} S_i \times CBSH_i + \sum_1^{N_{bâtiments\ toit\ végé}} [(0,9 \times S_i) \times 0,3] + \sum_1^{N_{bâtiments\ toit\ imper}} S_i \times 0}{\sum_{EspExt} S_i + \sum_{bâtiments} S_i}$$

Équation 14

La FIGURE 37 CI-DESSOUS permet d'illustrer le travail d'identification des espaces extérieurs et des bâtiments d'un quartier. Les bâtiments (toitures imperméables ou végétalisées), les espaces extérieurs comme les sols imperméables, perméables, semi-perméables ou mixtes et les plans d'eau (étanches, non étanches ou bassins) :

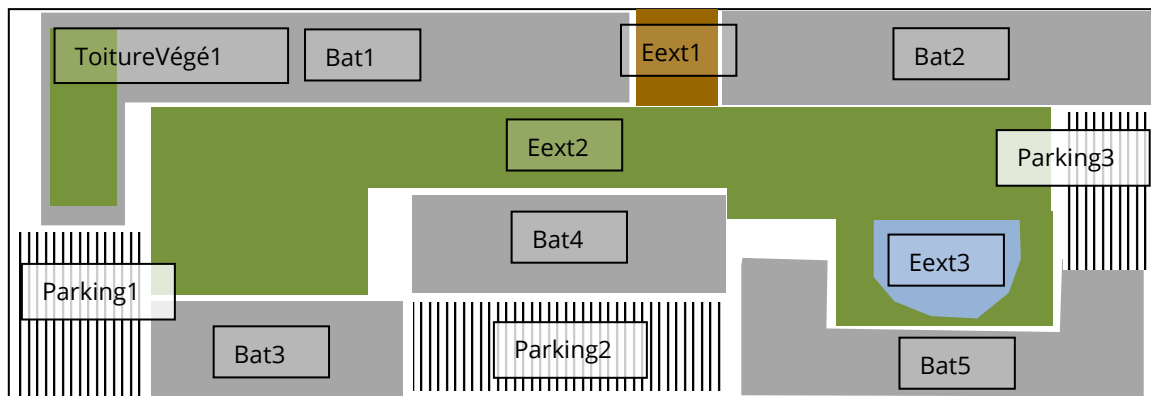


Figure 37 : Méthodologie axe n°2, représentation d'un quartier avec la typologie de sol de ses bâtiments et espaces extérieurs

¹⁴⁹ Voir la nomenclature CBSH à la FIGURE 36 CI-DESSUS.

5 Analyse des cas d'étude et discussion

5.1 Scénarios et cas d'étude

Une base de cas d'étude a été constituée pour les phases d'application et d'analyse des modélisations et elle puise, avec l'accord d'Efficity, dans le vivier de projets que l'Institut a pu accompagner jusqu'ici. Le choix des cas d'étude s'est porté sur différents critères, dont celui de projets intégrant du PV et un axe biodiversité plus ou moins affiché par l'aménageur ¹⁵⁰. Par souci de confidentialité, le nom et l'adresse de ces projets ne seront pas dévoilés. QUATRE PROJETS ont été sélectionnés dont les répartitions en usage des bâtiments sont celles représentées en FIGURE 38 CI-DESSOUS. Typiquement, les trois premiers cas d'étude sont majoritairement composés de LOGEMENTS et pour ce qui est du cas d'étude D, ce sont les BUREAUX qui sont présents en plus grand nombre.

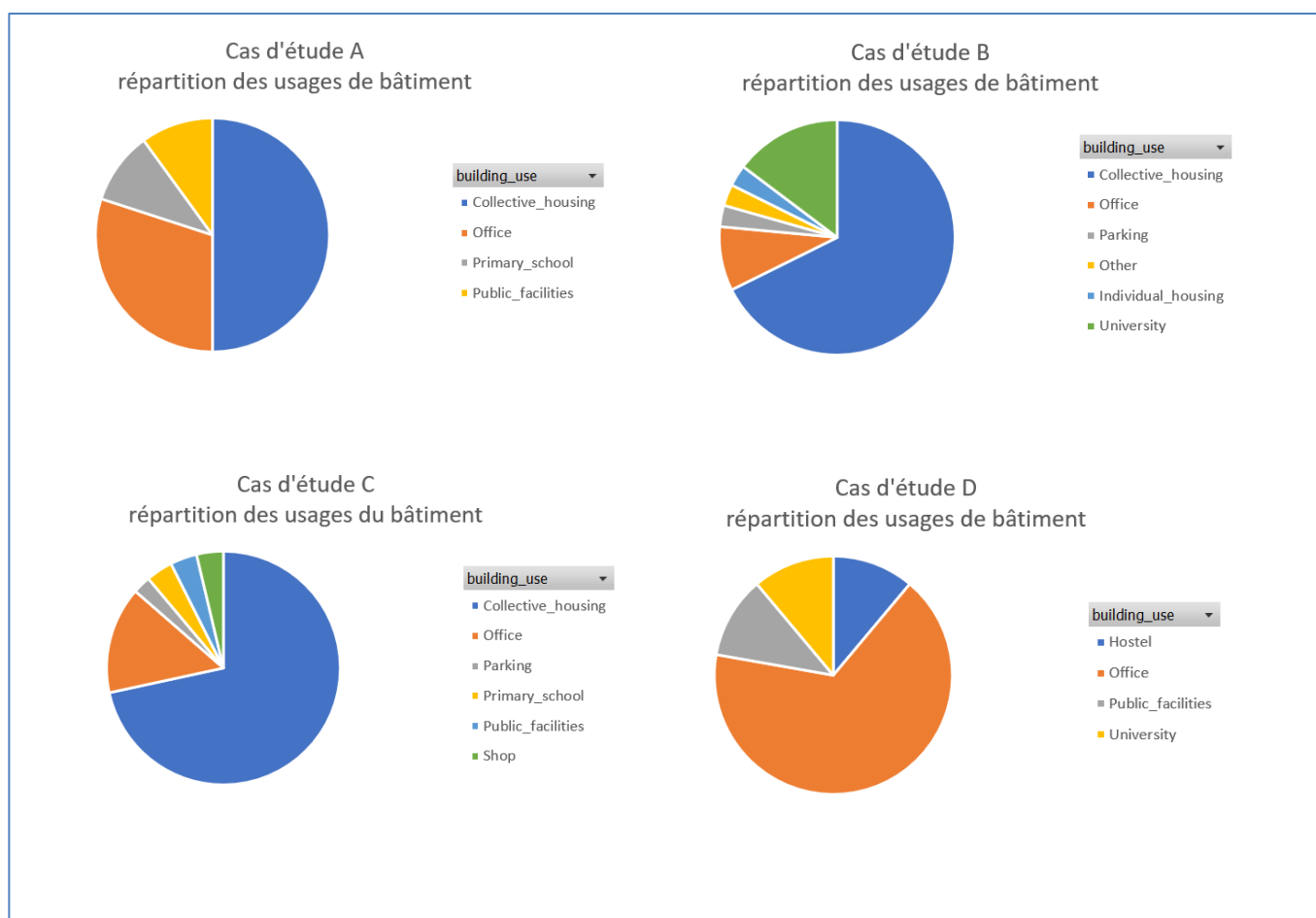


Figure 38 : Cas d'étude, répartition des usages de bâtiment

Pour ces projets, nous disposons des fichiers de stratégie compilés dans UrbanPrint. Leurs plans de masse ont été appréhendés dans la visionneuse de l'outil UrbanPrint et par la même occasion, les bâtiments pour lesquels une installation photovoltaïque est prévue ont pu être identifiés. Le TABLEAU 5.1-1 CI-DESSOUS précise un certain nombre de caractéristiques des projets pris en cas d'étude, dont leur zone climatique ¹⁵¹ :

¹⁵⁰ Voir le retour d'expérience sur les premières opérations d'aménagement QEC : https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/3209/QEC_PublicationFinale_Oct2021_HD.pdf

¹⁵¹ La carte des zones climatiques de la RE2020 est rappelée à l'ANNEXE 6.3, PAGE 111.

Tableau 5.1-1 : Cas d'étude axe n°1, caractéristiques principales

Projet	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
Zone climatique	H1a	H2b	H3	H1a
Nombre de bâtiments	10	34 (avec 1 bâtiment de parking)	86 (dont 2 bâtiments de parkings)	9
Part de bâtiments rénovés	0	0	0	0
Part en niveau Standard	20%	0	2,3%	33%
Part en niveau Élevé	50%	88%	95%	0
Part en niveau Très élevé	30%	12%	2,3%	67%
Part de bâtiments avec PV	9%	41%	57%	100%
Surface d'emprise des bâtiments du quartier (m²)	16 883	28 154	88 587	26 937
Surface d'emprise PV (m²)	5 221	4 738	14 467	18 856

La synthèse de l'état de l'art restituait les orientations du projet de décret et les arrêtés d'application de l'article L171-4 du Code de la construction et de l'habitation, créé par la loi dite « *climat et résilience* » qui prévoit trois échéances pour augmenter graduellement la proportion de végétalisation et/ou d'EnR des toitures : 30 % en 2023, 40% en 2026 et 50% en 2027 ¹⁵². Nous nous inspirons directement de ces seuils pour établir nos QUATRE SCÉNARIOS d'étude des toitures. Les scénarios sont synthétisés au

¹⁵² L'on peut se référer à la SOUS-SECTION 2.3.1.4.

Tableau 5.1-2 CI-DESSOUS. La règle conçue et suivie est la suivante :

- Dans le SCÉNARIO 1, un bâtiment qui est prévu en PV dans le projet initial garde la même emprise en toiture que dans la conception du projet traité. Dans les SCÉNARIOS 2 à 4, cette emprise est fixée au seuil du scénario si l'emprise initiale n'y satisfait pas ;
- Un certain nombre de bâtiments parmi ceux qui ne sont pas prévus en PV dans la conception initiale du projet voient leurs toitures revêtues d'une végétalisation extensive afin que le quartier réponde globalement au seuil des SCÉNARIOS 2 à 4.

Tableau 5.1-2 : Cas d'étude axe n°1, description des 4 scénarios

Modalité de toiture	Absorption/réflexion	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Bitumineuse	0,97 / 0,03	Bâtiments dans le paramétrage du projet initial (emprise de PV initiale)	Bâtiments avec PV ajustés au moins seuil de 30% de l'emprise de toiture, pour ceux qui n'y étaient pas	Bâtiments avec PV ajustés au moins au seuil de 40% de l'emprise de toiture pour ceux qui n'y étaient pas	Bâtiments avec PV ajustés au moins au seuil de 50% de l'emprise de toiture pour ceux qui n'y étaient pas
Gravier	0,8 / 0,2		30%	40%	50%
Cool Roof	0,2 / 0,8		D'ENR/VÉGÉTALISATION SUR LA SURFACE GLOBALE DE TOITURES DU QUARTIER	D'ENR/VÉGÉTALISATION SUR LA SURFACE GLOBALE DE TOITURES DU QUARTIER	D'ENR/VÉGÉTALISATION SUR LA SURFACE GLOBALE DE TOITURES DU QUARTIER
Végétalisation extensive	0,7 / 0,3				

Le « reste à végétaliser » d'un quartier pour satisfaire au SEUIL D'ENR ET/OU VÉGÉTALISATION des scénarios 2 à 4 est déterminé en considérant soit la proportion fixée par le seuil du scénario comme la nouvelle proportion d'emprise de toiture à appliquer à un bâtiment muni de PV, soit en conservant la proportion initiale si elle est supérieure au seuil.

Nous avons visé des bâtiments, sans PV, de surface de toiture supérieure à 1 000 m² quand cela était possible, pour éviter l'effet de dispersion des espaces à maintenir en conditions réelles. Pour ces bâtiments à végétaliser, le coefficient d'absorption solaire de la toiture dans la simulation sera celui associé à une végétalisation extensive (il est de 0,7).

Nous notons $R_{\text{Enr/végé}}$ la couverture en EnR/végétalisation des toitures d'un quartier à l'étude. Elle se calcule comme la somme de la surface végétalisée des toitures du quartier et de la surface PV de ces mêmes toitures, que divise la surface totale d'emprise des bâtiments¹⁵³. Seuls les cas d'étude B et C demandent l'application de tous les scénarios, le cas A, deux scénarios et le cas D, aucun, car il atteint initialement une couverture $R_{\text{Enr/végé}}$ de 70%, grâce au PV installé sur tous les bâtiments (70% d'emprise toiture). Le TABLEAU 5.1-3 CI-DESSOUS synthétise les éléments d'application des scénarios pour les quatre cas d'étude :

Tableau 5.1-3 : Cas d'étude axe n°1, stratégie de végétalisation des bâtiments en application des scénarios

Scénario	Paramètre	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
Scénario 1	$R_{\text{Enr/végé}}$ initial (%)	31%	17%	16%	70%
Scénario 2	Surface de toiture associée au seuil du scénario (m ²)	5 065	8 446	26 576	8 081
	Nombre de bâtiments « à végétaliser » (exclut les bâtiments PV)	0	4	10	0
	$R_{\text{Enr/végé}}$ final (%)	-	32%	30%	-

¹⁵³ Pour rappel, la stratégie de végétalisation est construite de manière à ce qu'elle ne concerne que des bâtiments sans PV (voir la présentation de la stratégie qui suit le Tableau 5.1-1 ci-dessus).

Scénario 3	Surface au sol associée au seuil du scénario (m ²)	6 753	11 261	35 435	10 775
	Nombre de bâtiments « à végétaliser » (hors bâtiments PV)	1	5	16	0
	$R_{\text{Enr/végé}}$ final (%)	40%	40%	43%	-
Scénario 4	Surface au sol associée au seuil du scénario (m ²)	8 442	14 077	44 294	13 469
	Nombre de bâtiments « à végétaliser » (hors bâtiments PV)	3	8	19	0
	$R_{\text{Enr/végé}}$ final (%)	53%	51%	52%	-

Enfin, en vue du calcul du CBSH, le TABLEAU 5.1-4 CI-DESSOUS présente les caractéristiques des cas d'étude en termes de surface des espaces extérieurs. Nous pouvons noter certaines spécificités, telles que :

- le cas A présente très peu de surface de parking et de piste cyclable ;
- le cas B présente une très grande surface d'espaces extérieurs (293% de plus que l'emprise au sol des bâtiments) ;
- le cas C présente une surface d'espace vert artificiel quasi égale à celle de l'emprise des bâtiments ;
- pour les quatre cas d'étude, les espaces verts artificiels représentent respectivement 51%, 292%, 99,6% et 15% de la surface d'emprise des bâtiments.

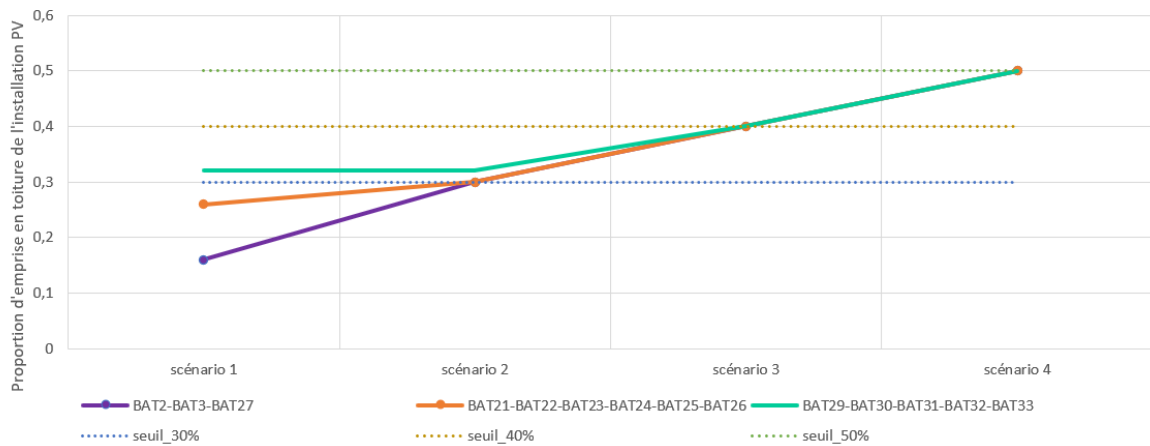
Tableau 5.1-4 : Cas d'étude axe n°2, surfaces et typologies de sol pour le calcul du CBSH

Projet	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
Surface d'emprise des bâtiments du quartier	16 883	28 154	88 587	26 938
Espace piétonnier artificialisé	11 010	110 750	40 118	2 393
Espace vert artificiel	8 674	82 073	88 212	3 916
Parking	634	24 558	2 575	598
Piste cyclable	317	10 200	1 288	299
Voirie	1 267	22 319	5 150	1 197

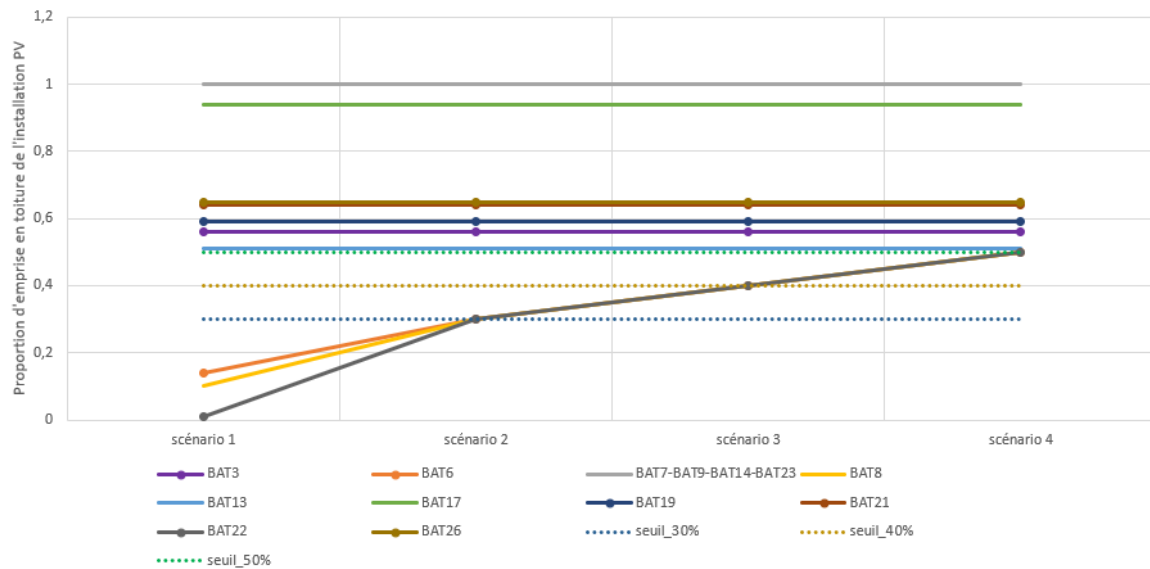
5.2 Résultats sur les cas d'étude à l'échelle quartier

Le résultat d'application des scénarios aux cas d'étude est représenté sur les graphiques de la FIGURE 39 CI-DESSOUS, le scénario 1 correspondant au projet dans sa conception initiale, le scénario 2 au projet modifié pour respecter le seuil de 30% d'EnR/végétalisation à l'échelle globale du quartier, le scénario 3 celui de 40% et le scénario 4, celui de 50%. Ces 3 seuils sont représentés par des droites horizontales sur les graphiques. Les cas A et D dépassant d'emblée 50% d'emprise toiture avec respectivement 77 et 70% de couverture PV, se référer au dernier graphique de la figure pour l'allure dans les deux cas :

Evolution de l'emprise de toiture correspondant aux installations PV des bâtiments en disposant (cas B)



Evolution de l'emprise de toiture correspondant aux installations PV des bâtiments en disposant (cas C)



Evolution de l'emprise de toiture correspondant aux installations PV des bâtiments en disposant (cas D)

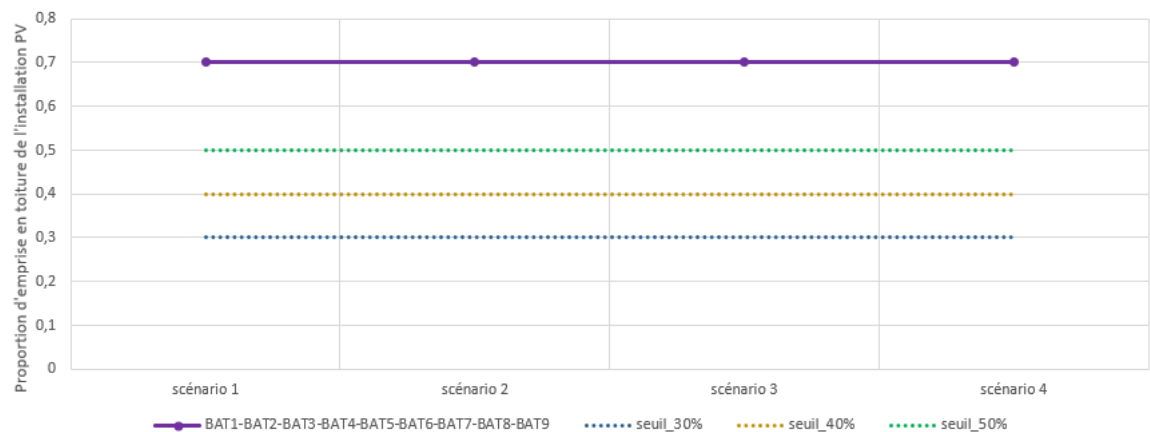


Figure 39 : Cas d'étude axe n°1, Proportion de surface de toiture dédiée au PV pour chaque scénario d'étude

Nous présentons ici une analyse détaillée du premier cas d'étude, le cas A, dans lequel 3 bâtiments sont pourvus de panneaux photovoltaïques. Nous les dénommerons dans ce qui suit : bâtiment 1, bâtiment

2 et bâtiment 3. Nous avons fixé un scénario 1 où les bâtiments sont tous construits avec la même modalité de toiture et donc avec les mêmes coefficients d'absorption et de réflexion solaires. C'est le scénario le moins réaliste, mais qui a l'intérêt de pouvoir servir de référence à des scénarios comme les scénarios 2 à 4 établis. Comme l'illustre la FIGURE 40 CI-DESSOUS, l'ordre des productions des modalités de toiture les unes par rapport aux autres est celui déjà obtenu à la SOUS-SECTION 3.2.3.1 CI-DESSUS.

Le TABLEAU 5.2-1 CI-DESSOUS présente l'écart de production pour les trois bâtiments entre le scénario 1 de la modalité Cool Roof et le scénario 1 de la modalité végétalisée. Nous reportons les écarts de toutes les modalités à la modalité de référence dans le TABLEAU 5.2-2 CI-DESSOUS. Avec la modélisation appliquée, nous ne nous inscrivons pas dans la lignée des résultats expérimentaux de la littérature scientifique référencée dans l'état de l'art, qui décrivent les toitures végétalisées comme permettant de produire plus qu'avec n'importe quelle autre toiture classique. La modélisation la place néanmoins en meilleure position que la toiture bitumineuse, recouverte de gravier ou non.

Tableau 5.2-1 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de production photovoltaïque sur toiture végétalisée par rapport à une toiture Cool Roof

Bâtiment	Modalité végétalisée
1	-2,7%
2	-2,7%
3	-2,7%

Tableau 5.2-2 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de production photovoltaïque annuelle moyenne en fonction de trois modalités de toiture et écart à la modalité de référence

	Bitumineuse	Gravier	Végétalisée
Production en MWh/an	319	322	324
Écart à la référence en % (Cool Roof)	-4,2%	-3,3%	-2,7%

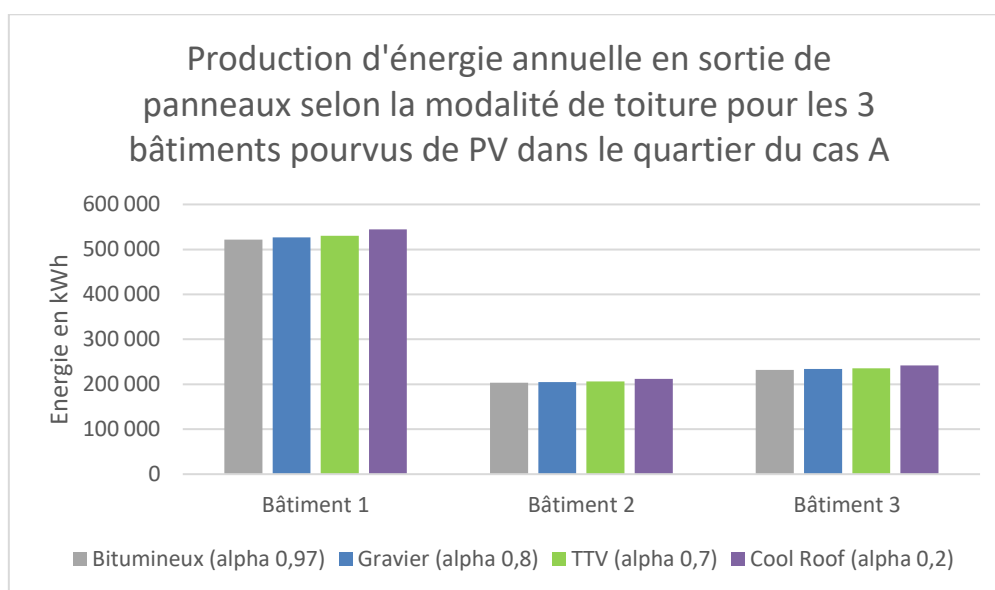


Figure 40 : Cas d'étude A axe n° 1, résultats de production d'énergie des bâtiments, dans le scénario 3

Si l'on ramène les productions annuelles du quartier par modalité à la surface de PV, l'on obtient un ratio moyen compris entre 183 et 191 Wh/m².an, qui correspondent respectivement au revêtement bitumineux et au revêtement Cool Roof ¹⁵⁴.

En termes d'autoconsommation d'énergie du quartier, comme le montre le TABLEAU 5.2-3 CI-DESSOUS, elle croît avec le coefficient d'absorption solaire de la toiture. Les autoconsommations sont respectivement de 91,3% ; 91,4% ; 91,2% et 90,7% pour le gravier, le revêtement bitumineux, la végétalisation extensive et le Cool Roof ¹⁵⁵. Le meilleur résultat (la modalité bitumineuse), surpasse la modalité Cool Roof de 0,8%. Les résultats d'autoconsommation, autoproduction sont aussi représentés sur la FIGURE 41 CI-DESSOUS.

Tableau 5.2-3 : Cas d'étude A axe n°1, résultats de l'indicateur d'autoconsommation de l'énergie photovoltaïque à l'échelle du quartier

ELEC AUTO CONSO DISTRICT				
Scénario	$\alpha = 0,97$	$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,7$	$\alpha = 0,2$
S1	0,914	0,913	0,912	0,907
S2	Scénario non utile car le seuil d'EnR/végétalisation est déjà initialement respecté par le projet			
S3	0,914	0,913	0,912	0,907
S4	0,914	0,913	0,912	0,907

Il est aussi possible de représenter graphiquement simultanément le résultat de production PV et les indicateurs d'autoconsommation et autoproduction et l'on voit alors des deux informations laquelle permet de mieux départager les modalités de toiture : la production en sortie de panneau. La FIGURE 41 CI-DESSOUS est présentée pour le scénario 1 du cas A :

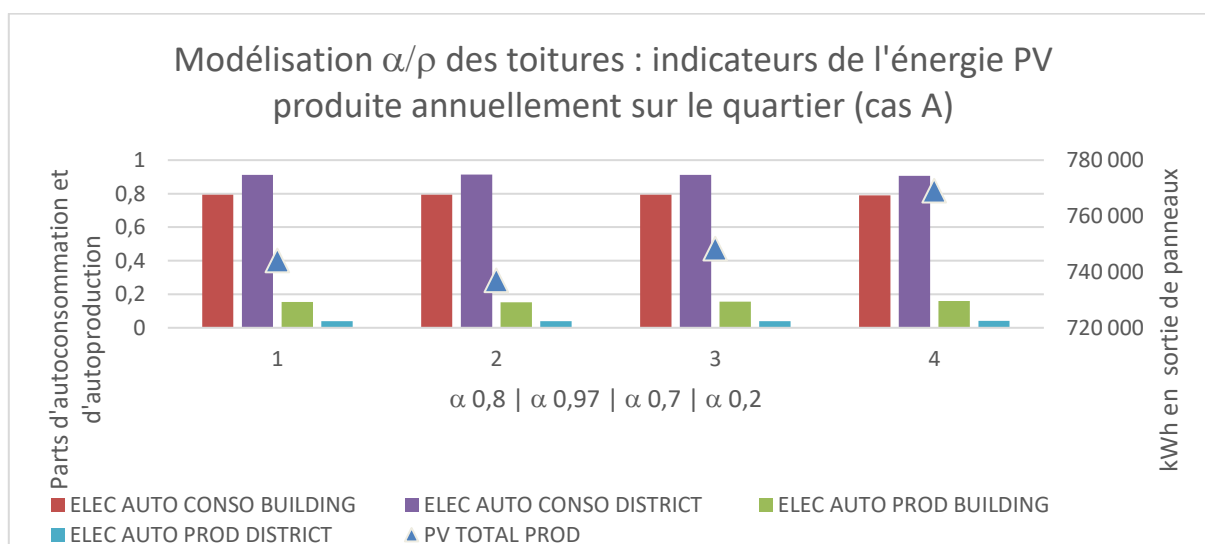


Figure 41 : Cas d'étude axe n°1, résultats d'indicateurs énergie à l'échelle du quartier dans le scénario 1

¹⁵⁴ Les surfaces PV sont reportées au Tableau 5.3-2 ci-dessous.

¹⁵⁵ Le constat est déjà celui-ci au niveau bâtiment (indicateur moyen).

Il peut être intéressant de se baser ici sur le gain de surfaces végétalisées et PV opérés pour répondre à chaque scénario. Le TABLEAU 5.1-3 CI-DESSUS est ainsi complété pour obtenir le TABLEAU 5.2-4 CI-DESSOUS. Ce dernier permet aussi de comparer la performance des projets par rapport aux trois seuils de PV/végétalisation installés en toiture dans le projet de décret et ses deux arrêtés en application de l'article L171-4 du code de la construction et l'habitation. Toutes les valeurs de $\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ au-dessus ou égales au seuil du scénario considéré correspondent à un cas d'étude qui satisfait le scénario (valeurs en vert dans le tableau). La présence d'un tiret au lieu d'une valeur est aussi un aspect positif. Cela signifie que le scénario en question n'a pas besoin d'être appliqué au cas d'étude, car il est déjà satisfait dans l'état initial du projet (scénario 1). C'est la situation du cas d'étude A, pour le scénario 2, et celle du cas d'étude D, vis-à-vis de tous les scénarios. Comme vu à la SOUS-SECTION 5.1 CI-DESSUS, nous rappelons que le $\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ ne s'obtient pas en sommant le gain de végétalisation et le gain de surface PV, mais bien en divisant la somme de surface végétalisée et de surface PV du quartier par la surface totale d'emprise des bâtiments.

Tableau 5.2-4 : Cas d'étude axe n°1, détails de l'application de la stratégie de végétalisation/installation PV

Paramètre du quartier		Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
Scénario 1	Surface totale de toiture	16 883	28 154	88 587	26 938
	Surface initiale toiture végétalisée (m ²)	0	0	0	0
	Surface initiale avec PV (m ²)	5 221	4 738	14 467	18 856
	$\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ du quartier	31%	17%	16%	70%
Scénario 2	Surface supplémentaire attendue par le scénario (m ²)	-	3 708	12 109	-
	Gain de surface réalisé en PV pour atteindre les seuils bâtiments PV	-	+34%	+16%	-
	Gain de surface réalisé en végétalisation pour atteindre le seuil quartier	-	+10%	+11%	-
	$\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ du quartier	-	31%	30%	-
Scénario 3	Surface supplémentaire attendue par le scénario (m ²)	1 532	6 523	20 967	-
	Gain de surface réalisé en PV pour atteindre les seuils bâtiments PV	+0%	+74%	+32%	-
	Gain de surface réalisé en végétalisation pour atteindre le seuil quartier	+10%	+11%	+22%	-
	$\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ du quartier	40%	40%	43%	-
Scénario 4	Surface supplémentaire attendue par le scénario (m ²)	3 220	9 339	29 826	-
	Gain de surface réalisé en PV pour atteindre les seuils bâtiments PV	0%	+118%	+49%	-
	Gain de surface réalisé en végétalisation pour atteindre le seuil quartier	+22%	+15%	+28%	-
	$\mathcal{R}_{\text{EnR/végé}}$ du quartier	53%	51%	+52%	-

Le gain de surface PV et le gain de surface végétalisée sont respectivement calculés par rapport à la surface initiale de PV et à la surface initiale de végétalisation en toiture (scénario 1). Les gains de surface PV apportés par les scénarios 2 à 4 sont très disparates d'un cas d'étude à l'autre. De plus, une fois la règle sur le PV appliquée aux bâtiments qui en sont munis, l'on observe un « effort restant » de végétalisation de la toiture compris entre 19 et 100% de la surface de toiture totale du quartier, tous cas d'étude confondus.

La FIGURE 42 CI-DESSOUS donne à voir la production d'énergie en sortie de panneau PV de chaque bâtiment du cas d'étude A, pour chaque scénario et pour deux modalités de toiture, DANS LA VARIANTE OÙ LES BÂTIMENTS PV SERAIENT INITIALEMENT À 20% D'EMPRISE DE LA SURFACE DE TOITURE. Nous constatons une variation de production en toiture végétalisée comprise entre -1,8% et -3,6% par rapport à la toiture revêtue de Cool Roof. Quels que soient la modalité de toiture et le bâtiment considérés, l'on observe également qu'à ± 1 MWh près, le gain de production PV est constant en passant du scénario 1 au scénario 2, du scénario 2 au scénario 3 et du scénario 3 au scénario 4 ¹⁵⁶.

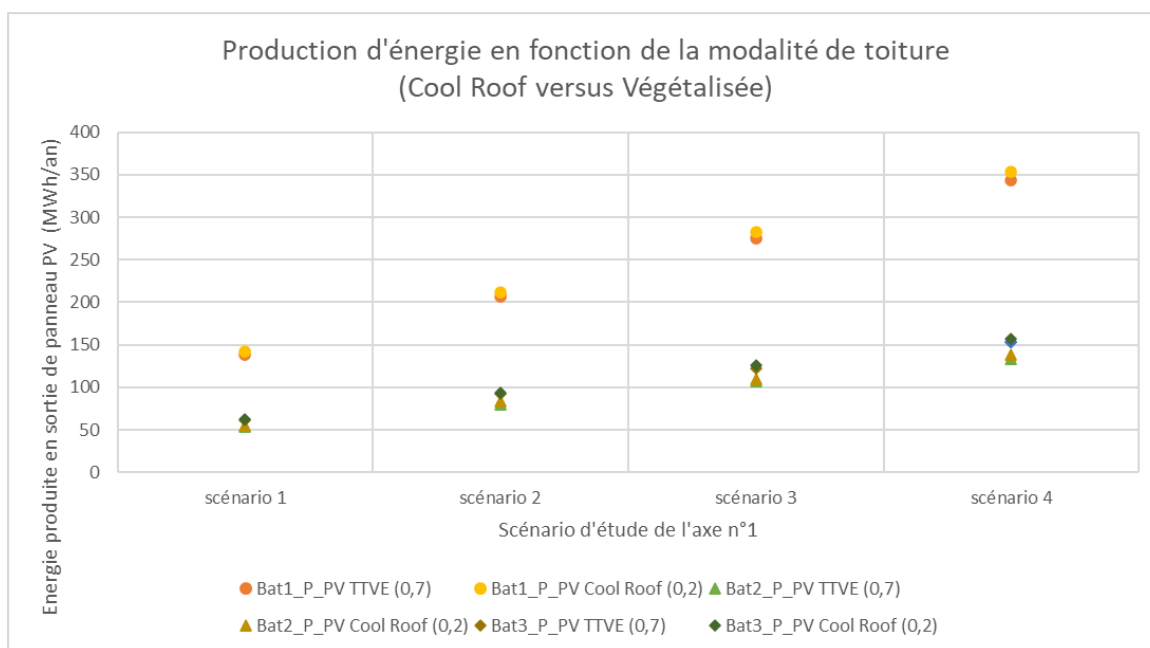


Figure 42 : Cas d'étude A [variante] axe n°1, comparatif des productions d'énergie PV sur les 4 scénarios pour les modalités Cool Roof et végétalisée

Nous donnons à présent les résultats de l'application de la modélisation du CBSH sur les projets simulés dans une nomenclature différente (nomenclature UrbanPrint présentée à la SOUS-SECTION 4.1 CI-DESSUS).

Au périmètre des espaces extérieurs seuls, nous avons observé le résultat représenté à la FIGURE 43 CI-DESSOUS. Les cas d'étude étant très différents du point de vue de leurs espaces extérieurs, cela se retranscrit dans le résultat de leur CBSH. Cependant, la tendance est claire, le scénario 2bis permet les meilleurs résultats. L'on atteint même un CBSH de 49% pour le cas d'étude C avec le scénario 2bis, contre 6% dans le scénario 1.

¹⁵⁶ A noter que dans cette variante du cas A appliquée, la proportion de surface de toiture en PV de chaque bâtiment PV passe de 0,2 à 0,3 lors du passage du scénario 1 au scénario 2. L'écart de proportion entre scénarios est donc toujours de 10%.

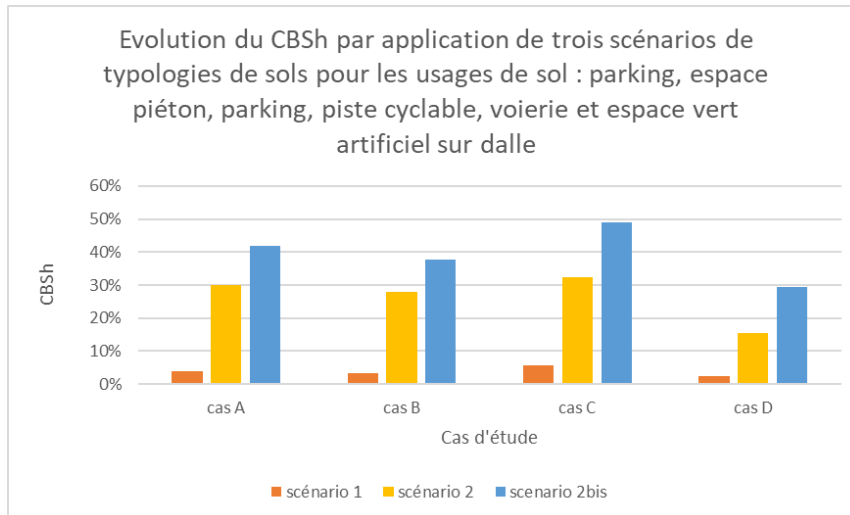


Figure 43 : Cas d'étude axe n°2, le CBSH au périmètre des espaces extérieurs seuls

Au périmètre des bâtiments, le constat est représenté au TABLEAU 5.2-5 CI-DESSOUS. C'est la végétalisation ou non des toitures, ainsi que la surface de toiture qui vient jouer sur la valeur de CBSH, car un bâtiment non végétalisé à un poids nul dans le calcul du CBSH du quartier (voir SOUS-SECTION 4.2 CI-DESSUS pour la formule de calcul).

Tableau 5.2-5 : Cas d'étude axe n°2, résultat intermédiaire de CBSH au périmètre des bâtiments

Cas d'étude	Scénario	Surface au sol des bâtiments (m²)	Nombre de bâtiments végétalisés	CBSH bâtiments
Cas A	S1	16 883	0	-
	S2		0	-
	S3		1	0,03
	S4		3	0,07
Cas B	S1	28 154	0	-
	S2		4	0,02
	S3		5	0,03
	S4		8	0,04
Cas C	S1	88 587	0	-
	S2		10	0,03
	S3		16	0,03
	S4		19	0,08
Cas D	S1	26 938	0	-
	S2		0	-
	S3		0	-
	S4		0	-

Les résultats présentés de cette manière montrent qu'à l'échelle des bâtiments, la typologie de végétalisation et la surface de toiture ciblées sont déterminantes pour le calcul du CBSH quartier. Cette étape du CBSH à l'échelle du quartier, c'est-à-dire au périmètre des espaces extérieurs et bâtiments est développée à la SOUS-SECTION 5.3 CI-DESSOUS.

5.3 Discussion

Les résultats de la modélisation par l'absorption et la réflexion solaires ne démontrent pas la prépondérance de la toiture végétalisée pour une meilleure production d'énergie photovoltaïque. Cela nous conforte dans l'idée que cette modélisation est limitée et qu'il faut l'améliorer. Elle est en cohérence avec les résultats issus de la littérature scientifique par rapport aux toitures de revêtement bitumineux ou de couverture gravier, mais elle ne l'est pas par rapport aux revêtement blanc de type Cool Roof.

Dans l'état actuel du modèle, discutons cependant les résultats obtenus sur les axes énergie et biodiversité :

A l'instar du cas A, le cas D est un cas d'étude où les seuils d'EnR/végétalisation sont déjà surpassés dans leur conception initiale, en ce qui concerne les bâtiments munis de PV. En revanche, les cas B et C sont deux projets qui permettent de mieux appréhender l'influence des scénarios réglementaires sur la production et les indicateurs d'énergie (de même pour le cas A en variante). Concernant l'impact de la végétalisation implantée en sous-face de panneaux PV, il s'observe directement à l'aide du seul scénario 1 et ce pour tous les cas d'étude. Nous avons décrit le résultat sur l'exemple des 3 bâtiments du cas A. L'étudier sur plusieurs quartiers permet d'obtenir un ordre de grandeur moyen du gain de production d'énergie en kWh, ramené au mètre carré de surface utile/habitable du quartier. À l'échelle du cas A, cet ordre de grandeur est de +0,8% par rapport à une toiture couverte de gravier et de -2,7% par rapport à une toiture revêtue de peinture réfléchissante blanche Cool Roof. Le Cool Roof n'est cependant pas un matériau conventionnel, au titre qu'il n'est que sous Atex en France ¹⁵⁷ et qu'il fait l'objet de nombreuses pathologies là où il est mis en œuvre, de par un vieillissement prématuré qui se manifeste par un rosisement, voire un craquèlement.

Pour le CBSH, nous avons choisi de considérer des scénarios d'espaces extérieurs défavorables et moyens en termes de CBSH, avec par exemple de la voirie et des pistes cyclables imperméables dans le premier cas, et des espaces piétonniers faiblement imperméabilisés et des espaces verts, parkings et voiries arborés dans le deuxième. Il en résulte un CBSH qui varie entre 2 et 94%. Ainsi, le CBSH est un indicateur très sensible aux choix de conception et permet d'évaluer une diversité de typologies d'espaces. L'étude de cas menée démontre que la végétalisation des toitures des bâtiments contribue effectivement à la biodiversité au sens du CBSH. Les toitures en étant au moins végétalisées de manière extensive (1 strate végétale et 7 à 12 cm de substrat), apportent à l'échelle des quatre cas d'étude, entre 1 et 15% de gain sur le CBSH, compte tenu d'un effort combiné sur la nature des espaces extérieurs. Les résultats de CBSH dans cette étude sont illustrés au TABLEAU 5.3-1 CI-DESSOUS. Le scénario 1 de l'axe d'étude n°1 pouvant correspondre au cas où toutes les toitures sont végétalisées (α de 0,7), nous distinguons les résultats de CBSH quartier pour ce cas de celui où les toitures ne le sont pas (modalités bitumineuse, gravier et Cool Roof).

¹⁵⁷ Atex du Cool Roof <https://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/detail/2913-v1/>

Tableau 5.3-1 : Cas d'étude axe n°2, résultats des CBSH avec les scénarios croisés Bâtiment (4)/Espaces extérieurs (3)

scénario esp. ext.	Scénario Bat 1			cas A	Scénario Bat 1		
	Ext1	Ext2	Ext2bis		Ext1	Ext2	Ext2bis
cas A	0,02	0,17	0,24	cas A	0,14	0,29	0,35
cas B	0,04	0,38	0,51	cas B	0,04	0,38	0,51
cas C	0,09	0,52	0,79	cas C	0,09	0,52	0,79
cas D	0,06	0,39	0,74	cas D	0,06	0,39	0,74

scénario esp. ext.	Scénario Bat 2			Scénario Bat 3			Scénario Bat 4		
	Ext1	Ext2	Ext2bis	Ext1	Ext2	Ext2bis	Ext1	Ext2	Ext2bis
cas A	0,02	0,17	0,24	0,03	0,18	0,25	0,05	0,20	0,27
cas B	0,05	0,38	0,51	0,05	0,38	0,52	0,05	0,38	0,52
cas C	0,15	0,58	0,85	0,21	0,63	0,90	0,24	0,67	0,94
cas D	0,06	0,39	0,74	0,06	0,39	0,74	0,06	0,39	0,74

Ici, le Coefficient de Biotope par Surface est :

- meilleur sans être bon pour le cas A, pour un scénario bâtiment en combinaison avec un scénario d'espace extérieur au moins égal au scénario d'espace extérieur n°2 ;
- constant sur les 4 scénarios bâtiment, mais meilleur en combinaison avec le scénario Ext2bis pour le cas B ;
- déjà excellent dès le scénario Bat1 (toiture végétalisée ou imperméabilisée), dès la combinaison avec le scénario Ext2 pour le cas C ;
- haut dès le Scénario Bat1 en combinaison avec le scénario Ext2bis, pour le cas D.

Nous constatons donc que la végétalisation systématique des toitures d'un quartier permet de gagner quelques points de CBSH, assurément si la typologie est supérieure à ce qui a été considéré dans l'étude selon la nomenclature CBSH. Quand la modélisation des toitures selon l'axe n°1 sera améliorée de manière à être en phase avec les résultats de la littérature scientifique, il sera alors possible d'affiner la discussion, car nous aurons alors une convergence du gain de production d'énergie PV avec un CBSH favorisé par cette végétalisation des toitures PV. Par le même temps, le quartier pourra bénéficier de meilleurs services écosystémiques cités aux SOUS-SECTIONS 2.3.7 ET 2.3.8 CI-DESSUS (lutte contre les îlots de chaleur urbains, gestion des eaux de pluie, stockage/séquestration du carbone). Cette perspective est donc propice à la démocratisation du CBSH, car il serait complémentaire aux enjeux énergétiques.

Comme contraintes non prises en compte dans la présente étude, nous évoquons : le choix des bâtiments à végétaliser (contraintes de maintenance, etc.) et le choix des emprises de toiture pour le PV. En effet, nous avons mis en œuvre une stratégie théorique selon laquelle les proportions d'emprise PV peuvent être augmentées, sans considérer si techniquement il n'y a pas de contrainte qui s'y opposerait ou si au contraire, il n'y aurait pas l'opportunité de viser de plus grandes emprises. Cela serait pertinent à prendre en compte dans de futures études, surtout pour appliquer des scénarios bâtiment par bâtiment, au lieu ou en complément de l'échelle quartier retenue ici au périmètre de certains bâtiments non pourvus de PV.

Au-delà de ces considérations des contraintes techniques, et pour clore cette sous-section dédiée à la discussion des résultats de l'étude, nous terminons par une approche économique. Cette contrainte tient une grande part dans le décret qui viendrait en application de l'article L171-4 du code de la construction et de l'habitation. Il prévoirait en effet de nombreux cas de dérogation à appliquer l'article. Une analyse

simplifiée des coûts d'investissement est proposée dans le TABLEAU 5.3-2 CI-DESSOUS ¹⁵⁸. En considérant un ratio d'investissement de 500 € H.T./m² installé et avec un coût additionnel de 600€/m² pour le raccordement électrique et le renforcement de structure que l'on va aussi considérer hors taxes, l'on obtient un investissement qui varie entre 320 000 et 2 030 000 d'euros hors taxes dans le cas d'étude A (variante), ce qui n'est pas négligeable.

Tableau 5.3-2 : Cas d'étude A, discussion sur l'investissement économique des toitures biosolaires

Cas d'étude	Bâtiment	Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3		Scénario 4	
		S_PV (m ²)	Invest. (M€ HT)	S_PV (m ²)	Invest. (M€ HT)	S_PV (m ²)	Invest. (M€ HT)	S_PV (m ²)	Invest. (M€ HT)
Cas base	1	2848,23	3,13	2848,23	3,13	2848,23	3,13	2848,23	3,13
	2	1108,03	1,22	1108,03	1,22	1108,03	1,22	1108,03	1,22
	3	1265,11	1,39	1265,11	1,39	1265,11	1,39	1265,11	1,39
Cas A variante	1	739,8	0,81	1109,7	1,22	1479,6	1,63	1849,5	2,03
	2	287,8	0,32	431,7	0,47	575,6	0,63	719,5	0,79
	3	328,6	0,36	492,9	0,54	657,2	0,72	821,5	0,90

Le cas A de base ne déclenchant aucune augmentation de surface pour l'installation photovoltaïque, nous concentrons l'analyse sur la variante du cas A, où l'on part de 20% d'emprise PV sur les toitures (scénario 1). Dans cette variante, en moyenne sur les 3 bâtiments munis de PV : l'investissement double presque en passant du scénario 1 au scénario 2 ; augmente d'un peu plus d'un tiers en passant du scénario 2 au scénario 3 ; et d'un quart en passant du scénario 3 au scénario 4.

¹⁵⁸ Analyse économique succincte sur la base de l'état de l'art de la SOUS-SECTION 2.4.3.

Conclusion

Nous avons mené ici une étude de la végétalisation des toitures selon deux axes, l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque et l'amélioration de l'accueil de la biodiversité en milieu urbain. L'esprit du nouvel article L171-4 du code de la construction et de l'habitation est très certainement d'aborder la question de la végétalisation et des énergies renouvelables en toiture bâtiment par bâtiment (SOUS-SECTION 2.3.1.4 CI-DESSUS). Dans la présente étude, nous avons ramené la question à l'échelle du quartier et il s'agit donc de scénarios d'étude faibles par rapport aux critères du projet de décret et d'arrêtés d'application de cette législation. Toujours est-il, ces scénarios permettent de démontrer la capacité à combiner les deux types de surface pour atteindre la couverture réglementaire dans une certaine mesure. Si ces scénarios réglementaires potentiels permettent de favoriser les énergies renouvelables et la végétalisation en toiture, l'on peut toutefois s'interroger sur la dimension économique de ces exigences (SOUS-SECTION 5.3 CI-DESSUS), et sur la maîtrise de l'impact carbone de leur mise en œuvre concrète sur les bâtiments (voir ci-dessous).

Ainsi, un logiciel comme UrbanPrint permet de quantifier l'impact carbone d'un projet d'aménagement en intégrant, éventuellement à terme, les différentes modalités de toitures, toitures biosolaires comprises. En ce qui concerne la végétalisation, l'approche insérée à L'ANNEXE 6.4 PAGE 113 du présent mémoire donne quelques éléments de compréhension classant les toitures végétalisées comme plus défavorables que les seules toitures conventionnelles. En effet, l'écart en impact carbone à une toiture classique non recouverte est supérieur à 75%, et celui à une toiture classique couverte de gravier est supérieur à 50%. Ces considérations sont réalisées sans disposer de l'ACV de la couche végétale. L'étude comparative entre les toitures pourra donc être stabilisée lorsque l'on disposera de ces informations. Or, les bénéfices de la végétalisation sont variés, comme cela a été exposé aux SOUS-SECTIONS 2.3.7 ET 2.3.8 CI-DESSUS. Les travaux scientifiques doivent se poursuivre, afin de mettre à disposition des décideurs les outils d'une évaluation sur les impacts énergétique et carbone, écosystémiques au sens large de la végétalisation des toitures. Parmi les services écosystémiques et d'après le deuxième axe pris dans la présente étude (la biodiversité), nous pouvons dire que le CBSH constitue un outil pertinent pour différencier la diversité des typologies de projet. L'ADIVET a lancé aussi cette année un indicateur qui note la performance des toitures végétalisées vis-à-vis de quatre services écosystémiques, dont l'accueil de la biodiversité ¹⁵⁹.

Finalement, dans l'optique d'une évaluation croisée des toitures végétalisées et biosolaires, telle qu'énoncée ci-dessus :

- il reste indispensable que les travaux scientifiques aboutissent à une ACV de la couche végétale et que des FDES arrivent prochainement dans la base INIES. C'est l'une des perspectives existant à travers le projet ANR Proof et l'implication du CSTB. De plus, les autres produits rentrant dans la composition des toitures végétalisées et proposés sur le marché sont pour certains très impactants d'un point de vue carbone, comme le substrat ou la membrane anti-racines chimique. Ils constituent un axe d'amélioration pour les fabricants. Le présent travail fait la lumière sur l'étanchéité EPDM, sur son caractère anti-racines mécanique et son classement satisfaisant aux Règles Professionnelles des Toitures-Terrasses Végétalisées 2018. Cependant, aucun document technique indiquant les toitures végétalisées comme domaine d'emploi n'a été trouvé pour ce type d'étanchéité. Ainsi, sous réserve de son applicabilité technique, elle pourrait être considérée comme première couche du système dans de futures études. Dans une approche inspirée de celle insérée en ANNEXE 6.4, PAGE 113, l'impact carbone du système végétalisé chute de 13,2% en passant d'une étanchéité anti-racines chimique (étanchéité bitumineuse bicouche), à une étanchéité anti-racines mécanique (étanchéité

¹⁵⁹ ADIVET et GreenRoofScore : voir SITOGRAFIE, PAGE 120.

monocouche EPDM)¹⁶⁰. Dans tous les cas, le système de toiture végétalisée ou biosolaire devra évoluer vers des formes plus décarbonées, comme il est souhaitable pour le secteur du Bâtiment. Cela sera aussi profitable au développement des façades végétalisées ;

- l'installation de panneaux photovoltaïques en toiture doit être dimensionnée tout en s'assurant de la maîtrise de l'impact carbone associé (SOUS-SECTION 2.2.4 CI-DESSUS). Cela ne sera peut-être pas toujours compatible avec le respect des seuils réglementaires « *article L171-4 du CCH* ». C'est une analyse qui n'a pas pu être développée dans la présente étude mais d'un intérêt certain ;
- les services écosystémiques doivent entrer en ligne de compte. Celui de la séquestration/stockage carbone commence à l'être depuis l'entrée en vigueur de la réglementation thermique RE2020 embarquant l'ACV des produits et des équipements (SOUS-SECTION 1.2.2). Le service rendu à la biodiversité l'est plus ou moins, à l'aide de certifications comme HQE ou les prescriptions dans certains PLUi. Ces PLUi s'appuient sur les CBS. Nous avons, dans la présente étude, analysé l'opportunité du CBS. Les travaux du projet ANR Proof visent aussi à mieux caractériser ces services écosystémiques au sein d'une toiture biosolaire.

La date d'obtention du jeu de données expérimentales n'a pas permis un travail plus poussé sur la piste de la température de module comme paramètre de modélisation de l'impact de l'interaction végétalisation/panneau PV. Cependant, l'exploration de la modélisation du bénéfice de la végétalisation a permis de pressentir une technique, celle du profil thermique, qui pourra être perfectionnée par la suite, à l'aide de données expérimentales incluant la température de l'air environnant l'installation photovoltaïque (SOUS-SECTION 3.2.3.2)¹⁶¹. De manière plus globale, il s'agirait peut-être de transformer les outils de calcul en France pour mieux y paramétrer le végétal, et en adoptant peut-être alors une approche similaire à celle de SAILOR D. J. (2008), avec notamment le *Leaf Area Index* (SOUS-SECTION 2.3.9) ? La sélection des plantes et leur irrigation sont en effet des champs complexes mais indissociables du système végétalisé (SOUS-SECTION 2.3.2.3 CI-DESSUS ET 2.3.10 CI-DESSUS). La littérature scientifique et le terrain montrent cependant que la végétation en toiture peut être indépendante de toute irrigation (ANNEXE 6.5, PAGE 115), ce qui va dans le sens de l'article L171-4 du code de la construction et de l'habitation¹⁶². Par ailleurs, la question du renforcement structurel ne devra pas être négligée en matière de végétalisation semi-intensive et intensive et pour les types de structures au-delà de la dalle béton ici étudiée (SOUS-SECTION 2.3.1.2). Et pour finir, afin d'intégrer largement les bénéfices de la végétalisation pour le bâtiment, il serait intéressant dans l'avenir de prévoir une étude axée sur l'isolation et les économies d'énergie, car des travaux scientifiques viennent consolider la thèse selon laquelle la toiture végétalisée atténuerait les besoins d'énergie pour le chauffage et la climatisation, avec une épaisseur moindre d'isolation de la toiture (SOUS-SECTION 2.3.8.2 CI-DESSUS). Ce qui constituerait un vecteur de décarbonation du bâtiment.

¹⁶⁰ L'étanchéité bitumineuse est la seule sous base INIES d'applicabilité en TTV. L'étanchéité EPDM dispose de différents produits sous base INIES. Ici, nous considérons le produit à plus faible impact carbone dans l'échantillon au lieu de la médiane qui présente un impact carbone supérieur à celui de l'unique étanchéité bitumineuse TTV. En approche « produit médian », la TTVE de 4 cm de substrat, version étanchéité EPDM monocouche en neuf présente un impact carbone supérieur de 11,3% par rapport à sa version bitumineuse (produit médian EPDM à 16,4 kg-eqCO₂/UF contre 13,3 pour le produit bitumineux).

¹⁶¹ De leur côté, les chercheurs du projet Proof à l'échelle du bâtiment travaillent avec le facteur solaire et envisagent le *NOCT* et le coefficient de dégradation en température μ du panneau photovoltaïque pour la modélisation du bénéfice de la végétalisation à la production photovoltaïque.

¹⁶²Article L171-4 du CCH : « *système de végétalisation basé sur un mode cultural ne recourant à l'eau potable qu'en complément des eaux de récupération* »

6 Annexes

6.1 Végétalisation, biodiversité, quelques lieux et opérations



Figure 44 : Le jardin botanique (Strasbourg), Le jardin des retrouvailles (Lille)

Sources :

<https://www.visitstrasbourg.fr/a-voir-a-faire-strasbourg/culture/sites-a-visiter/parcs-et-jardins/> , consulté le 13 août

<https://www.lille.fr/Nos-equipements/Jardin-des-retrouvailles> , consulté le 13 août 2023



Figure 45 : « Toits vivants », Jardin potager sur un toit de Paris (Espace Jean Dame (Paris 2^{ème}))

Sources :

<https://www.paris.fr/pages/une-ferme-suspendue-en-plein-quartier-montorgueil-5250/> , consulté le 13 août 2203

<https://geoportail.gouv.fr>

Les opérations immobilières ci-dessous sont LABELLISÉES BIODIVERCITY ® :

- La Scène musicale (92), qui offre 6000 places est bâtie sur l'île Seguin (ancienne friche industrielle.). Ses jardins en toiture comptent pour 6 755 m² ;
- Paris Venelles (Paris 20^{ème}), 60 logements et l'engagement « Triple Zéro » de l'aménageur (carbone, déchet, rejet) ;
- Résidence Oxygène (77) et ses 5 hectares d'espaces verts, dont un verger ;
- Siège social d'ENGIE (92), pensé comme un campus, se situera sur un ancien industriel. Les terrasses de 6 000 m² en compteront 600 d'espaces végétalisés ;
- Garden Street (31), opération de 33 villas et 38 logements, compte 150 arbres, la re-crédation de 0,5 hectare d'espaces verts et de la végétalisation sur les toits (potagers et terrasses).

Source : <http://cibi-biodiversity.com/les-projets-labellises/>

D'autres projets peuvent être soulignés. Ils ont été des projets pilotes de la méthode Quartier Energie Carbone :

- Issy Cœur de Ville (92), qui compte 600 logements, des commerces, bureaux et école. Sa forêt urbaine couvre 13 000 m² et la voie principale, un mail piéton est végétalisé ;
- Les Fabriques (13), écoquartier d'innovations urbaines, technologiques, environnementales et sociales.



Figure 46 : Opérations labellisées Biodiversity. Issy Cœur de Ville (92, vue aérienne), Les Fabriques (13, vue en perspectives)

Sources : https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/3209/QEC_PublicationFinale_Oct2021_HD.pdf

6.2 Présentation de la méthode Quartier Energie Carbone (QEC)

La documentation de la méthode est disponible en ligne, voir Sitographie PAGE 120. Cette annexe propose des éléments sur les niveaux de performance énergétique, les ratios de surface des installations photovoltaïques, les caractéristiques du panneau PV de référence, l'approche carbone des produits et équipements (TABLEAU 6.2-6) et la fiche de l'outil UrbanPrint :

En termes de niveaux d'objectifs pour la performance énergétique des bâtiments, le TABLEAU 6.2-1 CI-DESSOUS présente l'équivalent dans la réglementation française des trois niveaux prévus par la méthode QEC et qui peuvent être sélectionnés dans l'outil : « *standard* », « *élevé* », « *très élevé* ».

Tableau 6.2-1: UrbanPrint, niveaux d'exigence de la performance énergétique d'un bâtiment (méthode QEC, § 3.5.1.1, p.80)

Référentiel réglementaire français	Construction neuve			Rénovation partielle ou complète		
	Standard	Élevé	Très élevé	Standard	Élevé	Très élevé
RT 2012	✓					
E1 ou E2 ou RE2020		✓				
E3 ou E4			✓			
RT Existant				✓		
CEE					✓	
BBC rénovation						✓

Tableau 6.2-2 : Méthode QEC, caractéristiques principales du panneau photovoltaïque implémenté

Nom	Valeur	Unité
Puissance crête	289	Wc/module
Surface d'un module	1,7	m ²
Inclinaison des panneaux	30	degrés
Orientation	Sud	sans unité
Température d'équilibre thermique du module (NOCT) ¹⁶³	48	°C
Coefficient de température de la puissance crête (μ) ¹⁶³	0,00433	°C ⁻¹
Coefficient de transmission-absorption solaire des modules (τ)	0,9	sans unité
Coefficient de perte par connectique et mismatch (F_m)	0,97	sans unité
Correctif basse lumière du rendement des modules PV (Γ)	0,07	sans unité
Rendement électrique par défaut ($\eta_{\text{ond_base}}$)	0,9	sans unité
Rendement moyen de l'onduleur ($\eta_{\text{ond_moyen}}$)	0,77	sans unité

¹⁶³ Telle que définie par les normes internationales CEI61215 et CEI61646, en rapport avec le domaine photovoltaïque.

Tableau 6.2-3 : Méthode QEC, pourcentage de toiture considéré par défaut pour le PV en fonction du type de bâtiment et de l'objectif de performance énergétique

Usage	Performance visée	% de la toiture occupé par des panneaux PV
Maison individuelle	Standard (RT2012)	4%
Maison individuelle	Elevée (RE2020 ou label E1-E2)	8%
Maison individuelle	Très élevée (label E3-E4 visé)	15%
Logements collectifs	Standard (RT2012)	13%
Logements collectifs	Elevée (RE2020 ou label E1-E2)	19%
Logements collectifs	Très élevée (label E3-E4 visé)	26%
Bureaux	Standard (RT2012)	14%
Bureaux	Elevée (RE2020 ou label E1-E2)	22%
Bureaux	Très élevée (label E3-E4 visé)	63%
Autres usages	Standard (RT2012)	16%
Autres usages	Elevée (RE2020 ou label E1-E2)	18%
Autres usages	Très élevée (label E3-E4 visé)	32%

Tableau 6.2-4 : Méthode QEC, rendement moyen annuel des systèmes de chaud

Systèmes de chauffage existants	Mode de production dans le bâtiment	RMA Energie principale	RMA Energie secondaire	RMA auxiliaires	Energie principale	Energie secondaire	Energie auxiliaires
Chaudière bois ou biomasse	Collective	0,5	0	139	Biomasse		Electricité
Chaudière bois ou biomasse	Individuelle	0,53	0	139	Biomasse		Electricité
Chaudière gaz basse température	Collective	0,65	0	129	Gaz		Electricité
Chaudière gaz basse température	Individuelle	0,75	0	129	Gaz		Electricité
Chaudière gaz à condensation	Collective	0,7	0	129	Gaz		Electricité
Chaudière gaz à condensation	Individuelle	0,81	0	129	Gaz		Electricité
Chaudière biogaz basse température	Collective	0,65	0	129	Biogaz		Electricité
Chaudière biogaz basse température	Individuelle	0,75	0	129	Biogaz		Electricité
Chaudière biogaz à condensation	Collective	0,7	0	129	Biogaz		Electricité
Chaudière biogaz à condensation	Individuelle	0,81	0	129	Biogaz		Electricité
Convecteurs électriques	Individuelle	0,88	0	0	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/air	Individuelle	2,16	1,86	65,33	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau	Collective	2,17	1,85	196	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau	Individuelle	2,61	1,62	65,33	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau	Collective	2,66	1,6	196	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau	Individuelle	2,86	1,54	66,67	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC sol/eau	Collective	2,83	1,55	200	Electricité	Renouvelable	Electricité
Poêle ou insert bois	Individuelle	0,64	0	0	Biomasse		Electricité
PAC gaz	Collective	1,09	12,05	200	Gaz	Renouvelable	Electricité

Tableau 6.2-5 : Méthode QEC, rendement moyen annuel des systèmes de froid

Systèmes de refroidissement neufs	Mode de production dans le bâtiment	RMA Energie principale	RMA Energie secondaire	RMA auxiliaires	Energie principale	Energie secondaire	Energie auxiliaires
PAC air/air individuelle	Individuelle	2,3	1,77	52,36	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau collective	Collective	2,43	1,7	200	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau individuelle	Individuelle	2,56	1,64	48,43	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau collective	Collective	3,33	1,43	185	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau individuelle	Individuelle	3,34	1,43	26,18	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC sol/eau ou géothermique	Collective	4,16	1,32	100	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC gaz individuelle	Individuelle	1,31	4,26	100	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC gaz collective	Collective	1,38	3,63	100	Gaz	Renouvelable	Electricité
PAC air/air	Individuelle	2,3	1,77	52,36	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau	Collective	2,43	1,7	200	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC air/eau	Individuelle	2,56	1,64	48,43	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau	Collective	3,33	1,43	185	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC eau/eau	Individuelle	3,34	1,43	26,18	Electricité	Renouvelable	Electricité
PAC sol/eau ou géothermique	Collective	4,16	1,32	100	Electricité	Renouvelable	Electricité

Tableau 6.2-6 : Méthode QEC, synthèse sur les deux approches de calcul de l'impact carbone d'un produit de construction (ou d'un équipement)

Approche par macro-composants (module ACV express)		Approche par ratio d'impacts	
Formules	Description des termes	Formules	Description des termes
$I_{PC} = \sum_{n=2}^7 I_{lot\ n}$	$I_{lot\ n}$ est l'impact environnemental du produit de construction PC i considérant le lot n	$I_{PC} = \sum_{n=i}^j I_{lot\ n}$	$I_{lot\ n}$: voir description colonne 2 du tableau
$I_{lot\ n} = \sum_{i=1}^j I_{PC\ i} = \sum_{i=1}^j Q_{PC\ i} \times DE_{PC\ i} \times R_{PC\ i}$	$I_{PC\ i}$ est l'impact environnemental du PC i	$I_{lot\ n} = SDP \times DE_{lot\ n}$	SDP est la surface de plancher du bâtiment
	$Q_{PC\ i}$ est la quantité de produit ou équipement utilisée dans le sous-lot n (ou déposé dans la construction ou rénovation)		$DE_{lot\ n}$ est le ratio forfaitaire d'impact environnemental du lot n
	$DE_{PC\ i}$ est l'impact lu dans la donnée environnementale du PC i (modules C et D uniquement ¹⁶⁴)		
	$R_{PC\ i}$ est le facteur de renouvellement du PC i et il vaut 1 lorsque l'on considère la dépose du PC i		
$R_{PC\ i} = \max\left(1, \frac{PER}{DVE_{PC\ i}}\right)$	PER est la durée de cycle de vie prise en référence pour l'analyse du bâtiment (50 ans dans la RE2020)		
	$DVE_{PC\ i}$ est l'estimation de la durée de vie du PC i (en années aussi). On trouve l'information dans la donnée environnementale		

¹⁶⁴ Les modules C et D dont il est question ici sont les modules respectivement intitulés « *Fin de vie* » et « *Bénéfices et charges au-delà des frontières du système* » dans le cycle de vie, tel que présenté à la FIGURE 2 CI-DESSUS.

UrbanPrint

L'outil de référence
pour l'évaluation en analyse de cycle
de vie des impacts environnementaux
d'un projet d'aménagement urbain

PRÉSENTATION

UrbanPrint est un outil d'aide à la décision permettant l'**évaluation en analyse de cycle de vie (ACV)** des **impacts Énergie/Carbone et environnementaux** d'un **projet d'aménagement urbain** en neuf, en rénovation ou mixte.

Il permet d'accompagner la collectivité ou l'aménageur dans la définition d'objectifs ambitieux et chiffrés et de l'appuyer dans ses prescriptions aux promoteurs et constructeurs.

UrbanPrint est le premier **outil de référence** pour appliquer la méthode de calcul de la performance Quartier Énergie Carbone développé depuis 2018, notamment par le CSTB et Efficacity, pour l'ADEME.



Il propose deux approches: la vue *Aménageur* et la vue *Usager*. La **vue Aménageur** permet d'évaluer les **performances énergie/carbone et les impacts environnementaux associés** aux **ouvrages et services** urbains sous la responsabilité de l'aménageur du quartier. Elle sera complétée par une **vue Usager**, intégrant les autres impacts liés aux biens de consommation, aux voyages, à l'alimentation et permettant de traduire la performance environnementale du quartier au travers de **l'empreinte carbone moyenne de ses usagers**.

OBJECTIFS

- Mettre en évidence à chaque phase du projet les enjeux clés et les leviers d'action les plus performants, du point de vue Énergie/Carbone et au moyen d'indicateurs environnementaux complémentaires sur l'économie circulaire, l'épuisement des ressources, la santé, la biodiversité, etc.
- S'appuyer sur une méthodologie en «analyse de cycle de vie» (ACV) qui est la seule à permettre de quantifier l'ensemble des impacts, et ainsi d'éviter de prendre des mauvaises décisions basées sur une partie seulement des impacts environnementaux.

POUR QUI ?

Un **outil collaboratif** :

- Pour les **acteurs de l'aménagement** (collectivité, aménageur et leurs AMO/BE, promoteurs, constructeurs, habitants, etc.), et
- Permettant un **dialogue entre toutes les parties prenantes** du projet, sur des bases objectives.

FONCTIONNALITÉS

Une **interface ergonomique et fonctionnelle** permettant :

- L'évaluation de la **performance environnementale complète** (EN15804, 26 indicateurs),
- Le calcul de **l'énergie grise**, des **émissions de gaz à effet de serre**, des **déchets** générés, des **consommations d'eau**... sur l'ensemble du cycle de vie de l'aménagement,
- La création et comparaison de **variantes**,
- La comparaison de la performance du projet par rapport à un **projet de référence** (« business as usual »),
- Le **calcul de l'impact potentiel** des leviers d'action non encore mobilisés, afin d'identifier les leviers à plus fort impact et d'éclairer les choix.

Un **outil modulaire** permettant :

- De décrire le projet même en l'absence de données détaillées disponibles, grâce à de nombreux enrichisseurs de données,
- De proposer différentes échelles d'évaluation : bâtiment, quartier, espaces extérieurs.

PERSPECTIVES

Un **outil évolutif** intégrant :

- Les **besoins des acteurs de terrain** qui remontent du club des utilisateurs mis en place en 2020,
- L'évolution des connaissances et des bases de données,
- Le **développement de nouvelles fonctionnalités** telles que le stockage carbone des sols (2022) et la biodiversité in-situ et ex-situ (2022).

Fonctionnement de l'outil UrbanPrint

UrbanPrint possède une interface utilisateur avec une ergonomie intuitive permettant une saisie rapide des données d'entrée. Comme illustré ci-dessous, l'outil permet : (i) **de situer les performances du projet étudié par rapport à une référence** et ainsi de vérifier que son « **score énergie** » et son « **score carbone** » sont suffisants ; (ii) d'identifier les meilleurs **leviers d'action** qui restent à mobiliser ; et (iii) de construire et de **comparer plusieurs variantes** du projet.

UrbanPrint évalue l'impact de la phase de construction (terrassements, produits de construction, etc.), des consommations d'énergie en phase d'exploitation, des consommations et rejets d'eau, de la mobilité, de la gestion des déchets, etc.

Comparaison avec le projet de référence



Projet initial

Défini par l'utilisateur avec l'activation de premiers leviers.



Projet de référence

Calculé par l'outil : même localisation, même programme et même forme urbaine que le projet, mais avec des niveaux de performance «Business à Usual» matériaux classiques (béton, acier), performance énergétique RT2012 puis RE2020, etc.

Score énergie

Différence en pourcentage entre l'énergie primaire non renouvelable consommée du projet initial (ou d'une variante) et celle du projet de référence.



Score carbone

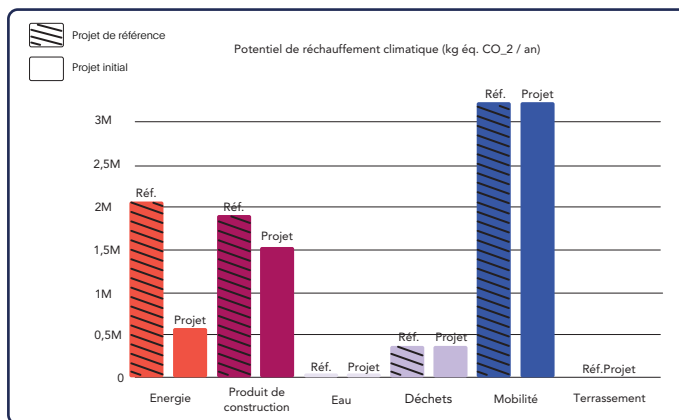
Différence en pourcentage entre les émissions de CO₂eq du projet initial (ou d'une variante) et celle du projet de référence.



Comparaison sur différents indicateurs environnementaux

UrbanPrint permet une comparaison détaillée entre le projet initial et le projet de référence sur l'ensemble des indicateurs environnementaux.

EXEMPLE : IMPACT CARBONE DES PROJETS INITIAL ET DE RÉFÉRENCE



Dans cet exemple, le projet initial est plus performant :

- sur l'énergie : grâce à un niveau de performance du bâtiment visé E3-E4, une PAC électrique collective, une boucle tempérée sur sonde géothermique et un réseau de chaleur,
- et sur les produits de construction : grâce à des matériaux mixtes pour certains bâtiments (classiques + biosourcés) et la réduction du nombre de parkings souterrains (mutualisation).

CO₂ -24.5%

Identification des leviers d'action à mobiliser



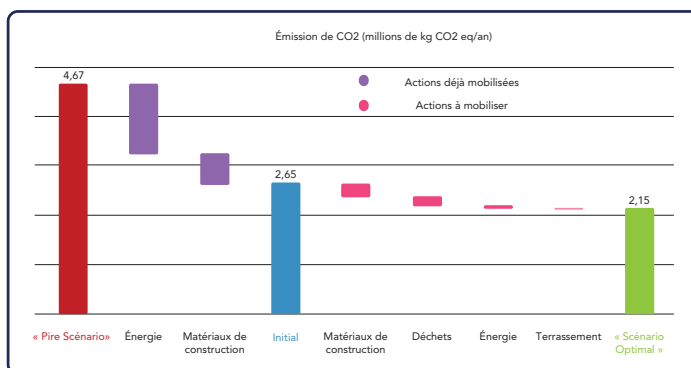
Scénario optimal

Calculé par l'outil qui identifie la combinaison de leviers d'actions encore mobilisables pour atteindre un optimal en terme de performance carbone.

Potentiel d'amélioration du projet initial

UrbanPrint permet d'identifier l'impact des leviers d'action mobilisés et non encore mobilisés par l'utilisateur.

EXEMPLE : ACTIONS AMÉLIORANT L'IMPACT CARBONE



Dans cet exemple, un projet initial déjà performant et des actions encore possibles pour atteindre un niveau d'émission annuelle de 2,15 M. de kgCO₂/an en agissant par exemple sur :

- Les matériaux de construction via : matériaux mixtes (classiques / biosourcés), bâtiments très performants, triple vitrage généralisé,
- Et les déchets via : plateforme de compostage.

Construction et comparaison détaillée de plusieurs variantes

UrbanPrint permet de définir et modéliser différentes variantes définies par l'utilisateur en faisant évoluer les produits de construction, les systèmes énergétiques, la gestion de l'eau et des déchets, le chantier. Il permet de comparer ces variantes sur l'ensemble des indicateurs environnementaux et sur les scores énergie et carbone.

Outil co-développé par :



@efficacity_lab



Efficacity



efficacity.com

Morgane Colombert

Directrice de projet
m.colombert@efficacity.com

6.3 RE2020, labels et certifications environnementaux



Figure 47 : RE2020; carte des zones climatiques

source : <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/>

En matière de bâtiment, HQE propose les certifications HQE Bâtiment Durable (HQE BD) et HQE Bâtiment (HQE B). Comme le présente la FIGURE 48 CI-DESSOUS, la certification HQE-B couvre les thèmes du développement durable comme l'énergie, l'eau, les déchets. La certification HQE BD reprend ce volet développement durable en lui adjoignant les thèmes transverses tels que la biodiversité, l'analyse du cycle de vie et l'économie circulaire.

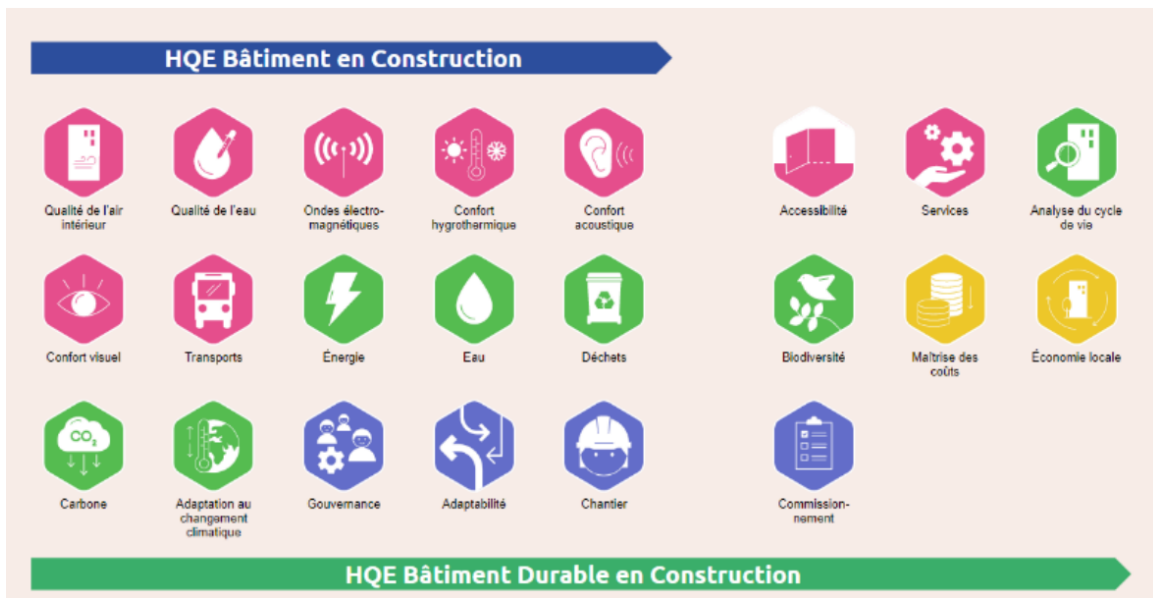
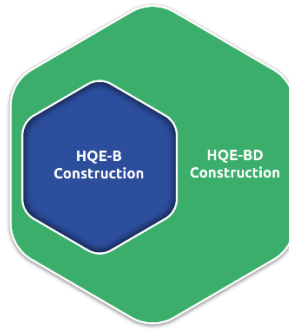


Figure 48 : Les certifications HQE pour le bâtiment, cas du neuf (Certivea)

Source : « Famille HQE Bâtiment Durable », [en ligne] <https://certivea.fr/solutions/hqe-batiment-durable/> - Certivea (certivea.fr), consulté le 22 juillet 2023

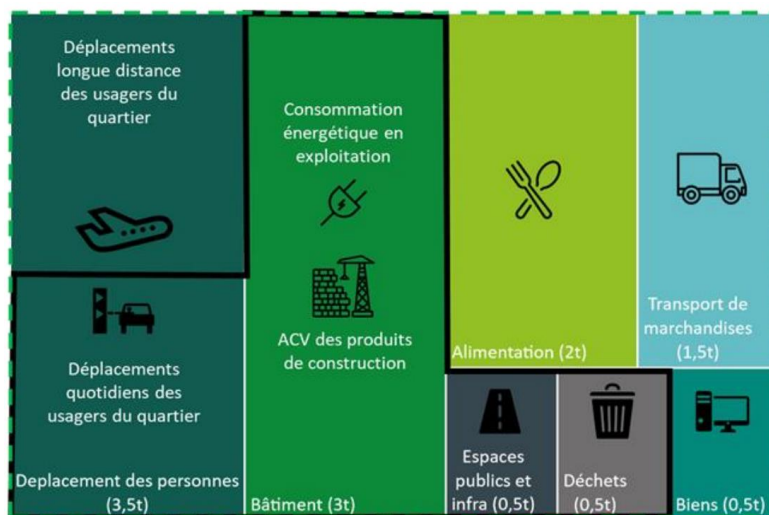


Figure 49 : Méthode QEC, logiciel UrbanPrint et le calcul de l'empreinte carbone Usager

6.4 Approche carbone des toitures végétalisées, complément

Puisque la toiture végétalisée est constituée de différentes couches, elle peut être assimilée à un « *macro-composant* » et ses couches en sont les « *composants* ». Ces couches étant désormais identifiées (voir SOUS-SECTION 2.3.1 CI-DESSUS « SYSTÈME CONSTRUCTIF D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE »), la modélisation carbone de la toiture végétalisée consiste à décrire techniquement chacune des couches en tant que « composant ». Un composant est déterminé selon la méthode du CSTB : collecte des données environnementales existantes pour chaque couche (base INIES) et détermination de la donnée médiane en impact environnemental ¹⁶⁵. L'élément dimensionnant reste le substrat, car comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, une certaine épaisseur de terre de culture (le substrat), est impliquée selon l'intensité de la végétalisation, c'est-à-dire selon les types de plantes (*sedum*, herbacées, arbustes, arbres). Pour déterminer la médiane parmi les différents substrats présents sur la base INIES, nous avons d'abord ramené les impacts carbone à l'unité fonctionnelle qui est le mètre cube ¹⁶⁶. C'est la seule fois où cela a été nécessaire, car pour les autres couches (étanchéité anti-racinaire, drain et filtre), le mètre carré de toiture fait référence. Par ailleurs, dans la modélisation, nous représentons la fonction anti-racinaire par l'unique solution du marché à ce jour représentée dans la base INIES, d'application en TTV ¹⁶⁷ et décrite dans l'état de l'art (SOUS-SECTION 2.3.1 CI-DESSUS « SYSTÈME CONSTRUCTIF D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE ») :

- L'étanchéité BICOUCHE bitume-polymère avec additifs anti-racines (un fabricant italien) ;
- L'étanchéité MONOCOUCHE bitume-polymère avec additifs anti-racines (même fabricant).

La première nous permet de représenter l'usage de la toiture végétalisée dans un PROJET DE BÂTIMENT NEUF et la deuxième de représenter la transformation de la toiture d'un BÂTIMENT EXISTANT en toiture végétalisée, sans dépose du revêtement d'origine, supposé être une étanchéité bicouche en bitume-polymère. Sur ce revêtement existant, l'on viendrait donc mettre le complexe végétalisé composé de l'étanchéité monocouche anti-racinaire, du drain, du filtre, du substrat. En neuf comme en rénovation, nous observons une même épaisseur de substrat (10 cm ¹⁶⁸) et la couche végétale n'est pas pourvue. En effet, nous ne disposons pas encore de données environnementales pour cette dernière couche dans la base INIES, comme vu en SOUS-SECTION 2.3.6 CI-DESSUS.

Nous avons aussi formalisé trois autres macro-composants pour représenter une toiture recouverte d'un film hautement réfléchissant, de couleur blanche (« Cool Roof ») ; une toiture couverte de 5 cm de gravier et une toiture revêtue de son étanchéité seule. Ce sont les modalités présentées à la SOUS-SECTION 1.5 CI-DESSUS.

En tout, cela nous fait cinq modalités d'étanchéité/couverture au total pour définir cinq macro-composants de toiture, et pour chaque composant impliqué dans un macro-composant, une donnée environnementale de la base INIES est assignée (par le process de détermination de la médiane explicitée plus haut). En termes structurels, nous leur considérons le socle commun suivant :

- dalle pleine en béton armé de 20 cm d'épaisseur ;
- pare-vapeur ;
- isolation thermique par l'extérieur de 16 cm en laine de verre ;

¹⁶⁵ La définition d'un échantillon pour établir la médiane sur un composant consiste à sélectionner les produits qui répondent à la fonction recherchée (ex. : substrat, drain, filtre, etc.).

¹⁶⁶ Durant cette étude, tous les substrats dans la base INIES présentent LE M² DE SURFACE DE TOITURE comme unité fonctionnelle (UF) sauf un. L'UF en m² présente l'inconvénient de ne pas permettre de comparer les substrats entre eux, car les épaisseurs prises en référence ne sont jamais les mêmes d'une FDES à une autre.

¹⁶⁷ A l'exclusion des produits en asphalte, bien qu'ils soient prescrits par les RP TTV, 2018 (§ 6.1.2.2) et présente des FDES sous base INIES, qui n'ont pas été analysées durant l'étude.

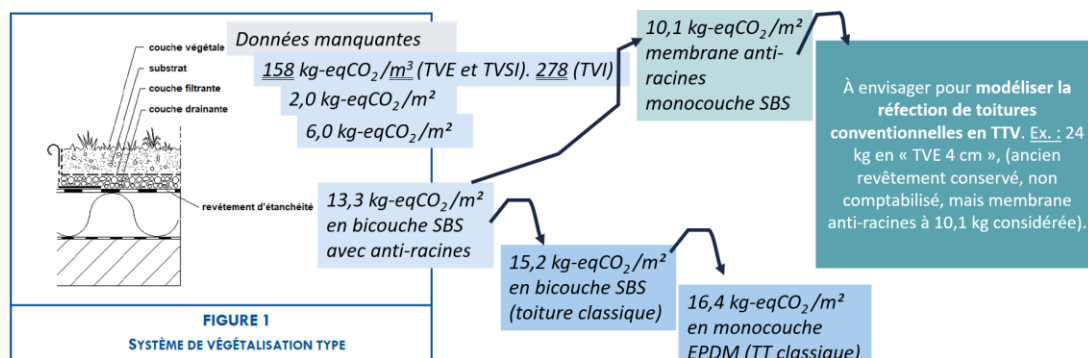
¹⁶⁸ Et donc selon les classes des Règles professionnelles des toitures végétalisées, il s'agit donc d'une toiture végétalisée extensive.

- étanchéité bicouche bitume-polymère (en commun pour les toitures Cool Roof, gravier et la toiture classique rénovée en toiture végétalisée).

L'approche carbone qui suit s'articule autour du périmètre de composants partant de l'étanchéité de la toiture. Ainsi :

- pour les trois macro-composants de toiture conventionnelle : étanchéité seule, étanchéité et gravier ou étanchéité et revêtement Cool Roof ;
- pour les macro-composants de toiture végétalisée : étanchéité avec fonction anti-racines (ou étanchéité et membrane anti-racines), couche de drainage, couche filtrante et substrat de culture.

La FIGURE 50 CI-DESSOUS illustre les résultats obtenus par l'approche carbone mise en œuvre :

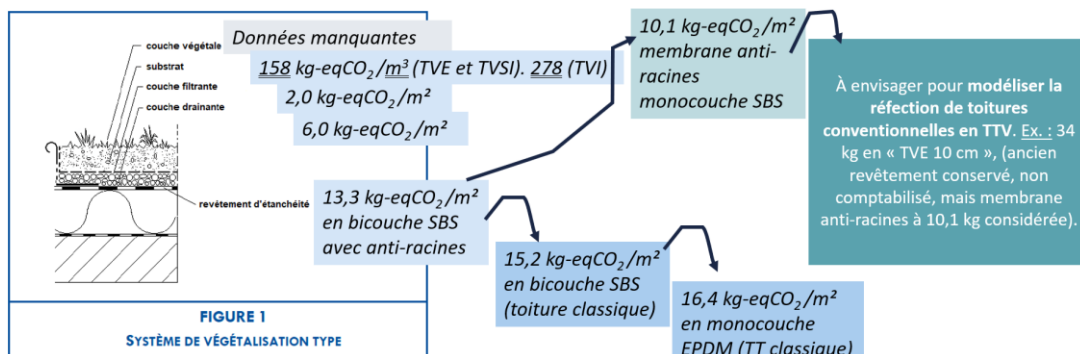


N.B. : Produits médians obtenus par étude des FDES (base INIES)

	TVE (4 cm)	TVSI (12 cm)	TVI (30 cm)	TT bitume	TT bitume + gravier	TT EPDM	TT EPDM + gravier
EGES en kg-eqCO ₂ /m ²	28	40	105	15	16	17	18

5 cm de gravier
31,0 kg-eqCO₂/m³

Tableau : EGES de la toiture végétale type, de l'étanchéité au substrat (hors couche végétale)



N.B. : Produits médians obtenus par étude des FDES (base INIES)

	TVE (10 cm)	TVSI (13 cm)	TVI (30 cm)	TT bitume	TT bitume + gravier	TT EPDM	TT EPDM + gravier
EGES en kg-eqCO ₂ /m ²	37	42	105	15	16	17	18

5 cm de gravier
31,0 kg-eqCO₂/m³

Tableau : EGES de la toiture végétale type, de l'étanchéité au substrat (hors couche végétale)

Figure 50 : Toitures végétalisées, synthèse de l'approche carbone menée en parallèle de l'étude énergie PV/biodiversité (substrat de 4 cm puis de 10 cm)

Dans l'état actuel des données environnementales, il ne se dégage pas d'orientation évidente vers les toitures végétalisées plutôt que les toitures conventionnelles en termes d'ACV. La couche végétale aujourd'hui manquante au niveau de la base INIES devrait permettre d'alléger le bilan carbone des toitures végétalisées, mais ne devrait pas leur permettre de se classer devant les solutions classiques. L'enjeu se trouve sur la phase D du cycle de vie, qui concentre les bénéfices (et charges) au-delà des frontières du système.

6.5 Toitures végétalisées, photographies personnelles

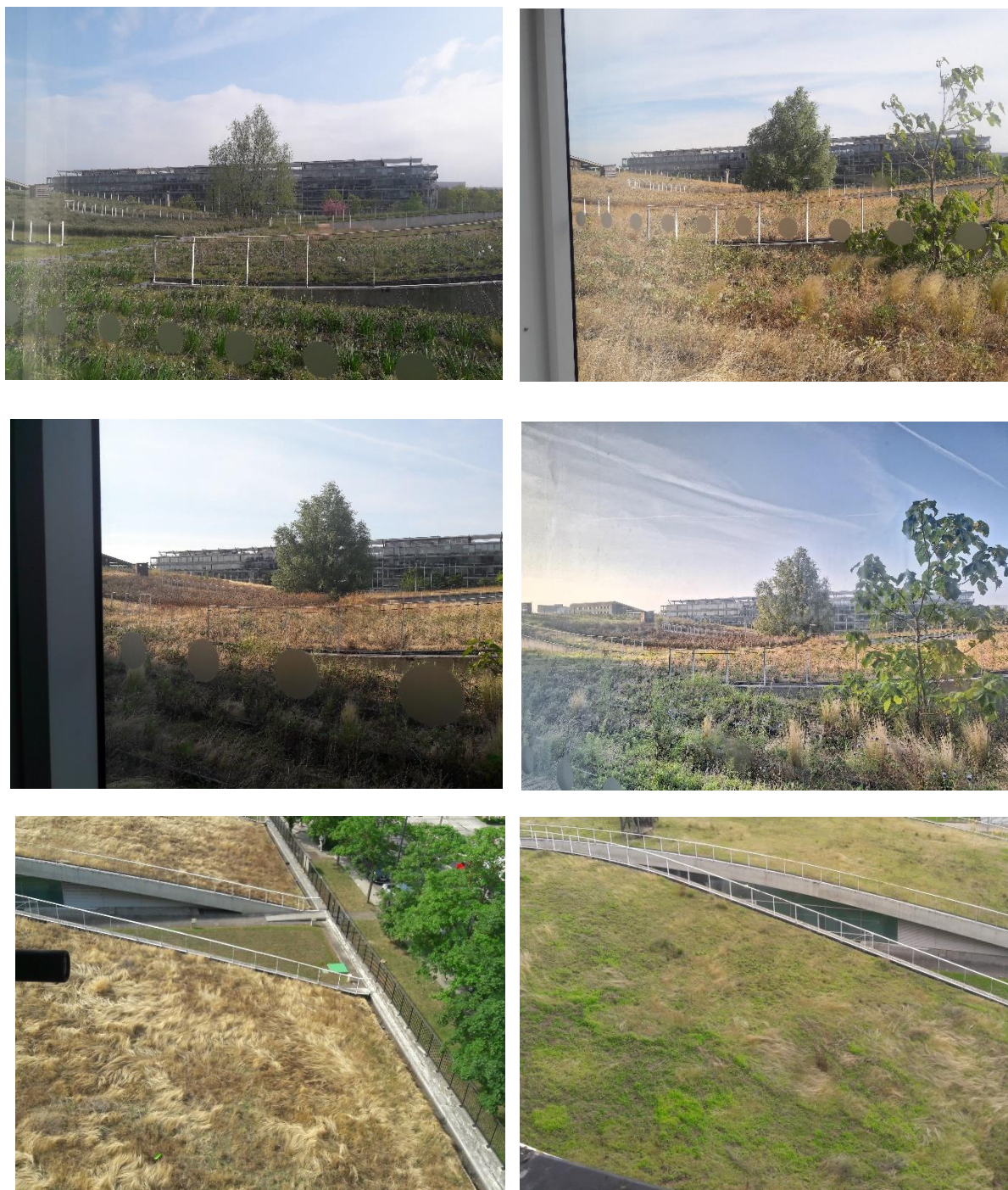


Figure 51 : Une toiture végétalisée non irriguée (77), photographies personnelles prises à différentes dates entre avril et août 2023

Dates des clichés de gauche à droite et de haut en bas : 17 avril ; 09 juin ; 30 juin ; 17 août ; 30 juin ; 9 août 2023.

Cette toiture végétalisée devient très sèche au courant du mois de juin avant de retrouver des couleurs vers la mi-août.

6.6 Bibliographie

- Alshayeb, Mohammed, et Jae D. Chang. « Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice ». *Procedia Engineering*, vol. 145, 2016, p. 1104-09, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.143>.
- Alshayeb, Mohammed J., et Jae D. Chang. « Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof ». *Energies*, vol. 11, n° 5, mai 2018, p. 1110, <https://doi.org/10.3390/en11051110>.
- Bamdad, Keivan. « Cool Roofs: A Climate Change Mitigation and Adaptation Strategy for Residential Buildings ». *Building and Environment*, vol. 236, 2023, p. 110271, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110271>.
- Brachet, Aline, et al. « Biodiversity Impact Assessment of Building's Roofs Based on Life Cycle Assessment Methods ». *Building and Environment*, vol. 158, 2019, p. 133-44, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.014>.
- . *Méthodologie d'évaluation hybride des interactions entre la biodiversité et les systèmes urbains : vers une synergie entre l'Analyse de Cycle de Vie, l'expertise écologie et la data science*. Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS, 16 juillet 2020, <https://theses.hal.science/tel-03433005>.
- Catalano, Chiara and Nathalie Baumann. "Biosolar roofs : a symbiosis between biodiverse green roofs an renewable energy." '2017à.
- Chemisana, D., et Chr. Lamnatou. « Photovoltaic-Green Roofs: An Experimental Evaluation of System Performance ». *Applied Energy*, vol. 119, 2014, p. 246-56, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>.
- Colombert, Morgane. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Université Paris-Est, 8 décembre 2008, <https://theses.hal.science/tel-00470536>.
- Cossou, Béline. *Végétalisation sur structure bois*. Master 2, Ministère de la Transition Ecologique (DGALN/DHUP/QC2), 3 septembre 2020, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/200911-Resume-v%C3%A9g%C3%A9talisation-structure-bois-stage-BCossou.pdf>. Mémoire complet disponible en accès réserve [en ligne] <https://biblioguides.entpe.fr>
- Coutts, Andrew M., et al. « Assessing Practical Measures to Reduce Urban Heat: Green and Cool Roofs ». *Building and Environment*, vol. 70, 2013, p. 266-76, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>.
- Fleck, R., et al. « Bio-Solar Green Roofs Increase Solar Energy Output: The Sunny Side of Integrating Sustainable Technologies ». *Building and Environment*, vol. 226, 2022, p. 109703, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109703>.
- Garreau, Enora, et al. « District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings*, vol. 251, 2021, p. 111354, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Geletič, J., et al. « High-Fidelity Simulation of the Effects of Street Trees, Green Roofs and Green Walls on the Distribution of Thermal Exposure in Prague-Dejvice ». *Building and Environment*, vol. 223, 2022, p. 109484, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109484>.
- Gómez-Baggethun, Erik, et al. « Urban Ecosystem Services ». *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*, édité par Thomas Elmqvist et al., Springer Netherlands, 2013, p. 175-251, https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_11.

- Huld, Thomas, et al. « A Power-Rating Model for Crystalline Silicon PV Modules ». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, n° 12, 2011, p. 3359-69, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.026>.
- Jahanfar, Ali, et al. « Evaluating the Shading Effect of Photovoltaic Panels on Green Roof Discharge Reduction and Plant Growth ». *Journal of Hydrology*, vol. 568, 2019, p. 919-28, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.019>.
- Jordan D.C. and Kurtz S. R. « Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review ». *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2013 Faiman, D. « Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules ». *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2008
- Kallio, Sonja, et Monica Siroux. « Photovoltaic Power Prediction for Solar Micro-Grid Optimal Control ». *Energy Reports*, vol. 9, 2023, p. 594-601, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.081>.
- Lamnatou, Chr., et D. Chemisana. « A Critical Analysis of Factors Affecting Photovoltaic-Green Roof Performance ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, 2015, p. 264-80, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.
- . « Photovoltaic-Green Roofs: A Life Cycle Assessment Approach with Emphasis on Warm Months of Mediterranean Climate ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 72, 2014, p. 57-75, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.006>.
- Lassalle, François. *Végétalisation extensive des terrasses et toitures: conception et mise en œuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions*. 2e éd, Éd. « Le Moniteur », 2008.
- Liu, Wen, et al. « Identifying City-Scale Potential and Priority Areas for Retrofitting Green Roofs and Assessing Their Runoff Reduction Effectiveness in Urban Functional Zones ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 332, 2022, p. 130064, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130064>.
- Lockett, Kelly, et Daniel Gouadec. *Toits verts, construction et maintenance*. Dunod, 2011.
- MacIvor, J. Scott, et al. « Performance of Dryland and Wetland Plant Species on Extensive Green Roofs ». *Annals of Botany*, vol. 107, n° 4, 2011, p. 671-79, <https://doi.org/10.1093/aob/mcr007>.
- Musy, Marjorie, éditeur. *Une ville verte: les rôles du végétal en ville*. Éditions Quae, 2014.
- Nagengast, Amy, et al. « Variations in Photovoltaic Performance Due to Climate and Low-Slope Roof Choice ». *Energy and Buildings*, vol. 64, 2013, p. 493-502, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.009>.
- Peiger, Philippe, et Nathalie Baumann. *Végétalisation biodiverse et biosolaire des toitures*. Eyrolles, 2018.
- Peri, Giorgia, et al. « Disposal of Green Roofs: A Contribution to Identifying an “Allowed by Legislation” End-of-Life Scenario and Facilitating Their Environmental Analysis ». *Building and Environment*, vol. 226, 2022, p. 109739, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109739>.
- Sailor, D. J. « A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs ». *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 8, 2008, p. 1466-78, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.
- Schindler, Bracha Y., et al. « Green Roof and Photovoltaic Panel Integration: Effects on Plant and Arthropod Diversity and Electricity Production ». *Journal of Environmental Management*, vol. 225, 2018, p. 288-99, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>.
- Scolaro, Taylana Piccinini, et EneDir Ghisi. « Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Literature Review of Layers Materials and Purposes ». *Science of The Total Environment*, vol. 829, 2022, p. 154650, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>.

- Seyedabadi, Mohammad Reza, et al. « Plant Selection for Green Roofs and Their Impact on Carbon Sequestration and the Building Carbon Footprint ». *Environmental Challenges*, vol. 4, 2021, p. 100119, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>.
- Smalls-Mantey, Lauren, et Franco Montalto. « The Seasonal Microclimate Trends of a Large Scale Extensive Green Roof ». *Building and Environment*, vol. 197, 2021, p. 107792, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107792>.
- Villemin, Thomas. *Modélisation des échanges énergétiques entre la surface d'une toiture végétalisée extensive et un panneau photovoltaïque*. Université de Lorraine, 2023, <https://www.theses.fr/s292895>.
- Virk, Gurdane, et al. « Microclimatic Effects of Green and Cool Roofs in London and Their Impacts on Energy Use for a Typical Office Building ». *Energy and Buildings*, vol. 88, 2015, p. 214-28, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.039>.
- Wang, Xun, et al. « The Effectiveness of Cool and Green Roofs in Mitigating Urban Heat Island and Improving Human Thermal Comfort ». *Building and Environment*, vol. 217, 2022, p. 109082, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>.

6.7 Sitographie

Energie solaire, grandeurs physiques pour les revêtements, entités, toitures biosolaires :

Schéma des albédos dans l'environnement urbain : "[Climate in cities Basics What controls the urban climate?](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/2_Urban_Climate/-_What_controls_it_3rk.html)" [en ligne] http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/2_Urban_Climate/-_What_controls_it_3rk.html , consulté le 10 juillet 2023.

[Solar Reflectance - an overview | https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-reflectance) consulté le 09 juillet 2023

"Comprendre l'autoconsommation photovoltaïque : Je consomme quoi de ma production ?" Forum photovoltaïque, 2017 [en ligne] <https://www.forum-photovoltaique.fr/viewtopic.php?f=90&t=37214&sid=724e7350d4c8abd53baf5d0939763faf> , consulté le 6 juin 2023 (Figure 11 du mémoire).

Les modélisations appliquées à l'énergie photovoltaïque : [PVGIS data sources & calculation methods \(europa.eu\)](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en#ref-5-calculation-of-pv-power-output) [en ligne] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en#ref-5-calculation-of-pv-power-output consulté le 21 juillet 2023.

Qu'est-ce que le NOCT ? Définition [en ligne] <https://www.jade-technologie.com/noct-definition/> (jade-technologie.com) , consulté le 22 juillet 2023.

Qu'est-ce que le coefficient de température d'un panneau photovoltaïque [en ligne] <https://www.jade-technologie.com/coefficient-de-temperature-panneau-photovoltaique/> , consulté le 25 juillet 2023

Qu'est-ce qu'un mismatch ?, Atelier solaire, 2019. [en ligne] <https://ateliersolaire.ch/le-mismatch/> , consulté le 12 août 2023.

Peinture acrylique Cool Roof, page Produit du distributeur [en ligne] <https://www.coolroof-france.com/fr/nos-expertises/nos-solutions-anti-chaleur/>

Peinture acrylique Cool Roof, avis technique d'expérimentation Atex n°2913-v1 (fabricant Iko, marque Iko Duo Reflect) [en ligne] <https://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/detail/2913-v1/>

Energie : les systèmes photovoltaïques sur toiture-terrasse [en ligne] <https://etancheiteinfo.fr/technique/18150/%C3%89nergie-les-systemes-photovolta%C3%AFques-sur-toiture-terrasse> , consulté le 18 avril 2023.

Projet Proof: Photovoltaic and Green Roofs [en ligne] <https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/recherche/projets/photovoltaic-and-greenroof-proof> , consulté le 04 février 2023.

Projet Proof: Évaluer les performances environnementale et énergétique de toitures combinant végétalisation et panneaux photovoltaïques [en ligne] <https://www.cerema.fr/fr/actualites/evaluer-performances-environnementale-energetique-toitures> , consulté le 04 février 2023.

Systèmes constructifs de toiture (couches) :

L'outil de simulation de vos besoins, fabricant Iko [en ligne] <https://www.iko.fr/prescri-plus/> , consulté le 8 juin 2023 (illustrations du Tableau 1.2-1).

Étanchéité en feuille bitumineuse, fiche technique pour INDEX https://www.indexspa.it/Indexspacom/Tecnoplan/Pdf/FLEXTER_TESTUDO_ANTIRACINE-FR.pdf consulté le 25 mai 2023

Étanchéité EPDM, marque Firestone, produit RubberGuard, Atec 5.2/18-2618_V1 [en ligne] https://www.cstb.fr/pdf/atec/GS05-F/AF2182618_V1.pdf , consulté le 14 août 2023.

Toitures végétalisées :

Guide des toitures végétalisées et cultivées, toutes les étapes pour un projet de qualité, Ville de Paris, 2022 [en ligne] [LTV-LVR-A4-ToituresVegetalisees-220907.indd \(paris.fr\)](#) , consulté le 07 juin 2023.

FLL Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. (Société de recherche pour le développement du paysage et l'aménagement du paysage) [en ligne] <https://www.fl.de/themen/gremien/uebersicht-fachgremien/bauwerksbegruenung#cb0> , consulté le 22 juillet 2023

Association des Toitures et Façades Végétales www.adivet.net

"Végétalisation et biodiversité : trois questions à Frédéric Madre, président de l'Adivet", article du 28/03/2023 [en ligne] <https://etancheiteinfo.fr> , consulté le 18 avril 2023.

Le Green Roof Score <https://www.adivet.net/actualites/l-adivet-lance-le-green-roof-score-le-referentiel-pour-evaluer-les-performances-des-toitures-vegetalisees>

[Référentiel : le Green Roof Score évalue les performances des toitures végétalisées \(etancheiteinfo.fr\)](#)

Teneur en eau et expression en % : [Cours Hydrologie générale - prof. André Musy \(epfl.ch\)](#) <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre6/main.html> consulté le 04 août 2023.

Sédum, Plante d'extérieur [en ligne] <https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/sedum> , consulté le 13 juillet 2023.

DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Substrat SAXALIS 1.1, ECOVEGETAL, mars 2023 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> ,consulté le 21 avril 2023.

Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire Substrat de culture pour toiture végétalisée », SOPRAFLOX X, Soprema, Mai 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> , consulté le 27 avril 2023.

Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire Procédé de végétalisation des toitures Vertige classique, Vertige, Avril 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> , consulté le 21 avril 2023.

FDES d'iD 29973 sous INIES : « Knauf Insulation Urbanscape® Green Roof Air (Incluant une végétation extensive, hors éléments de pose et membrane d'étanchéité) », Knauf Insulation, mai 2022 [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> , consulté le 21 avril 2023.

Fichet technique de la solution végétalisée tout-en-un VERTIGE <https://www.montoitvert.fr/wp-content/uploads/2019/12/classeur-technique-mon-toit-vert-by-vertige-lt.pdf> , consulté le 13 août 2023.

Urbanscape GreenRoof, le concept innovant pour la végétalisation des toitures, Knauf Insulation, septembre 2019 [en ligne] <https://pim.knaufinsulation.com/files/download/knauf-insulation-toits-vegetaux-maquette-29-08.pdf> , consulté le 13 août 2023.

Biodiversité et coefficient de biotope par surface :

CIBI (IBPC), label BiodiverCity®, qu'est-ce que la biodiversité urbaine [en ligne] <http://cibi-biodivercity.com/biodivercity/> , consulté le 02 juillet 2023

Ademe. "RÉUSSIR LA PLANIFICATION ET L'AMÉNAGEMENT DURABLES, CAHIER TECHNIQUE ÉCOSYSTÈMES DANS LES TERRITOIRES, LE COEFFICIENT DE BIOTOPE par surface (CBS)". En ligne] <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/CTecosystemes/fiches/outil11p6364.pdf> , consulté le 12 mai 2023.

Brachet Aline, CSTB. "WEBINAIRE FLASH N °2 : COEFFICIENT DE BIOTOPE SURFACIQUE HARMONISÉ", 21 juillet 2022 [en ligne] <https://experimentationsurbaines.ademe.fr/territoires-zero-artificialisation->

[nette/workshop/webinaire-flash-n-2-coefficient-de-biotope-surfacique-harmonise/](#) , consulté le 02 juillet 2023

Outils, réglementations et référentiels :

RE2020, Annexe IV de l'arrêté du 4 août 2021, Règles Th-Bat, « fascicule 4 » (sous-section 4.3.1.3 "Facteur solaire") [en ligne] <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/textes-de-la-re2020-en-version-consolidee-a617.html>

Guide RE2020 « Saisie des facteurs solaires » des parois opaques de l'enveloppe bâtiment [en ligne] https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09_parois_opaques_sp.pdf

« Méthode Quartier Energie, Description et implémentation de la méthode », Ademe 2022. [en ligne] <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5802-methode-quartier-energie-carbone.html> , consulté le 08 avril 2023.

Quartiers Energie Carbone, pour des opérations d'aménagement à énergie positive et bas carbone, 2021 [en ligne] https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/3209/QEC_PublicationFinale_Oct2021_HD.pdf , consulté en mars 2023 (Retour d'expérience sur des opérations pilotes).

« Bâtiment à énergie positive et réduction carbone » [en ligne] <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/> , consulté le 06 juin 2023.

Base INIES [en ligne] <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> , consulté le 14/04/2023.

« Aldo, Évaluez le carbone des sols et forêts » [en ligne] <https://docs.datagir.ademe.fr/documentation-aldo/introduction/definitions> , consulté le 1^{er} juin 2023.

« LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets » [en ligne] <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

Code de la construction et de l'habitat, article L171-4 [en ligne] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043963538/2022-09-23/ consulté le 03 mai 2023

Consultation publique concernant le projet de décret et deux arrêtés précisant les conditions d'application de l'article L.171-4 du code de la construction et de l'habitation et demandant l'installation d'énergies renouvelables ou de végétalisation en toiture de bâtiment [en ligne] https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=2846 , consulté le 23 mai 2023.

Consultation publique concernant le projet de décret relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols ouverte du 14 juin au 4 juillet 2023 [en ligne] <https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-decret-relatif-a-l-evaluation-et-au-a2862.html> , consulté le 30 juin 2023.

Publication du 6^{ème} rapport du GIEC [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec> , consulté le 01er juillet 2023.

« Suivi de la Stratégie Nationale Bas-Carbone », Ministère de la Transition Écologique [en ligne] <https://www.ecologie.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone> , consulté le 1^{er} juillet 2023.

6.8 Glossaire

ACV : analyse de cycle de vie

ADIVET : Association des toitures et façades végétales

AFPPS : Association des Fabricants de Panneaux Profils et Systèmes (l'enveloppe métallique du bâtiment)

Atec : avis technique

Atex : avis d'expérimentation

BBCA : Label Bâtiment Bas Carbone. Urbanprint est le premier logiciel intégrant la méthode BBCA Quartier. Le label BBCA Quartier sera délivré par le certificateur Certivea. Le process de labellisation est en cours de préparation. [Référentiel technique BBCA Quartier - Association BBCA (batimentbas carbone.org) <https://www.batimentbas carbone.org/bbca-quartier/>]

CCH : Code de la Construction et de l'Habitation (France, legifrance.gouv.fr)

CGIS : Cuivre, Indium, Gallium, Soufre et Sélénium

CdTE : Tellure de Cadmium

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

COS : coefficient d'occupation des sols

CSTB : Centre Scientifique et Technique Bâtiment www.cstb.fr

CU : Code de l'Urbanisme (France, legifrance.gouv.fr)

DE(D) : Déclarations Environnementales (Par Défaut)

DTU : Document Technique Unifié

EnR : Energie renouvelable (ex. : photovoltaïque, éolienne, hydraulique)

EPDM : caoutchouc éthylène-propylène-diène

FDES : fiche de déclarations environnementales et sanitaires

GES : gaz à effet de serre

GIEC : le groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (*IPCC* en anglais)

HQE : certification Haute Qualité Environnementale

ITE : isolation thermique par l'extérieur

ITI : isolation thermique par l'intérieur

NOMT : Température nominale de fonctionnement du module photovoltaïque (NOCT en anglais : *Nominal Operating Cell Temperature*)

PEP : Profil Environnemental Produit

PLU(i) : Plan Local d'Urbanisme (intercommunal)

PRoof : Photovoltaic and Green Roofs (projet de recherche financé par l'ANR)

PV : photovoltaïque

PVC-P : chlorure de polyvinyle plastifié

PVGIS : Photovoltaic Geographical Information System

QEC : pour méthode QEC Qualité Energie Carbone qui est la déclinaison à l'échelle du quartier de la méthode Energie Carbone du bâtiment

RE 2020 : la nouvelle réglementation thermique et environnementale pour la construction de bâtiments neufs)

SBS : styrène butadiène styrène (bitume-polymère)

SNB 2030 : Stratégie Nationale Biodiversité 2030

STC : conditions standard en photovoltaïque

TFE : travail de fin d'études

T(T)V : toitures-terrasses végétalisées

TVE/TV(S)I : toiture végétalisée extensive, (semi-) intensive

UF : unité fonctionnelle. C'est l'unité de quantité de produit, d'équipement utilisé pour exprimer les indicateurs environnementaux de l'ACV

XPS : polystyrène expansé

ZAN : zéro artificialisation nette

