

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Évaluation environnementale de cycle de vie des impacts et des services
écosystémiques d'une toiture verte comparée à une toiture classique à
Bruxelles**

Mémoire de Fin d'Études présenté par
TOWA KOUOKAM Edgar Battand
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement ENVI5G-T

Année académique : 2015-2016

Directeur : Prof. ACHTEN Wouter
Co-directeur : Prof. DEGREGZ Marc

*À mon feu père,
KOUOKAM Topi Emmanuel.*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier grandement mon promoteur de mémoire, le Professeur Wouter Achten, ainsi que mon co-promoteur, le Professeur Marc Degrez, pour l'encadrement et le suivi remarquables tout au long de cet exercice. Merci pour les discussions et réflexions constructives que nous avons eu dans le cadre de ce mémoire. Merci pour votre rigueur, votre sens de la précision et vos remarques critiques qui m'ont permis de donner le meilleur de moi. J'espère ardemment que ce travail n'est que le début d'une longue et solide collaboration.

Merci aux Professeurs Ahmed Khan et Philippe Bouillard de la Faculté d'Architecture pour leurs conseils, les orientations et les informations de grandes valeurs fournies pour le bon déroulement de ce mémoire.

Merci aux membres de l'équipe « Recycling and Environment » du centre de recherche 4MAT, particulièrement à Vanessa Zeller, Maria Isabel Touceda et Louise Gonda, pour leur disponibilité et leur assistance dans l'apprentissage du logiciel SimaPro.

Merci à mes collègues du Master en Gestion de l'Environnement et particulièrement à Namariam Traoré pour les échanges constructifs que nous avons eu, les propositions d'idées et la relecture de ce travail.

Un merci particulier à Giresse Tima et Virginie Maghe, pour leur présence et leur aide admirables. Je ne vous serais jamais assez reconnaissant.

Merci à ma famille, source de force et de motivation, de m'avoir encouragé depuis le début.

Merci à mes intimes et proches : Cyrielle, Harold, Élistin et Maéva, pour l'attention qu'ils ont eu à mon égard concernant ce travail, ainsi que leur capacité à me remonter le moral à tout moment.

Merci à mes amis, connaissances et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement de mon cycle de Master et surtout de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Le but de ce travail est d'évaluer les impacts environnementaux et les services écosystémiques d'une toiture verte. L'accent est porté d'une part, sur ses matériaux durant tout leur cycle de vie et d'autre part, sur les économies d'énergie créées par l'implémentation d'une toiture verte et le prolongement de la durée de vie des matériaux qu'elle permet. Pour bien mettre en évidence ces impacts, une comparaison est faite avec une toiture classique, par rapport à laquelle une toiture verte possède plus de matériaux (l'inconvénient), mais permet de réduire la consommation en énergie au sein du bâtiment, ainsi que de prolonger la durée de vie des matériaux de la toiture (les bénéfices).

Pour ce faire, une approche intégrée permettant de prendre en compte aussi bien les impacts des services écosystémiques que les impacts des matériaux, est utilisée. Le cadre méthodologique repose sur l'Analyse Environnementale du Cycle de vie, orienté par les normes ISO 14040, EN 15978 et EN 15804. Les données sur les procédés utilisées sont d'ordre générique et sont issues de la base de données d'EcoInvent 3.1. La modélisation s'est effectuée à l'aide du logiciel SimaPro, pour 1 m² de surface toiture, suivant tout le cycle de vie, sur une durée de 35 ans. Le calcul des impacts s'est fait selon la méthode CML suivant sept indicateurs midpoint. Deux approches ont été élaborées pour mieux répondre à la problématique. Dans la 1^{ère}, la toiture verte et la toiture classique sont comparées à performance énergétique identique, tandis que dans la 2^{nde}, elles sont comparées à performances énergétiques différentes. Pour cette 2^{nde} approche, une hypothèse est émise quant à la performance énergétique de la toiture verte. Il s'agit d'une réduction de 5% d'énergie pour le chauffage et de 20% d'énergie pour le refroidissement, créées par la toiture verte, par rapport à une toiture classique dans le bâtiment.

Les résultats sont nuancés d'une approche à l'autre. Dans la 2^{nde} approche, ces résultats vont en faveur de la toiture verte en ce sens qu'elle émet moins d'impacts que la toiture classique, ce qui témoigne du pouvoir de sa performance énergétique sur les impacts environnementaux. Par contre, dans la 1^{ère} approche, les impacts potentiels de la toiture verte sont légèrement supérieurs à ceux de la toiture classique. Ceci met bien en évidence le poids des impacts des matériaux (plus important dans la toiture verte), dans les impacts globaux. Afin de montrer les impacts dus au bénéfice de prolongement de la durée de vie des matériaux une analyse de sensibilité est effectuée en faisant varier les résultats d'une durée de vie de 35 ans à 50 ans. Ces résultats montrent que la toiture verte est du point de vue environnemental, meilleure qu'une toiture classique, surtout sur le long terme.

Mots-clés : toiture verte ; toiture classique ; évaluation environnementale de cycle de vie ; matériau ; service écosystémique ; performance énergétique.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the environmental impacts and ecosystem services of a green roof. The emphasis is first put on its materials throughout their life cycle and secondly, on energy savings created by the implementation of a green roof and an extension of the lifespan of the materials. To highlight these impacts, a comparison is made with a conventional roof, against which a green roof has extra materials in terms of quality and quantity of materials and (the drawbacks), but reduces energy consumption in the building and extend the lifespan of the materials in the roof (the benefits).

To do so, an integrated approach taking into account both the impacts of ecosystem services and the impacts of materials is used. The methodological framework is based on the Environmental Life Cycle Analysis, based on the ISO 14040-44, EN 15978 and EN 15804. The data on the processes used are generic and were collected from the EcoInvent 3.1 database. The modeling was carried out using the SimaPro software, for 1 m² roof surface following the entire life cycle of a period of 35 years. The calculation of impacts was executed according to the CML method, following seven midpoint impact categories. Two approaches have been developed to better consider the problematic. First, the green roof and the conventional roof are compared at a same energy performance level, whereas in the second approach, they are compared at a different energy performance level. For the 2nd approach, an assumption is made according to the energy performance of the green roof: 5% less energy for heating and 20% less energy for cooling, created by the green roof over a conventional roof in the building.

The results are shaded from one approach to another. In the 2nd approach, these results show that the green roof has less impact than a conventional roof, showing the weight of its energy performance in environmental impacts. On the other side, the potential impacts of the green roof are slightly higher than those of conventional roofing in the first approach. This clearly shows the weight of the impacts of materials (which are more important) of the green roof in the global impacts. To show the impacts due to the benefit of extending the lifespan of a material, a sensitivity analysis is performed by varying the results of a lifetime of 35 years to 50 years. The results are sensitive to the assumption on the life span of the materials because of the extension of the period on which the roof can provide the beneficial service without an extra material burden. Globally, the results show that the green roof is environmentally better than a conventional roof, especially in the long term, and highlight the sustainable character of a green roof.

Keywords: green roof; conventional roof; life cycle environmental assessment; material; ecosystem service; energy performance.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	IX
PARTIE 1 : INTRODUCTION	12
I. CONTEXTE	12
II. PROBLÉMATIQUE	14
III. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	15
PARTIE 2 : GÉNÉRALITÉS ET ÉTAT DE L'ART	17
I. GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VERTES.....	17
1. Bref historique.....	17
2. Définition	21
3. Structure	21
4. Typologie	24
5. Quel coût.....	29
6. Règlementation et incitants financiers	29
II. ÉTAT DE L'ART.....	30
1. Économies d'énergie pour les bâtiments :	30
2. Gestion optimale des eaux de pluie :	34
3. Effet de refroidissement urbain.....	36
4. Amélioration de la qualité de l'air	36
5. Valorisation de la biodiversité	37
6. Effets psycho sociologiques.....	37
7. Performance acoustique	37
8. Longévité accrue des matériaux.....	38
PARTIE 3 : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE CYCLE DE VIE.....	40
I. DÉFINITION DES SYSTÈMES	40
1. Le système de référence	40
2. Le système de recherche	41
II. MATÉRIELS ET MÉTHODES	48
1. Le cadre normatif	48
2. Les objectifs et l'application envisagée de l'étude	48
3. L'unité fonctionnelle.....	49
4. Le cycle de vie et les frontières du système	49
5. La méthode d'allocation.....	53
6. Les indicateurs d'impacts et Méthode d'évaluation.....	53
III. COLLECTE DE DONNÉES D'INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE	55

1. La phase de production des matériaux (A1-A3)	55
2. La phase de construction (A4-A5)	55
3. La phase d'usage	56
4. La phase de fin de vie	58
5. Le module D : bénéfices et charges au-delà des frontières du système	60
IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	63
1. La caractérisation des impacts	63
2. L'analyse de contribution aux impacts	64
3. La normalisation des impacts.....	70
4. L'analyse des incertitudes.....	72
V. DISCUSSION	74
1. Analyse de l'approche (a)	75
2. Analyse de l'approche (b).....	76
3. Analyse de sensibilité.....	77
PARTIE 4 : CONCLUSIONS	80
I. RÉCAPITULATIF ET RÉPONSE À LA PROBLÉMATIQUE	80
II. LIMITES DE L'ÉTUDE	82
III. QUELQUES PERSPECTIVES	82
BIBLIOGRAPHIE.....	84
ANNEXES	89

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 :	Les toitures terrasses végétalisées des édifices religieux mésopotamiens (source : Shimmin, 2012).....	18
Figure 2 :	Les jardins suspendus de Babylone (source : Shimmin, 2012)	18
Figure 3 :	La villa des Mystères à Pompéi (source : Shimmin, 2012)	19
Figure 4 :	Le palais Piccolomini à Pienza (source : Shimmin, 2012)	19
Figure 5 :	La villa Giulia à Genova (source : Shimmin, 2012)	19
Figure 6 :	Une toiture végétalisée, appelée « sod roof », en Norvège (source: Shimmin, 2012).	20
Figure 7 :	Une toiture végétalisée (« sod roof ») à Milton au Dakota du Nord construit par un immigrant norvégien (source : Shimmin, 2012)	20
Figure 8 :	La structure d'une toiture classique (source : CSTC, 2006).....	22
Figure 9 :	La structure d'une toiture verte (source : CSTC, 2006)	22
Figure 10 :	Les types de technologie des toitures vertes extensives (source : Oberndorfer et <i>al.</i> 2007).....	25
Figure 11 :	Aperçu des trois types de toitures vertes : extensif, semi-intensif et intensif (source : CSTC, 2006).....	26
Figure 12 :	Un exemple de toiture verte extensive à Bruxelles (source : Photo prise par Edgar Towa le 25-05-2016).....	28
Figure 13 :	Un exemple de toiture verte semi-intensive à Bruxelles (source : Ferme Nos Pilifs, Bruxelles, Belgique).....	28
Figure 14 :	Relation entre l'épaisseur de l'isolation et le coefficient de transmission thermique (sources : CSTC, 2006 ; CSTC, 2000)	42
Figure 15 :	Le cycle de vie d'un bâtiment et/ou de ses composantes (sources : CEN, 2013 et CEN, 2011).....	50
Figure 16 :	Les modules de la phase de fin de vie (source : Zeller et <i>al.</i> 2015).....	52
Figure 17 :	Comparaison d'impacts globaux entre les deux toitures	65
Figure 18 :	Contribution aux impacts par phase du cycle de vie pour chaque toiture	66
Figure 19 :	Contribution aux impacts par matériaux à la phase de production pour chaque toiture.....	68
Figure 20 :	Contribution aux impacts des charges et bénéfiques au-delà du système.....	69
Figure 21 :	Normalisation des impacts de chaque toiture	71
Figure 22 :	Normalisation des impacts par phase du cycle de vie de chaque toiture	71
Figure 23 :	Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture verte.....	73
Figure 24 :	Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte	73
Figure 25 :	Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture classique à performance énergétique différente de celle de la toiture verte	74
Figure 26 :	Variation des résultats en fonction de la performance énergétique des toitures vertes.....	78
Figure 27 :	Variation des résultats en fonction de la durée de la vie des matériaux des toitures.....	79

Figure 28 :	Analyse fonctionnelle d'une toiture.....	90
Figure 29 :	Procédés contributeurs à l'épuisement des ressources naturelles fossiles par ordre décroissant.....	92
Figure 30 :	Procédés contributeurs au réchauffement climatique par ordre décroissant.....	92
Tableau 1 :	Les différents matériaux envisageables et leurs épaisseurs pour chaque élément de la toiture verte (sources : Bianchini et Hewage, 2012 ; CSTC, 2006)	24
Tableau 2 :	La relation entre le type de toiture verte, le type de végétation et l'épaisseur du substrat (source : Bruxelles Environnement, 2011)	26
Tableau 3 :	Caractéristiques des trois types de toiture verte : extensif, semi-intensif et intensif (source : CSTC, 2006).....	27
Tableau 4 :	Coût d'installation de la végétation et du substrat par type de toiture verte (source : Bruxelles Environnement, 2011).....	29
Tableau 5 :	Récapitulatif non-exhaustif de la littérature sur les toitures vertes et leurs services écosystémiques.....	31
Tableau 6 :	Consommation énergétique annuelle de trois types de toiture : classique, verte intensive et verte extensive (source : Kosareo et Ries, 2007)	34
Tableau 7 :	Caractéristiques du système de référence (source : Bruxelles Environnement, 2013).....	40
Tableau 8 :	Dimensions de la structure de la toiture classique, système de référence (sources : Bruxelles Environnement, 2013 ; CSTC, 2006 ; CSTC, 2000 et EcoInvent, Zurich, Suisse)	41
Tableau 9 :	Dimensions de la structure de la toiture verte, système de recherche (sources : Chenani et <i>al.</i> 2015 et CSTC, 2006)	43
Tableau 10 :	Caractéristiques du système de recherche (source : Bruxelles Environnement, 2013).....	44
Tableau 11 :	Relation entre l'épaisseur de l'isolation et la consommation en énergie pour une toiture classique et dans une toiture verte, dans le cas du bâtiment de La Rochelle (source : Jaffal et <i>al.</i> 2012).....	44
Tableau 12 :	Relation entre l'épaisseur de l'isolation et la consommation en énergie dans une toiture classique et dans une toiture verte, pour le cas de bâtiment de référence.....	45
Tableau 13 :	Consommations énergétiques totales du cas du bâtiment de La Rochelle (source : Jaffal et <i>al.</i> 2012).....	45
Tableau 14 :	Comparaison des caractéristiques du cas du bâtiment de La Rochelle par rapport au bâtiment de référence	46
Tableau 15 :	Récapitulatif des caractéristiques des deux systèmes	47
Tableau 16 :	Les indicateurs d'impacts, leurs paramètres et unités (sources : CEN, 2013 et CEN, 2011).....	54
Tableau 17 :	Transport des matériaux de l'usine de production au chantier de construction en tonne.kilomètre.....	56
Tableau 18 :	Matériaux par éléments de toiture : épaisseurs, densités, masses et procédés (sources : Chenani et <i>al.</i> 2015 ; Bianchini et Hewage, 2012 ; CSTC, 2006 et EcoInvent, Zurich, Suisse).....	57

Tableau 19 : Caractéristiques énergétiques des toitures : besoin net en énergie et le rendement de production.....	58
Tableau 20 : Consommation de diesel et quantité de micro particules émises lors de la démolition (source : OVAM, 2013).....	59
Tableau 21 : Hypothèses sur les scénarios de fin de vie de chaque catégorie de matériaux (source : OVAM, 2013)..	61
Tableau 22 : Transport des déchets du point de tri vers le centre de recyclage et vers le centre d'incinération.....	62
Tableau 23 : Quantité d'électricité récupérée de l'incinération des plastiques (source : EcoInvent, Zurich, Suisse).....	63
Tableau 24 : Contribution aux impacts par phase du cycle de vie pour chaque toiture	65
Tableau 25 : Pourcentage de variation des incertitudes sur les procédés à 95% de confiance pour chaque toiture.....	72
Tableau 26 : Analyse fonctionnelle d'une toiture.....	89
Tableau 27 : Résultats de la caractérisation des impacts de chaque toiture par indicateur	91

PARTIE 1 : INTRODUCTION

I. CONTEXTE

L'urbanisation et le changement climatique sont intimement liés. À l'heure où la plupart des villes de la planète font face à une croissance démographique, plus de la moitié de la population mondiale est concentrée en milieu urbain, avec une augmentation de 2,5 milliards de personnes attendues d'ici 2050 (ONU, 2014). En Région de Bruxelles Capitale (RBC), ce foisonnement de la population urbaine renforce la densité urbaine et se conjugue par une emprise bâtie au sol forte. Cela se caractérise par la présence manifeste des bâtiments, soit nouvellement construits, soit réhabilités. Plus l'ensemble du bâti urbain est densément construit, moins sa configuration est favorable à l'expansion de la nature et à la biodiversité. Les enjeux liés à la biodiversité et l'écologie urbaines consistent en la conservation des éléments existants et en la compensation des surfaces 'prises' à la nature. De plus, les bâtiments possèdent cette grande tendance à modifier le flux d'énergie et de matière dans les écosystèmes urbains. À cet effet, à l'échelle européenne, 30% de la consommation mondiale énergétique, 40% des émissions de gaz à effet de serre (GES) et 40% de l'utilisation des matériaux proviennent des bâtiments (Napolano et al. 2015 ; Berardi et al. 2014). Cette modification des flux d'énergie et de matières provoque généralement des problèmes urbains environnementaux, parmi lesquels : les risques d'inondation causés par l'imperméabilité accrue des sols à travers les constructions, la pollution atmosphérique, l'augmentation de la température en milieu urbain (l'effet d'îlot de chaleur urbain), etc. Ces problèmes augmentent de plus en plus en RBC, d'autant plus que les préoccupations actuelles relèvent de la recherche du confort énergétique optimal pour les bâtiments (Bruxelles Environnement, 2010).

Cependant, ces problèmes pourraient être atténués par la modification des propriétés de surface des bâtiments. À cet effet, l'architecture durable et le 'green design' se présentent ainsi comme des concepts innovants, de plus en plus étudiés et répandus, qui pourraient permettre de résoudre ces problèmes. Ces concepts se déclinent en plusieurs techniques parmi lesquelles les toitures vertes (Hoseini et al. 2013). D'une manière générale, les toitures peuvent représenter jusqu'à 20 à 25 % de la superficie des villes (Susca et al. 2011) et sont des déterminants importants de flux d'énergie, d'eau et de matières, dans leur relation avec leurs bâtiments et l'environnement dans lequel elles se trouvent. Sachant que l'ensemble des toitures couvrent 22% de la superficie de la RBC, il pourrait y avoir là un enjeu potentiel pour les toitures vertes, qui en plus d'assurer la même fonction qu'une toiture classique – protection contre toute sorte d'intempéries – apportent des effets positifs à ces différents problèmes urbains et environnementaux. Ces bénéfices s'adressent à la population urbaine, agissent sur le bâtiment qui porte cette toiture verte et impactent l'environnement dans lequel elle se trouve : ces bénéfices peuvent être considérés comme des services écosystémiques. À ce niveau, une nuance mérite d'être mise en évidence. Parmi ces services écosystémiques, certains sont clairement prouvés dans la littérature scientifique, d'autres sont contextuels, tandis que d'autres sont encore hypothétiques. En effet, ces derniers ne sont pas clairement scientifiquement démontrés à ce jour. À ce titre, ils sont considérés comme des 'prétendus bénéfices' ('*claimed advantages*'). Il est à noter que cette nuance n'est pas le fruit d'hypothèses personnelles, mais elle est plutôt issue de l'état de l'art, qui est présenté au II. de la partie 2.

Parmi les bénéfices sur l'environnement nous avons : (i) la création d'habitat pour la faune et la flore à travers la végétation et la couche de terre (Lee et al. 2014 ; Cook-Patton et Bauerle, 2012 ; Sutton et al. 2012 ; Baumann, 2006 ; Brenneisen, 2006) ; (ii) la réduction des risques d'inondation par effet de rétention d'eaux de pluie par le substrat, et la réduction de la quantité d'eau de pluie à traiter dans les stations d'épuration (STEP) par effet d'évapotranspiration de la végétation (Lee et al. 2015 ; Whittinghill et al. 2015 ; Metselaar, 2012 ; Nagase et Dunnett, 2012 ; Mentens et al. 2006) ; (iii) l'amélioration du paysage urbain par augmentation de la valeur esthétique créée par la présence des plantes en altitude (Berardi et al. 2014 ; Köhler et Clements, 2012 ; Susca, 2012 ; Oberndorfer et al. 2007) ; (iv) la réduction des effets d'îlots de chaleur urbains par action de la végétation (Razzaghmanesh et al. 2016 ; Li et al. 2014 ; Susca, 2012 ; Martineau et Samson, 2011 ; Susca et al. 2011 ; Sailor et al. 2011) et (v) la capture des particules polluantes présentes dans l'air par les plantes (Zhang et al. 2015 ; Speak et al. 2012 ; Getter et Rowe, 2006). Les îlots de chaleur sont des élévations localisées des températures enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou à la moyenne régionale (Susca et al. 2011). Ces effets d'îlots de chaleur sont liés à la pollution atmosphérique. En effet, une température élevée entraîne une formation plus rapide et plus fréquente d'ozone photochimique (ou nuage de micro particules polluante) ayant ainsi des conséquences sur la santé humaine. Raison pour laquelle la réduction des effets d'îlots de chaleur urbains et la capture des particules polluantes sont des effets positifs offerts par des toitures vertes. Ensuite, les bénéfices qu'offre une toiture verte sur le bâtiment qui la porte sont des co-services ou extra-services notamment : une meilleure isolation acoustique par la couche de substrat et la végétation (Yang et al. 2012 ; CSTC, 2006), la valorisation de l'espace toiture lorsqu'elle est accessible et aménagée, l'augmentation de la durée de vie des matériaux de la toiture (Susca et al. 2011 ; Oberndorfer et al. 2007 ; Getter et Rowe, 2006) et une meilleure isolation thermique par effet de la couche de terre pour la végétation, ce qui entraîne des économies d'énergie pour le bâtiment (Gagliano et al. 2015 ; La Roche et Berardi, 2014 ; Saadatian et al. 2013 ; Jaffal et al. 2012 ; Castleton et al. 2010 ; Sailor et al. 2011 ; CSTC, 2006 ; Niachou et al. 2001). Enfin, le bénéfice des toitures vertes sur la population relève de l'impact sur la psycho sociologie urbaine dû à l'augmentation de la valeur esthétique (Berardi et al. 2014 ; Lee et al. 2014 ; Oberndorfer et al. 2007 ; Susca, 2012). Tous les mécanismes des services écosystémiques offerts par les toitures vertes seront développés davantage dans l'état de l'art.

Toutefois, bien qu'elles soient un atout pour les villes, les toitures vertes présentent des limites. Hormis le fait qu'elles soient encore méconnues et peu intégrées en milieu urbain bruxellois (plus du point de vue de ses bénéfices que de sa technologie), son coût d'installation relativement élevé se révèle être un frein à son expansion. En outre, il faut préciser que les toitures vertes, comparativement aux toitures conventionnelles consomment plus d'entrants en termes de matériaux. En plus des couches de base d'une toiture classique (plancher, pare vapeur, isolation, étanchéité), les matériaux des toitures vertes sont notamment la couche de protection mécanique, la couche de drainage, le filtrage, le substrat (la terre) et la végétation. C'est ce surplus de matériaux qui devient dès lors préoccupant, tant en termes de quantité que de qualité des matériaux.

II. PROBLÉMATIQUE

Il est à noter que les études scientifiques traitant des impacts environnementaux des toitures vertes et de leurs services écosystémiques sont propres à des villes/pays/zones géographiques précises. Cependant, le cas de la RBC n'a pas encore fait l'objet d'études scientifiques. Plusieurs problématiques environnementales sont mises en évidence lorsqu'il s'agit des toitures vertes. Étant donné la multitude de ses bénéfices, l'évaluation environnementale des toitures vertes sera faite dans des limites de faisabilité raisonnables dans le cadre de ce mémoire et portera sur le prolongement de la durée des matériaux et sa capacité à réduire la consommation énergétique dans un bâtiment.

En effet, la plupart des travaux sur les toitures vertes mettent plus en avant leurs bénéfices/services écosystémiques que leur surplus de matériaux utilisés, par rapport à ceux d'une toiture classique. C'est ainsi que ce mémoire se concentrera sur les matériaux utilisés dans les deux types de toitures. D'un côté, il sera nécessaire d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux d'une toiture verte, aussi bien de manière qualitative que quantitative et suivant une perspective de cycle de vie. De plus, il serait également nécessaire d'analyser ce que représente cette différence de matériaux en termes d'impacts environnementaux. Par ailleurs, étant donné que la toiture verte permet un prolongement de la durée de vie des matériaux de la toiture, ce bénéfice sera également pris en compte dans les impacts des matériaux des deux toitures.

D'un autre côté, l'une des préoccupations actuelle de la RBC, d'un point de vue économique et environnemental est de répondre aux enjeux énergétiques des bâtiments, en optimisant leur niveau énergétique. Le surplus de matériaux de la toiture verte augmente sa résistance thermique par rapport à celle de la toiture classique. Ceci lui permet d'avoir une meilleure isolation thermique et par conséquent, une réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment. Dès lors, que représente cette différence de consommation en énergie en termes d'impacts environnementaux ?

La perspective de cycle de vie est intéressante car elle permet d'identifier les transferts d'impacts à travers les phases du cycle de vie de la toiture verte et entre les catégories d'impacts. Ainsi, dans le but de considérer les charges (extra matériaux) et les bénéfices (services écosystémiques), une approche intégrée doit être considérée. Pour ce faire, après avoir clairement défini la question de recherche et les objectifs spécifiques, la méthodologie suivie pour les atteindre sera détaillée. Par la suite, des généralités et un état de l'art permettront de s'imprégner des toitures vertes et de leurs services écosystémiques. Enfin, l'évaluation des impacts environnementaux d'une toiture verte comparée à une toiture classique sera menée.

III. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire s'est déroulé suivant une méthodologie en 2 étapes : une revue de la littérature et une approche intégrée orientée cycle de vie.

Comme tout travail scientifique, la revue de la littérature est la 1^{ère} étape méthodologique. Dans ce mémoire elle a permis de s'imprégner des questions relatives aux toitures vertes à savoir : son histoire, ses technologies, ses bénéfices, son coût et son cadre institutionnel dans un contexte bruxellois. Elle a également permis de prendre connaissance des différents travaux scientifiques qui ont déjà été effectués au sujet de l'évaluation environnementale des toitures ainsi que de ses services écosystémiques. Un grand nombre d'articles de revues scientifiques, mais aussi des ouvrages et des parties d'ouvrage sont tirés à l'issue de la recherche par mots clés ciblés dans des bases de données bibliographiques de référence (Springer, Science Direct, Wiley, etc.). Par la suite, un tri est effectué après avoir épluché en profondeur chacun de ses articles, et n'ont été sélectionnés que ceux qui cadraient avec les problématiques à traiter. Par ailleurs, la recherche bibliographique s'est aussi orientée vers des publications des organismes belges (comme Bruxelles Environnement) ou des centres de recherche belges (à l'instar du Centre Scientifique et Technique des Constructions – CSTC). Toutes ces opérations de recherches et de tri se sont effectuées suivant un processus itératif, afin de répondre aux besoins en informations de ce mémoire mais aussi pour enrichir la bibliothèque scientifique relative aux toitures vertes, pour des travaux académiques ultérieurs.

La 2^e étape méthodologique de ce mémoire et la plus importante repose sur une approche intégrée orientée cycle de vie. La base est la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV). Les appuis normatifs sont les normes internationales ISO 14040-44, portant sur les exigences et les lignes directrices de l'ACV. Cette 2^e étape se subdivise en plusieurs autres étapes à savoir : (1) la définition des systèmes à étudier, (2) la définition des matériels et méthodes utilisées pour (3) la collecte des données pour l'inventaire en cycle de vie, afin de pouvoir (4) modéliser et calculer les impacts et faire ressortir des résultats, afin de les interpréter.

- La définition des systèmes

Deux systèmes ont été définis : une toiture classique comme système de référence et une toiture verte, comme système de recherche. Un bâtiment de référence à toiture classique a été sélectionné conformément au contexte bruxellois. Afin d'effectuer une comparaison une hypothèse est émise sur ce bâtiment qui porterait potentiellement une toiture verte. La définition des systèmes a rendu compte des données de premier plan (*'foreground data'*), notamment les matériaux utilisés et leurs épaisseurs, ainsi que la consommation énergétique au sein du bâtiment. Envisager une comparaison entre les deux toitures du point de vue des matériaux et de leur performance énergétique a donné lieu à la définition de deux approches. La 1^{ère} dans laquelle les deux toitures sont comparées à performances énergétiques identiques (dans ce cas les épaisseurs d'isolant sont différentes) et la seconde dans laquelle les deux toitures sont comparées à performances énergétiques différentes (dans ce cas les épaisseurs d'isolant sont identiques). À ce niveau, une hypothèse a été émise quant au pourcentage de réduction de la consommation énergétique au sein du bâtiment à toiture verte.

- La définition des matériels et méthodes

Cette partie est cadrée et orientée par les normes européennes EN 15978 et EN 15804, relatives à l'application de l'ACV aux bâtiments et/ou à ses composantes. Elle démarre par la définition des objectifs phares de cette étude d'ACV et de son application envisagée. Ensuite, l'unité fonctionnelle qui rend compte de l'unité de surface des toitures à étudier, de la fonction de la toiture à prendre en compte dans l'étude, ainsi que de la durée de vie à considérer. Par la suite, l'entièreté du cycle de vie des toitures et les frontières des systèmes ont été définis. Cette partie rend également compte de la méthode d'allocation utilisée et se termine par la définition de la méthode de calcul des impacts.

- La collecte de données pour l'inventaire en cycle de vie

Cette partie fera état de la collecte des données et des modes opératoires pour quantifier les flux de matériaux entrants et les sortants des systèmes, par phase de cycle de vie. En effet, pour chacune de ces phases, il s'agissait de lier chaque matériau et la consommation énergétique de chacune des toitures à son correspondant idéal dans la base de données EcoInvent 3.1 (EcoInvent, Zurich, Suisse).

- La modélisation, calcul des impacts et interprétations

À l'issue de cette collecte, chaque ensemble de données est modélisé par phase du cycle de vie via le logiciel SimaPro (Pré Consultants, Amersfoort, Pays-Bas), en respectant les quantités spécifiques de chaque flux de matériaux et d'énergie et en distinguant bien les deux approches. Le calcul des impacts s'est fait conformément à la méthode de calcul d'impacts CML selon des indicateurs prescrits par les normes. Les résultats produits ont été ensuite interprétés et analysés selon les deux approches.

PARTIE 2 : GÉNÉRALITÉS ET ÉTAT DE L'ART

Avant d'entrer dans le cœur du sujet, il est important de fixer des bases, afin de réellement connaître et de s'appropriier la question des toitures vertes. Cette partie a pour but d'apporter des éléments de base pour la compréhension de la technologie des toitures vertes. Cette partie est exempte de détails techniques et organisationnels de la mise en place d'une toiture verte.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VERTES

1. BREF HISTORIQUE

Le concept de disposer de la végétation sur les toitures n'est pas nouveau. Entre 4000 et 600 ans avant JC, les ziggurats (édifices religieux mésopotamiens) abritaient déjà des arbres et des fleurs sur leurs toitures terrasses (cf. figure 1) (Shimmin, 2012). Au 7^e siècle avant JC, le concept est renforcé par les 'jardins suspendus de Babylone' (cf. figure 2). Il s'agissait d'une structure à plusieurs terrasses aériennes avec une végétation dense et riche de toute sorte (arbres, fleurs et herbes, sauvages et exotiques). Ils étaient construits en milieu désertique et contribuaient à rendre l'espace plus viable. Exemple de référence des toitures végétalisées, ces 'jardins suspendus de Babylone' sont connus comme l'une des sept merveilles de l'Ancien Monde, de par leur aspect esthétique irrévocable. (Shimmin, 2012 ; Almusaed, 2011 ; Oberndorfer et *al.* 2007). Par ailleurs, quelques vestiges trouvés dans l'architecture romaine montrent la présence des toitures terrasses végétalisées, dont l'une d'elles a été retrouvée dans la villa des Mystères à Pompéi (cf. figure 3). Son aspect esthétique faisait d'elle un espace fortement fréquenté par ses habitants pour s'y restaurer et passer du temps (Almusaed, 2011 ; Shimmin, 2012). Durant des siècles et des siècles, l'idée de planter des arbres et fleurs sur des toitures n'a cessé de se répandre en Europe et des cas de toitures végétalisées se font encore plus nombreux. Le palais Piccolomini à Pienza, (cf. figure 4) et la villa Giulia à Genova construit entre 1550 et 1555 (cf. figure 5) en sont des exemples. Ils ont été construits respectivement en 1463 pour le Pape Pie II et en 1550 pour le Pape Jules III. Ils représentent les premiers aménagements paysagers artificiels mis en place et contrôlés par l'homme. (Shimmin, 2012).

Le mouvement de prolifération des toitures végétalisées dans le monde est également marqué par l'émergence de l'architecture vernaculaire en Scandinavie entre 1600 et 1800. En Norvège, un nouveau type de toiture végétalisée voit le jour. Faite de substrat et de plantes, ces toitures étaient conçues pour des bénéfices en matière de protection contre les intempéries, de réduction du vieillissement de la toiture, d'isolation thermique et donc de confort thermique (cf. figure 6) (Shimmin, 2012 ; Almudaed, 2011). Ceci marque l'évolution de la technologie des toitures vertes en ce sens qu'on passe des toitures terrasses végétalisées à des toitures végétalisées avec implémentation de couches supplémentaires. Quelques années plus tard ce concept fut exporté sur le continent Américain par des immigrants scandinaves (cf. figure 7) (Shimmin, 2012 ; Getter et Rowe, 2006).

Vers la fin du XX^e siècle après la crise énergétique, des régulations ont commencé à s'établir dans le monde afin de limiter la consommation d'énergie des bâtiments. Avec la prise de conscience progressive du concept du développement durable et le développement de nouvelles techniques de construction, ces régulations ont donné lieu à la mise en place de certaines mesures, parmi

lesquelles la promotion des toitures vertes. C'est ainsi que l'Allemagne, pionnière de l'installation des toitures vertes en Europe a commencé à les implémenter, suivie de la France, des Pays Bas, de la Suisse, etc. La Belgique s'y est mise quelques années plus tard. Les toitures vertes ont commencé à susciter de plus en plus de l'intérêt parmi les chercheurs, voulant confirmer les hypothèses sur leurs bénéfices qui étaient jusque-là connus par expérience, mais pas scientifiquement prouvés. Par ailleurs, des réglementations et mesures incitatives sont mises en place dans chacun de ces pays pour la promotion et la valorisation des toitures vertes (Berardi et *al.* 2014 ; Almusaed, 2011).

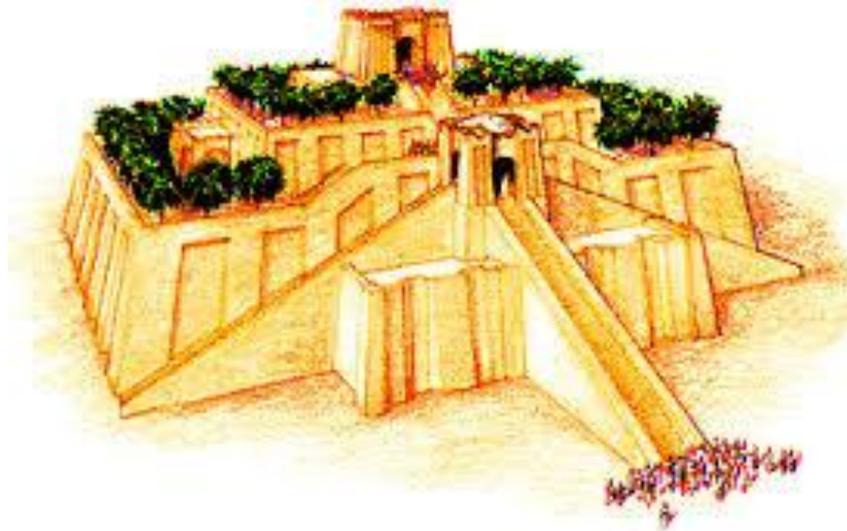


Figure 1 : Les toitures terrasses végétalisées des édifices religieux mésopotamiens (source : Shimmin, 2012)



Figure 2 : Les jardins suspendus de Babylone (source : Shimmin, 2012)



Figure 3 : La villa des Mystères à Pompéi (source : Shimmin, 2012)



Figure 4 : Le palais Piccolomini à Pienza (source : Shimmin, 2012)



Figure 5 : La villa Giulia à Genova (source : Shimmin, 2012)



Figure 6 : Une toiture végétalisée, appelée « sod roof », en Norvège (source: Shimmin, 2012)



Figure 7 : Une toiture végétalisée (« sod roof ») à Milton au Dakota du Nord construit par un immigrant norvégien (source : Shimmin, 2012)

Ce bref historique permet de mettre en évidence l'évolution les différents rôles, places et perceptions des toitures vertes dans la société et dans le temps, aussi bien que l'amélioration de ses technologies. En effet, entre 4000 ans avant JC jusqu'aux années 1600, les premières toitures vertes sont des toitures terrasses végétalisées. Elles sont à l'origine de la recherche chez l'Homme d'un accroissement de son bien-être et son confort personnel au sein de son environnement vivant. Les plantes et arbres sont d'ores et déjà perçus comme des éléments de décoration et d'embellissement contribuant ainsi à l'épanouissement psychosocial des hommes. Les toitures terrasses végétalisées sont dès lors des espaces au grand confort où se tenir à l'écart du soleil et de la chaleur, des espaces de récréation où passer du bon temps, se restaurer, socialiser et aussi des espaces de reconnexion avec la nature. Ensuite, à partir des années 1600, un nouveau style de toiture verte voit le jour. En plus des toitures terrasses végétalisées (plates et sans pente), on voit apparaître en Norvège des toitures vertes dites 'toiture-gazon' à forme pentue. La propagation des toitures vertes ne tire plus seulement son origine dans la recherche de l'esthétique, de la proximité avec la nature ou de l'épanouissement psychosocial, mais aussi dans la recherche des bénéfiques techniques qu'elles confèrent aux bâtiments ; en l'occurrence la protection contre les intempéries, la réduction du vieillissement de la toiture et un meilleur confort thermique principalement. Enfin, depuis la fin du

XXe siècle, avec l'intérêt grandissant des questions liées à l'environnement et au développement durable, grâce à leurs bénéfices écologiques, les toitures vertes deviennent, non plus seulement des atouts indispensables à l'échelle d'un bâtiment, mais aussi à l'échelle des villes. À ce stade, leur technologie relève de l'implémentation de plusieurs couches nécessaires au développement de la végétation, dans la recherche de la durabilité et des solutions aux problèmes urbains et environnementaux.

2. DÉFINITION

Il n'existe pas de définition unique des toitures vertes. Sa description dépend du contexte et des spécifications à mettre en avant. D'un article scientifique à l'autre, plusieurs définitions des toitures vertes sont données. Toutes ces définitions sont inter reliées se complètent.

De manière générale, une toiture verte est un toit recouvert de végétation. Elle est encore appelée éco-toiture, toiture vivante, toiture végétalisée ou végétale (Sutton, 2015 ; Cook-Patton et Bauerle, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011).

Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) définit une toiture verte comme un toit recouvert de végétation (herbes, plantes, fleurs, arbres, etc.) et des couches nécessaires à son développement (CSTC, 2006). Il est ainsi mis en évidence la particularité d'une toiture verte qui est sa végétation, ainsi que son caractère multicouche.

Kosario & Ries (2007, p. 2606) apporte une autre dimension dans la définition d'une toiture verte : *"A green roof, i.e., a roof with a vegetative cover, is one passive technique that can be used to address environmental issues in an urban setting"*. Cela signifie qu'en plus d'être une couverture végétale, une toiture verte est une technique de construction passive appliquée pour pallier aux problèmes urbains et environnementaux. La dimension qu'apporte cette définition est alors d'ordre écologique et environnemental, compte tenu des bénéfices qu'elles procurent.

3. STRUCTURE

De l'intérieur vers la surface (cf. figure 8), on distingue : (Chenani et al. 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; CSTC, 2006).

- Le support de plancher : c'est la première couche de la structure de base d'une toiture classique. C'est l'élément porteur de la toiture, il doit être conçu et dimensionné de sorte à supporter l'ensemble de la toiture classique ou verte. Il peut être en béton, en acier ou en bois.
- Le pare-vapeur permet d'éviter que l'humidité de la construction ne pénètre dans l'isolant. Il est en forme de panneaux de fibres.
- L'isolant thermique doit garantir une isolation thermique souhaitée et de préférence résister à l'écrasement.
- À la membrane d'étanchéité, doit être apporté le plus grand soin. En cas de fuite, elle n'est plus accessible. Elle est généralement en EPDM (éthylène-propylène-diène monomère), en PVC (polychlorure de vinyle) ou en étanchéité liquide. Sur une toiture verte, la durée de vie de cette membrane, qui est de 35 ans (Charlot-Valdieu et Outrequin, 2013), augmente et peut aller de 40 à 70 ans (Getter et Rowe, 2006). Elle clôture la structure de base d'une toiture classique.

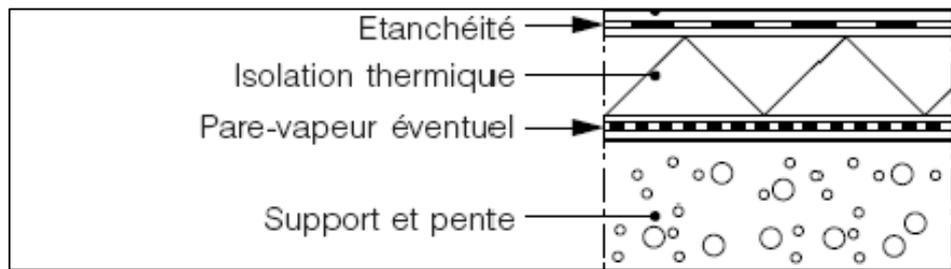


Figure 8 : La structure d'une toiture classique (source : CSTC, 2006)

C'est sur cette structure de base que reposent les couches supplémentaires nécessaires pour une toiture verte. Il s'agit des couches : de protection mécanique, de drainage, de filtrage, de substrat et de la végétation (cf. figure 9). Chacune de ces couches possède des caractéristiques physiques et chimiques et a un rôle précis dans la structure d'une toiture verte.

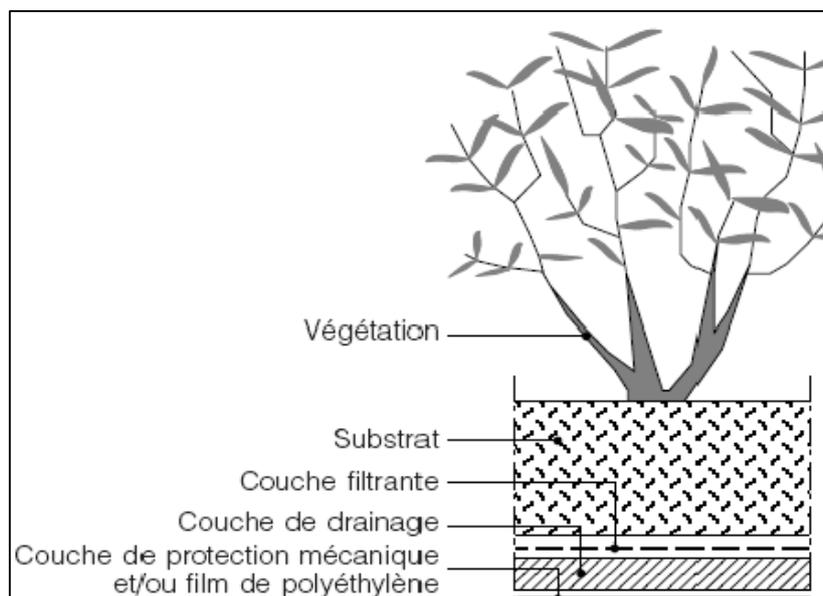


Figure 9 : La structure d'une toiture verte (source : CSTC, 2006)

- La couche de protection mécanique à l'étanchéité et aux racines représente la première couche au-dessus de la structure de base d'une toiture (cf. figure 9). Son rôle consiste à imperméabiliser la structure de la toiture verte. En effet, la prévention des infiltrations d'eau dans la structure de base du toit constitue l'un des objectifs principaux dans la conception des toitures vertes. Un autre rôle de cette couche consiste en la protection du système de toiture contre la pénétration des racines susceptibles de se propager lors de la croissance des plantes. Il existe deux types de protection mécanique : physique et chimique. Le premier type correspond à une fine couche de polyéthylène basse densité (PE) et le second utilise des toxines comme du cuivre (cf. tableau 1) (Vijayaraghavan, 2016 ; Chenani *et al.* 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006).
- La couche de drainage permet aux excédents d'eaux de pluie d'être stockés tout en leur permettant de s'écouler librement hors de la toiture. Ainsi, les plantes peuvent avoir accès à l'eau pour leur survie. Cependant, stocker de l'eau en permanence dans cette couche peut endommager le substrat et favoriser la prolifération d'un environnement insalubre. De ce fait, une attention particulière de la part des chercheurs et des professionnels du domaine doit y être

portée. La couche de drainage est généralement faite de matériaux géopolymères 3D tels que le polyéthylène (PE), de polypropylène (PP). Son épaisseur varie en fonction du type de toiture verte et peut atteindre 4 cm sur une toiture verte de type intensif (cf. tableau 1) (Vijayaraghavan, 2016 ; Chenani *et al.* 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006 ; Getter & Rowe, 2006).

- Au-dessus de la couche de drainage, la couche de filtrage est installée (cf. figure 9). Cette nappe synthétique en polyester, en laine de verre ou en polypropylène retient des particules de terre et de végétaux venant du substrat, qui risqueraient de colmater la couche de drainage. (Vijayaraghavan, 2016 ; Chenani *et al.* 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006 ; Getter & Rowe, 2006).
- L'installation d'une couche de rétention d'eau au-dessus de la couche filtrante est optionnelle. Elle dépend du type de toiture et des conditions climatiques de la zone. Il serait plus judicieux de l'installer pour une toiture intensive, ou dans une zone à forte pluviométrie. Son but est de retenir de l'eau afin d'humidifier en permanence le substrat. Elle peut être faite de laine minérale, de fibres polymères ou de fibres recyclées. Son épaisseur varie de 1 à 6,5 cm (cf. tableau 1) (Vijayaraghavan, 2016 ; Chenani *et al.* 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006 ; Getter & Rowe, 2006).
- Le substrat est la couche sur laquelle repose la végétation sur une toiture verte (cf. figure 9). Il n'existe pas, en Belgique, de règles à caractère officiel concernant la composition des mélanges de substrat pour toitures vertes. Le choix de la nature et de l'épaisseur de la couche d'enracinement est cependant intimement lié au type de végétation. Cependant, l'expérience montre que la terre de jardin (terre arable, terre noire), bien que la plus économique, ne convient généralement pas pour les toitures vertes, car se compacte et s'acidifie facilement, au point de réduire sa capacité de rétention d'eau et d'air au fil du temps.). Dans la plupart des cas, le substrat est un mélange de matières minérales et organiques. La proportion de matières organiques est plus importante dans une toiture verte de type intensif (Vijayaraghavan, 2016 ; Best *et al.* 2015 ; Chenani *et al.* 2015 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006 ; Getter & Rowe, 2006).
- La végétation est la partie visible et la particularité d'une toiture verte. Elle représente toute l'esthétique de la toiture. Le type de plante présente sur une toiture verte dépend de plusieurs paramètres : la zone géographique, les conditions climatiques, le type de toiture, etc. Elle joue un rôle très important en matière de services écosystémiques. D'une façon générale, quelle que soit l'exposition, il peut y être planté un mélange de graminées et de sédums qui résistent au gel, au soleil, en ponctuant le tout de quelques vivaces (thyms, lavandes, œillets et santolines). Un mélange d'espèces ornementales et sauvages augmentera l'intérêt biologique de la toiture (biotopes pour les papillons, les abeilles et autres insectes sympathiques), sans négliger l'aspect esthétique. (Vijayaraghavan, 2016 ; Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Almusaed, 2011 ; CSTC, 2006).

Tableau 1 : Les différents matériaux envisageables et leurs épaisseurs pour chaque élément de la toiture verte (sources : Bianchini et Hewage, 2012 ; CSTC, 2006)

Éléments de toiture	Différents matériaux envisageables	Épaisseur
Plancher	➤ Acier/béton/bois	*
Isolant thermique	➤ Minérale : laine minérale, verre cellulaire, perlite expansée ; ➤ Synthétique : polyuréthane (PUR), polystyrène expansé (EPS) ou extrudé (XPS), polyisocyanurate (PIR) ; ➤ Végétale : liège (ICB).	**
Pare-vapeur	➤ Panneaux de fibres géotextiles	/
Étanchéité	➤ Bitumes polymères : Bitume + plastomère ou élastomère ; ➤ Matières synthétiques : Éthylène-propylène-diène monomère (EPDM), polychlorure de Vinyle (PVC) ; ➤ Matières liquides : résines de polyuréthane, de polyester.	/
Protection mécanique	➤ Physique : Caoutchouc synthétique ou recyclé, polyéthylène (PE) ou polypropylène (PP), asphalte coulé, PVC, béton maigre ; ➤ Chimique : Cuivre.	0,5 cm
Drainage	➤ Extensif : PE, PP, PVC. ➤ Intensif : granulats de graviers, ou d'argile expansée.	Extensif : 1 cm à 2 cm Intensif : > 4 cm
Filtre	➤ PE, PP, PVC	0,5 cm
Rétention d'eau (optionnelle)	➤ Laine minérale, fibre polymère ou recyclée	1 à 6,5 cm
Substrat	➤ Sable, pierres volcaniques / pierre ponce, argile expansée, compost	Extensif : 4 à 10 cm Intensif : 10 à 150 cm.

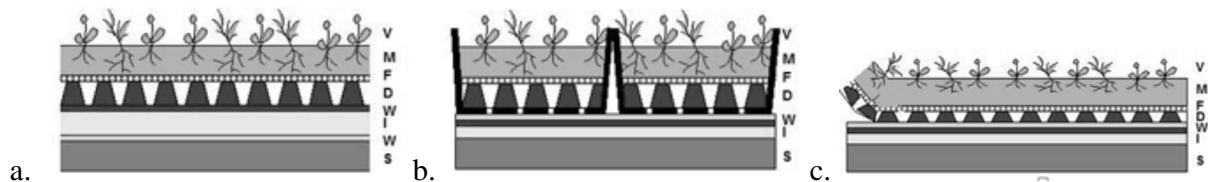
**épaisseur variante en fonction de la structure et de la charge du bâtiment ; **épaisseur variante en fonction du coefficient de transmission à atteindre ; / : pas disponible dans la littérature.*

4. TYPOLOGIE

Les toitures vertes se classent en trois catégories : intensive (toiture-jardin), semi-intensive ou semi-extensive et extensive (cf. figure 11). La principale différence entre ces catégories réside dans l'épaisseur du substrat, ce qui influence le type de végétation ; d'où les appellations 'intensive' et 'extensive' qui font référence à la végétation.

a. Toiture verte extensive

Ce système est adapté aux bâtiments de grandes surfaces, aux toits inclinés et aux habitations existantes. En effet, il ne nécessite qu'une faible épaisseur de substrat et de ce fait, une végétation légère est recommandée (cf. tableau 2). La structure n'a généralement pas besoin d'être renforcée (le poids de la surcharge est $> 100 \text{ kg/m}^2$, en tenant compte de la capacité maximale en eau) (cf. tableau 3). La hauteur de la couche de terre se situe entre 3 et 10 cm environs. L'entretien est assez restreint car ces plantes s'autorégulent, résistent à la chaleur et au gel (arrosage uniquement en cas de sécheresse prolongée). Néanmoins, deux contrôles annuels sont également exigés pour vérifier les évacuations pluviales et le bon fonctionnement du drainage et de l'ensemble de la structure. (Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Bruxelles Environnement, 2011 ; CSTC, 2006). Trois types de technologies s'appliquent aux toitures vertes extensives (cf. figure 10) : les systèmes complet (a), modulaire (b) et pré cultivé (c) (Oberndorfer et *al.* 2007). Dans le premier (a), la structure de base et les couches supplémentaires de la toiture verte forment un bloc et ces couches sont installées en tant que partie intégrante de la toiture de base. Dans le second (b), des bacs de végétation sont cultivés ex situ et sont installés au-dessus du système de toiture de base. Dans le dernier (c), la végétation, le substrat, les couches filtrante, drainante et de protection sont pré montés ex situ et roulés sur la toiture existante.



a : système d'installation complet ; b : système modulaire ; c : système pré cultivé

Figure 10 : Les types de technologie des toitures vertes extensives (source : Oberndorfer et *al.* 2007)

b. Toiture verte semi-intensive ou semi-extensive

Ce type de toiture constitue un bon compromis entre le toit extensif et le toit intensif. L'installation est adaptée lorsque l'inclinaison du toit est inférieure à 15° . Il peut être installé sur tous les supports de toit : béton, acier ou bois et ne supporte que des variétés d'une hauteur maximale de 50 cm. On y retrouve en général des plantes couvre-sol et des arbustes (cf. tableau 2). La hauteur du substrat est de 10 à 25 cm environ pour une surcharge allant de 100 à 400 kg/m^2 (cf. tableau 3). Ce type de toiture peut être installé sur des constructions neuves ou en rénovation sur une toiture existante, le cas échéant, il faudra renforcer la structure. Il est donc possible d'y créer un espace vital et accessible. L'entretien y est fréquent et a lieu plusieurs fois par an (Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Bruxelles Environnement, 2011 ; Oberndorfer et *al.* 2007 ; CSTC, 2006).

c. Toiture verte intensive

Encore appelée toiture-jardin, ce type de toiture est adapté aux petites et moyennes surfaces. Son usage est similaire à celui d'un jardin traditionnel. Elle nécessite une épaisse couche de substrat, de minimum 25 cm, pouvant aller jusqu'à 100 cm, pour y planter de petits arbres. La surcharge pouvant être supportée par ce type de toit est de 400 kg/m^2 au minimum. Elle ne peut être réalisée que sur des constructions neuves (cf. tableau 3). La végétation y est plus dense et les plantations possibles sont la pelouse, les buissons, les arbustes, et les arbrisseaux (cf. tableau 2). L'entretien y est régulier,

comme dans un jardin traditionnel. L'arrosage y est fréquent, l'idéal étant de prévoir un système automatique. (Bianchini & Hewage, 2012 ; Friedman, 2012 ; Bruxelles Environnement, 2011 ; Oberndorfer et al. 2007 ; CSTC, 2006).

Tableau 2 : La relation entre le type de toiture verte, le type de végétation et l'épaisseur du substrat (source : Bruxelles Environnement, 2011)

Type de toiture verte	Formes végétales	Épaisseur du substrat (cm)
Extensive	Mousses et sedums	4 – 6
	Les mêmes + graminées et vivaces à port bas	4 – 15
Intensive et semi-intensive	Les mêmes + plantes vivaces et couvre-sol	15 – 30
	Arbustes	30 – 60
	Grands arbustes, arbrisseaux	60 – 100
	Arbres	> 100 (en bacs : 200×200×150)

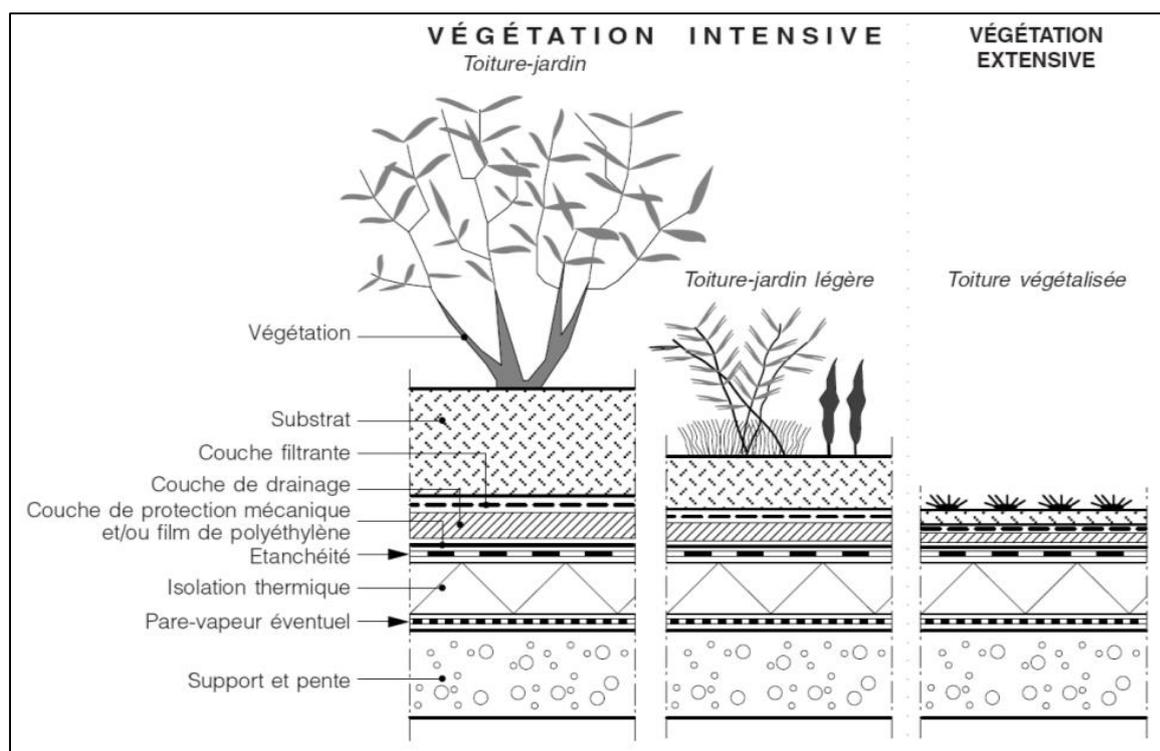


Figure 11 : Aperçu des trois types de toitures vertes : extensif, semi-intensif et intensif (source : CSTC, 2006)

Tableau 3 : Caractéristiques des trois types de toiture verte : extensif, semi-intensif et intensif (source : CSTC, 2006)

Éléments caractéristiques	Toiture verte intensive		Toiture verte extensive
	intensive	semi intensive	extensive
Épaisseur indicative des couches au-dessus de l'étanchéité	≥ 25 cm	Entre 15 et 25 cm	≤ 15 cm
Charge permanente et poids propre approximatifs de la toiture verte (saturée)	≥ 400 kg/m ²	Entre 100 et 400 kg/m ²	Entre 30 et 100 kg/m ²
Pente indicative usuelle du support	2 à 10 % (1 à 6°)	2 à 58 % (1 à 30°)	2 à 70 % (1 à 35°)
Accessibilité	Oui	Oui	Non*
Entretien de la végétation	Important	Moyen	Limité
Réalisation			
➤ En rénovation	Souvent impossible	Parfois	Oui
➤ En bâtiment neuf	À étudier	À étudier	Oui

**sauf aménagement supplémentaire*

En conclusion, les toitures vertes sont différentes les unes des autres. Leurs structures et caractéristiques dépendent de plusieurs facteurs géographique, climatique et des raisons de leur construction. Cependant, le succès d'une toiture verte réside dans la capacité de survie de ses plantes. De ce fait, il y a un besoin en termes de recherche scientifique sur les caractéristiques du substrat et de la végétation. Les matériaux des toitures vertes, des polymères pour la plupart, sont des matériaux polluants. C'est principalement la raison pour laquelle la réalisation des toitures vertes promeut de plus en plus l'utilisation des matériaux à meilleure performance environnementale, comme les matériaux recyclés.

Les figures 12 et 13 présentent des exemples réelles de toitures vertes à Bruxelles.



Toit du rez-de-chaussée du bâtiment H de l'ULB – Solbosch

Figure 12 : Un exemple de toiture verte extensive à Bruxelles (source : Photo prise par Edgar Towa le 25-05-2016)



Figure 13 : Un exemple de toiture verte semi-intensive à Bruxelles (source : Ferme Nos Pilifs, Bruxelles, Belgique)

5. QUEL COÛT

Il n'est pas aisé de définir le prix exact d'installation d'une toiture végétalisée, car celui-ci est très fluctuant en fonction de la surface à réaliser, des travaux éventuels (en rénovation ou en création), du type de toiture souhaitée, etc. Le tableau 4 suivant présente un aperçu du prix du substrat et de la végétation pour chaque type de toiture, en fonction de sa surface.

Tableau 4 : Coût d'installation de la végétation et du substrat par type de toiture verte (source : Bruxelles Environnement, 2011)

SUBSTRAT				
Type de toiture verte	Masse (kg/m²)	Surface de toiture (m²)		
		De 1 à 80	De 80 à 200	> 200
Extensive	95	81 – 55 €/ m ²	55 – 29 €/ m ²	< 29 €/ m ²
	100	125 – 73 €/ m ²	73 – 39 €/ m ²	< 39 €/ m ²
Semi-intensive et intensive	130	137 – 77 €/ m ²	77 – 46 €/ m ²	< 46 €/ m ²
	236	181 – 91 €/ m ²	91 – 72 €/ m ²	< 72 €/ m ²
	392	218 – 120 €/ m ²	120 – 108 €/ m ²	< 108 €/ m ²

VÉGÉTATION				
Type de toiture verte (transport et installation compris)	Surface de toiture (m²)			
	De 1 à 80	De 80 à 200	> 200	
Végétation sous forme de bouture	5 – 4 €/ m ²	4 – 3.5 €/ m ²	< 3.5 €/ m ²	
Végétation pré-cultivée	15 – 12 €/ m ²	12 – 9 €/ m ²	< 9 €/ m ²	
Végétation sous forme de tapis	28 – 24 €/ m ²	24 – 18 €/ m ²	< 18 €/ m ²	
Végétation intensive transport + installation	40 – 35 €/ m ²	35 – 28 €/ m ²	< 28 €/ m ²	

6. RÈGLEMENTATION ET INCITANTS FINANCIERS

Le Règlement Régional d'Urbanisme (RRU) dans son article 13 stipule que : « ... *Les toitures plates non accessibles de plus de 100 m² doivent être aménagées en toitures verdurisées.* ». Les toitures plates visées dans cet article concernent aussi bien les toitures des bâtiments principaux que des annexes. Par toitures accessibles dans cet article, il est entendu des toitures terrasses, aménagées à fins de séjour. L'accessibilité partielle d'une toiture plate ne dispense pas d'un aménagement verdurisé de la partie non accessible. Toutes les autres toitures de plus de 100 m² accessibles uniquement pour des raisons techniques sont soumises à l'imposition de verdurisation prescrite par cet article (RRU, 2006).

Par ailleurs, des mesures incitatives existent pour favoriser l'installation de toitures végétalisées sur les bâtiments. Les autorités publiques proposent d'ailleurs des primes. Elles correspondent à la prime énergie B5 relative aux toitures vertes. Elle s'applique aux bâtiments résidentiel, tertiaire et industriel. Le montant de la prime va de 20€/m² à 40€/m² de toiture verte extensive selon les revenus, avec un supplément de 30€/m² pour une toiture verte intensive. (Bruxelles Environnement, 2014).

II. ÉTAT DE L'ART

Aujourd'hui, les toitures vertes ont pris de l'importance, dans un contexte d'écologisation des villes (*'urban greening'*) et d'aménagement urbain durable. Dans ce contexte, les enjeux urbains et environnementaux, liés aux services écosystémiques, sont de plus en plus importants. (Köhler et Clements, 2012 ; Bowler et *al.* 2010 ; Lundholm et Peck, 2008 ; Oberndorfer et *al.* 2007). Les services écosystémiques ont fait l'objet de plusieurs sujets de recherche et ont donné lieu à de nombreuses publications scientifiques. Il est entendu par services écosystémiques des bénéfices que les humains tirent de la nature. Ils reposent sur plusieurs flux de matières, d'énergie et d'informations issus du capital naturel (les écosystèmes), au profit du bien-être des humains (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). En effet, bien que les toitures vertes soient des constructions artificielles, leurs bénéfices sont essentiellement issus de sa végétation et sa couche de substrat, qui constituent des écosystèmes ou capital naturel.

Cependant, afin d'obtenir le bénéfice environnemental net des toitures vertes, il est important d'évaluer non seulement les impacts de ses services écosystémiques, mais aussi les impacts de sa technologie, à travers ses matériaux tout au long de leur cycle de vie. Bien que ce travail porte sur les bénéfices environnementaux des toitures vertes des points de vue des impacts des matériaux et de la consommation énergétique, l'état de l'art fera part de manière non-exhaustive des travaux portant sur les toitures vertes et les services écosystémiques scientifiquement prouvés. Cet état de l'art critique (cf. tableau 5) présente un récapitulatif de ces travaux et qui met en relation les aspects des toitures vertes étudiées avec les méthodes appliquées.

1. ÉCONOMIES D'ÉNERGIE POUR LES BÂTIMENTS :

Les toitures vertes sont connues pour leurs performances thermiques remarquables. Saadatian et *al.* (2013) prouvent que ces performances dépendent du type de végétation en place, de l'effet des saisons, des matériaux utilisés et de l'épaisseur du substrat. Ils montrent qu'en une journée, 27% du rayonnement solaire est réfléchi par les toitures vertes, 60% est absorbé par les plantes pour la photosynthèse et le reste des 13% est transmis au substrat. Ainsi, une toiture verte intensive offre un meilleur confort thermique et un effet de refroidissement ambiant plus important qu'une toiture verte extensive, dus à la différence de végétation et de l'épaisseur du substrat, plus importantes dans la première. Ils prouvent également que les toitures vertes ont une performance thermique optimale en été et qu'en hiver ces performances font encore l'objet de débats entre les experts, car elles dépendent de la quantité d'humidité contenue dans le substrat, le rayonnement solaire, la température ambiante extérieure et la neige.

En outre, une étude récente a été menée à Guangzhou en Chine par Yang et *al.* (2015), dans laquelle ils comparent les performances thermiques de cinq types de toitures qui diffèrent par leur couche superficielle notamment : 100 mm et 200 mm de substrat de végétation, une couche céramique, une couche d'argile et une toiture classique.

Tableau 5 : Récapitulatif non-exhaustif de la littérature sur les toitures vertes et leurs services écosystémiques

Auteurs	Contexte géographique	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	Approche/Méthode générale
Baumann (2006)	Suisse, Wädenswil							◆			Observations et analyses
Berardi et al. (2014)	/		◆	◆	◆	◆	◆	◆			Revue de la littérature et analyses
Bianchini et Hewage (2012)	/	◆				◆				◆	ACV
Brenneisen (2006)								◆			Observations et analyses
Carter et Jackson (2007)	Grèce, Athènes										Analyse spatiale et modélisation
Castleton et al. 2010	/		◆								Revue de la littérature et analyses
Chenani et al. (2015)	Finlande, Stockholm, Helsinki	◆									ACV
Cook-Patton et Bauerle (2012)	/		◆	◆				◆			Revue de la littérature et analyses
Gagliano et al. (2015)	Zone méditerranéenne		◆								Simulation énergétique
Getter et Rowe (2006)	/		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	Revue de la littérature et analyses
Hashemi et al. (2015)	/		◆								Revue de la littérature et analyses
Jaffal et al. 2012	France, La Rochelle		◆								Simulation énergétique
Kohler et Clements (2012)	/		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		Revue de la littérature et analyses
Kosareo et Ries (2007)	États-Unis, Pittsburgh	◆	◆							◆	ACV
La Roche et Berardi (2014)	États-Unis, Chicago, Los Angeles et Phoenix		◆								Simulation énergétique
Lee et al. (2014)	Australie							◆	◆		Observations et statistiques
Lee et al. (2015)	Corée du Sud, Séoul			◆							Simulations et modélisations
Li et al. (2014)	États-Unis, Baltimore				◆						Simulations et modélisations
Martineau et Samson (2011)	Canada, Québec	◆	◆	◆	◆					◆	ACV
Mentens et al. (2006)	Belgique, Limelette			◆							Simulations et modélisations
Metselaar (2012)	Pays-Bas, Wageningen			◆							Simulations et modélisations

Tableau 5 : Récapitulatif non-exhaustif de la littérature sur les toitures vertes et leurs services écosystémiques

Auteurs	Contexte géographique	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	Approche/Méthode générale
Nagase et Dunnett (2012)	Royaume-Uni, Sheffield			◆							Simulations et modélisations
Niachou et al. (2001)	Grèce, Athènes		◆								Simulation énergétique
CSTC (2006)	Belgique, Bruxelles		◆	◆			◆			◆	Simulations et modélisations
Oberndorfer et al. (2014)	/		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	Revue de la littérature
Razzaghmanesh et al. (2016)	Australie, Adélaïde				◆						Simulations et modélisations
Saadatian et al. (2013)	/		◆								Revue de la littérature et analyses
Sailor et al. (2010)	États-Unis, Portland, Houston, New York City		◆		◆						Simulation énergétique
Saiz et al. (2006)	Espagne, Madrid	◆	◆							◆	Simulation énergétique et ACV
Speak et al. (2012)	Royaume-Uni, Manchester, Oxford					◆					Modélisations
Susca et al. (2011)	États-Unis, New York				◆					◆	Modélisations
Susca (2012)	États-Unis, New York				◆				◆		ACV
Sutton et al. 2012	Amérique du Nord							◆			Observations et analyses
Whittinghill et al. (2015)	États-Unis, Michigan			◆							Simulations et modélisations
Yang et al. 2012	Royaume Uni, Sheffield						◆				Simulations et modélisations
Zhang et al. (2015)	Chine, Chongqing			◆		◆					Simulations et modélisations

[1] Impacts des matériaux ; [2] Performance énergétique des toitures vertes ; [3] Gestion des eaux de pluie ; [4] Réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain ; [5] Capture des particules polluantes ; [6] Isolation acoustique ; [7] Création et préservation de la biodiversité urbaine ; [8] Effets sur la psycho-sociologie urbaine ; [9] Augmentation de la durée de vie des matériaux

Tout ceci à travers le pouvoir d'évapotranspiration de la végétation et à l'épaisseur du substrat. En revanche, ces auteurs ne font pas mention de ce qui se passe si l'on fait varier les matériaux et leur épaisseur dans la toiture classique, en considérant 200 mm d'isolation par exemple. En tenant compte de ces facteurs (type de végétation, épaisseur du substrat, etc.), Wang et *al.* (2014) démontrent également que les toitures vertes apportent plus d'humidité ambiante et limitent les échanges de flux de chaleur au sein des bâtiments. Les toitures vertes offrent un meilleur confort thermique en réduisant la consommation d'énergie en hiver comme en été, même comparées à une toiture classique bien isolée (Berardi et *al.* 2014).

D'autres recherches ont été menées dans les villes de Portland, Houston, New York City et Phoenix aux États-Unis par les chercheurs Sailor et *al.* (2011). Cette étude a évalué la performance énergétique de huit différents bâtiments (immeuble de bureaux et habitation unifamiliale et collective) à toiture verte dans 4 types de climats différents. Tout d'abord, ils concluent que les toitures vertes ont une meilleure performance énergétique que les toitures conventionnelles. Ensuite, ils constatent que les économies d'énergie pour le chauffage (au gaz naturel) étaient plus élevées pour les immeubles de bureaux et dans les climats tempéré et froid, en hiver. Enfin, pour ce qui est des économies d'énergie (électrique) pour le refroidissement, les résultats étaient nuancés. Les économies d'énergie variaient d'un type de bâtiment à un autre et d'une ville à une autre, mais elles étaient plus importantes lors des étés chauds. Ils concluent que la performance énergétique augmente avec l'épaisseur du substrat et de l'intensité de la végétation, mais aussi et surtout en fonction du climat.

Par ailleurs, Saiz et *al.* (2006) proposent une approche basée sur une ACV comparative entre les toitures verte et classique. Ils démontrent que grâce à sa faible absorption solaire et sa conductance thermique inférieure, un toit vert réduit les flux de chaleur à la surface du toit en créant ainsi un effet de refroidissement ambiant en été et des économies de consommation annuelle d'énergie. Leur approche ACV leur permet de conclure qu'en remplaçant une toiture classique par une toiture verte les impacts environnementaux – principalement ceux sur le changement climatique, la santé humaine et la qualité des écosystèmes – sont considérablement réduits. Ce que confirment également Kosareo et Ries (2007).

En effet, ces derniers, suivant une approche orientée cycle de vie, ont mené une étude comparative entre une toiture classique, verte extensive et verte intensive. Les performances énergétiques de ces trois toitures ont été testées sur un bâtiment de 1115 m² de couverture, dont les résultats sont montrés dans le tableau 6.

Il en ressort qu'un bâtiment à toiture verte intensive consomme moins d'énergie que ce même bâtiment à toiture verte extensive et encore moins d'énergie en toiture classique. Ce qui souligne clairement la différence de performance énergétique entre les toitures classiques et les toitures vertes. La faible différence (< 1%) entre les performances énergétiques des trois toitures, ne devrait pas compromettre l'importance des toitures vertes. Car, d'une part, chaque kWh compte et a un coût ; d'autre part, il s'agit là d'une expérience sur une seule toiture d'un bâtiment, dont les caractéristiques varient d'un bâtiment à un autre.

Tableau 6 : Consommation énergétique annuelle de trois types de toiture : classique, verte intensive et verte extensive (source : Kosareo et Ries, 2007)

Types de toitures	Consommation annuelle de gaz (kWh)	Différence de consommation de gaz par rapport à celle de la TVI (kWh)	Consommation annuelle d'électricité (kWh)	Différence de consommation d'électricité par rapport à celle de la TVI (kWh)
Toiture classique	269948	616	2122699	16043
Toiture verte extensive (TVE)	269684	352	2115407	8751
Toiture verte intensive (TVI)	269332	0	2106656	0

Une étude réalisée par les chercheurs Niachou et *al.* (2001) fait part des propriétés thermiques des toitures vertes en accord avec leur performance énergétique. Ils se basent sur des relevés des températures sur trois cas de bâtiments : bien isolé, moyennement isolé et pas isolé. Ils concluent que plus un bâtiment est bien isolé, moins la performance énergétique de la toiture verte au sein du bâtiment est perceptible. Autrement dit, la toiture verte est plus efficace sur un bâtiment moyennement isolé ou peu isolé. Or, le revers de cette assertion est que l'augmentation de l'isolation au sein d'un bâtiment implique une augmentation de la quantité de matériaux. Or, plus de matériaux implique plus d'extraction des matières premières en phase de production et plus de déchets en fin de vie, et par conséquent, plus d'impacts. Ceci étant, un bâtiment bien isolé est-il préférable à un bâtiment peu ou pas isolé à toiture verte ?

2. GESTION OPTIMALE DES EAUX DE PLUIE :

Pour Berardi et *al.* (2014), Getter et Rowe (2006), Köhler et Clements (2012), c'est le bénéfice environnemental le plus important rendu par une toiture verte. Plusieurs études ont été menées concernant les capacités hydrologiques des toitures vertes comparées à celles des toitures classiques. Par capacité hydrologique, il est entendu deux actions principales : diminuer la quantité d'eau de pluie rejetée et réduire en même temps le débit de pointe des averses (Berardi et *al.* 2014). Ces actions permettent de réduire le taux de ruissellement au sol des eaux de pluie, ce qui décharge le réseau d'égouttage et réduit les « coups de bélier » dans les collecteurs qui arrachent les sédiments et engorgent les STEP. De ce fait, les risques d'inondation dans les zones sensibles sont ainsi minimisés.

L'influence de la toiture verte sur l'amortissement du débit de pointe est illustrée par une étude réalisée par le CSTC (2006) de 2002 à 2004 à Limelette (Belgique). Elle montre les débits évacués par onze types de toitures tout au long de l'année. Il s'agit de neuf toitures vertes (intensives et extensives à caractéristiques différentes) et deux toitures classiques (une nue et l'autre avec une couche superficielle de gravier). Les résultats montrent que les toitures classiques évacuent un débit de pointe de l'ordre de 0,84 l/min.m², alors que la toiture verte à végétation intensive, avec une

couche de substrat de 20 cm, évacue seulement 0,22 l/min.m². Ce processus démarre en outre plus d'un quart d'heure plus tard que sur la toiture nue. Ainsi, les chercheurs du CSTC constatent que la toiture verte diminue et postpose les débits de pointe. Ceci met en évidence le caractère retardateur de la toiture verte, lors d'averses intenses. Par ailleurs, ils concluent que les toitures vertes rejettent clairement moins d'eau qu'une toiture traditionnelle, car une bonne partie de l'eau est retenue par le système de la toiture verte. Cependant, toutes les toitures vertes n'ont pas la même performance hydraulique. En effet, parmi les neuf toitures vertes, plus épais était le substrat, plus importante était la rétention d'eau.

D'une manière générale, les capacités hydrologiques des toitures végétalisées dépendent du type de toiture verte, de sa pente, de l'épaisseur et du type de substrat et de la végétation en place, l'âge de la toiture, pour ce qui sont des facteurs internes et des saisons, de la durée et de l'intensité des pluies, la température comme facteurs externes (Stovin et al. 2015 ; Zhang et al. 2015 ; Köhler et Clements, 2012 ; Berndtsson, 2009 ; Mentens et al, 2005). Les techniques de gestion des eaux pluviales des toitures conventionnelles nécessitent des dispositifs tels que des réservoirs de stockage, des gouttières, des filtres à sable, etc. cependant, ces technologies peuvent être difficiles à mettre en œuvre en zone urbaine dense (Oberndorfer et al. 2007. Mentens et al. 2005). Les toitures vertes n'ont pas besoin de ces technologies supplémentaires.

Tout d'abord, lors d'un épisode pluviométrique, l'eau s'infiltré dans la couche de terre faisant office de substrat jusqu'à la couche de drainage, dans laquelle elle est stockée temporairement, le temps de s'écouler doucement hors de la toiture. Ensuite, lors de cette infiltration, cette couche de substrat absorbe une bonne quantité de cette eau. Cette absorption peut atteindre 42% à 80% de manière générale (Köhler et Clements, 2012). Les toitures vertes intensives sont plus efficaces (75% d'absorption pour 150 mm d'épaisseur de substrat) que les extensives (45% d'absorption pour 100 mm) (Mentens et al. 2006). Enfin, les toitures vertes possèdent un pouvoir d'évaporation. Une partie de cette eau de pluie est restituée dans l'atmosphère sous forme de vapeur par évapotranspiration de la végétation qui peut aller jusqu'à 4,5mm/jour (Köhler et Clements, 2012).

Stovin et al (2015) ont mené une expérience sur neuf toitures vertes en tenant compte des statistiques pluviométriques des quatre années précédentes. Ils concluent que les performances hydrologiques des toitures vertes dépendent du type de végétation, de l'épaisseur et du type de substrat, mais aussi et surtout de l'intensité des pluies. En effet, les toitures vertes avaient un pouvoir d'absorption > 80% pour des précipitations <10 mm. Ce pouvoir d'absorption se réduisait au fur et à mesure que les précipitations dépassaient les 10 mm. Zhang et al. (2015), dans le même ordre d'idée ont conduit une étude sur 19 cas, de la capacité de rétention d'eau de pluie des toitures vertes. Ils en ressortent avec des conclusions similaires à celles de Stovin et al. (2015), en ajoutant que les capacités hydrologiques des toitures vertes dépendent plus des facteurs externes qu'internes. Ce qu'approuvent Steak et al. (2013), en ajoutant qu'un substrat de nature organique à plus de pouvoir de rétention d'eau de pluie.

Berndtsson (2009), en s'appuyant sur les travaux de Mentens et al. (2006) montre que la durée et l'intensité des pluies, le type de toiture, l'épaisseur du substrat sont directement liés. Ils sont également à l'origine d'une réduction de la quantité des eaux de pluies qui arrivent sur le sol de l'ordre moyen de 75% pour une toiture verte intensive et 50% pour une toiture verte extensive. Ils

montrent par contre que les paramètres tels que l'âge et la pente de la toiture verte influencent très peu ou pas ses capacités hydrologiques.

Par ailleurs, il est à préciser que la qualité de ces eaux de pluies retenues est remise en cause, dues au contact de ces eaux avec les matériaux synthétiques et composites de la toiture verte (Zhang et al. 2015 ; Bianchini et Hewage, 2012 ; Berndtsson, 2009).

3. EFFET DE REFROIDISSEMENT URBAIN

Dans les pays développés, la plupart des surfaces en milieu urbain (métalliques, asphaltées, bétonnées, en briques, etc.) ont un faible albédo. L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente. Plus il tend vers 1 plus l'énergie réfléchie est absorbée. De ce fait, une bonne partie du rayonnement solaire de ces surfaces est absorbée et conservée, ce qui contribue à l'élévation de la température localisée en zone urbaine, ce qui crée des îlots de chaleur urbains. Ces effets d'îlot de chaleur urbains ou d'élévation de la température en milieu urbain peut être amoindri par une expansion à grande échelle des toitures vertes (intensives surtout) (Razzaghmanesh et al. 2016 ; Oberndorfer et al. 2007.)

En effet, les toitures vertes ont un albédo compris entre 0,7 et 0,85 ; ce qui est nettement meilleur que celui des surfaces urbaines (entre 0,1 et 0,2 d'albédo). De ce fait, une réduction de 1.5°C à 2°C en moyenne de la température à 2 m du sol pourrait être atteinte par l'implémentation des toitures vertes (Berardi et al. 2014). De plus, Susca et al. (2011) à travers une modélisation, montrent qu'à grande échelle, les toitures vertes contribuent à une réduction de la température ambiante en milieu urbain de l'ordre de 2°C à New York City. Les résultats de cette étude corroborent à celle de Santamouris (2014) dans laquelle il en conclut que la mise en place à une grande échelle des toitures vertes pourrait réduire la température dans les 5 premiers mètres du sol de 0.3°C à 3°C d'une manière générale.

4. AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Les toitures vertes contribuent à la pollution atmosphérique, principalement lors de sa mise en place et dans le processus de fabrication des matériaux chimiques et métalliques qui la composent (Bianchini et Hewage, 2012). Cette étude de ces 2 auteurs, basée sur une ACV des toitures vertes, démontre que leurs capacités de pollution est inférieure à leur pouvoir d'atténuation de la pollution atmosphérique. En effet, la pollution de l'air associée aux toitures vertes, ou plutôt aux matériaux de type polymère qui constituent sa structure, peut être atténuée au bout de 13 ans. Ils en concluent que les toitures vertes sont durables à long terme, car la balance de leurs impacts environnementaux s'inverse à un moment donné (Bianchini et Hewage, 2012).

Wang et al. (2014) distinguent les effets directs et indirects des toitures vertes sur la qualité de l'air. En effet, pour ces auteurs les effets directs des toitures vertes sur la qualité de l'air sont liés au type de végétation en place. Les plantes captent les polluants gazeux dans leurs stomates et sont capables de briser les composés aromatiques dans leurs tissus ou dans le sol. De plus, les plantes feuillues à fort pouvoir de photosynthèse ont une grande capacité de capture du carbone (Wang et al. 2014. Rowe, 2010). À cet effet, une étude menée dans les villes de Chicago et Detroit montre qu'une couverture de 109 ha de toitures vertes contribuerait à une atténuation de 7,87 tonnes de polluants dans l'air, en un an (Berardi et al. 2014).

Quant aux effets indirects des toitures vertes sur la qualité de l'air, ils proviennent des autres services écosystémiques rendus comme l'effet de refroidissement ambiant et les économies

d'énergie. Ainsi, plusieurs études ont montré que les performances thermiques des toitures vertes sur les bâtiments et leurs effets réducteurs de la température urbaine contribuent déjà à l'amélioration de la qualité de l'air (Berardi et al. 2014 ; Wang et al. 2014 ; Rowe, 2010).

5. VALORISATION DE LA BIODIVERSITÉ

Plusieurs études présentent les avantages des toitures vertes liés à l'amélioration de la qualité de l'environnement et la préservation écologique en milieu urbain. En effet, les toitures vertes sont perçues comme des écosystèmes par la présence de la végétation et d'un substrat (minéral ou organique) ce qui crée un habitat propice à la prolifération d'invertébrés, de communautés d'insectes, d'oiseaux, fourmis, araignées, etc. (Oberndorfer et al. 2007. Brenneisen, 2006). Le type de plante ou de végétation en place sur une toiture verte conditionne la présence ou pas de certaines espèces animales (Köhler et Clements, 2012. Sutton et al. 2012 ; Brenneisen, 2006. Baumann, 2006). Certaines espèces végétales comme les plantes rares, les lichens se développent de manière spontanée sur les toitures vertes. (Baumann, 2006).

Bien que les bénéfices des toitures vertes en termes de valorisation de la biodiversité en milieu urbain soient connus, il est important de préciser qu'il manque de preuves scientifiques pour appuyer ces assertions. En effet, il n'est pas aisé de mesurer et de quantifier ce bénéfice comme les précédents, dû à l'effet dynamique dans l'espace et dans le temps des plantes et animaux, ce qui devient dès lors un défi méthodologique pour la recherche.

6. EFFETS PSYCHO SOCIOLOGIQUES

Enfin, d'autres études mettent en évidence les autres services écosystémiques apportés par les toitures vertes. Il s'agit notamment de la valorisation de l'espace toitures (surtout pour les toitures vertes intensives) en espace de récréation. Il s'agit aussi du confort visuel et de l'aspect esthétique offert par la présence de la végétation en altitude en milieu urbain. Tout cela joue un rôle non négligeable sur la psychologie urbaine et le stress. (Lee et al. 2014 ; Susca, 2012 ; Oberndorfer et al. 2007). Cependant, ces services écosystémiques sont contextuels et dépendent d'un type de toiture à un autre et d'une ville à une autre. Notons que les travaux concernant ces sujets sont à ce jour, traités de manière hypothétique et pas encore scientifiquement prouvés. Il y a de ce fait, un besoin en terme de recherche scientifique afin d'apporter des preuves à ces thèses.

7. PERFORMANCE ACOUSTIQUE

La réduction du bruit est considéré comme un service important généré par la verdure urbaine. Pourtant, les effets environnementaux du bruit et le risque pour la santé qui en découlent sont généralement négligés dans la conception des infrastructures (Wang et al. 2014). Les toitures vertes sont aussi connues pour leur performance acoustique en termes de réduction du bruit et d'absorption du son. Elles ont la capacité d'absorber les ondes sonores grâce à la végétation et au substrat. Ce dernier permet de réduire le bruit pour de faibles ou courtes fréquences sonores, tandis que la végétation réduit le bruit pour de plus grandes fréquences. Getter et Rowe (2006) ont montré qu'une toiture verte à 10 cm de substrat peut réduire 5 décibels dans le bâtiment et ses environs, à Francfort en Allemagne. D'autres résultats présentés par Berardi et al. (2014), montrent que pour une toiture verte de 15 cm de substrat, 5 à 13 décibels de courtes fréquences sonores et de 2 à 8 décibels pour de grandes fréquences.

Une étude expérimentale conduit par le CSTC (2006) a examiné les effets des toitures vertes sur la propagation du son en relation avec la charge de la toiture. Cette étude montre qu'une toiture verte

extensive d'environ 90 kg/m² de charge correspond à une isolation du bruit de 35 décibels. Dans le cas d'une toiture verte semi-intensive de 300 kg/m², l'isolation du bruit correspond à 50 décibels. Pour une toiture verte intensive de 400 kg/m², l'isolation acoustique peut atteindre voire dépasser les 60 décibels.

8. LONGÉVITÉ ACCRUE DES MATÉRIAUX

Une étude de Köhler et Clements (2012) indique que la durée de vie des toitures vertes et de tous leurs matériaux est au moins trois fois plus longue que celle des toits traditionnels. En effet, la végétation et la couche de substrat, en protégeant les matériaux contre les rayons ultraviolet et en réduisant les fluctuations de température à la surface de la toiture, favorisent le prolongement de la durée de vie des matériaux de la toiture verte de plus de 20 ans (Oberndorfer et *al.* 2007) ; certaines toitures vertes à Berlin ont duré 90 ans sans avoir besoin de réparations majeures (Köhler et Clements, 2012). Susca et *al.* (2011) affirment dans leur étude que sur une durée de 50 ans, les toitures vertes ne nécessitent pas de remplacement de leurs matériaux.

Conclusions de l'état de l'art :

Au vu de tout ce qui précède, la recherche à ce jour sur les toitures vertes a tendance à se concentrer sur ses bénéfices environnementaux, tandis que moins d'attention a été accordée aux impacts environnementaux des différents matériaux utilisés. Car évaluer la performance environnementale d'une toiture verte ne revient pas à évaluer ses bénéfices (services écosystémiques), mais aussi ses inconvénients (extra matériaux par rapport à une toiture classique). D'autant plus que les matériaux utilisés sont pour la plupart des matériaux synthétiques ou polymères, qui sont des produits manufacturés, à fort potentiel de pollution et consommation des ressources naturelles, aussi bien en phase de production qu'en fin de vie. Ainsi, le fait que les impacts environnementaux des matériaux des toitures vertes soient moins intégrés dans les études relatives aux toitures vertes, renforce la nécessité de les évaluer dans le cadre de ce mémoire.

Par ailleurs, cet état de l'art met bien en évidence que le bénéfice en termes d'économies d'énergie est l'un des bénéfices des toitures vertes qui a suscité le plus d'attention pour la recherche scientifique concernant les services écosystémiques des toitures vertes. En effet, ce bénéfice a jusque-là été évalué et quantifié de manière expérimentale. Cependant, qu'en est-il de la portée environnementale de ce bénéfice. Excepté le travail de Saiz et *al.* (2006), aucune autre étude n'a fait l'objet d'une évaluation environnementale de la performance énergétique des toitures vertes. Raison pour laquelle, le travail à réaliser dans le cadre de ce mémoire permettra de mettre cela en évidence. Cet état de l'art montre que les toitures vertes permettent une réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement, par rapport à une toiture classique, dans un bâtiment. Cette proportion de réduction varie d'une structure de toiture verte à une autre, d'un bâtiment à un autre, d'une zone géographique et climatique à une autre. L'hypothèse à définir pour la suite de ce travail cadre avec les résultats de cet état de l'art. En effet, la toiture verte à étudier dans ce mémoire permettrait une réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement, par rapport à la toiture classique considérée, dans un contexte bruxellois.

Toutefois, cet état de l'art a fait mention de plusieurs études et expériences relatives aux toitures vertes et leurs bénéfices. Il s'agissait pour tous ces cas : d'un bâtiment faisant office du cadre d'étude, d'une zone géographique précise, des conditions climatiques propres à cette zone et

d'autres paramètres propres à chaque cas, ainsi les résultats pourraient être différents dans d'autres circonstances. C'est pourquoi il serait indispensable d'entreprendre plus de recherches, plus d'études de cas variées, des analyses de sensibilité et d'incertitudes, afin de confirmer ou de réfuter pour chaque cas, les conclusions des précédentes études.

PARTIE 3 : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE CYCLE DE VIE

I. DÉFINITION DES SYSTÈMES

1. LE SYSTÈME DE RÉFÉRENCE

Le choix du bâtiment à toiture classique, système de référence, s'est fait sur base du rapport réalisé par Bruxelles Environnement (2013), relatif à l'établissement des niveaux optimaux en matière de performance énergétique des bâtiments en RBC. Dans ce rapport, les performances énergétiques des bâtiments résidentiels, des immeubles de bureaux et des écoles sont élaborées et analysées pour la mise en œuvre de l'article 5 de la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments. Il s'agit des bâtiments existants avec leurs caractéristiques en matière de performance énergétique, ainsi que des bâtiments 'neufs', qui ne sont pas encore construits, mais qui décrivent les performances énergétiques souhaitées pour ces bâtiments. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur une habitation résidentielle, neuve (i.e. pas encore construits) par soucis d'exhaustivité des données. Dans ce système de référence, le bâtiment est couvert par une toiture conventionnelle. Les caractéristiques du système de référence sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques du système de référence (source : Bruxelles Environnement, 2013)

Bâtiment	
Superficie totale	588 m ²
Nombre de niveau	7
Besoin net en énergie pour le chauffage	37348 kWh/an
Besoin net en énergie pour le refroidissement	1615.8 kWh/an
Toiture conventionnelle	
Surface	98 m ²
Inclinaison	2% (plate)
Coefficient de transmission thermique U	0,3 W/m ² .K

Le coefficient de transmission thermique U exprime la quantité de chaleur qui traverse 1 m² de toiture par degré de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Plus il est petit moins il y a d'échange de chaleur à travers la toiture. La structure de la toiture conventionnelle, système de référence, est représentée dans le tableau 8.

Tableau 8 : Dimensions de la structure de la toiture classique, système de référence (sources : Bruxelles Environnement, 2013 ; CSTC, 2006 ; CSTC, 2000 et EcoInvent, Zurich, Suisse)

Éléments de la toiture	Matériaux	Épaisseur (m)	Coefficient de conductivité thermique (λ en W/m.K)
Étanchéité	EPDM (éthylène-propylène-diène monomère)	0,0012	0,36
Isolation	PUR (polyuréthane)	0,077*	0,025
Pare-vapeur	PE-BD (polyéthylène basse densité)	0,003	0,34
Plancher et pente	Béton	0,2	1,7

* 77 mm d'épaisseurs d'isolant est une valeur essentiellement prise dans ce mémoire, pour des raisons de précision dans les calculs. Sur le marché, on retrouve plutôt des valeurs comme 65mm, 70 mm, etc.

La valeur de U du toit dépend de la valeur du coefficient de conductivité thermique λ de ses matériaux, qui exprime la quantité de chaleur qui traverse, en régime stationnaire, une couche de matériau de 1 m d'épaisseur et de 1 m² de section, par unité de temps et par degré de différence de température entre les deux faces du matériau. Les valeurs de λ sont obtenues via la base de données EcoInvent (EcoInvent, Zurich, Suisse) et du CSTC (2006). Le dimensionnement de la structure d'une toiture selon le coefficient de conductivité thermique U à atteindre repose principalement sur l'épaisseur de la couche d'isolation.

Le CSTC (2006 et 2000), dans ses notes d'information technique (n°215 et n°229 respectivement) a dressé un abaque faisant le lien entre la valeur de U et l'épaisseur de la couche d'isolation, dépendamment de λ (cf. figure 14). λ correspond à la courbe en traits interrompus courts la plus basse et vaut 0.025W/(m.K), qui représente aussi la valeur de λ de la couche d'isolation en PUR. Le coefficient de transmission thermique U est représenté par l'axe des ordonnées et vaut 0,3 W/(m².K). Par lecture, sur l'axe des abscisses, l'épaisseur de la couche d'isolation correspondante est approximativement égale à 0,077 m, soit 77 mm.

2. LE SYSTÈME DE RECHERCHE

Le système de recherche est une toiture verte extensive reposant sur le même bâtiment résidentiel. Le choix se porte sur la toiture verte de type extensif, plutôt qu'intensif ou semi-intensif pour plusieurs raisons. L'un des objectifs est de fournir une première impression des impacts environnementaux potentiels des toitures vertes ; pour des raisons de simplification, sans toutefois être superficiel et dans le but d'optimiser la compréhension de ce mémoire, une toiture verte extensive permettrait rapidement d'atteindre ce but. Par ailleurs, le choix s'est porté sur le type extensif car celui-ci, de par ses caractéristiques (cf. tableau 3), a plus d'aptitude à s'implémenter à l'échelle urbaine dans un contexte bruxellois. En effet, sa surcharge inférieure à celle d'une toiture

verte intensive permet de considérer une toiture verte sur ce bâtiment résidentiel, sans en modifier la structure.

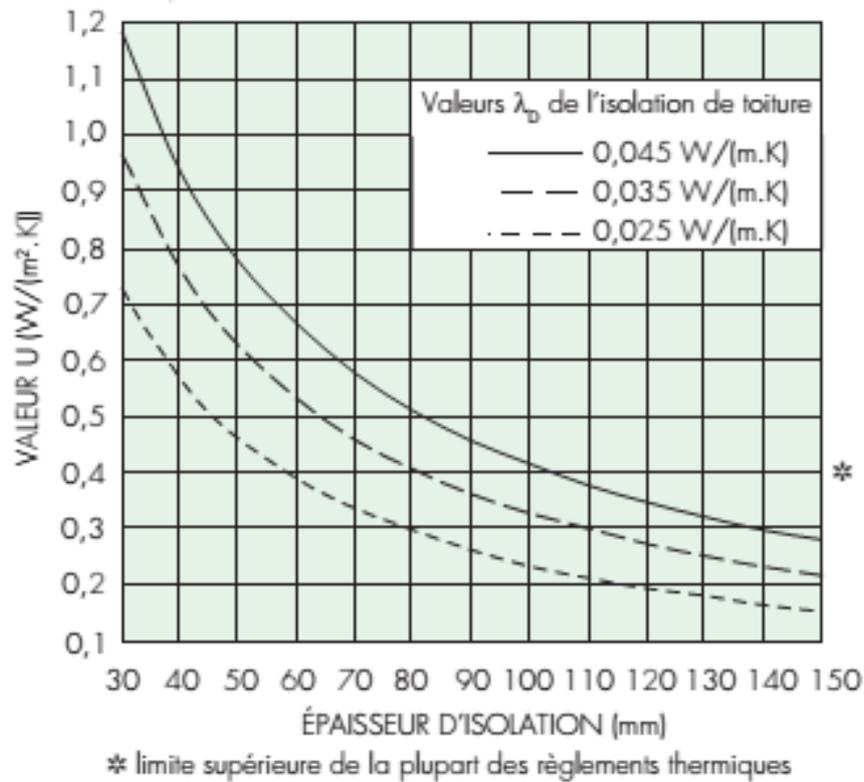


Figure 14 : Relation entre l'épaisseur de l'isolation et le coefficient de transmission thermique (sources : CSTC, 2006 ; CSTC, 2000)

Le dimensionnement de la couche d'isolant s'est fait en fonction du coefficient de transmission thermique U de cette toiture verte extensive. Il s'agit à partir de la valeur de $U = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et de sa formule ci-dessous, de retrouver l'épaisseur de l'isolant convenable, qui est 67 mm, après tout calcul fait.

La formule générale suivante permet de calculer U.

$$U = \frac{1}{R}$$

R est la résistance thermique.

$$R = \frac{1}{h_e} + \sum \frac{d_n}{\lambda_n} + \sum R_{non-isotopique} + \sum R_{cavité} + \frac{1}{h_i}$$

- h_e est le coefficient de transmission thermique entre la toiture et l'environnement extérieur ; $h_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- d_n et λ_n sont respectivement l'épaisseur et la valeur de λ de la couche n ;
- $R_{non-isotopique}$ représente la résistance thermique des matériaux non-isotropiques et $R_{cavité}$ représente la résistance thermique des cavités. Dans cette toiture verte, tous les matériaux sont isotropiques et il n'existe pas de cavités. Ces valeurs sont donc nulles dans ce cas ;
- h_i est le coefficient de transmission thermique entre la toiture et l'ambiance intérieure, $h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$; (CSTC, 2000 ; ISO 6946, 2007)

Tableau 9 : Dimensions de la structure de la toiture verte, système de recherche (sources : Chenani et al. 2015 et CSTC, 2006)

Éléments de la toiture	Matériaux	Épaisseur (m)	λ (W/m.K)
Végétation	Mousses, sedums, graminées, vivaces à port bas	/	/
Substrat	40 % de compost 60 % de pouzzolane	0,1	2*
Couche de drainage + filtre	PP (polypropylène)	0,0025	0,2
Couche de protection mécanique	PE-BD (polyéthylène basse densité)	0,005	0,34
Étanchéité	EPDM (éthylène-propylène-diène monomère)	0,0012	0,36 – 0,40
Isolation	PUR (polyuréthane)	0,067**	0,025
Pare-vapeur	PE-BD (polyéthylène basse densité)	0,003	0,34
Plancher et pente	Béton	0,2	1,7

*à 40% d'humidité.

** 67 mm d'épaisseurs d'isolant est une valeur essentiellement prise dans ce mémoire, pour des raisons de précision dans les calculs. Sur le marché, on retrouve plutôt des valeurs comme 65mm, 70 mm, etc.

Afin de favoriser la végétation, tout en limitant leur développement excessif (et l'entretien qui en résulterait), pour les toitures extensives, le choix se porte généralement, sur des substrats à composition mixte d'éléments minéraux et organiques. Ainsi, dans ce cas, le substrat est constitué d'un mix de : 60% de pouzzolane et 40% compost. (Chenani et al. 2015 ; CSTC, 2006).

Les caractéristiques du bâtiment quant à eux restent les mêmes, à l'exception de la consommation en énergie qui est réduite avec l'implantation d'une toiture verte extensive à coefficient de transmission thermique identique à celui de la toiture classique (cf. Tableau 10).

À titre de rappel, il s'agit de comparer les impacts environnementaux liés à la différence de la consommation énergétique dans les deux systèmes. Or obtenir la différence de consommation énergétique entre les deux systèmes nécessite une simulation énergétique de l'ensemble du bâtiment. Cependant, une simulation énergétique du bâtiment n'est pas l'objectif premier de ce mémoire, pour des raisons de temps imparti, de disponibilités de données. Ainsi, pour faire face à cette limite, une hypothèse sera émise quant à la proportion de réduction de la consommation énergétique avec une toiture verte. Cette hypothèse repose sur un cas de simulation énergétique d'un même bâtiment avec les deux types de toiture, classique et verte, le plus représentatif possible du cas bruxellois de ce mémoire. Il n'existe pas encore d'études scientifiques relatives à la performance énergétique d'un bâtiment à toiture classique et à toiture verte en RBC. Raison pour laquelle, l'étude de cas sur laquelle se fonde cette hypothèse est un cas de simulation énergétique d'un bâtiment résidentiel à La Rochelle réalisée par les chercheurs Jaffal et al. (2012).

Tableau 10 : Caractéristiques du système de recherche (source : Bruxelles Environnement, 2013)

Bâtiment	
Superficie totale	588 m ²
Nombre de niveau	7
Besoin net en énergie pour le chauffage	37348 kWh/an × X% de réduction = (1)
Besoin net en énergie pour le refroidissement	1615.8kWh/an × Y% de réduction = (2)
Toiture verte	
Surface	98 m ²
Inclinaison	2% (plate)
Coefficient de transmission thermique U	0,3 W/m ² .K

Le choix s'est porté sur cette étude de cas car, de toutes les études sur la performance énergétique d'un bâtiment à toiture classique et à toiture verte, il s'agit de celle qui s'en rapproche le plus possible, de par ses caractéristiques. Il s'agit d'un bâtiment résidentiel de 192 m² de superficie totale, 96 m² de surface de toiture, à un niveau, dans un climat tempéré océanique. Le type de toiture verte est le même, notamment le type extensif, avec des sedums et herbes comme végétation, ainsi que 40% de compost et de 60% de pouzzolane comme substrat. De plus, les auteurs ont établi la relation entre l'épaisseur de l'isolant et la consommation énergétique de ce bâtiment (cf. tableau 11)

Tableau 11 : Relation entre l'épaisseur de l'isolation et la consommation en énergie pour une toiture classique et dans une toiture verte, dans le cas du bâtiment de La Rochelle (source : Jaffal et al.2012)

Épaisseur isolation (m)	Énergie pour le chauffage (kWh.m⁻².an⁻¹)		Énergie pour le refroidissement (kWh.m⁻².an⁻¹)	
	TC*	TV*	TC	TV
0.05	45,6	43	2,5	0
0.1	36	36,1	2,5	0,1
0.15	32,4	32,8	2,5	0,4
0.2	30,5	31	2,5	0,7
0.25	29,3	29,8	2,5	0,9
0.3	28,5	29	2,5	1,1

*TC : Toiture classique ; TV : Toiture verte

Ce tableau 11 est pris de l'article de Jaffal et al. (2012). Avant de procéder à une interprétation, il est important de constater que d'une part, les valeurs de l'énergie pour le refroidissement dans une toiture classique sont similaires pour tous les niveaux d'épaisseur de l'isolant. D'autre part, la

réduction d'énergie pour le refroidissement dans une toiture verte (de 2,5 à 0,1 kWh.m⁻².an⁻¹ pour 0,1 m d'isolation par exemple), suscite grandement l'attention dans la mesure où, plus l'isolation thermique est importante, moins il y a d'échange de chaleur avec l'extérieur, et de ce fait la chaleur intérieure est moins importante que celle de l'extérieur (principe du 'cool box'). De plus, n'ayant pas trouvé d'argument convaincant dans cet article pour justifier ces valeurs, si ce n'est qu'elles sont le résultat d'une simulation énergétique, un contact a été établi avec l'auteur principal Jaffal pour plus d'informations à ce sujet. Dans l'attente d'une réponse de leur part, le travail à réaliser dans le cadre de ce mémoire suivra son cours¹.

Pour obtenir les consommations énergétiques correspondant aux épaisseurs d'isolant 67 mm et 77 mm de la toiture classique et verte, respectivement, une interpolation non-linéaire est nécessaire. Elle a été réalisée par une simulation dans Excel et le tableau 12 en présente les résultats.

Tableau 12 : Relation entre l'épaisseur de l'isolation et la consommation en énergie dans une toiture classique et dans une toiture verte, pour le cas de bâtiment de référence

Épaisseur isolation (m)	Énergie pour le chauffage (kWh.m ⁻² .an ⁻¹)		Énergie pour le refroidissement (kWh.m ⁻² .an ⁻¹)	
	TC	TV	TC	TV
0.067	40,35	39,53	2,5	0,027
0.077	39,53	38,8	2,5	0,064

Les consommations énergétiques de l'ensemble du bâtiment de La Rochelle (192 m²) sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Consommations énergétiques totales du cas du bâtiment de La Rochelle (source : Jaffal et al. 2012)

Énergie pour le chauffage (kWh.an ⁻¹)				
Épaisseur isolation (m)	TC	TV	Différence de consommation	% de réduction de consommation
0.067	7747,2	7589,8	218,3	2,8%
0.077	7589,8	7449,6	203,5	2,7%
Énergie pour le refroidissement (kWh.an ⁻¹)				
0.067	480	5,2	474,8	98,9%
0.077	480	12,4	467,6	97,4%

Ainsi, on observe les consommations énergétiques du bâtiment, d'une toiture classique à une toiture verte dans le cas d'étude. Il en ressort que l'implémentation d'une toiture verte a permis une réduction de la consommation énergétique :

¹ À ce jour, le 30-05-2016, aucune réponse n'a été apportée par l'auteur principal.

- pour le chauffage d'environ 2,7 à 2,8% ;
- et pour le refroidissement d'environ 97,4 à 98,9%, pour les épaisseurs d'isolation de 67 ou 77 mm.

Les résultats de cette étude serviront pour définir l'hypothèse de réduction de la consommation en énergie que permet une toiture verte. Pour ce faire, une comparaison est effectuée entre les caractéristiques du cas d'étude de La Rochelle et le bâtiment de référence (cf. tableau 14).

Tableau 14 : Comparaison des caractéristiques du cas du bâtiment de La Rochelle par rapport au bâtiment de référence

Paramètres	Cas du bâtiment de La Rochelle	Bâtiment de référence
Type de bâtiment	résidentiel	résidentiel
Nombre de niveau	1	7
Type de climat	Tempéré océanique	Tempéré
Surface toiture	96 m ²	98 m ²
Type de toiture classique	chaude avec plancher en béton	chaude avec plancher en béton
Type de toiture verte	extensif	extensif

Au regard de cette comparaison, on peut tenter d'établir une hypothèse quant à la consommation énergétique du cas du bâtiment du mémoire, s'il avait une toiture verte. Cependant il est important de porter un regard sur les différences entre les deux cas, à savoir : le ratio toiture/enveloppe et le type de climat. En effet, le ratio toiture/enveloppe n'est pas identique : 98 m² par plancher pour 7 niveaux (cas du mémoire) contre 96 m² par plancher pour 1 niveau. Pour pallier à cette différence, il sera considéré uniquement le dernier étage (sur 6) du bâtiment de ce mémoire. Ainsi, la consommation énergétique à considérer sera 6224,7 kWh/an (37348 divisé par 6) et 269,3 kWh/an (1615.8 divisé par 6) pour le chauffage et le refroidissement respectivement.

En ce qui concerne le climat, Bruxelles se trouve dans un climat tempéré, différent de celui de La Rochelle, qui a un climat tempéré océanique. Ce dernier présente des hivers moins sévères (10°C en moyenne contre 4°C en moyenne à Bruxelles) et des étés un peu plus chauds (28°C en moyenne contre 18°C à Bruxelles)² (IRM, 2015). Ce qui influencerait considérablement les performances énergétiques d'une toiture verte selon qu'on est à Bruxelles ou à La Rochelle. L'état de l'art a mis en évidence que les toitures vertes sont efficaces à de basses températures en termes de réduction d'énergie pour le chauffage, ainsi qu'à de très hautes températures, en termes de réduction d'énergie pour le refroidissement. Dès lors, on peut imaginer que ce bâtiment à toiture verte à Bruxelles, aura une meilleure performance en termes de réduction d'énergie pour le chauffage et une moindre performance en termes de réduction d'énergie pour le refroidissement par rapport à ce même

² 18°C et 4°C correspondent à des valeurs des températures moyennes en été et en hiver respectivement, des dix dernières années à Uccle (IRM, 2015).

bâtiment à La Rochelle. Sachant qu'à La Rochelle, la réduction d'énergie pour le chauffage et le refroidissement était respectivement de 2,8% et 98,9%, une hypothèse pour le cas de ce mémoire sera émise, en termes d'augmentation de ce pourcentage de réduction d'énergie pour le chauffage (car il fait plus froid en hiver en RBC) et en termes de réduction considérable de ce pourcentage de réduction d'énergie pour le refroidissement (car il fait beaucoup moins chaud en été en RBC).

Ne disposant pas de plus d'outils pour réellement estimer la réduction d'énergie dans le bâtiment à toiture verte, l'hypothèse pour la suite du mémoire reposera ainsi sur : 5% de réduction d'énergie pour le chauffage ($6224,7 \times 5\% = 5913,5$ kWh/an) et 20% de réduction d'énergie pour le refroidissement ($269,3 \times 20\% = 215,4$ kWh/an) pour le cas du bâtiment résidentiel à toiture verte de ce mémoire, en considérant uniquement le dernier étage.

L'hypothèse étant définie, le tableau 15 récapitulatif des caractéristiques des deux systèmes.

Tableau 15 : Récapitulatif des caractéristiques des deux systèmes

	Système de référence : bâtiment à toiture classique	Système second : bâtiment à toiture verte
Bâtiment		
Superficie totale de l'enveloppe considérée	98 m ²	
Nombre de niveau	1 (le dernier étage)	
Besoin net en énergie pour le chauffage	6224,7 kWh/an	5913,5 kWh/an
Besoin net en énergie pour le refroidissement	269,3 kWh/an	215,4 kWh/an
Toiture		
Surface	98 m ²	
Inclinaison	2% (plate)	
Coefficient de transmission thermique U	0,3 W/m ² .K	
Structure	Cf. tableau 8	Cf. tableau 9

Il va sans dire qu'un regard plus profond est nécessaire pour adapter le cas d'étude au cas de ce mémoire, d'autant plus qu'une simulation énergétique du bâtiment avec toiture classique et verte est primordiale. Néanmoins, ce minimum de similitudes entre les deux cas permet de définir cette hypothèse de manière approximative.

Toutefois, dans l'optique de garder un regard critique à l'égard de cette hypothèse, une analyse de sensibilité est indispensable et sera réalisée à l'issue de l'évaluation d'impacts des deux systèmes. L'analyse de sensibilité sera effectuée dans la discussion et permettra d'observer les impacts en faisant varier cette hypothèse.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. LE CADRE NORMATIF

Les étapes et choix méthodologiques de l'ACV dans cette étude s'appuient entièrement sur la norme ISO 14040 (2006), portant sur les principes et le cadre d'une ACV. Par la suite, il existe des normes européennes relatives à l'application de l'ACV aux bâtiments dans l'optique de la durabilité des constructions, notamment les normes 15978 (CEN, 2011) et 15804 (CEN, 2013). Elles portent respectivement sur l'évaluation des performances environnementales des bâtiments et méthodes de calcul d'impacts et sur la déclaration environnementales des produits de construction et les règles de base pour les catégories des produits de construction. Étant donné qu'il s'agit dans cette étude d'une ACV liée aux bâtiments, plus précisément l'ACV d'une composante d'un bâtiment, la toiture en l'occurrence, ces normes européennes serviront également d'appui méthodologique.

2. LES OBJECTIFS ET L'APPLICATION ENVISAGÉE DE L'ÉTUDE

Cette ACV vise trois objectifs.

- (1) Le premier est d'évaluer les performances environnementales des toitures vertes à Bruxelles. Ainsi, l'accent est porté sur l'analyse des choix et performances des matériaux utilisés pour une toiture verte.
- (2) Ensuite, le second objectif de cette analyse environnementale est d'évaluer les impacts liés à l'efficacité énergétique d'un bâtiment à toiture verte. Ainsi, l'accent sera porté sur les impacts liés à la consommation énergétique du bâtiment lorsqu'il est recouvert d'une toiture verte.
- (3) Enfin, le dernier objectif à atteindre par cette ACV est de comparer les impacts environnementaux d'une toiture verte par rapport à ceux d'une toiture conventionnelle en combinant les deux premiers objectifs. Ainsi, il en ressortira une comparaison entre (i) les impacts des matériaux utilisés dans les deux types de toitures, et (ii) les impacts liés à l'efficacité énergétique du même bâtiment lorsqu'il est recouvert des deux types de toiture.

L'application envisagée de cette étude est de mieux prendre connaissance des questions environnementales liées aux matériaux des toitures vertes, afin de permettre des améliorations et de réduire les impacts des toitures vertes, pour leur promotion et valorisation à Bruxelles ; mais aussi de servir de tremplin méthodologique pour la recherche relative à la performance environnementale des toitures vertes à l'égard des autres extra services et services écosystémiques. Il n'existe ni commanditaire, ni parties prenantes précises, encore moins de public visé, si ce n'est l'académie universitaire. Toutefois, elle pourrait dépasser ce cadre académique au besoin et selon les circonstances.

3. L'UNITÉ FONCTIONNELLE

L'unité fonctionnelle (UF) devra prendre en compte la fonction d'isolation, qui met en évidence les performances énergétiques des deux toitures, à coefficient de transmission thermique identique : $U = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Par ailleurs, elle devra intégrer la durée de vie de la toiture, qui dans sa relation avec le bâtiment qui la porte. Ainsi, l'UF est : 1 m^2 de couverture de toiture pendant 35 années avec un coefficient de transmission thermique de $0,3 \text{ W} \cdot (\text{m}^2/\text{K})$.

4. LE CYCLE DE VIE ET LES FRONTIÈRES DU SYSTÈME

Le cycle de vie des systèmes va du berceau à la tombe. Il contient quatre phases principales à savoir la phase de production des matériaux de construction, la phase de construction des toitures, la phase d'usage des toitures et la phase de fin de vie, comme l'illustre la figure 15. Il est à préciser que la définition du cycle de vie ici et des codes utilisés sont propres au secteur du bâtiment, étant donné que la toiture en une composante.

a. La phase de production (A1-A3)

La phase de production concerne la production des matériaux des toitures. Elle est constituée de :

- A1 : l'extraction des matières premières et la transformation produits semi-finis ;
- A2 : le transport des matières premières et/ou secondaires à l'usine de transformation
- A3 : La production des matériaux à partir des matières premières.

b. La phase de construction (A4-A5)

La phase de construction comporte :

- A4 : le transport des matériaux de l'usine au chantier
- A5 : l'installation des matériaux de construction pour la réalisation des toitures.

Le transport (A4) de tous les matériaux, de l'usine au chantier, en passant par les sites de stockage et de distribution est pris en compte. L'installation des matériaux in situ (A5), concerne l'usage des machines/engins de construction, l'utilisation de l'énergie et de l'eau pendant cette réalisation et la génération des déchets liés à la construction. Cette phase (A5) ne sera pas prise en compte dans ces systèmes, par soucis de disponibilité des données.

c. La phase d'usage (B1-B7)

La phase d'usage des toitures (B1-B5) est constituée :

- B1 : des fonctions rendues par usage des toitures. Une analyse fonctionnelle a été réalisée à cet effet afin de mieux visualiser les fonctions remplies par les deux types de toitures (cf. annexe 1). Ainsi, de toutes les fonctions rendues par les deux types, la fonction d'isolation est celle qui requiert le plus d'attention dans le cadre de ce mémoire. Les autres fonctions et les impacts qui y sont liés ne seront donc pas pris en compte dans cette phase (B1). En effet, pendant sa phase d'usage, les types de toitures remplissent la même fonction d'isolation, avec une valeur de U identique. Les effets de cette fonction se trouvent dans la performance énergétique du bâtiment qui les porte. Ces effets sont explicités dans la phase B6.

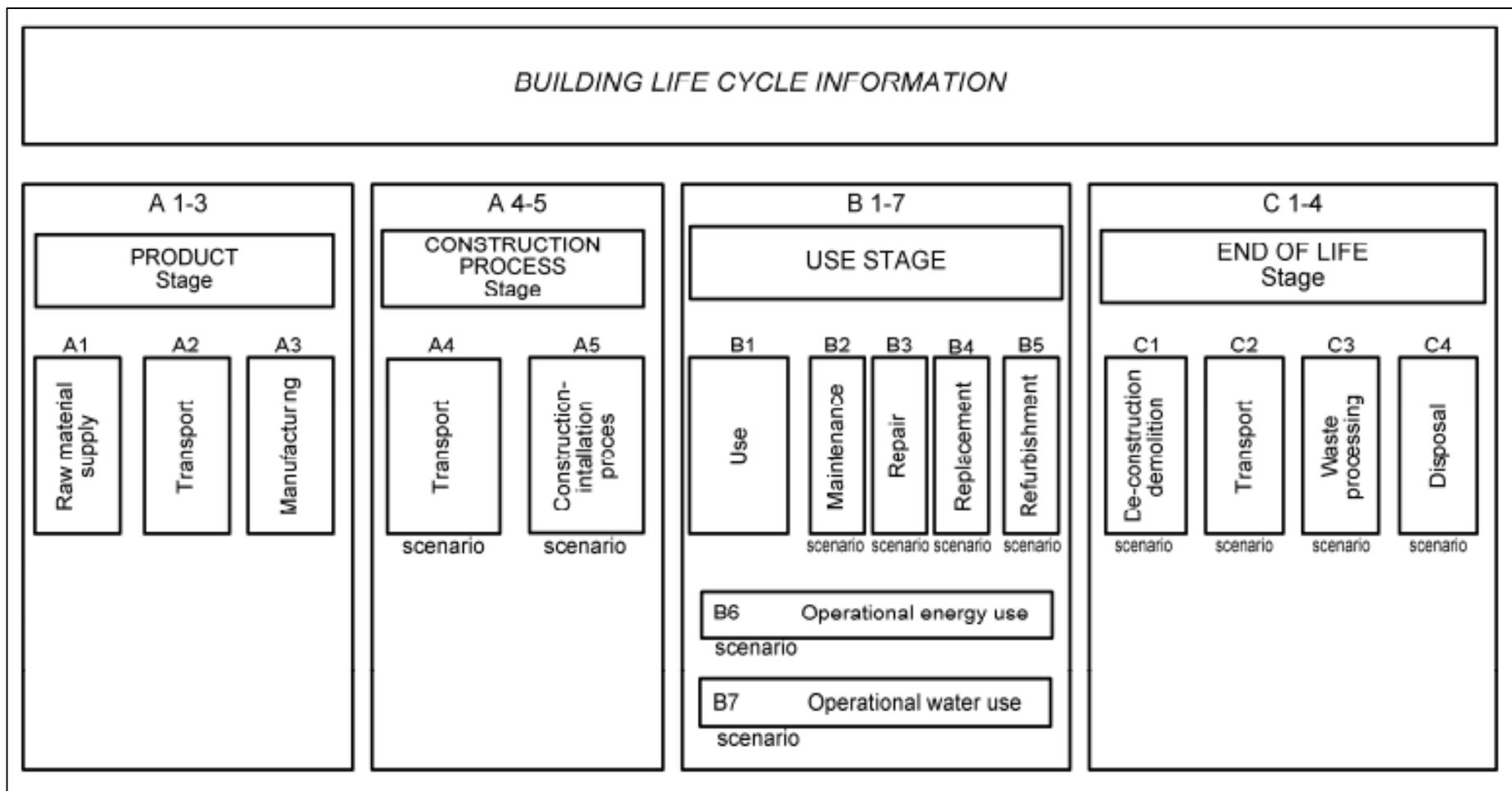


Figure 15 : Le cycle de vie d'un bâtiment et/ou de ses composants (sources : CEN, 2013 et CEN, 2011)

- B2 : de la maintenance, B3 : de la réparation et B4 : du remplacement.

Elles concernent les opérations techniques d'entretien sur l'ensemble de la toiture durant son cycle de vie, lui permettant de maintenir cet état de remplir ses fonctions, la fonction d'isolation en l'occurrence. Elles requièrent des processus d'amélioration d'un composant usé, endommagé ou dégradé de la toiture à un état acceptable, par le renouvellement, le remplacement ou la réparation. Ces phases (B2-B4) ne seront pas prises en compte dans le cycle de vie des toitures, car les matériaux des toitures n'ont pas besoin d'être remplacés ou réparés tout au long de leur durée de service (35 ans) considérée dans ce travail.

- B5 : de la rénovation. Il fait référence à des modifications majeures des composantes ou de l'ensemble de la toiture. Des scénarios de rénovation d'un bâtiment ou d'une partie du bâtiment doivent avoir lieu pour une durée de vie > 100 ans de ce bâtiment (Wittsock et *al.* 2012). Or dans le cadre de cette étude, la durée de vie de la toiture est prise à 35 ans. De ce fait, la phase B5 ne sera pas prise en compte dans le cycle de vie des toitures.

Quant à la phase d'usage des toitures liée au bâtiment (B6-B7), elle est constituée de :

- B6 : la consommation énergétique du bâtiment. La fonction d'isolation rendue par les deux toitures a des effets sur la consommation énergétique du bâtiment. Il s'agit de l'énergie pour le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires. Seule la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement sera considérée dans le cadre de cette étude, car elle est directement impactée par la fonction d'isolation.
- B7 : la consommation en eau. Ce module inclut tous les procédés liés à la consommation en eau dans le bâtiment (de l'eau à boire, de l'eau pour les sanitaires, l'eau chaude domestiques...). Puisque ni une toiture verte, ni une toiture classique, n'influence la consommation en eau dans un bâtiment, ce module (B7) ne sera pas pris en compte dans cette étude.

d. La fin de vie (C1-C4)

Les modules de cette phase sont illustrés dans la figure 16.

Cette phase comporte :

- C1 : la déconstruction / démolition des toitures. Elle se fait par démantèlement des matériaux des toitures sur le site de construction
- C2 : le transport des matériaux-déchets. Ce module inclut le transport des matériaux-déchets du site de construction jusqu'au site de fin de vie. Le transport pris en compte dans cette étude sera celui-ci : site de déconstruction → point de collecte ou de tri → site de traitement en fin de vie : enfouissement, incinération, recyclage/réutilisation.
- C3 : la préparation au traitement en fin de vie des matériaux-déchets. Il s'agit des procédés de prétraitement des matériaux au sortir des points de collecte ou de tri avant d'être transportés vers le site de mise en décharge, de recyclage/incinération ou d'incinération.
- C4 : la mise en décharge ou incinération. L'échelle temporelle considérée pour prendre en compte les émissions liées à l'enfouissement est de 100 ans conformément à la norme 15804.

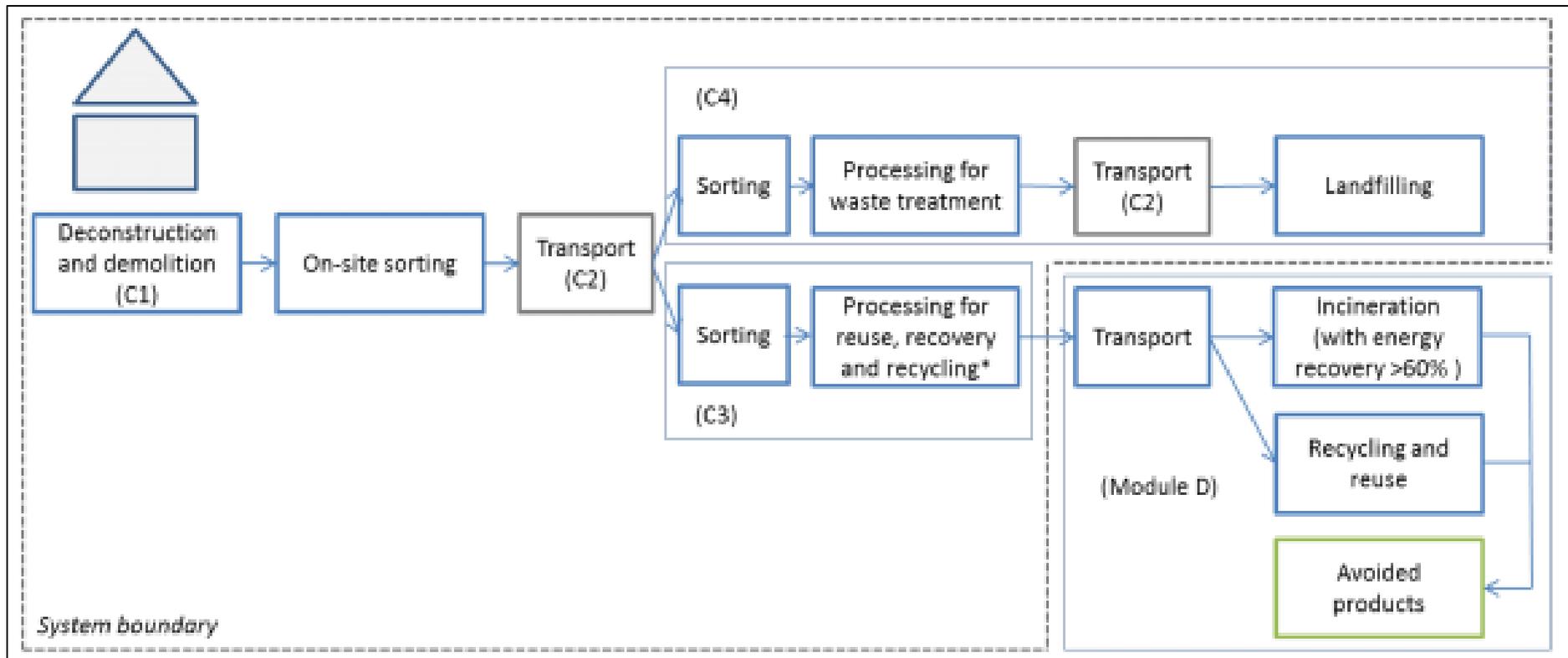


Figure 16 : Les modules de la phase de fin de vie (source : Zeller et al. 2015)

e. Le module D

Ce module correspond aux impacts générés par les matériaux des toitures qui se retrouvent en dehors du système, mais qui doivent être considérés. Ces impacts se traduisent en charges environnementales moins les bénéfices environnementaux, afin d'obtenir le bénéfice net. Les charges environnementales sont celles liées aux processus d'incinération et de recyclage des matériaux, y compris leur transport. Tandis que les bénéfices environnementaux font référence à la valorisation énergétique due à l'incinération des matériaux, ainsi que la substitution de certains matériaux par recyclage d'autres. La description méthodologique du calcul de cet impact se trouve dans au III.5. de la partie 3.

5. LA MÉTHODE D'ALLOCATION

Ce travail, s'appuie sur des normes pour les bâtiments et leurs composantes (EN 15804 et 15978), repose sur une modélisation de type attributionnel pour l'ACV au niveau produit (la toiture étant assimilée à un produit). Car conformément aux objectifs, il est question de mettre en évidence les impacts environnementaux potentiels, imputables aux toitures vertes. Pour les matériaux utilisés dans les toitures et l'énergie consommée par le bâtiment pendant la phase d'utilisation, la méthode d'allocation par défaut, qui fait référence à une allocation massique, d'EcoInvent 3.1 a été sélectionnée (EcoInvent, Zurich, Suisse).

Pour la modélisation des charges et bénéfices liés au processus de recyclage ou d'incinération en fin de vie (module D), la méthode d'allocation par substitution, proposée et expliquée dans les normes européennes 15798 et 15804 a été utilisée. En effet, les impacts liés aux processus de recyclage ou d'incinération en traitement de fin de vie des déchets sont pris en compte dans le module D, jusqu'à ce que le point de substitution, soit atteint. Ce dernier représente le point où le matériau ou l'énergie secondaire a une fonction équivalente au matériau ou énergie primaire. Les impacts qui sont liés à la production des matériaux ou de l'énergie primaire, qui peuvent être substitués, sont ôtés. Ainsi, un crédit est accordé pour des charges évitées (CEN, 2013 ; CEN, 2011). Ce crédit est calculé sur la base d'un scénario qui tient compte des pratiques et technologies moyennes actuelles dont les choix et les produits substitués sont explicités dans cette partie au III. 5.

6. LES INDICATEURS D'IMPACTS ET MÉTHODE D'ÉVALUATION

Les normes européennes 15978 et 15804 prescrivent sept principaux indicateurs d'impacts à évaluer dans la phase d'évaluation d'impacts environnementaux de l'ACV liée aux bâtiments. Le tableau 16 rassemble les catégories d'impacts ainsi que de leurs caractéristiques, à prendre en compte dans l'évaluation environnementale.

- L'acidification est causée par des émissions de polluants acidifiants, majoritairement le dioxyde de soufre (SO₂) et l'oxyde d'azote (NO_x). Ces émissions ont des impacts sur le sol, le sous-sol, l'eau, les organismes biologiques et les écosystèmes. Les impacts de l'acidification sont comptabilisés en kg de SO₂ équivalents, par kg d'émissions de polluants acidifiants (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).

Tableau 16 : Les indicateurs d'impacts, leurs paramètres et unités (sources : CEN, 2013 et CEN, 2011)

Catégorie d'impacts	Paramètre	Unité
Acidification terrestre et aquatique	Potentiel d'acidification terrestre et aquatique	Kg SO ₂ equiv
Réduction de la couche d'ozone	Potentiel d'épuisement de la couche d'ozone stratosphérique (<i>ODP</i>)	Kg CFC 11 equiv
Épuisement des ressources naturelles minérales	Potentiel d'épuisement des ressources naturelles (<i>ADP-elements</i>)	Kg Sb equiv
Épuisement des ressources naturelles fossiles	Potentiel d'épuisement des ressources naturelles (<i>ADP-fossil</i>)	MJ, valeur calorifique nette
Eutrophisation	Potentiel d'eutrophisation (<i>EP</i>)	Kg (PO ₄) ³⁻ equiv
Création d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone photochimique (<i>POCP</i>)	Kg Ethene equiv
Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement climatique (<i>GWP</i>)	Kg CO ₂ equiv

- Les indicateurs d'épuisement des ressources naturelles font référence aux impacts liés à l'extraction des ressources minérales (fer, d'uranium, d'or, etc.) et fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole, etc.). Ces impacts sont quantifiés en kg d'antimoine (Sb) équivalents par kg de minéraux extraits, ainsi qu'en valeur calorifique nette équivalente par méga joules de ressources fossiles extraites (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).
- La réduction de la couche d'ozone stratosphérique est le résultat des émissions des particules chimiques, particulièrement le chlorofluorocarbone (CFC 11). Les impacts liés à cet indicateur sont quantifiés en kg de CFC 11 équivalents, par kg d'émissions (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).
- L'eutrophisation est causée par des émissions excessives d'azote et de phosphore (provenant des eaux usées et des rejets agricoles) qui contribuent à la dégradation des écosystèmes aquatiques et terrestres. Les impacts liés à l'eutrophisation sont comptabilisés en kg de phosphate (PO₄)³⁻ équivalents, par kg d'émissions d'azote et de phosphore (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).
- La couche d'ozone photochimique est formée dans la troposphère sous l'influence des rayons solaires ultraviolets, par oxydation photochimique des composés organiques volatils (COV) et du monoxyde de carbone (CO) en présence d'oxydes d'azote (NO_x). Les impacts liés à la

formation de cet ozone photochimique, aussi connue sous le nom de smog, sont comptabilisés en kg d'éthylène (C₂H₄) équivalents, par kg d'émissions (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).

- L'indicateur de réchauffement climatique correspond aux impacts des émissions des gaz à effets de serre – GES (CO₂, méthane, etc.) sur le forçage radiatif³ de l'atmosphère sur une période de 100 ans. Chaque GES est comptabilisé en kg de CO₂ équivalents, par kg d'émissions des GES (Chenani et al. 2015 ; Guinée, 2002).

Afin de pouvoir évaluer les impacts environnementaux suivant ces sept indicateurs *mid-point*, la méthode de calcul d'impacts **CML-IA baseline V.3.01** sera appliquée. La méthode CML a été développée par la faculté des sciences de l'institut des sciences de l'environnement de l'université de Leiden., aux Pays-Bas. Elle est choisie dans ce travail, pour calculer les impacts environnementaux des toitures car en plus d'être la méthode la plus largement utilisée, elle est considérée comme la plus complète (EC – JCR, 2010 ; Guinée, 2002). Ensuite, elle utilise en priorité des données européennes pour obtenir ses facteurs d'impact. Enfin, la méthodologie CML de calcul des impacts est conforme aux exigences des normes européennes 15804 et 15978. Elle regroupe les résultats de l'inventaire de cycle en catégories d'impacts qui correspondent aux sept catégories prescrites par les normes européennes 15804 (CEN, 2013) et 15978 (CEN, 2011). Aussi, les résultats se présentent sous la forme d'un tableur qui met en évidence les facteurs de caractérisation pour chacun des indicateurs, comme exigée par ces normes européennes.

III. COLLECTE DE DONNÉES D'INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE

Le processus de collecte de ces données nécessaires pour l'ACV, ainsi que leurs sources ont été dressés par phase du cycle de vie. La modélisation de toutes les phases du cycle de vie repose entièrement sur des données d'ordre générique, par opposition aux données spécifiques qui relèvent des procédés construits à partir d'un cas d'étude concret (à partir des informations fournies par l'entreprise de construction, les fournisseurs, etc.). Dans ce mémoire, les procédés liés aux matériaux (extraction des matières premières, transformation, fin de vie, etc.) et à l'énergie utilisés (électricité, gaz) sont issus de la base de données EcoInvent 3.1 (EcoInvent, Zurich, Suisse).

1. LA PHASE DE PRODUCTION DES MATÉRIAUX (A1-A3)

Les procédés associés à chaque matériau sont tous issus de la base de données EcoInvent 3.1 (EcoInvent, Zurich, Suisse) et présentés dans le tableau 18. Il s'agit des procédés de type 'marché', qui sont des représentations des matériaux sur le marché européen et belge. Dans ces procédés, les données sur le transport de ces matériaux y sont intégrées. Dans le but d'éviter un double comptage, dans chacun des procédés, les sous procédés de transport ont été supprimés, car les données sur le transport des matériaux dans un contexte belge sont précisées par l'OVAM.

2. LA PHASE DE CONSTRUCTION (A4-A5)

Conformément à la définition du cycle de vie des deux systèmes, la phase de construction ne contient que le transport des matériaux de construction du site de production au site de construction. Le transport des équipements et des personnes, ainsi que l'activité de réalisation de la toiture ne sont pas pris en compte dans cette phase. Toutefois il convient de préciser que lors de la

³ Le forçage radiatif est la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné. S'il est positif, il tend à réchauffer le système, i.e. plus d'énergie reçue qu'émise (GIEC, 2013).

construction, une partie des matériaux est toujours perdue. Cependant, en l'absence de données détaillées par matériau et par application, en s'appuyant sur les travaux de l'OVAM (2013), une hypothèse sera émise sur une proportion de 5% de perte par groupe de matériau.

❖ **Transport des matériaux usine-chantier (A4)**

Les données sur le transport des matériaux reposent sur le scénario général pour le transport des matériaux de construction de l'usine au chantier, en Belgique, défini par l'OVAM (2013). De ce fait, le chantier se trouvant à Bruxelles, la distance moyenne usine-chantier est de 50 km, avec un moyen de transport par camion-lourd (> 16 t). Le tableau 17 montre les valeurs en tonne-kilomètre (tkm) liés au transport des matériaux.

La donnée d'EcoInvent choisie est : 'Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4'.

3. LA PHASE D'USAGE

Comme spécifié dans la définition du cycle de vie, les modules B2-B4 ne sont pas considérés dans cette étude.

❖ **La consommation énergétique (B1 et B6)**

Seules les consommations énergétiques pour le chauffage et le refroidissement, sont considérées. Cette consommation fait référence au besoin net en énergie pour le chauffage et le refroidissement.

Le besoin net en énergie pour le chauffage est l'énergie nécessaire pour compenser les pertes par transmission, par in/exfiltration et par ventilation du volume protégé, après avoir soustrait les apports internes et solaire. Afin de quantifier la consommation finale d'énergie pour le chauffage, le type d'énergie et le système de production de chauffage doivent être spécifiés. En effet, le système de production d'énergie pour le chauffage est une chaudière avec un rendement de production de 90%. La donnée EcoInvent choisie à cet effet est : 'Heat, central or small-scale, natural gas {RoW} | heat production, natural gas, at boiler condensing modulating < 100 kW'.

Quant au besoin net en énergie pour le refroidissement, il fait référence à l'énergie liée aux pertes par transmission, ventilation, in/exfiltration, ainsi qu'aux gains internes et solaire, qui doit être évacuée par le système de refroidissement. Ce dernier est un climatiseur à condenseur à eau. La donnée EcoInvent choisie est : 'Electricity, low voltage {BE}| market for'.

Tableau 17 : Transport des matériaux de l'usine de production au chantier de construction en tonne.kilomètre

	TC1*	TC2*	Toiture verte
Transport des matériaux de l'usine au chantier (tkm/m²)	8,7	8,8	15,9

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;
TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

Le tableau 19 présente les caractéristiques de l'énergie utilisée pour le chauffage et le refroidissement. Les valeurs énergétiques, le rendement de production $\eta_{\text{production}}$ et le support d'énergie ont été pris dans le rapport de Bruxelles Environnement (2013) relatif à l'établissement des niveaux optimaux en matière de performance énergétique des bâtiments à Bruxelles.

Tableau 18 : Matériaux par éléments de toiture : épaisseurs, densités, masses et procédés (sources : Chenani et al. 2015 ; Bianchini et Hewage, 2012 ; CSTC, 2006 et EcoInvent, Zurich, Suisse)

Éléments de la toiture	Matériaux*	Épaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg/m ²)	Nom du procédé
Substrat	40 % de compost	0,1	600	24	‘Compost, at plant / CH U’
	60 % de pouzzolane		1920	115,2	‘Pumice {GLO} market for Alloc Def, U’
Couche de drainage + filtre	PP (polypropylène)	0,0025	946	2,365	‘Polypropylene, granulate {GLO} market for Alloc Def, U’
Couche de protection mécanique	PE-BD (polyéthylène basse densité)	0,005	925	4,625	‘Polyethylene, low density, granulate {GLO} market for Alloc Def, U’
Étanchéité	EPDM (éthylène-propylène-diène monomère)	0,0012	1170	1,404	‘Synthetic rubber {GLO} market for Alloc Def, U’
Isolation TC	PUR (polyuréthane)	0,077	40	3,08	‘Polyurethane, flexible foam {GLO} market for Alloc Def, U’
Isolation TV	PUR (polyuréthane)	0,067	40	2,68	‘Polyurethane, flexible foam {GLO} market for Alloc Def, U’
Pare-vapeur	PE-BD (polyéthylène basse densité)	0,003	925	2,775	‘Polyethylene, low density, granulate {GLO} market for Alloc Def, U’
Plancher et pente	Béton	0,2	2400	168**	‘Concrete block {GLO} market for Alloc Def, U’

*La capture du CO₂ par les plantes n’étant pas considérée dans cette étude, la végétation n’a pas été modélisée. Le carbone biogénique sera retourné à l’atmosphère dans un horizon temporel relativement court.

**la valeur de la quantité de béton est calculée en fonction de sa durée de vie. Étant donné que la durée de vie considérée dans l’unité fonctionnelle est 35 ans et que la durée de vie du béton considérée dans cette étude est de 100 ans (Charlot-Valdieu et Outrequin, 2013), on pourrait dire que sur ce plancher en béton il pourrait être installé environ 3 toitures. De ce fait, la quantité de béton à considérer dans les 35 premières années est de : $0,2 \times 2400 \times 0,35 = 168 \text{ kg/m}^2$

Tableau 19 : Caractéristiques énergétiques des toitures : besoin net en énergie et le rendement de production

	TC1*	TC2*	TV*
Besoin net en énergie pour le chauffage [kWh/(an.m²)]	60,4	63,52	60,4
$\eta_{\text{système}}$	90%	90%	90%
Consommation énergétique finale pour le refroidissement [kWh/(an.m²)]	2,2	2,8	2,2

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;

TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

4. LA PHASE DE FIN DE VIE

Dans le but de déterminer les impacts et bénéfices environnementaux à la phase de fin de vie, la collecte des données consiste en la classification des matériaux-déchets par catégorie, ainsi que la définition des scénarios de fin de chacune de ces catégories, en tenant compte du transport et de l'énergie utilisée à cet effet. L'OVAM (2013), dans son étude sur le profil environnemental des matériaux de construction, a dressé des scénarios relatifs à la fin de vie des matériaux de construction dans un contexte belge, en s'appuyant sur la norme européenne 15978. L'élaboration des scénarios dans ce mémoire repose sur des hypothèses entièrement issues de cette étude de l'OVAM (cf. tableau 21).

Il est supposé qu'à l'exception du substrat, tous les déchets de construction et de démolition, qu'ils soient triés sur le chantier ou non, sont d'abord transportés depuis le chantier vers un point de collecte ou de tri. Les différentes fractions sont alors évacuées vers une décharge, un incinérateur ou une entreprise de recyclage/réutilisation suivant les scénarios illustrés au Tableau 21 (OVAM, 2013). À chaque catégorie de matériau est affecté un scénario de fin de vie.

Pour les fractions des matériaux qui sont à recycler, notamment les plastiques (PP et PE), le béton, la limite entre le cycle de vie actuel et le cycle de vie suivant (i.e. le matériau qui utilise les matières premières secondaires) correspond au point à partir duquel les matériaux ne sont plus considérés comme des déchets, mais comme une matière première secondaire. Pour tous les matériaux qui sont recyclés ou réutilisés, il est supposé par défaut que le statut "end-of-waste" est atteint à la sortie du point de tri ou du point de collecte sur base des informations de l'OVAM (2013). Le point critique précis où les déchets deviennent des matières premières secondaires est difficile à définir particulièrement pour chaque produit. La conséquence de cette hypothèse est que l'impact jusqu'à la sortie du centre de tri (ou jusqu'à la sortie du centre de concassage pour le béton) est attribué au produit générant les déchets, mais que tous les impacts qui s'en suivent (soit les impacts du transport depuis l'entreprise de tri vers l'infrastructure de recyclage et l'impact du processus de recyclage proprement dit) tombent hors des frontières du système et sont dès lors attribués au matériau pour lequel les matières premières secondaires sont utilisées (cf. II.4.e. Module D).

❖ Le démantèlement / la démolition (C1) :

Étant donné que les opérations de démantèlement sont exclusivement manuelles, aucun impact environnemental n'est attribué à ces opérations. Les opérations de démolitions sont cependant accompagnées de consommation énergétique et d'émission de particules fines. Indépendamment de la composition des matériaux, les hypothèses suivantes sont retenues : (OVAM, 2013)

- Consommation de diesel pour les opérations mécaniques : 0,0437 MJ/kg ;

Émission de particules fines :

- $PM < 2,5 \mu m$: $1,66 \times 10^{-5}$ kg/kg de matériaux
- $PM > 2,5 \mu m$ et $< 10 \mu m$: $6,34 \times 10^{-5}$ kg/kg de matériaux
- $PM > 10 \mu m$: $8,35 \times 10^{-5}$ kg/kg de matériaux

Ainsi, la consommation totale de diesel pour les opérations mécaniques de démolition et les émissions de particules fines ont une valeur totale de, illustrés dans le tableau 20.

Tableau 20 : Consommation de diesel et quantité de micro particules émises lors de la démolition (source : OVAM, 2013)

	TC1*	TC2*	TV*
Consommation totale de diesel (kWh/m²)	7,9	7,7	14
PM < 2,5 μm (kg/ m²)	$3,2 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-3}$
PM < 2,5 μm et < 10 μm (kg/ m²)	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}
PM > 10 μm (kg/ m²)	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;

TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

Le procédé utilisé pour la consommation de diesel est : 'Diesel, burned in building machine/GLO U'.

❖ Le transport (C2)

Les hypothèses suivantes concernant le transport en phase de fin de vie des matériaux sont les suivantes : (OVAM, 2013) :

- Du chantier de démolition au centre de tri : 30 km. Tous les matériaux sont transportés vers un centre de tri
- Du centre de tri à la décharge : 50 km
- Du centre de tri à l'incinérateur : 100 km

Le moyen de transport est un camion lourd (16-32 t). Le procédé choisi est : 'Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4'.

❖ Préparation au recyclage/réutilisation des déchets (C3)

95% de béton, 50% de plastiques (PP et PE) et le substrat sont les déchets recyclés/réutilisés. La couche de terre du substrat ne fera l'objet d'aucun traitement, puisqu'elle peut être réutilisée dans un jardin ou ailleurs, par conséquent, aucun impact environnemental n'est attribué à la préparation à son recyclage. Quant aux plastiques (PE et PP), on émettra l'hypothèse qu'aucun prétraitement ne leur est affecté, avant leur recyclage. Concernant le béton, le prétraitement relève des opérations de concassage, qui précèdent sa réutilisation. Le procédé de concassage du béton est : xxx. Cette opération de concassage consomme 0,0015 kWh d'électricité par kg de béton (OVAM, 2013), dont le procédé dans EcoInvent est : 'Electricity, low voltage, at grid/BE U' correspondant au mix énergétique belge.

❖ La mise en décharge (C4)

Ce module comporte les opérations de préparation et la mise en décharge des plastiques (EPDM, PP et PE) et du béton. La préparation pour la mise en décharge consiste en un processus de tri dont la consommation d'électricité est 0,0022 kWh/kg de matériaux (OVAM, 2013), qui correspond au procédé 'Electricity, low voltage, at grid/BE U'. Les matériaux, en proportions spécifiques précisées dans le tableau 21, sont enfouis dans une décharge de matériaux inertes. Le processus de mise en décharge est modélisé sur base des données EcoInvent qui prend en compte les paramètres spécifiques de mise en décharge pour chaque catégorie de déchet. Le procédé de mise en décharge pour le béton dans la base de données EcoInvent est : 'disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH U'. En revanche, par manque de données sur la mise en décharge des plastiques, l'hypothèse émise est que les plastiques sont mis en décharge en tant que fraction de déchets inertes. De ce fait, le procédé de mise en décharge des plastiques utilisé pour la modélisation du module C4 est : 'disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U'.

5. LE MODULE D : BÉNÉFICES ET CHARGES AU-DELÀ DES FRONTIÈRES DU SYSTÈME

Ce module prend en compte d'une part, les charges environnementales liées au transport des matériaux du centre de tri au centre de recyclage ou d'incinération et les impacts des processus de recyclage et d'incinération. D'autre part, il prend en compte les bénéfices environnementaux liés à la substitution d'autres matériaux due au recyclage/réutilisation et la récupération d'énergie due à l'incinération. Ainsi, la balance entre les charges environnementales et les bénéfices potentiels permettra d'obtenir le bénéfice environnemental net, à prendre en compte.

- Les distances de transport du centre de tri/concassage vers le centre de recyclage et d'incinération sont celles données par l'OVAM (2015), notamment : 30 km et 100 km, respectivement. Le procédé utilisé pour la modélisation du transport est : 'Transport freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}, transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4', avec les quantités présentées dans le tableau 22.

Tableau 21 : Hypothèses sur les scénarios de fin de vie de chaque catégorie de matériaux (source : OVAM, 2013)

Catégorie de déchets	Matériaux concernés (éléments de toiture)	Tri		Scénarios de fin de vie		
		In situ (%)	hors chantier (%)	Enfouissement (%)	Incinération (%)	Recyclage / réutilisation (%)
Déchet inerte	Béton (plancher)	75	25	5	0	95
Isolant ignifuge	Polyuréthane (couche d'isolant)	0	100	0	100	
Élastomère	EPDM (étanchéité)	0	100	100	0	0
Polyoléfine	Polyéthylène (couche de protection mécanique et pare-vapeur)		100	5	45	50
	Polypropylène (couche de drainage + filtre)					
Déchets organiques	Compost + pouzzolane (substrat)		100	0	0	100

Tableau 22 : Transport des déchets du point de tri vers le centre de recyclage et vers le centre d'incinération

Distance (tkm/m ²)	TC1*	TC2*	TV*
Pour recyclage	4,8	3,9	9,1
Pour incinération	0,43	0,3	0,71

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;

TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

- Le procédé de recyclage pour les proportions de matériaux à recycler à savoir 95% de béton et 50% de plastique (PP et PE) est modélisé comme suit :

L'ensemble du béton concassé est supposé substituer les graviers pour les travaux publics (le béton concassé servira de granulats pour le béton par exemple). Ainsi, le procédé de recyclage du béton ne contient que le transport et le concassage pour la substitution du gravier dans les travaux publics. Le produit substitué représente du gravier concassé du mix du marché global, dont le procédé est utilisé pour la modélisation est : 'Gravel, crushed {GLO} market for |' (transport exclus).

En ce qui concerne le recyclage des plastiques, EcoInvent ne dispose pas encore de données en la matière. De ce fait, le procédé de recyclage des plastiques a été modélisé de manière simplifiée : il est supposé que 0,6 kWh d'électricité est nécessaire pour recycler 1 kg de déchet de plastique (EcoInvent, Zurich, Suisse). Le procédé pour la consommation d'électricité est le même que dans les autres modules : 'Electricity, low voltage {BE}, market for'. Le PE et le PP recyclés remplacent respectivement les procédés suivants : 'Polyethylene, low density, granulate {GLO} | market for |' et 'Polypropylene, granulate {GLO} | market for |', (transport exclus).

Quant au procédé d'incinération, il consiste principalement en la valorisation énergétique des matériaux. Le procédé énergétique pour les proportions de matériaux (uniquement des plastiques : PUR et 45 % de PE et de PP) à incinérer a été modélisé à cet effet. Les plastiques sont incinérés dans une centrale d'incinération des déchets solides municipaux. Les procédés des matériaux incinérés pris dans EcoInvent (EcoInvent, Zurich, Suisse) et utilisés dans la modélisation sont les suivants : 'Waste polyurethane {CH} treatment of, municipal incineration', 'Waste polyethylene {CH}, treatment of, municipal incineration' et 'Waste polypropylene {CH} treatment, of, municipal incineration' respectivement pour l'incinération du PUR, PE et PP. Le rendement électrique des centrales d'incinération est de 25% (source), ainsi, il est supposé que l'électricité générée substitue l'électricité utilisée en Belgique ('Electricity, low voltage {BE}, market for'). L'énergie générée lors de ce processus d'incinération peut être obtenu par le produit du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des plastiques à incinérer, leurs quantités respectives et du rendement des installations d'incinération qui vaut 25%. Le tableau 23 présente les résultats de ce calcul pour chaque plastique.

Tableau 23 : Quantité d'électricité récupérée de l'incinération des plastiques (source : EcoInvent, Zurich, Suisse)

Plastiques	PCI (MJ/kg)	Masse (kg/m ²)			Énergie générée (kWh/m ²)		
		TC1*	TC2*	TV*	TC1	TC2	TV
PUR	30,67	3,08	2,68	2,68	6,5	5,7	5,7
PE	42,47	1,25	1,25	3,33	3,65	3,65	9,8
PP	32,78	0		1,1	0		2,4
Total					10,15	9,35	17,9

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;

TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

L'objectif de cette étape est de transformer les flux de matériaux et d'énergie en indicateurs d'impacts environnementaux potentiels. À l'aide du logiciel SimaPro (Pré Consultants, Amersfoort, Pays-Bas), ayant déjà servi pour la modélisation du système, l'évaluation environnementale ici, à travers la méthode CML-IA, consiste en la transformation des flux de matériaux et d'énergie en effets qui décrivent les impacts des émissions polluantes : en termes du devenir d'une substance, et des impacts de l'extraction des ressources : en termes de raréfaction des ressources par rapport aux réserves (ISO 14040, 2006 ; Guinée, 2002). Ces résultats sont présentés conformément aux prescriptions des normes européennes 15804 et 15978, suivant deux étapes à savoir : la caractérisation d'impacts, puis la normalisation. Pour la suite de ce travail, il est nécessaire de garder à l'esprit que dans l'approche (a), il s'agit de comparer la toiture classique et la toiture verte à performance énergétique identique (→ les épaisseurs d'isolant sont différentes dans les deux toitures), qui sont respectivement représentées par TC1 et TV dans les tableaux/figures. Tandis que dans l'approche (b), la comparaison porte sur la toiture classique et la toiture verte à performance énergétique différente (→ les épaisseurs d'isolant sont identiques dans les deux toitures), dont la première est représentée par TC2 dans les tableaux/figures.

1. LA CARACTÉRISATION DES IMPACTS

La caractérisation consiste à traduire les flux de matériaux et d'énergie, recensés lors de l'inventaire du cycle de vie, en impacts environnementaux, en fonction de leurs contributions respectives aux sept catégories d'impacts considérés. Les flux propres à chaque catégorie sont multipliés par un facteur de caractérisation qui exprime la contribution relative de chaque flux. Par exemple, le facteur de caractérisation du CO₂ dans la catégorie d'impact du réchauffement climatique vaut 1, tandis que celui du méthane vaut 25, pour une période de 100 ans. Ce qui veut dire qu'une émission de 1kg de méthane représente le même impact pour 25 kg de CO₂ (ISO 14040, 2006 ; Guinée, 2002). Les résultats de la caractérisation à travers les sept indicateurs d'impacts sont séparés par modules comme prescrit par la norme européenne 15978. Autrement dit, les résultats sont présentés par impacts de chaque phase du cycle de vie des toitures, ainsi que par impacts de chaque matériau des toitures.

En effet, les résultats de caractérisation des impacts sont présentés sous forme de tableau dans l'annexe 2 suivant les exigences des normes européennes 15804 et 15978, à savoir : par phase du

cycle de vie et par indicateur, regroupant les approches (a) et (b). Ils présentent en valeurs exactes, les impacts environnementaux potentiels de la toiture verte et de la toiture conventionnelle tout au long de leur cycle de vie et par indicateur. D'une part, ce tableau permet d'avoir, par indicateur, un aperçu de quelle phase du cycle de vie génère le plus d'impacts. Le total des impacts représente la somme des impacts de chaque phase de cycle de vie. Par indicateur, plus la valeur est grande, plus l'impact est le plus significatif pour la phase spécifique. D'autre part, il permet rapidement de savoir pour quel indicateur et à quelle phase de cycle un bénéfice net positif pourrait être généré. En effet, une valeur négative signifie que du crédit (bénéfice net positif ou impact évité) pourrait être accordé à cet indicateur. À l'exception du module D, toutes les autres phases du cycle de vie présentent des valeurs d'impacts positives, car aucun bénéfice potentiel n'est créé tout au long de ces phases. Cependant, il n'est pas aisé d'aller plus loin dans les résultats de cette d'évaluation d'impact à travers les chiffres du tableau de l'annexe 2. Dès lors, il s'avère important d'aller plus loin en identifiant les principales contributions aux impacts, par matériaux et par phase du cycle de vie.

2. L'ANALYSE DE CONTRIBUTION AUX IMPACTS

Avant de procéder à cette analyse, il est nécessaire de montrer un aperçu global des impacts des toitures. En effet, la figure 17 fait état des impacts environnementaux potentiels de chacune des toitures par indicateur. D'entrée de jeu, les résultats d'impacts des deux toitures suivant les deux approches varient d'un indicateur à un autre. À performance énergétique identique (approche (a) : comparaison entre TC1 et TV), les résultats sont légèrement nuancés. La toiture verte affiche des scores d'impacts légèrement supérieurs à ceux de la toiture classique pour tous les indicateurs, excepté celui d'eutrophisation à travers lequel les impacts de la toiture verte sont légèrement inférieurs. Autrement dit, la toiture verte émet en moyenne 0,8% d'impacts potentiels de plus que la toiture classique, à performance énergétique identique et tout au long de leur cycle de vie. Tandis qu'à performance énergétique différente (approche (b) : comparaison entre TV et TC2), la toiture verte affiche des résultats d'impacts inférieurs à ceux de la toiture classique pour tous les indicateurs, ce qui fait qu'en moyenne, les impacts potentiels émis par la toiture verte sont inférieurs de 5,7%, aux impacts émis par la toiture classique, à performance énergétique différente et tout au long de leur cycle de vie.

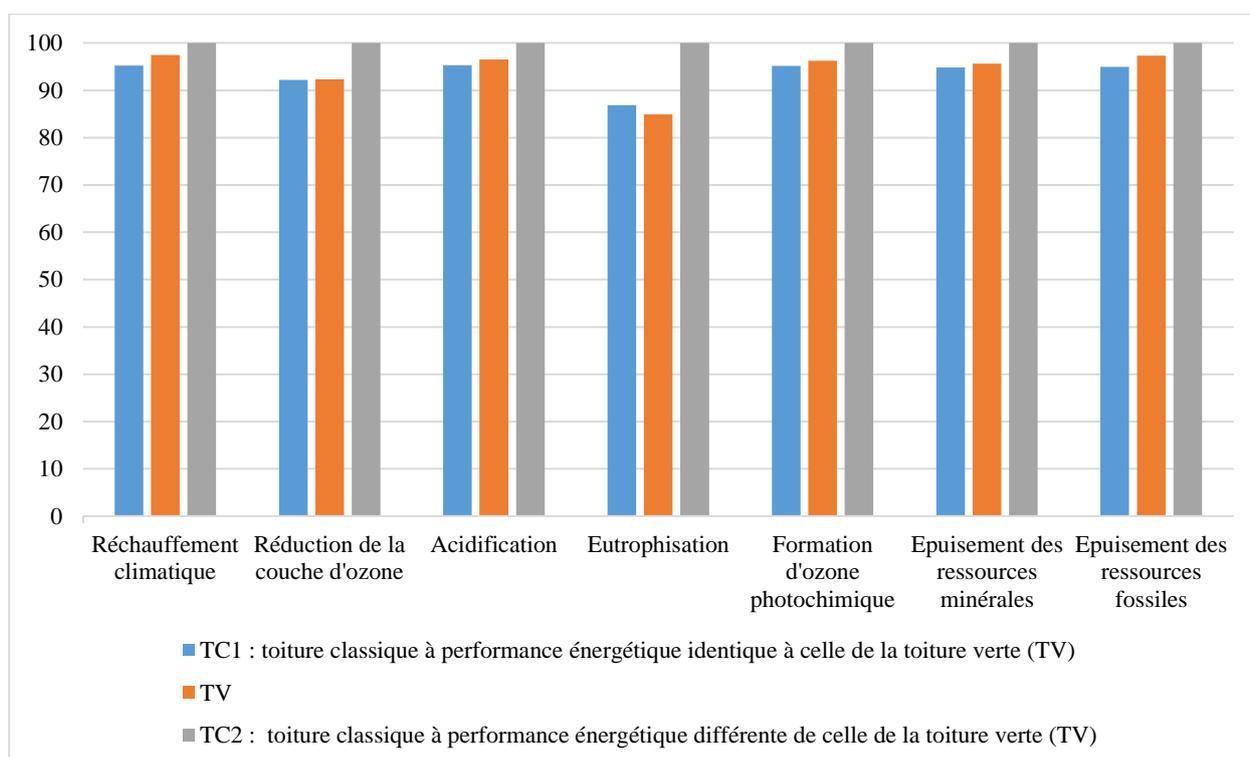


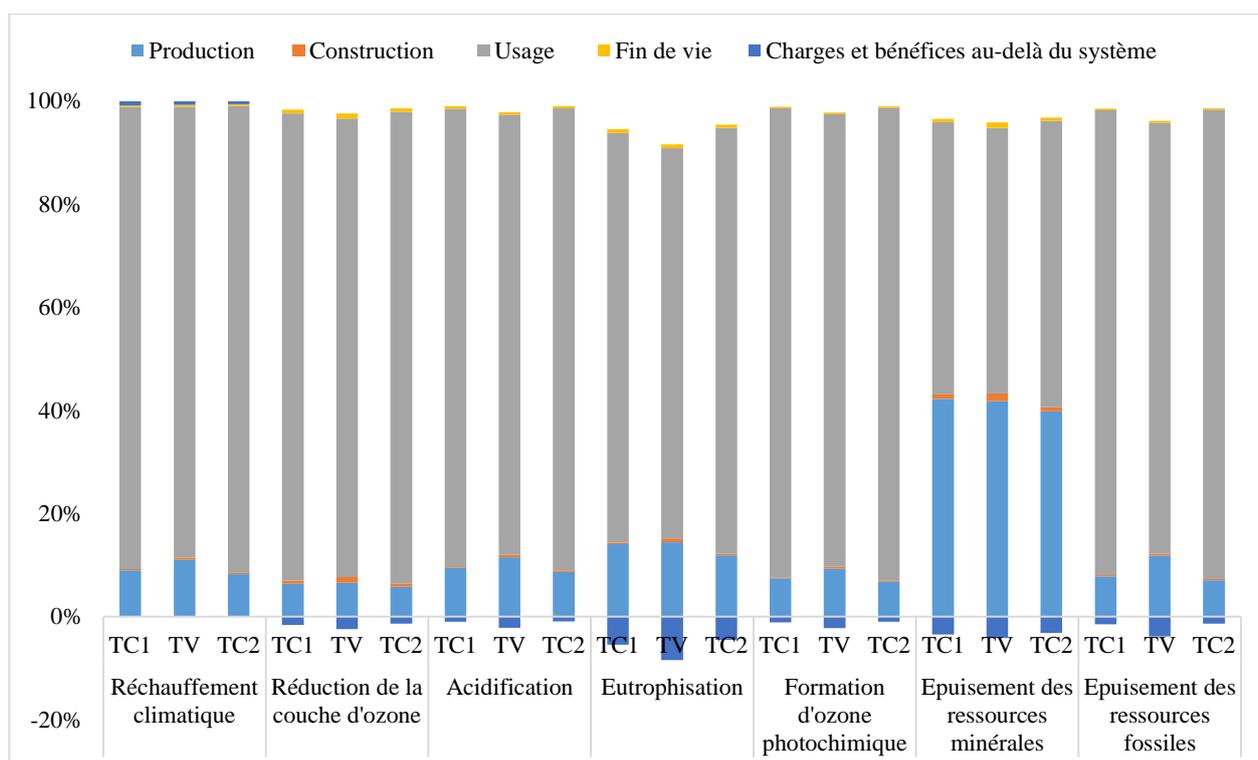
Figure 17 : Comparaison d'impacts globaux entre les deux toitures

Ayant un aperçu global des impacts potentiels des deux toitures selon les deux approches, il convient de se demander quelles sont les principales contributions à ces impacts. Une analyse est menée à cet effet et porte sur la contribution aux impacts environnementaux par phase du cycle de vie. La figure 18 présente par indicateur, les impacts potentiels générés par chaque phase du cycle de vie des toitures selon les deux approches. Le tableau 24 permet de distinguer en chiffres, les contributions aux impacts pour une meilleure compréhension des résultats. Il met en évidence les moyennes d'impacts par phase du cycle de vie.

Tableau 24 : Contribution aux impacts par phase du cycle de vie pour chaque toiture

	TC1* (%)	TV* (%)	TC2* (%)
Production	14,2	15,8	13
Construction	0,4	0,7	0,4
Usage	84,8	82,7	86,1
Fin de vie	0,5	0,6	0,5
Charges et bénéfices au-delà du système	-1,9	-3,4	-1,7

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ;
 TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte



TC1 : toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 : toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

Figure 18 : Contribution aux impacts par phase du cycle de vie pour chaque toiture

a. La phase de production :

À travers cette figure 18, la phase de production se classe en deuxième position en termes de contributions aux impacts environnementaux. En effet, elle contribue en moyenne pour 14% aux impacts des toitures. Cette phase contient l'extraction des matières premières, leur transport jusqu'à l'usine de transformation et la transformation de ces matières premières en produits semi finis ou finis. La figure 18 et le tableau 24 montrent que la phase de production de la toiture verte affiche plus d'impacts potentiels (15,8% en moyenne) par rapport à la toiture classique (14,2% pour TC1 et 13% pour TC2). Ceci s'explique tout simplement par le fait que la toiture verte contient plus de matériaux que la toiture classique. Cependant, il est important de savoir à quel degré chacun de leurs matériaux contribue aux impacts environnementaux de cette phase.

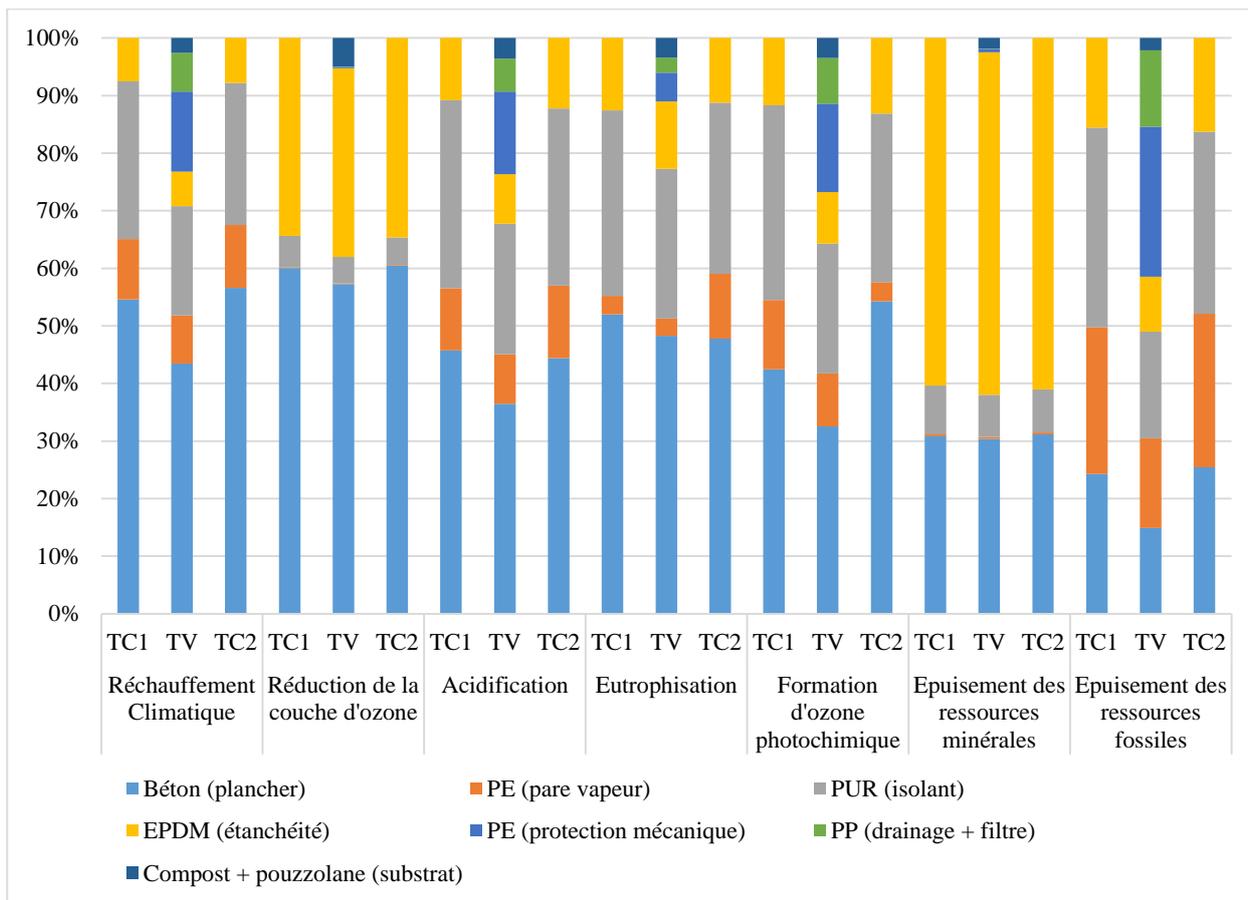
La figure 19, dressée à cet effet, montre les contributions de chacun des matériaux aux impacts environnementaux potentiels, par indicateur. Il apparaît que le béton est le matériau qui affiche le plus d'impacts potentiels (avec une moyenne de 42,5% des impacts) dans les trois cas de toitures. Ceci est dû principalement au procédé de production du clinker pour la fabrication du ciment qui est aussi bien énergivore que fort pollueur (atmosphérique). Raison pour laquelle, les indicateurs de réchauffement climatique et de réduction de la couche d'ozone affichent des impacts plus importants pour le béton que les autres indicateurs. Après le béton, l'EPDM et le PUR occupent la deuxième place des matériaux plus impactant avec en moyenne 21% de contribution chacun. Les impacts potentiels de l'EPDM sont plus significatifs pour les indicateurs d'épuisement des ressources naturelles minérales et de réduction de la couche d'ozone car le procédé de fabrication de l'EPDM

est aussi bien énergivore que fort consommateur en matière première. En valeur relative, ces impacts sont identiques pour les trois cas de toitures car les quantités respectives y sont les mêmes. Par ailleurs, la différence d'impacts à la phase de production pour les trois cas de toitures se trouve dans les matériaux qu'elles n'ont pas en commun, ainsi que dans leurs quantités, notamment les polymères et le substrat. En effet, les polymères ont des impacts plus significatifs dans la toiture verte du fait de leur présence massive plus importante (13,8 kg/m² dans la TV, 7,3 kg/m² dans TC1 et 6,8 kg/m² dans TC2). Le PUR affiche des impacts considérables pour tous les indicateurs, à l'exception des indicateurs d'épuisement des ressources minérales et de réduction de la couche d'ozone dont les effets sont contrastés par le procédé de fabrication de l'EPDM dans le graphique. Il est à noter que ses impacts sont plus importants dans l'approche (a) dû à sa quantité élevée par rapport à la toiture verte et la toiture classique de l'approche (b). Les impacts du PP ne sont bien évidemment visibles que pour la toiture verte. Quant au PE, les impacts sont plus significatifs pour la toiture verte du fait de leur quantité plus importante (pare vapeur + protection mécanique dans la toiture verte, contre seulement le pare vapeur dans la toiture classique).

a. Les phases de construction et de fin de vie :

Ces phases sont faiblement visibles dans la figure 18. En effet, les phases de construction et de fin de vie présentent ensemble moins de 2% de l'ensemble des impacts pour toutes les toitures, tout au long de leur cycle de vie (cf. tableau 24). Ceci s'explique par le fait que la phase de construction n'a été modélisée qu'en tenant compte du transport des matériaux de l'usine de production au site de construction. Comme précisé dans la définition du cycle de vie (cf. II.4.), abstraction a été faite des opérations ainsi que d'équipements nécessaires pour l'installation des toitures par manque de données. Quant à la phase de fin de vie, elle contient la démolition de la toiture (C1), le transport des matériaux du site de déconstruction à la décharge (C2), la préparation au traitement des matériaux (C3) et la mise en décharge (C4). Sa modélisation repose sur des hypothèses tirées de l'étude de l'OVAM (2013). Par manque de données sur les opérations et équipements pour la fin de vie, cette modélisation n'a pris en compte que l'énergie consommée pour la préparation au traitement des matériaux, l'énergie pour la démolition et les émissions des particules y relatives, le transport des déchets au centre de tri et le processus de mise en décharge. En outre, ceci s'explique également par le fait que très peu de matériaux (moins de 5% des matériaux) avaient pour fin de vie la mise en décharge (cf. tableau 21).

Par ailleurs, quelle que soit l'approche, la toiture verte affiche plus d'impacts à ces phases par rapport à la toiture classique, car disposant de plus de matériaux, l'énergie pour les opérations de fin de vie et les masse-kilomètre sont plus importantes.



TC1 : toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 : toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte ; EPDM : éthylène-propylène-diène monomère ; PE : polyéthylène ; PUR : polyuréthane ; PP : propylène

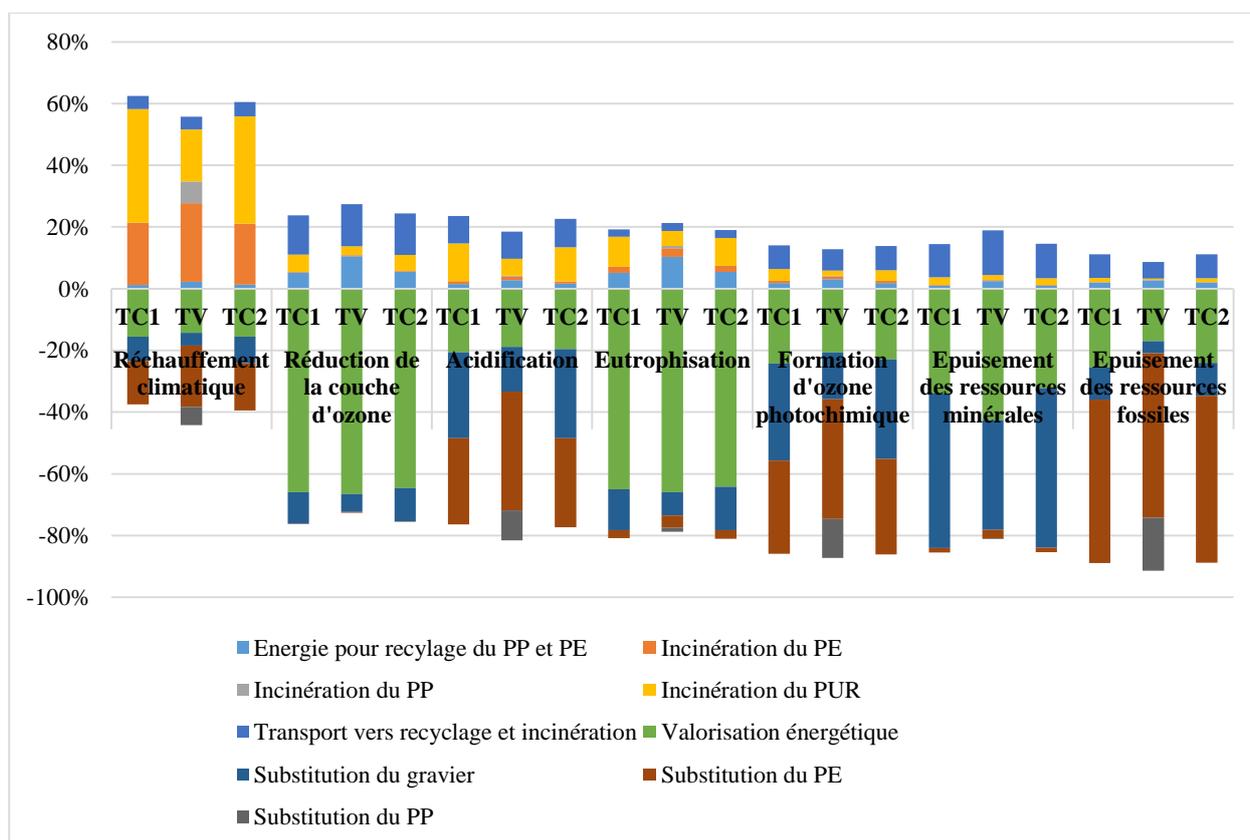
Figure 19 : Contribution aux impacts par matériaux à la phase de production pour chaque toiture

b. La phase d'usage :

Il apparaît clairement dans la figure 18 et le tableau 24 que cette phase constitue l'élément qui contribue le plus aux impacts potentiels tout au long du cycle de vie des toitures avec une moyenne de 84,5% d'impacts durant le cycle de vie. L'un des principaux objectifs de ce travail est de traduire la différence de performance énergétique des toitures en impacts environnementaux. Or, la performance énergétique de la toiture verte est attribuée à sa capacité à réduire la consommation en énergie pour le chauffage et le refroidissement dans un bâtiment. De ce fait, la modélisation de cette phase n'a tenu compte que de la consommation énergétique liée au chauffage et au refroidissement (Cf. II.4 et III.3.). La figure 18 et le tableau 24 montrent que la toiture verte (82,7% des impacts en moyenne) affiche des impacts inférieurs à la toiture classique aussi bien dans l'approche (a), (84,8% d'impacts en moyenne) que dans l'approche (b) (86,1% d'impacts en moyenne) à la phase d'usage. Tous les indicateurs sont concernés par cette phase et affichent de grands scores d'impacts, à l'exception des indicateurs (i) d'épuisement des ressources minérales, dont la contribution de la phase d'usage est réduite par les procédés de la phase de production et (ii) d'eutrophisation, dont les effets sont contrastés par le module D.

a. Les charges et bénéfices environnementaux au-delà du système

Une valeur négative signifie que des impacts potentiels peuvent être évités. Plus la valeur est petite, plus les impacts potentiels évités sont importants. En effet, ce module affiche des valeurs essentiellement négatives pour tous les indicateurs. Ce qui signifie que pour le recyclage et la valorisation énergétique des matériaux spécifiques en fin de vie, des impacts potentiels peuvent être évités pour tous ces indicateurs ; particulièrement pour les indicateurs d'eutrophisation et d'épuisement des ressources naturelles fossiles comme le montre bien la figure 18. Ainsi, un bénéfice net positif est créé par toutes les toitures, majoritairement par la toiture verte, dont le tableau 24 montre -3.3% des impacts potentiels évités. Pour aller plus loin, la figure 20 met en évidence les principales contributions à ce bénéfice net positif. Il montre que de la récupération d'énergie électrique par incinération des polymères (PUR, PE et PP, en proportions spécifiques ; cf. tableau 21) est l'élément qui contribue le plus à éviter les impacts en termes d'eutrophisation et sur la couche d'ozone. Ensuite, cette figure 20 montre que recyclage du PE (et du PP) permet d'éviter des impacts significatifs selon l'indicateur d'épuisement des ressources fossiles, car le procédé de production du PE (et du PP) est fort consommateur en ressources fossiles (le PP moins que le PE, raison pour laquelle sa contribution est inférieure à celle du PE).



TC1 : toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 : toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte ; PE : polyéthylène ; PUR : polyuréthane ; PP : propylène

Figure 20 : Contribution aux impacts des charges et bénéfices au-delà du système

En outre, la substitution du gravier (granulats utilisés dans le béton), par du béton concassé, permet d'éviter des impacts selon l'indicateur d'épuisement des ressources éléments. Cependant, dans

l'approche (a) comme dans l'approche (b), le tableau 24 met en évidence que la toiture verte possède plus de crédit (-3.4% des impacts en moyenne) que la toiture classique (-1,7% des impacts pour TC1 et -1,9% pour TC2 en moyenne). Abstraction faite des matériaux communs en quantité identique, la différence de crédit à accorder à chacune des toitures dans les deux approches se trouve principalement dans la différence massique entre les matériaux des deux toitures. Ainsi, la valorisation énergétique, par incinération des polymères et le recyclage du PE (dont le PCI est le plus élevé) et du PP sont plus bénéfiques en considérant la toiture verte.

À l'issue de cette analyse, les principales contributions aux impacts dans les deux toitures par phase du cycle de vie et par matériaux ont été mises évidence. Cependant, un regard doit être porté également sur les contributions des indicateurs, par rapport aux contributions globales. Autrement dit, à travers quel(s) indicateur(s) les impacts environnementaux sont plus significatifs ? Répondre à cette question revient à effectuer une normalisation des impacts.

3. LA NORMALISATION DES IMPACTS

La normalisation des impacts permet de quantifier, à travers des facteurs de normalisation, l'importance des résultats issus de la caractérisation, par rapport à une situation de référence (ISO 14040, 2006 ; Guinée, 2002). La situation de référence se décrit dans le temps et dans l'espace. Dans le cadre de ce mémoire, la période de temps considérée est l'année 2014 (année de référence des données EcoInvent) et la couverture géographique est l'Europe 25. Ces facteurs de normalisations utilisés sont ceux de la méthode CML-IA Baseline. Les impacts une fois caractérisés, sont divisés par ces facteurs de normalisation spécifiques à chaque indicateur et à l'issue, toutes les catégories d'impacts ont la même unité, ce qui permet d'avoir une quantification de l'importance des impacts par rapport à tous les indicateurs.

Les figures 21 et 22 présentent les résultats des impacts normalisés des toitures de manière globale et par phase du cycle de vie respectivement. En effet, les deux figures, aussi bien dans l'approche (a) que dans l'approche (b) et pour les trois cas de toitures, montrent que l'épuisement des ressources fossiles est l'indicateur à travers lequel les impacts potentiels sont les plus significatif, par rapport aux autres, suivi de l'indicateur du réchauffement climatique. Pour le 1^{er} indicateur, ceci est principalement dû (i) au processus d'extraction des énergies fossiles telles que le gaz naturel (principalement), le charbon et le pétrole (réduisant de ce fait les réserves) ; (ii) et à l'utilisation de ces énergies fossiles pour la production des polymères, particulièrement du PE et du PP. (cf. annexe 3). Quant à l'indicateur du réchauffement climatique, c'est le fonctionnement du support énergétique pour le chauffage, en l'occurrence la chaudière à gaz qui contribue le plus aux impacts. En outre, le processus de production du PE et PP, de même que leur traitement en fin de vie (par incinération) représentent aussi des éléments contributeurs aux impacts du réchauffement climatique. Par ailleurs, l'extraction du charbon aussi bien que le processus de production du clinker (pour la fabrication du ciment qui est utilisé dans le béton) sont des éléments qui contribuent aux impacts liés au réchauffement climatique (cf. annexe 3).

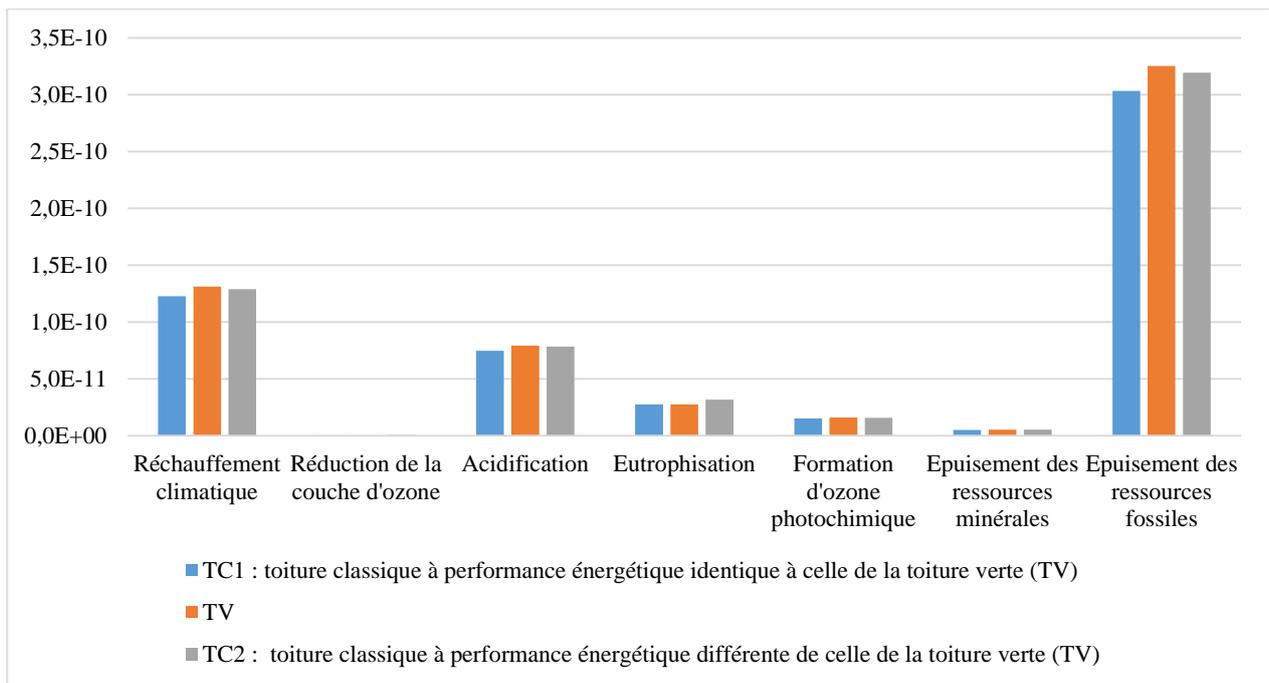
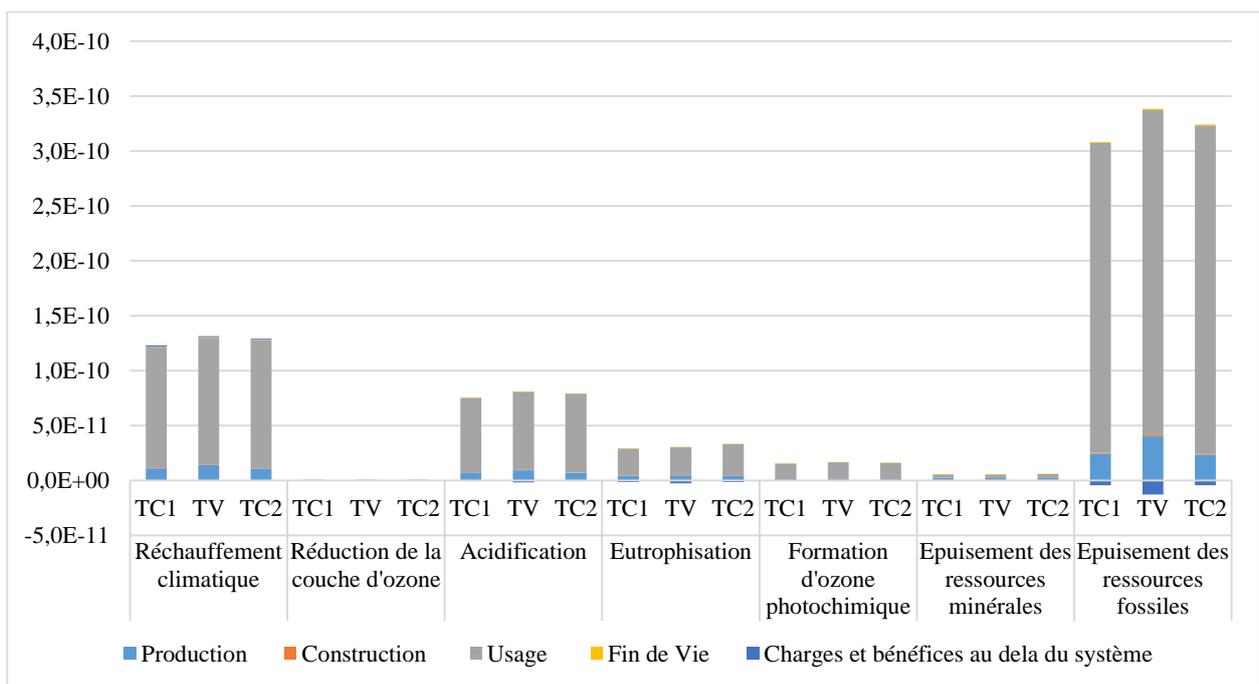


Figure 21 : Normalisation des impacts de chaque toiture



TC1 : toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 : toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

Figure 22 : Normalisation des impacts par phase du cycle de vie de chaque toiture

Tous ces résultats sont obtenus par la modélisation des procédés d'ordre générique, des matériaux et d'énergie, issues de la base de données d'EcoInvent (EcoInvent, Zurich, Suisse). Chacune de ses données est décrite selon sa complétude, sa fiabilité et son degré de précision. Il est dès lors intéressant d'analyser la qualité des données utilisées dans cette évaluation.

4. L'ANALYSE DES INCERTITUDES

L'analyse des incertitudes est une des étapes d'interprétation des résultats dans la méthodologie de l'ACV permettant de déterminer comment les incertitudes dans les données influencent les calculs d'impacts et comment elles affectent la robustesse des résultats (Guinée, 2002). Elle permet d'estimer le degré d'incertitude des données pour chaque indicateur. Dans ce travail, cette analyse a été réalisée par la méthode Monte Carlo via le logiciel SimaPro (Pré Consultants, Amersfoort, Pays-Bas), dans un intervalle de confiance de 95%. Les figures 23, 24 et 25 présentent les résultats de cette analyse par indicateur et pour la toiture verte (TV) et des toitures classiques (TC1 et TC2), respectivement. Ils montrent l'écart de variation potentielle (minimale et maximale) des incertitudes pour chaque impact. Il en ressort que pour les deux toitures, les indicateurs de réduction de la couche d'ozone et d'acidification, affichent des incertitudes les plus élevées avec un coefficient de variation moyen de 41% et de 40%, respectivement (cf. tableau 25). Tandis que pour les indicateurs de réchauffement climatique, d'eutrophisation et d'épuisement des ressources fossiles, les incertitudes sont les plus faibles avec un coefficient de variation moyen de 14%, 23% et 26% respectivement (cf. tableau 25). Cependant, il est important de remarquer que les incertitudes les plus faibles sont portées sur les indicateurs qui affichent de plus grands impacts (cf. tableau 25 et figures 23, 24 et 25). Ceci renforce la fiabilité des résultats des impacts suivant ces indicateurs.

Tableau 25 : Pourcentage de variation des incertitudes sur les procédés à 95% de confiance pour chaque toiture.

Indicateurs d'impacts	Pourcentage de variations des incertitudes sur les procédés à 95% de confiance		
	TC1*	TV*	TC2*
Réchauffement climatique	14,1	14,5	14,9
Réduction de la couche d'ozone	39,1	41,2	43,1
Acidification	35,7	40,6	36,2
Eutrophisation	23,6	23,9	24,5
Formation d'ozone photochimique	27,3	30,5	27,7
Épuisement des ressources naturelles minérales	27,7	26,6	28,1
Épuisement des ressources naturelles fossiles	21,3	21	21,7

**TC1 : toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 : toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte*

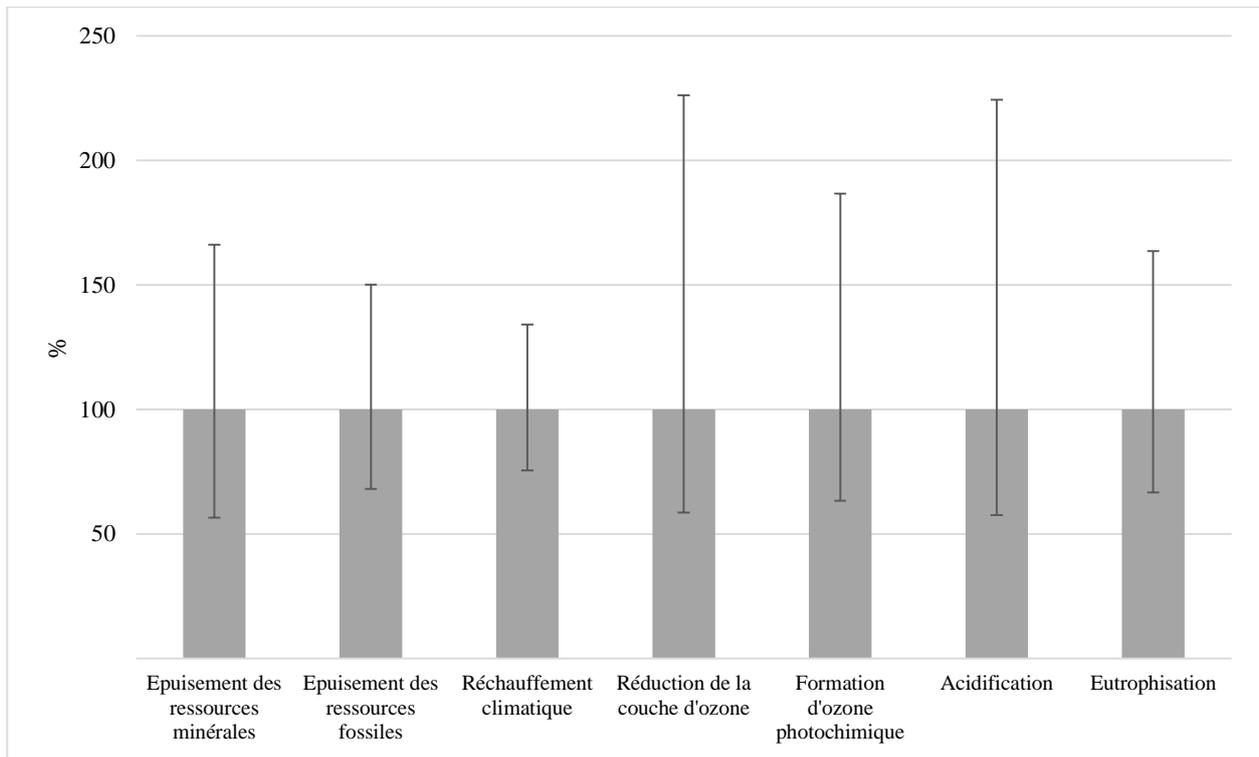


Figure 23 : Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture verte

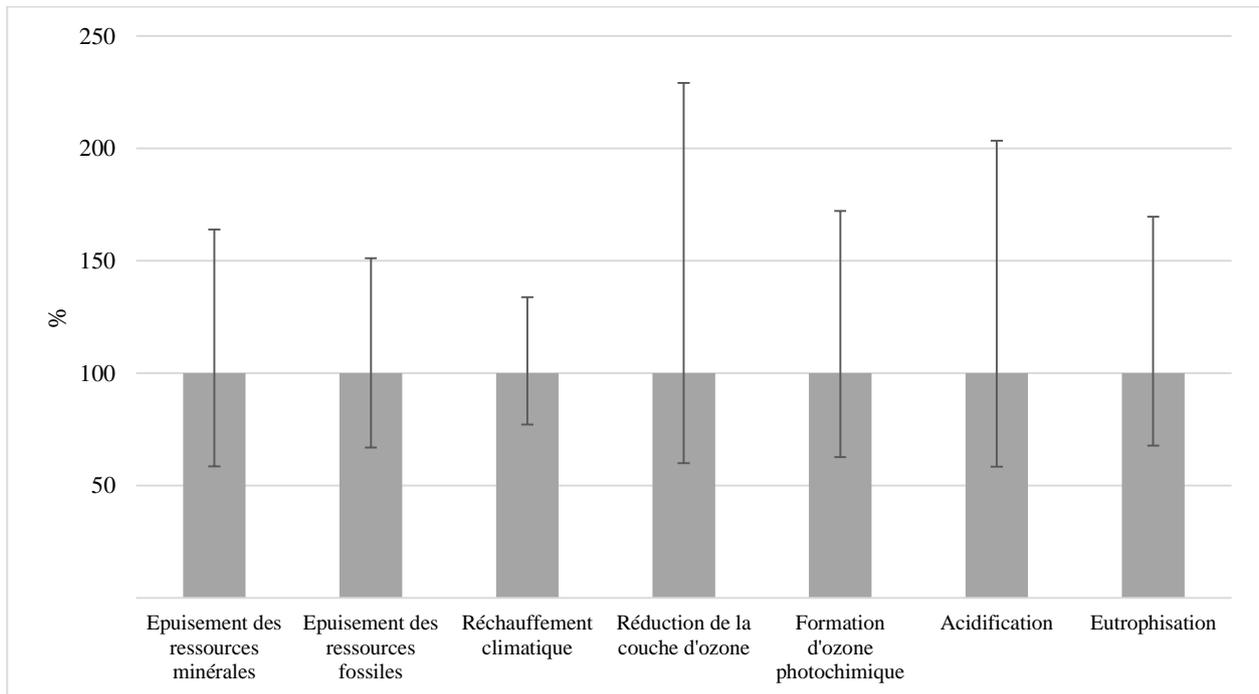


Figure 24 : Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte

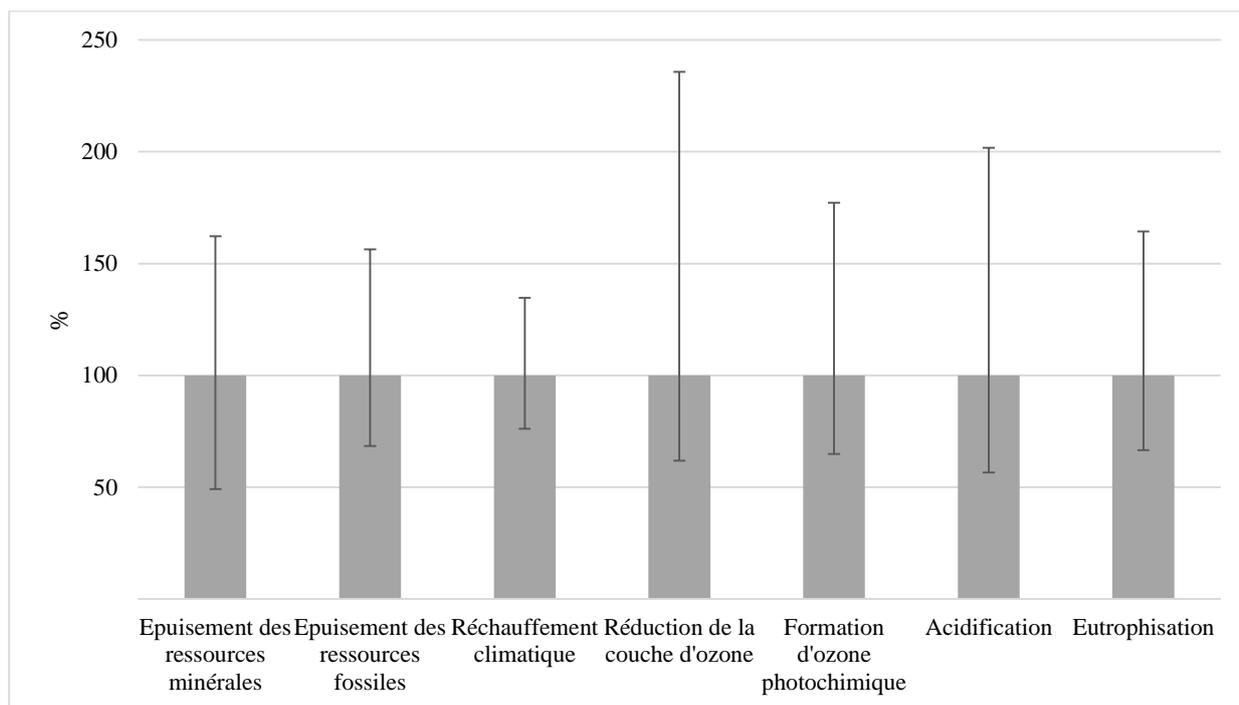


Figure 25 : Analyse des incertitudes sur les procédés de la toiture classique à performance énergétique différente de celle de la toiture verte

V. DISCUSSION

Dans le cadre de ce mémoire, une évaluation de la performance environnementale d'une toiture verte a été réalisée en ayant recours à une analyse environnementale de son cycle de vie. Cette dernière s'est portée sur une comparaison de la toiture verte par rapport à la toiture classique afin de montrer les impacts potentiels de l'une par rapport à l'autre : les impacts des matériaux et de la performance énergétique tout au long du cycle de vie des toitures, dont la prise en compte a nécessité une approche intégrée. C'est dans cet ordre d'idée que deux approches ont été définies : l'approche (a), dans laquelle il était question de comparer les deux toitures à performance énergétique identique, i.e. l'énergie consommée est la même, par conséquent à épaisseurs d'isolant différentes ; et l'approche (b), dans laquelle les deux toitures ont été comparées à performance énergétique différente, i.e. à toiture verte le bâtiment de référence consomme moins d'énergie qu'à toiture classique, dans ce cas, l'épaisseur des isolants est identique. De toutes les formes de consommations énergétiques dans un bâtiment (l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, etc.), seules les consommations en énergie pour le chauffage et le refroidissement ont été prises en compte, car elles sont directement influencées par l'implémentation d'une toiture verte. La modélisation a été effectuée via le logiciel SimaPro (Pré Consultants, Amersfoort, Pays-Bas) à partir des données générique d'EcoInvent (EcoInvent, Zurich, Suisse) et l'évaluation des impacts s'est faite par la méthode CML, selon sept indicateurs, par m² de surface de toiture. Il ne pourrait pas être dit d'entrée de jeu que la toiture verte est du point de vue environnemental, préférable à la toiture classique, car les résultats d'impacts sont assez nuancés. En envisageant les deux approches, la toiture verte est préférable à la toiture classique à performance énergétique différente (approche (b)), tandis que ce n'est pas le cas dans l'approche (a) à performance énergétique identique. Ces résultats des deux approches suscitent des préoccupations et sont sujets à discussion.

1. ANALYSE DE L'APPROCHE (A)

À travers l'approche (a), l'une des questions de recherche de ce mémoire, à savoir : évaluer la performance environnementale des toitures vertes à travers l'analyse des choix et performances de ses matériaux, trouve des éléments de réponse. En effet, selon l'approche (a), les deux toitures sont à performance énergétique identique, afin de mieux considérer les impacts liés aux matériaux durant tout leur cycle de vie. L'épaisseur d'isolant est de ce fait différente au sein de la structure de chaque toiture. Elle est inférieure dans la toiture verte (67 mm contre 77 mm dans la toiture classique), car son caractère multicouche lui permet d'atteindre rapidement la même résistance thermique que la toiture classique. Il a été montré que la toiture verte génère en moyenne 4.5% fois plus d'impacts potentiels que la toiture classique tout au long de leur cycle de vie. La phase de production est la plus problématique car génère plus d'impacts environnementaux surtout en termes d'épuisement des ressources naturelles. Cependant, ces impacts sont amoindris à la fin de vie. Ceci est principalement dû aux bénéfices potentiels générés par le traitement en fin de vie des matériaux des toitures vertes. Il est à préciser que les hypothèses de traitement en fin de vie des matériaux sont issues d'une étude de l'OVAM (2013) sur les performances environnementales des éléments de construction. Pour une meilleure approche des performances environnementales des matériaux des toitures, abstraction est faite des matériaux communs en quantité identique, notamment le béton (plancher), le PE (le pare-vapeur) et l'EPDM (l'étanchéité). Cela revient à prendre en compte 3 kg de PUR pour l'isolation dans la toiture classique contre 2,68 kg de PUR, 4,6 kg de PE, 2,4 kg de PP et 10 cm d'un mix de compost et de pouzzolane. Ainsi, un constat est vite fait quant à la nature des matériaux à comparer à savoir : les polymères, majoritairement. Le traitement en fin de vie de ces polymères dans un contexte belge repose majoritairement sur du recyclage et de la valorisation énergétique (cf. tableau 21). C'est ainsi que l'évaluation environnementale a montré que les impacts potentiels de la phase de production des matériaux, leur transport (global durant tout le cycle de vie), leur mise en décharge et leur procédé d'incinération, sont réduits par les bénéfices potentiellement générés par le recyclage et la valorisation énergétique dans un contexte belge, mais pas de là à créer un bénéfice net positif sur tout le cycle de vie. Cependant, les impacts environnementaux des toitures dans ce mémoire sont propres à toute autre toiture présentant la même structure et des matériaux identiques. Cependant, en RBC, toutes les toitures n'ont pas forcément le profil (i.e. structure de la toiture et type de matériaux) comme étudié dans ce mémoire. Le tableau 1 (sur les différents types de matériaux envisageables) a montré les différents matériaux qui peuvent être utilisés pour chaque élément d'une toiture verte. C'est ainsi que d'un profil de toiture verte à un autre, les impacts potentiels sont différents. L'ACV comparative entre la toiture verte et la toiture classique réalisée dans ce mémoire a montré que la première génère plus d'impacts que la dernière. Ces impacts sont majoritairement liés à la performance environnementale des matériaux utilisés. Ceux-ci, particulièrement le PE de la couche de protection mécanique et le PP de drainage/filtre, ont affichés des impacts environnementaux remarquables, allant en défaveur de la toiture verte par rapport à la toiture classique. Cette ACV a ainsi permis d'analyser du point de vue environnemental, le choix porté sur ces matériaux. Cependant, les matériaux recyclés, à l'exemple du PE ou du PP recyclés, les matériaux d'origine végétale comme le liège, les matériaux de nature minérale comme de la laine minérale, de perlite expansée ou des granulats de graviers, pourraient être des matériaux environnementalement préférables à des matériaux composites ou synthétiques comme l'EPDM, le PE, le PUR, le PP, etc.

Le choix des matériaux des toitures vertes doivent être portés dans ce sens-là afin d'atteindre une meilleure performance environnementale de toitures vertes du point de vue des matériaux. Toutefois, une ACV des toitures vertes avec différents profils contenant ces types de matériaux est nécessaire afin de valider ces assertions.

2. ANALYSE DE L'APPROCHE (B)

Suivant cette approche, l'une des questions de recherche soulevée en amont de ce mémoire concerne la traduction de la performance énergétique des toitures verte en impacts environnementaux, trouve des éléments de réponses. En comparant les deux approches, les impacts potentiels de la toiture classique sont plus élevés dans l'approche (b), qui témoigne de la performance énergétique de la toiture verte. En effet, c'est à partir de cette approche (b) que la performance énergétique de la toiture verte par rapport à la toiture classique est traduite en termes d'impacts environnementaux potentiels. La figure 18 montre que la phase d'usage, à travers la consommation énergétique, représente l'élément contributeur principal tout au long du cycle de vie des toitures, avec une contribution inférieure dans le cycle de vie de la toiture verte due à sa performance énergétique. Ainsi, l'implémentation de cette toiture verte sur ce bâtiment de référence permettrait une réduction des impacts environnementaux de la consommation énergétique de 3,4% sur 35 ans (durée de vie des matériaux des toitures considérée dans cette étude), avec les hypothèses énergétiques choisies. Cependant, un regard critique doit être porté sur le support d'énergie, qui est en l'occurrence, une chaudière à gaz. Cette donnée était contenue dans les informations caractéristiques du bâtiment de référence (habitation unifamiliale à un niveau avec 98 m² de surface de toiture), recueillies de l'étude de Bruxelles Environnement (2013) et exploitées dans ce mémoire. Or, il a été montré que les impacts les plus importants, à travers les indicateurs de réchauffement climatique et d'épuisement des ressources (qui sont les indicateurs qui présentent les impacts les plus significatifs), sont justement attribués à ce support d'énergie au gaz naturel par chaudière à gaz. Ce qui remet en question le choix du mode d'approvisionnement en énergie du point de vue environnemental. De ce fait, d'autres évaluations environnementales avec d'autres supports d'énergie (pompe à chaleur, cogénération, chauffage électrique, etc.) sont nécessaires afin de comparer et choisir le support le plus environnementalement préférable. Par ailleurs, le mix énergétique choisi est belge : la production d'électricité, de gaz, ainsi que les rendements des installations d'incinération sont typiques à la Belgique. Ainsi, cela peut fortement varier d'un pays à un autre. En outre, la proportion de 3,4% de réduction des impacts environnementaux de la consommation énergétique peut sembler négligeable, mais reste tout de même non négligeable. En effet, l'évaluation environnementale réalisée dans ce travail fournit des résultats pour une toiture verte de type extensif. Or il a été prouvé qu'une toiture verte de type intensif, possède une meilleure performance énergétique qu'une toiture verte extensive. De ce fait, des résultats plus satisfaisants pourraient être attendus à l'égard de la réduction des impacts de la consommation énergétique avec une toiture verte intensive. Une ACV comparative entre une toiture verte de type intensif, de type extensif et classique est nécessaire pour valider cela. Cependant, dans cette ACV, une attention doit être portée sur le fait que l'implémentation d'une toiture verte de type intensif nécessite un renforcement de la structure du bâtiment sur lequel elle est construite. Ce qui augmente ainsi la quantité de matériaux à considérer dans cette ACV, par conséquent génère plus d'impacts.

3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

a. Approche énergétique

Pour effectuer ce travail, des hypothèses ont été bâties afin de lui donner une orientation logique. Cependant, une de ces hypothèses connaît des limitations scientifiques. Il s'agit de l'hypothèse émise sur les proportions de réduction de la consommation en énergie pour le chauffage et le refroidissement par l'implémentation d'une toiture verte, l'occurrence : 5% de réduction de l'énergie pour le chauffage et 20% pour le refroidissement, occasionnées par la toiture verte. En effet, cette hypothèse nécessite d'un appui scientifique plus robuste en ce sens que, pour obtenir les proportions de réduction de la consommation en énergie avec l'implémentation d'une toiture verte dans un bâtiment, une simulation énergétique de ce bâtiment est nécessaire, ce qui n'a pas été le cas dans le cadre de ce mémoire. Raison pour laquelle, comme annoncé précédemment, une analyse de sensibilité est nécessaire et doit être réalisée. Le but de l'analyse de sensibilité est de déterminer comment les hypothèses prises évoluent dans les calculs et comment elles affectent les résultats (Guinée, 2002). C'est dans cet ordre d'idée qu'il sera question de faire varier cette hypothèse afin d'observer et d'analyser les résultats. De prime abord, l'état de l'art a montré qu'une toiture verte permet une réduction de la consommation en énergie au sein du bâtiment sur lequel elle est implémentée. Cependant, la proportion de réduction varie d'un bâtiment à un autre ou d'un contexte géographique à une autre. Ainsi, la variation de cette hypothèse se décline en deux autres hypothèses selon un minimum et un maximum pour cette variation. Sachant que dans ce mémoire les pourcentages de réduction pris sont 5% pour l'énergie pour le chauffage et 20% pour l'énergie pour le refroidissement, l'analyse de sensibilité fera varier cette hypothèse pour un minimum de 3% de réduction d'énergie pour le chauffage et 15% de réduction d'énergie pour le refroidissement, et un maximum de 10% de réduction d'énergie pour le chauffage et 30% de réduction d'énergie pour le refroidissement. Étant donné qu'on fait varier la consommation énergétique, il est plus logique de travailler avec l'approche (b), c'est-à-dire la comparaison entre la toiture verte (TV) et la toiture classique (TC2) à consommation énergétique différente. TVmax et TVmin représentent respectivement les hypothèses selon le maximum et le minimum de la variation de la consommation énergétique. La figure 26 présente les résultats issus de cette modélisation. Il apparaît clairement que plus la consommation énergétique est réduite, plus les impacts potentiels générés par la toiture verte sont également réduits, et ce pour tous les indicateurs. Il a été montré qu'à performance énergétique différente (5% de réduction d'énergie pour le chauffage et 20% pour le refroidissement) la toiture verte affiche 5,7% moins d'impacts que la toiture classique. Ainsi, pour la variation minimale de cette hypothèse, la toiture verte génère 3% moins d'impacts que la toiture verte, tandis que pour la variation maximale, elle affiche 11% moins d'impacts que la toiture classique. Ceci démontre bien comment la performance énergétique de la toiture verte influence ses impacts environnementaux.

a. Approche selon la durée de vie des matériaux

L'évaluation environnementale des toitures dans ce mémoire a nécessité la prise en compte de la dimension temporelle : elle s'inscrit sur une durée de 35 ans. Cette période de 35 années représente la période moyenne de la durée de vie d'une toiture classique dans un contexte européen, autrement dit, durant les 35 1^{ères} années d'une toiture, aucune opération de remplacement n'est nécessaire (Nemry et Uihlein, 2008). Cependant, la littérature scientifique souligne que parmi les bénéfices des

toitures vertes, on distingue le prolongement de la durée de vie de la structure de base de la toiture, notamment : le plancher, le pare-vapeur, l'isolation et l'étanchéité ; ce qui représente la structure de la toiture classique en fait. Cette augmentation de la durée de vie des matériaux est dès lors un bénéfice dans la mesure, moins d'opérations remplacements des matériaux seront effectuées, ce qui veut moins de consommation en matériaux et partant, moins de déchets en fin de vie.

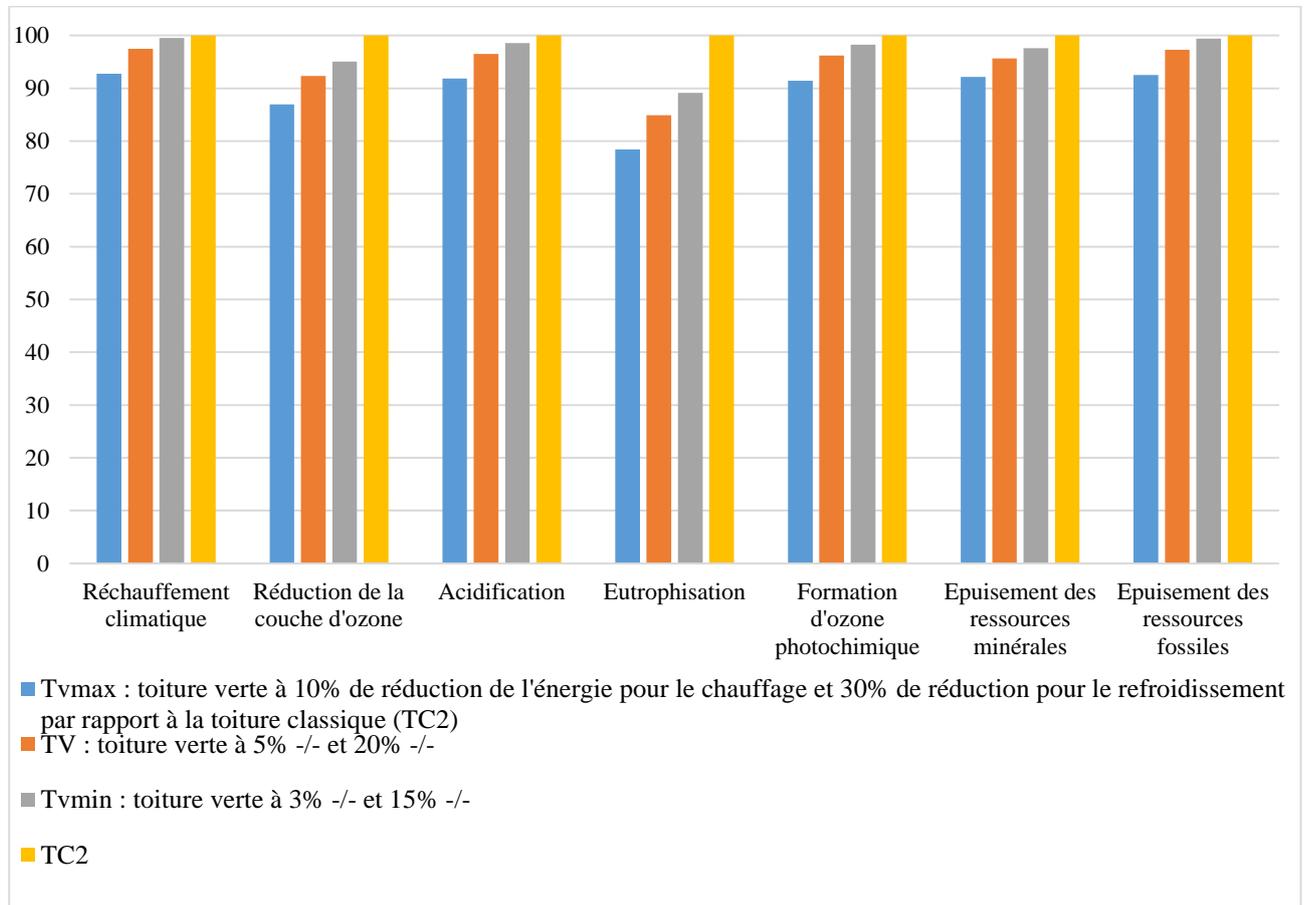


Figure 26 : Variation des résultats en fonction de la performance énergétique des toitures vertes

Ainsi, la toiture verte garantit une durée de vie plus importante aux matériaux par rapport à une toiture classique. Il est donc question dans ce point de traduire ce bénéfice de la toiture verte en termes d'impacts environnementaux, en comparaison avec la toiture classique. Pour ce faire, une analyse de sensibilité est effectuée, afin de voir comment varie l'hypothèse sur la durée de vie des matériaux dans les deux toitures dans les résultats.

La nouvelle durée de vie considérée est 50 ans (durée minimale avant le 1^{er} remplacement des matériaux dans une toiture verte). Or celle de la toiture classique est 35 ans. Ce qui veut dire qu'au bout de 50 ans, les matériaux auraient été changés 1,42 fois dans la toiture classique, contre 1 fois dans la toiture verte ($50 : 35 = 1,42$). De ce fait, la quantité de matériaux et par conséquent de déchets dans la toiture classique devient plus importante. Une modélisation est effectuée à cet effet en adaptant les nouvelles quantités des toitures classiques à toutes les phases du cycle de vie. La figure 27 en présente les résultats. Il apparaît clairement que la toiture verte affiche moins d'impacts environnementaux par rapport à la toiture classique de 8% en moyenne dans l'approche (a) et de 14,6% dans l'approche (b). En effet, sur une durée de 50 ans, alors que les impacts de la toiture

classique iraient croissant, dus au remplacement de ses matériaux, il n'en serait pas le cas pour la toiture verte. Ce bénéfice met bien en évidence le caractère durable de la toiture verte en ce sens qu'à long terme, la toiture verte est environnementalement préférable à la toiture classique.

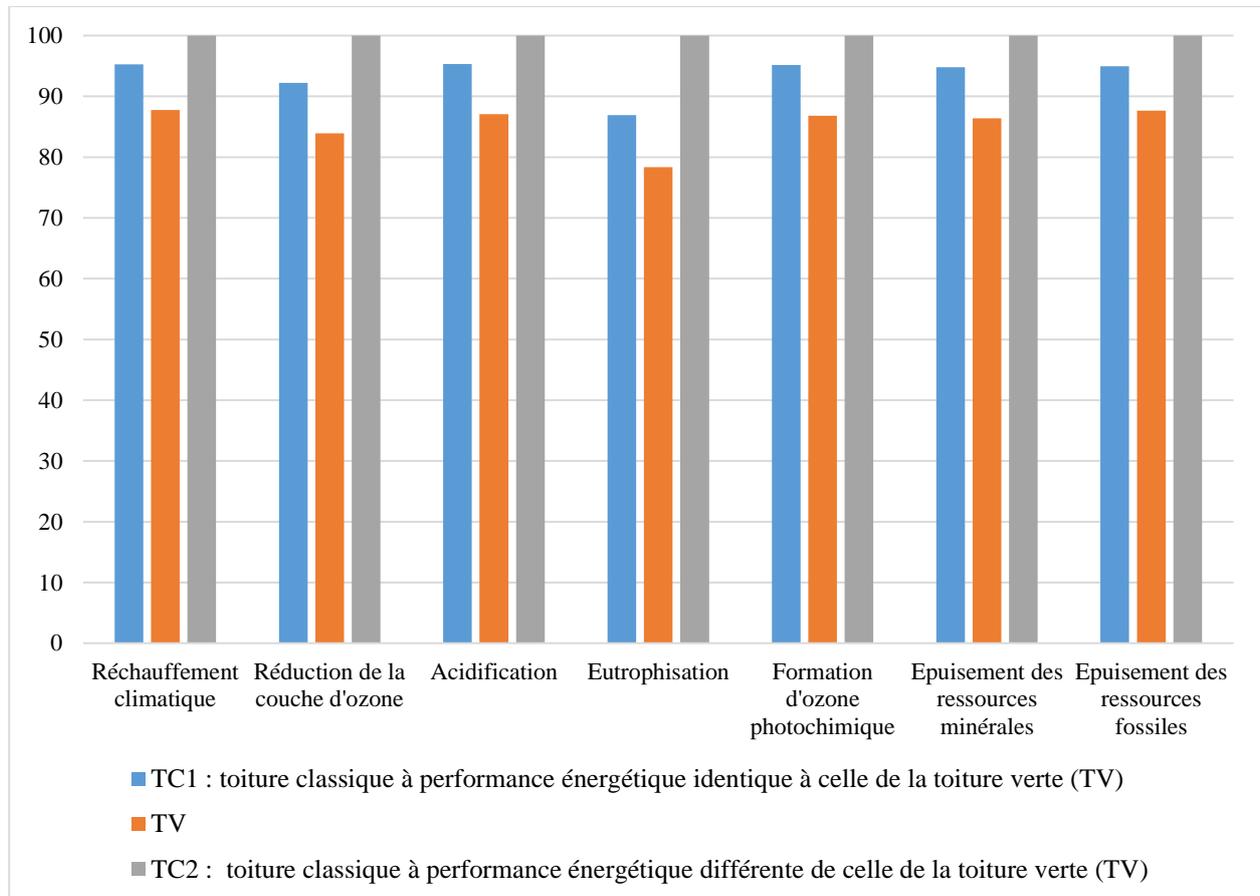


Figure 27 : Variation des résultats en fonction de la durée de la vie des matériaux des toitures

La réduction de la consommation énergétique et le prolongement de la durée de vie des matériaux sont les deux bénéfices dont les impacts environnementaux ont été quantifiés dans ce travail afin d'évaluer la performance environnementale d'une toiture verte. Cependant, ces bénéfices ne sont pas les seuls offerts par une toiture verte. Pour avoir une approche plus holistique et complète de la performance environnementale des toitures vertes, il est indispensable de prendre en considération l'ensemble de ses bénéfices. Les deux bénéfices évalués dans cette étude suivant des hypothèses spécifiques témoignent d'ores et déjà d'une performance environnementale remarquable d'une toiture verte. On peut dès lors se demander dans quel sens (positif ou négatif) irait cette performance, si les impacts environnementaux des autres services écosystémiques étaient considérés. En effet, en référence à l'état de l'art, les services écosystémiques ne pourraient avoir que des effets positifs, qui, cumulés, tendraient à améliorer davantage la performance environnementale des toitures vertes. Ainsi, le caractère durable d'une toiture verte se renforce au fur et à mesure que l'on considère l'ensemble de ses services écosystémiques. Toutefois, vérifier ou confirmer cela représente des perspectives pour les recherches futures.

PARTIE 4 : CONCLUSIONS

I. RÉCAPITULATIF ET RÉPONSE À LA PROBLÉMATIQUE

L'évaluation des impacts environnementaux et des services écosystémiques d'une toiture verte est le leitmotiv de ce mémoire. Une toiture verte, ou toiture végétalisée, ou éco-toiture ou toiture vivante est un toit recouvert de végétation. On en distingue trois types : extensif, semi-intensif et intensif, ces termes faisant référence à l'intensité de la végétation. La différence entre ces trois types se trouve dans l'épaisseur de la couche de substrat qui est plus importante dans une toiture verte de type intensif, avec une végétation intensive par conséquent. Les toitures vertes existent depuis le VII^e siècle à Babylone et leurs technologies ont subi une évolution dans le temps. En effet, elles ont été longtemps vues et considérées à travers leur valeur esthétique. Cependant, de plus en plus, elles ont fait l'objet de plusieurs sujets de recherche, non plus pour cette valeur esthétique, mais plutôt à travers les bénéfices potentiels, traduits en termes des services écosystémiques qu'elles seraient capables d'offrir. Ces services écosystémiques sont entre autre :

- les économies d'énergie au sein du bâtiment ;
- la rétention des eaux de pluie, qui réduit le débit d'eau dans les égouts, et par conséquent réduit les risques d'inondation ;
- l'amélioration de la qualité de l'air par capture des particules polluantes ;
- la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain ; une meilleure isolation acoustique au sein du bâtiment, la création et la favorisation de la biodiversité urbaine ;
- le prolongement de la durée de vie des matériaux de la toiture ;
- la valorisation de l'espace toiture, l'amélioration du confort visuel et des effets psychosociologiques positifs.

Parmi ces services écosystémiques, la majorité a déjà été scientifiquement prouvée et quantifiée, certains sont contextuels, tandis que d'autres n'ont pas encore été scientifiquement prouvés. Cependant, les toitures vertes n'ont pas que des bénéfices. Le principal inconvénient des toitures vertes est son caractère multicouche. En effet, dans la technologie moderne des toitures vertes, plusieurs autres couches de matériaux, notamment une couche de protection mécanique, de drainage, de filtre, de rétention d'eau (optionnelle), de substrat et de la végétation, sont implémentées au-dessus de la structure de bas d'une toiture classique (plancher, pare-vapeur, isolation et étanchéité). Pour ainsi évaluer les impacts environnementaux d'une toiture verte, il est indispensable de prendre en compte aussi bien cet inconvénient que ses bénéfices. Étant donné la multitude de ses bénéfices, l'évaluation environnementale des toitures vertes s'est faite dans des limites de faisabilité raisonnables dans le cadre de ce mémoire et n'a porté que sur sa capacité à réduire la consommation énergétique dans un bâtiment et le prolongement de la durée des matériaux. C'est ainsi que cette évaluation a visé deux objectifs principaux à savoir : évaluer les impacts environnementaux des matériaux utilisés dans une toiture verte tout au long de leur cycle de vie et traduire en impacts environnementaux, la réduction de la consommation énergétique dans un bâtiment par implémentation d'une toiture verte. Afin de mieux mettre en évidence les impacts environnementaux de la toiture verte, une comparaison en est faite par rapport à ceux d'une toiture classique, selon ces objectifs. Ainsi, deux approches ont été définies : l'approche (a) dans laquelle une comparaison a été

faite entre les deux toitures à performance énergétique identique (c'est-à-dire que la consommation énergétique identique, par conséquent l'épaisseur d'isolant est inférieure dans la toiture classique) ; et l'approche (b) dans laquelle les deux toitures sont comparées à performances énergétiques différentes (l'épaisseur d'isolant est identique aux deux toitures, mais la consommation énergétique y est différente).

Pour ce faire, la méthodologie de l'analyse environnementale du cycle de vie a été utilisée, tandis que l'approche méthodologique générale est de type intégrée, afin de prendre en compte les inconvénients et les bénéfices des toitures vertes. Les données utilisées étaient entièrement d'ordre générique, issues de la base de données EcoInvent 3.1 (EcoInvent, Zurich, Suisse). À défaut d'avoir réalisé une simulation énergétique (pour des raisons de temps imparti, de disponibilité des données et de priorité des objectifs à mettre en avant dans ce mémoire) pour avoir le pourcentage de réduction de la consommation en énergie dans un bâtiment suite à l'implémentation de la toiture verte, une hypothèse a été émise. Cette hypothèse repose sur 5% de réduction d'énergie pour le chauffage et 20% de réduction d'énergie pour le refroidissement. La modélisation s'est faite par m² de surface de toiture et sur une durée de 35 ans, suivant le cycle de vie '*cradle to gate*' (du berceau à la tombe) et contient : la phase de production, de construction, d'usage, de fin de vie, tout en tenant compte des charges et bénéfices environnementaux qui ont été générés dans le cycle de vie mais qui se retrouvent hors de ce cycle de vie.

Les résultats ont montré que la toiture verte émettrait légèrement plus d'impacts (de 0,8% en moyenne) que la toiture classique à performance énergétique identique (approche (a)), tandis qu'à performance énergétique différente, la toiture verte affiche 5,7% moins d'impacts potentiels que la toiture classique. Les résultats de l'approche (a) démontrent bien l'importance du choix et de la performance environnementale des matériaux dans les impacts potentiels de la toiture verte. En effet, la plupart des matériaux au sein de la toiture verte sont des matériaux composites ou synthétiques, qui ont une performance environnementale faible, car le processus de production est aussi bien énergivore que fort consommateur en ressources naturelles. De ce fait, en portant le choix des matériaux sur une catégorie de matériaux à meilleure performance environnementale à l'exemple des matériaux recyclés ou organiques, les impacts potentiels de la toiture verte pourraient être amoindris. Quant aux résultats de l'approche (b), ils mettent en évidence le poids de la performance énergétique de la toiture verte dans les impacts potentiels globaux, comparés à ceux de la toiture classique. Cependant, ces résultats dépendent entièrement de l'hypothèse sur la réduction de la consommation énergétique par l'implémentation de la toiture verte. C'est ainsi que pour aller plus loin, cette hypothèse a fait l'objet d'une analyse de sensibilité dans laquelle elle a subi une variation suivant un minimum et un maximum afin d'observer les résultats. Ceux-ci ont bien mis en évidence comment la performance énergétique de la toiture verte influence ses impacts environnementaux, en ce sens que plus la consommation en énergie est réduite, plus les impacts potentiels générés par la toiture verte sont également réduits, par rapport à ceux de la toiture classique. Or, dans cette dernière, augmenter la performance énergétique pour réduire les impacts revient à augmenter l'épaisseur d'isolant (donc plus de quantité de matériaux polymères), ce qui rehausse ces impacts. Par ailleurs, le bénéfice de la toiture verte en termes de prolongement de la durée de vie des matériaux qui a été évalué dans ce mémoire n'a fait donner plus de crédit à la toiture verte. Ce qui témoigne du caractère

durable de la toiture verte en ce sens qu'elle est environnementalement préférable à la toiture classique.

II. LIMITES DE L'ÉTUDE

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire connaît quelques limites. La toute première à mettre en évidence dans ce travail est l'absence d'une simulation énergétique du bâtiment de référence. Cette simulation énergétique aurait permis de réellement avoir la proportion de réduction de la consommation énergétique dans ce bâtiment par implémentation d'une toiture verte. Cependant, cette limite a été traitée à travers une analyse de sensibilité.

Ensuite, une autre limite rencontrée relève des données utilisées pour la modélisation, du point de vue de la précision des procédés et du point de vue de leur disponibilité dans la base de données EcoInvent. D'une part, la plupart des données utilisées dans ce mémoire sont issues de la base de données EcoInvent et sont d'ordre générique, ce qui signifie qu'elles sont généralisées selon les modes de production et de consommation et selon les zones géographiques. Alors que seulement quelques-uns des procédés utilisés dans ce mémoire sont typiques belges (à l'exemple du mix énergétique choisi), la plupart d'entre eux sont à l'échelle européenne (qui ont des modes de production des matériaux standardisés). Pour pallier à cette limite, il aurait été intéressant de se renseigner sur les modes de production spécifique à chaque matériau et les modéliser dans un contexte purement belge. D'autre part, la base de données EcoInvent, bien que très riche et fournit ne disposait pas de toutes les données nécessaires, à l'exemple du procédé exact du compost (constituant le substrat).

Par ailleurs, ce mémoire a évalué la performance environnementale d'une toiture verte, en tenant compte de l'impact des matériaux durant tout son cycle de vie et de sa performance énergétique. Il va sans dire qu'il est nécessaire, pour réellement évaluer la performance environnementale globale d'une toiture verte, de prendre en compte l'ensemble de ses services écosystémiques. Le fait d'avoir évalué les impacts environnementaux d'une toiture verte en tenant compte de certains aspects et en faisant abstraction des autres représente ainsi une limite à ce travail.

III. QUELQUES PERSPECTIVES

Les études scientifiquement reconnues au sujet des toitures vertes, leurs impacts environnementaux et leurs services écosystémiques sont encore rares dans un contexte belge. C'est ainsi que plusieurs perspectives peuvent en ressortir, à l'égard de la performance environnementale des matériaux d'une toiture verte, des services écosystémiques, mais aussi à l'égard des verrous scientifiques.

D'entrée de jeu, la technologie des toitures vertes s'inscrit dans la thématique des constructions et de l'architecture durable. Sa technologie est assez récente et suscite encore plusieurs développements, notamment à l'égard de ses matériaux. En effet, une étude en cycle de vie comparative de plusieurs profils de toitures à matériaux différents est nécessaire afin de déterminer 'le profil idéal' d'une toiture verte, lui permettant d'avoir une performance environnementale optimale du point de vue de ses matériaux. Dans ce sens-là, quel serait le profil idéal pour une habitation individuelle ? Une habitation collective ? Un immeuble de bureaux ? Un hôpital ? Une école ? Etc.

Ensuite, l'état de l'art a montré des bénéfices ou services écosystémiques potentiels qui peuvent être offerts par une toiture verte, dans des contextes géographiques précis. Cependant, rares sont ceux qui

ont fait l'objet d'une étude scientifique dans un contexte bruxellois. De ce fait, une évaluation, voire une quantification de chaque service écosystémique en RBC est nécessaire. Par exemple, concernant les économies d'énergie, en se basant sur les systèmes de chauffage et refroidissement réellement existants en RBC, plusieurs simulations énergétiques sont nécessaires afin d'évaluer réellement la capacité d'une toiture verte à réduire la consommation énergétique en RBC. Il pourrait aussi être envisagé de mesurer la capacité des toitures vertes à capturer des particules polluantes atmosphériques en RBC ; ou alors d'évaluer leur potentiel de réduction des effets d'îlots de chaleur urbain, à partir des cas réelles de toitures vertes, suivant des observations, relevés sur le terrain, modélisations et simulations. Il serait aussi intéressant par exemple de mesurer le potentiel de gestion des eaux de pluie en comparant une toiture verte à une toiture classique, dans le cas où l'eau est récupérée pour des fonctions subalternes (toilettes, arrosage jardin, etc.), ceci en tenant compte de tous les paramètres réels (climat, type d'habitation, nombre de personnes dans l'habitat, etc.

Au-delà de cette quantification, il est également indispensable d'évaluer les impacts environnementaux de ces services écosystémiques, comme cela a été le cas avec le bénéfice d'économie d'énergie. Tout cela dans le but de pouvoir mesurer l'impact que pourrait avoir l'implémentation des toitures vertes non seulement à l'échelle du bâtiment, mais aussi et surtout à l'échelle urbaine bruxelloise, sachant qu'il y a un réel enjeu pour les toitures vertes en RBC. Cependant, évaluer les impacts environnementaux des services écosystémiques des toitures vertes relève d'un verrou scientifique qui pourrait faire l'objet d'une recherche.

Par ailleurs, mesurer le potentiel d'implémentation des toitures vertes à l'échelle urbaine nécessite dès lors la prise en compte des aspects économiques et sociaux, au-delà de l'aspect environnemental. De ce fait, une analyse du coût du cycle de vie est nécessaire et permettra de quantifier en données monétaires, les impacts environnementaux des toitures vertes tout au long de leur cycle de vie. Aussi, une analyse sociale du cycle de vie est nécessaire afin de mesurer les impacts des toitures vertes liés par exemple aux effets psychosociaux sur la population. Cependant, la littérature montre qu'il y a un défi méthodologique quant à l'intégration des services écosystémiques dans les analyses du coût du cycle de vie et analyses sociales du cycle de vie. Ainsi, une perspective de recherche se dessine dans ce sens-là. Afin de connaître la performance globale des toitures vertes dans un contexte bruxellois, les approches environnementales, économiques et sociales doivent être prises en considération. Il pourrait de ce fait être mis en place un outil d'évaluation de durabilité intégré et orienté cycle de vie qui tiendrait compte de ces trois aspects, comme modèle utilisable par les bureaux d'étude et l'administration.

BIBLIOGRAPHIE

- Almusaed, A. (2011). Green roofs. Dans Almusaed, A. (ed.), *Biophilic and bioclimatic architecture* (pp. 187-204).
- Baumann, N. (2006). Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations. *Urban Habitats*, 4(1), 37-50.
- Berardi, U., Hoseini, G. A., et Hoseini, G. A. (2014). State-of-the-art analysis of environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-248.
- Berndtsson, J. C. (2009). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360.
- Best, B. B., Swadek K. S., et Burgess, L. T. (2015). Soil-based green roofs. Dans Sutton, R. (ed.), *Green roofs ecosystems* (139-174).
- Bianchini, F. et Hewage, K. (2012). How 'green' are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65.
DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.019
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, M. T., et Pullin, S. A. (2010). Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, 4(1), 27-36.
- Bruxelles Environnement. (2010). *Réaliser les toitures vertes*. Récupéré le 14-04-2015 de http://app.bruxellesenvironnement.be/guide_batiment_durable/docs/TER06_FR.pdf
- Bruxelles Environnement. (2011). *Les toitures vertes : principes techniques et contexte bruxellois*. Récupéré le 09-04-2015 de http://www.confederatiebouw.be/Portals/19/Cellule%20Energie%20Environnement/1.%20Facilitateur%20F.%20Luyckx%20toitures%20vertes_CCBC.pdf
- Bruxelles Environnement. (2013). *Étude cost optimum Mise en oeuvre de l'article 5 §2 de la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments - Rapport à la Commission relatif l'établissement de niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique*. Bruxelles.
- Bruxelles Environnement. (2014). *Primes B5 – Toiture verte*. Récupéré le 05-02-2016 de http://www.environnement.brussels/sites/default/files/primes-premies/FORM_B5_FR_2015.pdf
- Carter, T., et Jackson, C. R. (2007). Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, 80(1-2), 84-94.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., Davison, J. B. (2010). Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582-1591.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2011). *EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2013). *EN 15804: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*.

- CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction). (2000). *Note d'information technique 215 – La toiture plate : composition, matériaux, réalisation, entretien*. Bruxelles.
- CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction). (2006). *Note d'information technique 229 - les toitures vertes*. Bruxelles.
- Charlot-Valdieu, C., et Outrequin, P. (2013). *Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement*. Paris : Le Moniteur. 315 p.
- Chenani, B. S., Lehvävirta, S., et Häkkinen, T. (2014). Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 90, 153-162.
- Cook-Patton, C. S., et Bauerle, L. T. (2012). Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management*, 106, 85-92.
- De la Bretesche, B. (2000). *La méthode APTE. Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*. Paris : Pretelles. 238 p.
- Friedman, A. (2012). Green roofs. Dans Friedman, A. (ed), *Fundamentals of sustainable dwellings* (pp. 183-197).
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., et Evola, G. (2015). A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*, 90, 71-81.
- Getter, L. K., et Rowe, D. B. (2006). The role of Extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). (2013). *The physical science basis*. Récupéré le 16-04-2016 de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment – Operational guide to the ISO Standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 688 p.
- Hashemi, G. S. S., Mahmud, B. H., et Ashraf, A. M. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52. 669-679.
- Hoseini, G. A., Dahlan, D. N., Berardi, U., Hoseini, G. A., Makaremi, N., et Hoseini, G. M. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 1-17.
- IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique). (2015). *Vigilance climatique 2015*. Récupéré le 0-04-2016 de [http://www.meteo.be/resources/20150508vigilance-oogklimaat/vigilance climatique IRM 2015 WEB FR BAT.pdf](http://www.meteo.be/resources/20150508vigilance-oogklimaat/vigilance%20climatique%20IRM%202015%20WEB%20FR%20BAT.pdf)
- ISO (International Standard Organization) 6946. (2007). *Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*.
- ISO 14040. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., et Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164.
- EC – JRC (European Commission – Joint Research Centre). (2010). *ILCD Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. Récupéré le 16-02-2016 de http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd_handbook-general_guide_for_lca-detailed_guidance_12march2010_isbn_fin.pdf

- Kosareo, L., et Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606-2613.
- Köhler, M., et Clements, A. M. (2012). Green Roof, Ecological Functions. Dans: Meyers R. A. (ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 282-306). London: Springer.
- La Roche, P., et Berardi, U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82, 492-504.
- Lee, K. E., Williams, J.H. K., Sargent, D. L. (2014). Living roof preference is influenced by plant characteristics and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 122, 152-159.
- Lee, Y. L., Lee, J. M., et Han, M. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, 152, 171-176.
- Li, D., Bou-Zeid, E., et Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*. 9(5). 1-16.
- Lundholm, J. T., et Peck, S. W. (2008). Introduction: frontiers of green roofs ecology. *Urban Ecosystems*, 11, 335-337.
- Martineau, G., et Samson, R. (2011). *Analyse de cycle de vie des impacts environnementaux découlant de l'implantation des mesures d'atténuation d'îlots de chaleur urbains*. Récupéré le 09-03-2016 de :
https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1322_ACVImpactsEnvironImplanMesuresAttenuÎlotsChaleurUrbains.pdf
- Mentens, J., Raes, D., et Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217-226.
- Metselaar, K. (2012). Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 49-55.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Récupéré le 24-03-2016 de
<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Nagase, A., et Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104(3-4), 256-363.
- Napolano, L., Menna, C., Asprone, C., Prota, A., et Manfredi, G. (2015). Life cycle environmental impact of different replacement options for a typical old flat roof. *Life Cycle Sustainability Assessment*, 20(5), 694-704.
- Nemry, F., et Uihlein, A. (2008). *Environmenral improvement potentials of residential buildings*. Récupéré le 18-04-2016 de <http://ccsl.iccip.net/jrc46667.pdf>
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., et Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719-729.
- Oberndorfer, L., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., et Rowe, B. (2007). Green roof's as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Oxford Journals*, 40(10), 823-833.
- ONU (Organisation des Nations Unies). 2014. Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes. Récupéré le 02-02-2016 de

- <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/world-urbanization-prospects.html>
- OVAM. (2013). *Profil environnemental des éléments de construction*. Récupéré le 08-04-2016 de <http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Profil-Environmental-2015.pdf>
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., et Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 89-102.
- Rowe, B. D. (2010). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2100-2110.
- RRU (Règlement Régional d'Urbanisme). (2006). *Titre 1 caractéristiques des constructions et de leurs abords*. Récupéré le 05-02-2016 de https://urbanisme.irisnet.be/pdf/RRU_Titre_1_FR.pdf
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C.H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., et Sulaiman, M. Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 233, 155-168.
- Sailor, J. D., Elley, B. T., et Gibson, M. (2011). Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates. Récupéré le 14-04-2016 de http://www.brikbases.org/sites/default/files/best3_sailor.pdf
- Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., et Pressnail, K. (2006). Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environmental science & technology*, 40(13), 4312-4316.
- Shimmin, H. (2012). *The vertical garden city and the transformative power of roof gardens* (Thèse de Master, Université de New York). Récupéré le 01-02-2016 de <http://www.heathershimmin.com/wp-content/uploads/2012/07/Thesis1.pdf>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., et Smith, C. L. (2012). Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in UK city. *Atmospheric Environment*, 61, 283-293.
- Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., et Berreta, C. (2015). The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering*, 85, 159-172.
- Susca, T. (2012). Multiscale approach to life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 951-962.
- Susca, T., Gaffin, S.R., et Dell'Osso, G.R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2119-2126.
- Sutton, R. K., Harrington, A. J., Skabelund, L., MacDonagh, P., Coffman, R. R., et Koch, G. (2012). Prairie-based green roofs: literature, templates, and analogs, *Journal of Green Building*, 7(1), 143-172.
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57. 740-752.
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., et Wörtche, H. (2014). Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Building and Environment*, 77, 88-100.
- Wittsock, B., Gantner, J., Lenz, K., Saunders, T., Anderson, J., Carter, C., Gyetvai, Z., Kreißig, J., Braune, A., Lasvaux, S., Bosdevigie, B., Bazzana, M., Schiopu, N., Jayr, E., Nibel, S., Chevalier, J., Hans, J., Fullana-i-Palmer, P., Gazulla, C., Mundy, J.-A., Barrow-Williams, T.,

- et Sjöström, C. (2012). *EeBGuide guidance document – Part B :Buildings – Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*. Récupéré le 18-04-2016 de http://www.eebguide.eu/eeblog/wp-content/uploads/2012/10/EeBGuide-B-FINAL-PR_2012-10-29.pdf
- Whittinghill, J. L., Rowe, D. B., Andresen, A. J., et Cregg, M. B. (2015). Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs. *Urban Ecosystems*, 18, 13-29.
- Yang, H. S., Kang, J., et Choi, S. M. (2012). Acoustic effects of green roofs systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, 50, 44-55.
- Yang, W., Wang, Z., Cui, J., Zhu, Z., et Zhao, X. (2015). Comparative study of the thermal performance of novel green (planting) roofs against other existing roofs. *Sustainable Cities and Society*, 16, 1-12.
- Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., Sun, J., et Liu, Jingtao. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*, 144, 142-150.
- Zeller, V., Thyssen, N., Degrez, M., D'Ans, P., et de Boever, L. (2015). *Life cycle assessment of wood buildings*. Récupéré le 18-04-2016 de http://www.enecobois.be/useruploads/files/Enecobois%20report_4_LCA%20building_20160126.pdf

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse fonctionnelle de la toiture classique et de la toiture verte.

Une analyse fonctionnelle a été réalisée afin de mieux s'approprier des différentes fonctions des toitures, leur hiérarchie et lesquelles seront abordées dans le cadre de cette étude (cf. figure 28 et tableau 26). La méthodologie de cette analyse fonctionnelle repose sur la méthode APTE (de la Bretesche, 2000). Dès qu'il y a une relation entre l'élément principal (la toiture) et au moins deux milieux extérieurs, on parle de fonctions principales. Ces dernières peuvent être vues comme des raisons qui justifient la mise en place d'une toiture verte. En revanche, toute relation entre l'élément principal et un seul milieu extérieur sont des fonctions complémentaires simples dites de contraintes. Elles font référence à d'autres fonctions de services qui peuvent être réalisées par la toiture verte.

Tableau 26 : Analyse fonctionnelle d'une toiture

Fonctions de services		TC*	TV*
FP1	Protéger l'intérieur du bâtiment contre les intempéries	+	+
FP2	Assurer une isolation thermique du bâtiment / permettre de réaliser des économies d'énergie	+	++
FP3	Réduire les problèmes de drainage et risques d'inondations / réduire le taux d'écoulement au sol des eaux de pluie		+
FP4	Assurer une isolation acoustique du bâtiment	+	++
FC1	Réduire la pollution de l'air en milieu urbain / améliorer la qualité de l'air		+
FC2	Réduire les effets d'îlot de chaleur urbain / réduire la température ambiante		+
FC3	Valoriser la biodiversité en milieu urbain / créer un habitat pour les espèces animales et végétales		+
FC4	Permettre un prolongement de la durée de vie des matériaux de la toiture		+
FC5	Permettre une fréquentation par des personnes**		+
FC6	Garantir un aspect visuel esthétique + effets psycho sociologiques positifs		+

*TC : toiture classique ; TV : toiture verte

**dépend des aménagements supplémentaires

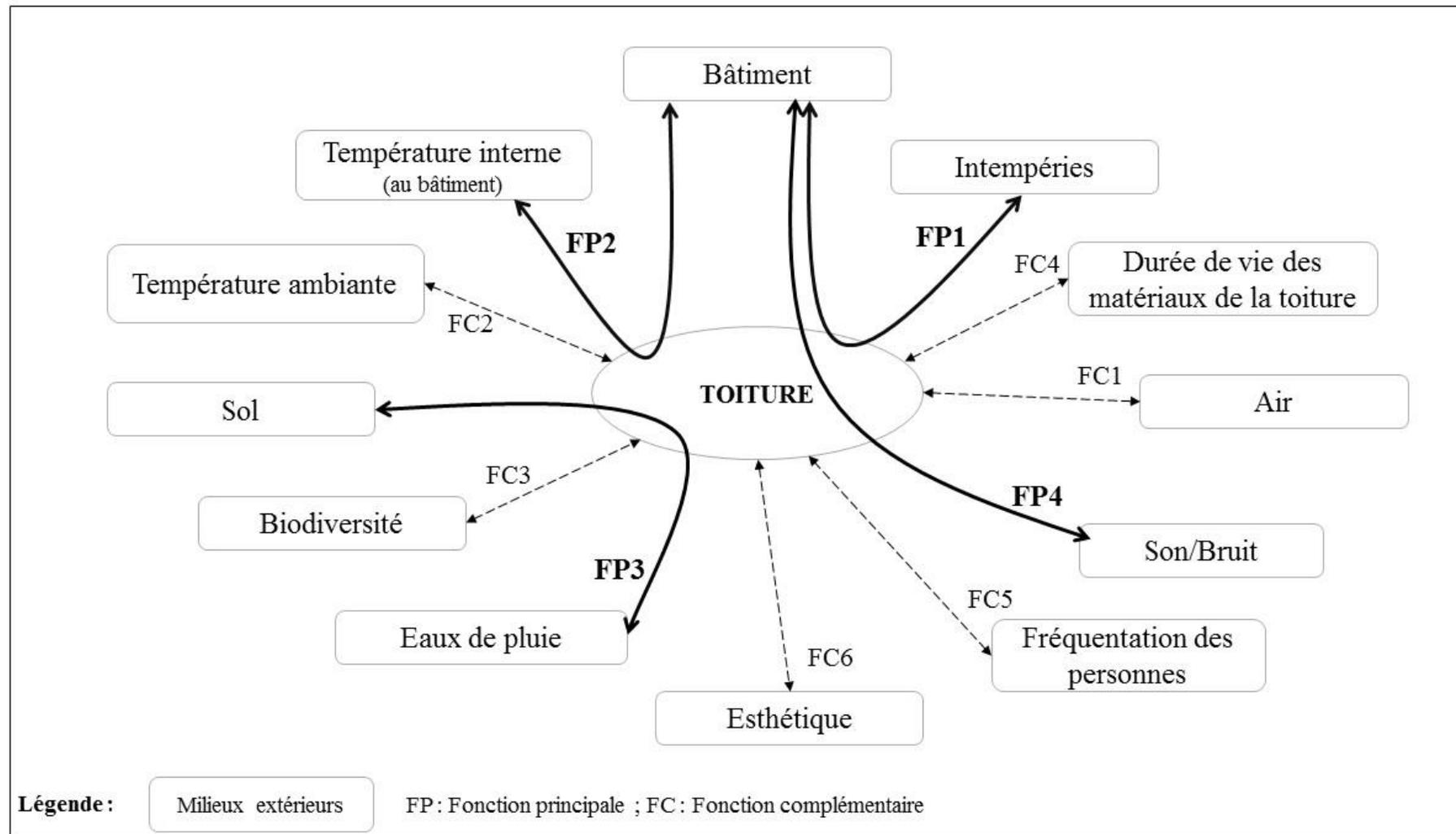


Figure 28 : Analyse fonctionnelle d'une toiture

Annexe 2 : Résultats de la caractérisation des impacts de chaque toiture par indicateur

Tableau 27 : Résultats de la caractérisation des impacts de chaque toiture par indicateur

	Réchauffement Climatique kg CO ² eq. / m ²			Réduction de la couche d'ozone kg CFC 11 eq. / m ²			Acidification kg SO ₂ eq. / m ²			Eutrophisation kg (PO ₄) ³⁻ eq. / m ²			Formation d'ozone photochimique kg Ethene eq. / m ²			Épuisement des ressources naturelles minérales kg Sb eq. / m ²			Épuisement des ressources naturelles fossiles MJ / m ²		
	TC1*	TV*	TC2*	TC1	TV	TC2	TC1	TV	TC2	TC1	TV	TC2	TC1	TV	TC2	TC1	TV	TC2	TC1	TV	TC2
Plancher	30,3	30,3	30,3	1,6E-06	1,6E-06	1,6E-06	0,09	0,09	0,09	0,03	0,03	0,03	4,1E-03	4,1E-03	4,1E-03	6,1E-05	6,1E-05	6,1E-05	186,5	186,5	186,5
Pare vapeur	5,8	5,8	5,8	3,1E-09	3,1E-09	3,1E-09	0,02	0,02	0,02	1,8E-03	1,8E-03	1,8E-03	1,2E-03	1,2E-03	1,2E-03	6,5E-07	6,5E-07	6,5E-07	196,1	196,1	196,1
Isolant	15,2	13,2	13,2	1,4E-07	1,3E-07	1,3E-07	0,07	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02	3,3E-03	2,9E-03	2,9E-03	1,7E-05	1,5E-05	1,5E-05	266,7	232,1	232,1
Étanchéité	4,2	4,2	4,2	9,1E-07	9,1E-07	9,1E-07	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	1,1E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	119,5	119,5	119,5
Protection mécanique	0	9,7	0,0	0	5,2E-09	0	0	0,04	0	0	3,1E-03	0	0	2,0E-03	0	0	1,1E-06	0	0	326,8	0
Drainage + filtre	0	4,7	0,0	0	2,1E-09	0	0	0,01	0	0	1,6E-03	0	0	1,0E-03	0	0	1,4E-07	0	0	166,5	0
Substrat	0	1,8	0,0	0	1,4E-07	0	0	0,01	0	0	2,1E-03	0	0	4,4E-04	0	0	3,7E-06	0	0	26,9	0
Production (A1-A3)	55,5	69,7	53,5	2,6E-06	2,8E-06	2,6E-06	0,21	0,26	0,20	0,06	6,2E-02	0,05	9,8E-03	1,3E-02	0,01	2E-04	2E-04	2E-04	768,8	1254,3	734,1
Transport (A4)	1,5	2,7	1,5	2,7E-07	4,9E-07	2,7E-07	0,01	0,01	0,01	1,4E-03	2,6E-03	1,4E-03	2,5E-04	4,5E-04	2,5E-04	4,1E-06	7,4E-06	4,1E-06	2,4E+01	4,3E+01	2,3E+01
Construction	1,5	2,7	1,47	2,7E-07	4,9E-07	2,7E-07	0,01	0,01	0,01	1,4E-03	2,6E-03	1,4E-03	2,5E-04	4,5E-04	2,5E-04	4,1E-06	7,4E-06	4,1E-06	23,5	42,5	23,5
Consommation énergétique (B6)	553,0	580,3	586,9	3,8E-05	3,9E-05	4,1E-05	1,9	2	2,02	0,32	0,33	0,38	0,12	0,13	0,13	2,5E-04	2,6E-04	2,7E-04	8867,0	9306,5	9404,2
Usage	553	580,3	586,9	3,8E-05	3,9E-05	4,1E-05	1,9	2	2	0,32	0,33	0,38	0,12	0,13	0,13	2,5E-04	2,6E-04	2,7E-04	8867	9306,5	9404,2
Démolition (C1)	0,70	0,37	0,70	8,7E-08	4,6E-08	8,7E-08	0,01	2,8E-03	0,01	1,3E-03	6,6E-04	1,3E-03	1,4E-04	7,2E-05	1,4E-04	1,1E-07	5,8E-08	1,1E-07	10,3	5,4	10,3
Transport (C2)	0,97	1,71	0,97	1,8E-07	3,2E-07	1,8E-07	3,9E-03	0,01	3,9E-03	9,4E-04	1,7E-03	9,4E-04	1,6E-04	2,9E-04	1,6E-04	2,7E-06	4,7E-06	2,7E-06	15,4	27,2	15,4
Préparation des déchets (C3)	0,08	0,08	0,08	2,0E-08	2,0E-08	2,0E-08	2,1E-04	2,1E-04	2,1E-04	5,6E-04	5,6E-04	5,6E-04	1,2E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07	1,1	1,1	1,1
Mise en décharge (C4)	0,08	0,08	0,08	2,3E-08	2,4E-08	2,3E-08	4,4E-04	4,5E-04	4,4E-04	1,5E-04	1,6E-04	1,5E-04	1,6E-05	1,7E-05	1,6E-05	9,2E-08	9,6E-08	9,2E-08	2	2,1	2
Fin de Vie	1,83	2,23	1,82	3,1E-07	4E-07	3,1E-07	0,01	0,01	0,01	2,9E-03	3E-03	2,9E-03	3,3E-04	3,9E-04	3,3E-04	3,1E-06	5,1E-06	3,1E-06	28,9	35,8	28,9
Charges et bénéfiques au-delà du système (D)	5,1	4,5	4,0	-6,7E-07	-1,0E-06	-6,1E-07	-0,02	-0,05	-0,02	-0,02	-0,04	-0,02	-1,4E-03	-3,0E-03	-1,4E-03	-1,6E-05	-2,0E-05	-1,5E-05	-144,1	-405,3	-140,8
Total	616,9	659,4	647,7	4,0E-05	4,2E-05	4,3E-05	2,1	2,2	2,2	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	4,4E-04	4,5E-04	4,6E-04	9544,0	10233,8	10049,9

*TC1 = toiture classique à performance énergétique identique à celle de la toiture verte (TV) ; TC2 = toiture classique à performance énergétique différente à celle de la toiture verte

Annexe 3 : principaux procédés contributeurs aux impacts liés à l'épuisement des ressources natures fossiles et au réchauffement climatique

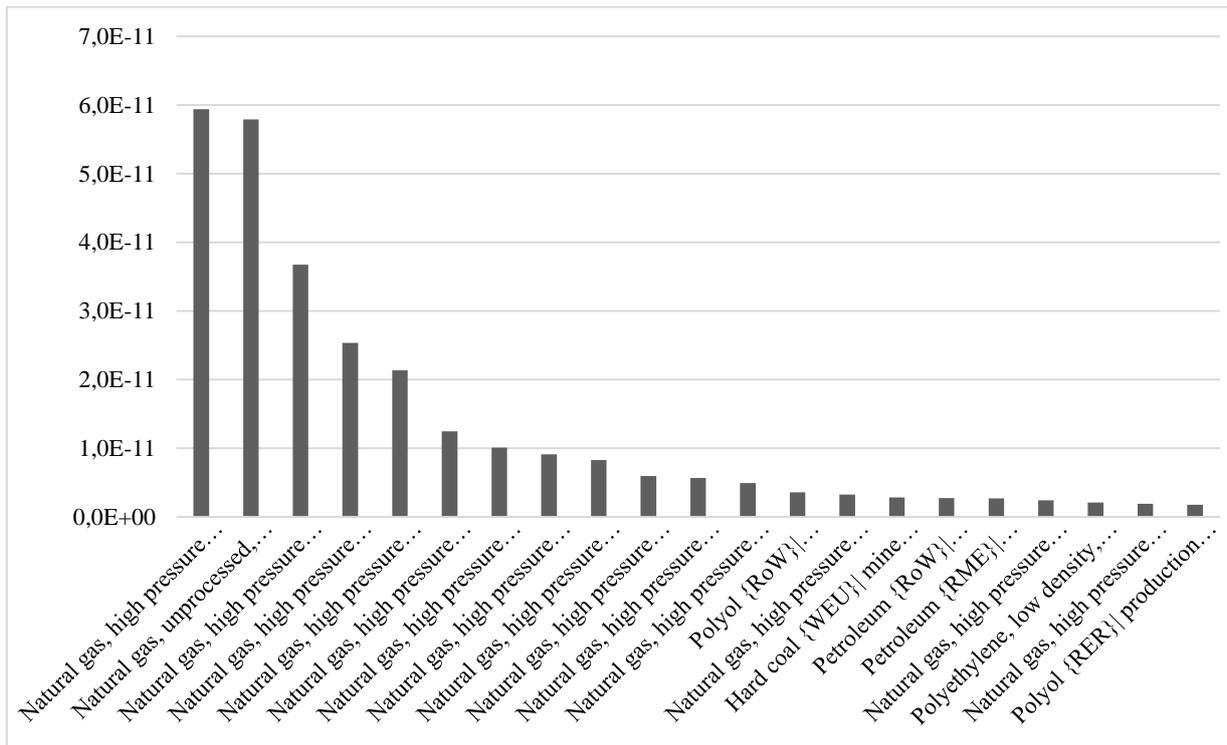


Figure 29 : Procédés contributeurs à l'épuisement des ressources naturelles fossiles par ordre décroissant

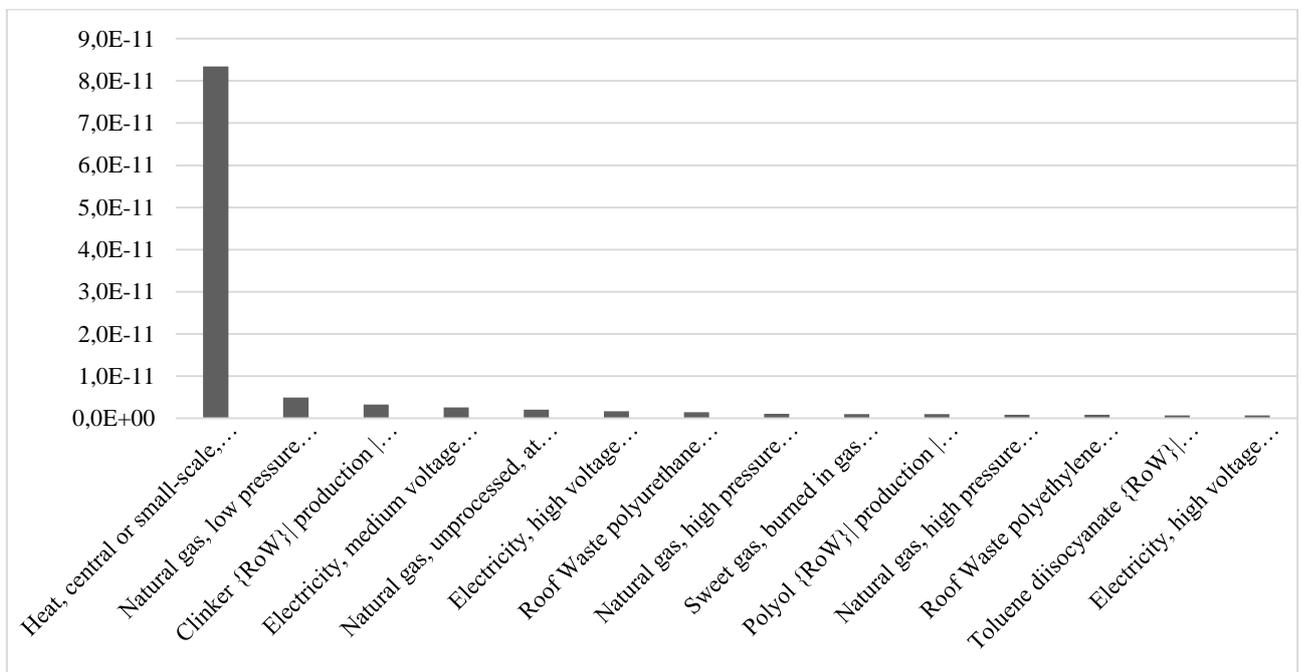


Figure 30 : Procédés contributeurs au réchauffement climatique par ordre décroissant