

---

**Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Évaluation du potentiel d'intégration architecturale du photovoltaïque sous le climat belge : Analyse d'un bâtiment tertiaire comportant des Building Integrated Photovoltaics**

**Auteur :** Decrop, Catherine

**Promoteur(s) :** Reiter, Sigrid; Leclercq, Pierre

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/14350>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---

Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Année académique 2021 - 2022



# Évaluation du potentiel d'intégration architecturale du photovoltaïque sous le climat belge

Analyse d'un bâtiment tertiaire comportant des *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*



Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte par Catherine Decrop

**Promotrice :** Sigrid Reiter

**Co-promoteur :** Pierre Leclercq

**Membres du jury :** Shady Attia

Clémentine Schelings

## ABSTRACT

In order to reduce the impact of the construction sector on the environment, the Energy Building Performance Directive is getting increasingly reinforced. In a world where Zero Energy Building (ZEB) is becoming the norm, it is important for architects to be aware of the possibilities they have. Whether in renovation or for a new construction, the integration of a renewable energy production system that complies with the constraints of the site is a way to reduce the primary energy consumption of a building. Furthermore, with the recent energy crisis, solutions allowing energy independence are in everyone's interest.

This work focuses on the architectural integration of photovoltaics in the Belgian climate. Beyond usual solar panels, there are active construction materials that produce electricity while assuring the external envelope function: Building Integrated Photovoltaics (BIPV). The purpose of this research is to evaluate their potential but also the barriers to their implementation. Through an in-depth literature review, available technologies and existing projects with BIPVs are explored in order to get a first understanding of the challenges of this innovative technique. The analysis of a tertiary building with BIPVs in Brussels provides a detailed investigation of the benefits and constraints identified in practice, thanks to the feedback of various actors in the project construction. Finally, a survey conducted among construction professionals in Wallonia and in Brussels highlights the knowledge, experience and opinion of the public likely to use BIPVs.

The results show that architectural integration of photovoltaics has a great potential under certain conditions. Although it is far from being an ideal solution applicable everywhere, it can reduce primary energy demand in large buildings occupied all day long, and avoid the associated greenhouse gas emissions. Most of project designers are currently unaware of this technique, and even if in the survey they seem globally in favour of BIPVs, clients do not yet appear to be willing to spend the budget involved. Aesthetics is also a subject of debate among project developers, although according to the experts in the case study, the subtle integration of photovoltaics into the architecture is more respectful of the built environment.

## RÉSUMÉ

Afin de réduire l'impact du secteur de la construction sur l'environnement, les réglementations concernant la Performance Énergétique des Bâtiments ne font que se renforcer. Dans un monde où les bâtiments zéro-énergie vont devenir la norme, il est important de connaître les possibilités qui s'offrent aux architectes. Que ce soit en rénovation ou en construction neuve, l'intégration d'un système de production d'énergie renouvelable qui s'adapte aux contraintes du site est un moyen de réduire l'énergie primaire consommée par un bâtiment. En outre, avec la récente crise de l'énergie, les solutions permettant l'indépendance énergétique sont dans l'intérêt de chacun.

Ce travail s'intéresse plus particulièrement à l'intégration architecturale du photovoltaïque sous le climat belge. Au-delà des panneaux solaires classiques, il existe des matériaux de construction actifs qui produisent de l'électricité tout en jouant le rôle d'enveloppe extérieure du bâtiment : les *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV). L'objectif poursuivi dans cette recherche est d'évaluer leur potentiel, mais aussi les freins à leur utilisation. À travers un état de l'art approfondi, les technologies disponibles et les projets déjà réalisés avec des BIPV sont examinés afin d'avoir une première compréhension des enjeux de cette technique innovante. L'analyse d'un immeuble tertiaire comportant des BIPV à Bruxelles permet d'investiguer en détail les bénéfices et les contraintes relevées en pratique, grâce au retour d'expérience de différents acteurs de la construction du projet. Enfin, une enquête auprès des professionnels de la construction en Wallonie et à Bruxelles met en évidence la connaissance, l'expérience et l'opinion du public susceptible d'employer les BIPV.

Les résultats indiquent que l'intégration architecturale du photovoltaïque a beaucoup de potentiel à certaines conditions. Loin d'être la solution idéale applicable partout, elle permet néanmoins de réduire la demande en énergie primaire dans les bâtiments de grande ampleur occupés durant la journée, et d'éviter les émissions de gaz à effet de serre associées. Les concepteurs de projet sont actuellement peu informés sur cette technique, et bien qu'ils soient généralement favorables aux BIPV, les clients ne semblent pas encore prêts à consacrer le budget que cela représente. L'aspect esthétique fait également débat parmi les auteurs de projets, même si selon les experts du cas concret étudié, l'intégration discrète de cellules photovoltaïques à l'architecture permet de mieux respecter l'environnement construit.

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier la personne qui m'a guidée tout au long de la réalisation de ce travail, ma promotrice Sigrid Reiter, pour le temps qu'elle m'a accordé, pour sa confiance et ses encouragements. Je remercie aussi mon co-promoteur Pierre Leclercq pour son soutien et ses conseils avisés.

J'aimerais remercier également les membres de mon jury, Shady Attia et Clémentine Schelings, pour la patience et l'intérêt qu'ils manifesteront lors de la lecture de ces pages. Plus particulièrement, je suis reconnaissante envers C.Schelings pour son aide quant à la réalisation et la validation du questionnaire.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont permis de faire avancer cette recherche. Aux interviewés Jean-Didier Steenackers, Guy Standaert, Patrick ibens et Eric Bloyaert, pour le temps qu'ils ont consacré à me transmettre des informations enrichissantes sur le cas d'étude. À Benedicte Kruijjer, pour sa disponibilité et pour son organisation des interviews des usagers et de la visite du bâtiment étudié. Aux usagers concernés, restés anonymes, pour le partage de leur point de vue. À toutes les personnes qui ont répondu à mes e-mails, et plus spécialement à Sébastien La Fontaine et Maaïke Berckmoes, qui ont mis à ma disposition des documents essentiels. Enfin, aux architectes et ingénieurs qui ont participé à mon questionnaire, sans vous ce mémoire n'aurait jamais abouti.

Finalement, je remercie ma famille et mes proches, pour leur présence et leur soutien dans mon dernier travail en tant qu'étudiante.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contexte et problématique</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Questions de recherche</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Structure du travail</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Méthodes de recherche</b>	<b>5</b>
2.2.1. État de l'art	5
2.2.2. Analyse d'un cas d'étude	6
2.2.2.1. Sélection et justification du cas d'étude	7
2.2.2.2. Collecte des données	9
2.2.2.3. Méthode d'interview	9
2.2.2.4. Sélection des interviewés	10
2.2.2.5. Création d'un guide d'entretien	10
2.2.2.6. Création d'une première grille d'analyse	11
2.2.3. Enquête	12
2.2.3.1. Objectifs et public visé	12
2.2.3.2. Méthode utilisée pour élaborer et valider le questionnaire	12
2.2.3.3. Présentation du questionnaire final	14
<b>2.3. Schéma méthodologique détaillé</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 3 : ÉTAT DE L'ART</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Énergie solaire renouvelable</b>	<b>16</b>
3.1.1. L'énergie solaire	16
3.1.2. Les communautés d'énergie renouvelable	17
3.1.3. Évaluation du potentiel solaire des quartiers	18
<b>3.2. Les différents capteurs solaires</b>	<b>21</b>
3.2.1. Les panneaux photovoltaïques	21
3.2.2. Les capteurs thermiques	27
3.2.3. Les panneaux hybrides	28
3.2.4. Les modules intégrés au bâtiment	29
<b>3.3. BIPV : Le photovoltaïque intégré au bâtiment</b>	<b>30</b>
3.3.1. Approche technique	30
3.3.1.1. Technologies existantes	30
3.3.1.2. Aspects durables	38
3.3.1.3. Avis critique	43
3.3.2. Approche commerciale	45
3.3.2.1. Disponibilité commerciale	45
3.3.2.2. Aspects durables	46

3.3.2.3. Avis critique	49
3.3.3. Approche architecturale	50
3.3.3.1. Projets réalisés	50
3.3.3.2. Aspects durables	53
3.3.3.3. Avis critique	55
3.3.4. Analyse des trois approches	56
3.3.4.1. Tableau récapitulatif	56
3.3.4.2. Discussions	57
<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE D'UN CAS D'ÉTUDE</b>	<b>60</b>
<b>4.1. Fonctionnement du bâtiment</b>	<b>60</b>
4.1.1. Introduction	60
4.1.2. Calcul du productible photovoltaïque (ISSOL, 2016c)	62
4.1.2.1. Installation photovoltaïque	62
4.1.2.2. Spécificités techniques	63
4.1.2.3. Calcul de la production	63
4.1.3. Performance énergétique du bâtiment (VK engineering, 2013)	66
4.1.3.1. Objectif Zéro Énergie Nette	66
4.1.3.2. Stratégie de conception	67
4.1.3.3. Bilan de la PEB	69
<b>4.2. Interviews des acteurs de la construction du projet</b>	<b>70</b>
4.2.1. Entretien	70
4.2.2. Traitement des données	70
4.2.3. Analyse des données	70
4.2.4. Synthèse des résultats des interviews avec les acteurs	81
<b>4.3. Interview des usagers</b>	<b>83</b>
4.3.1. Entretien	83
4.3.2. Traitement des données	83
4.3.3. Analyse des données	83
4.3.4. Synthèse des résultats des interviews des usagers	86
<b>CHAPITRE 5 : ENQUÊTE AUPRÈS DES ARCHITECTES</b>	<b>87</b>
<b>5.1. Réponses au questionnaire</b>	<b>87</b>
5.1.1. Taux de participation	87
5.1.2. Profil des répondants	88
<b>5.2. Analyses transversales</b>	<b>89</b>
5.2.1. Traitement des données	89
5.2.2. Analyse des données	89
<b>5.3. Synthèse des résultats du questionnaire</b>	<b>97</b>
<b>CHAPITRE 6 : DISCUSSION DES RÉSULTATS</b>	<b>99</b>
<b>6.1. Comparaison des résultats</b>	<b>99</b>
6.1.1. Potentiel des BIPV	99
6.1.2. Freins à l'utilisation de BIPV	100

<b>6.2. Discussions</b>	<b>101</b>
6.2.1. Potentiel du photovoltaïque intégré à l'architecture (BIPV) d'un point de vue énergétique et esthétique	101
6.2.3. Freins à l'application à grande échelle des BIPV	105
<b>CHAPITRE 7 : CONCLUSION</b>	<b>108</b>
<b>7.1. Synthèse des travaux</b>	<b>108</b>
<b>7.2. Contributions</b>	<b>108</b>
<b>7.3. Limites</b>	<b>109</b>
<b>7.4. Perspectives</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>111</b>
<b>Livres et Articles scientifiques</b>	<b>111</b>
<b>Ressources internet</b>	<b>114</b>
<b>Autres documents</b>	<b>118</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b>	<b>119</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b>	<b>121</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>122</b>
<b>Annexe 1 : Guide d'interview des entretiens semi-dirigés</b>	<b>122</b>
<b>Annexe 2 : Formulaire de consentement pour les interviews des usagers</b>	<b>123</b>
<b>Annexe 3 : Questionnaire aux architectes</b>	<b>125</b>
<b>Annexe 4 : Transcription des interviews dans la grille d'analyse</b>	<b>128</b>
<b>Annexe 5 : Tableaux d'analyse des interviews</b>	<b>143</b>



## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### 1.1. Contexte et problématique

Un des défis majeurs auquel nous faisons face à l'heure actuelle est certainement celui de freiner le réchauffement climatique. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, le secteur de l'énergie est responsable de trois quarts des émissions de gaz à effet de serre (IEA, 2021). Afin de limiter le réchauffement de la planète à long terme, il est primordial de réduire les émissions de dioxyde de carbone d'ici 2050. L'Accord de Paris, adopté par près de 190 parties lors de la COP 21 en décembre 2015, vise à limiter la hausse de la température moyenne sur la planète à 2° par rapport aux niveaux préindustriels, et à entreprendre des efforts pour la restreindre à 1,5°. L'Europe pousse ses objectifs encore plus loin et vise la neutralité carbone d'ici 2050, avec une économie sans émission nette de gaz à effet de serre (European Commission, 2018). Pour cela, un changement radical est requis dans la manière de produire, transporter et consommer de l'énergie. La pandémie du Covid-19 a permis d'amorcer un tournant, bien que la baisse d'émission constatée n'ait été que temporaire. Cependant, elle a marqué un arrêt, et offre une nouvelle opportunité aux industries de se reconstruire économiquement en s'alignant dans les objectifs « Net Zero Emissions ». Ceux-ci visent à limiter le recours aux énergies fossiles, pour qu'en 2050, 90% de l'électricité générée mondialement provienne des énergies renouvelables, dont 70% serait fournie par le solaire et l'éolien (IEA, 2021).

Les objectifs de l'UE en matière de réduction de gaz à effet de serre prévoient que d'ici 2030, il y ait une réduction d'au moins 40% des émissions de GES par rapport au niveau de 1990 (European Commission, 2018). D'ici 2050, c'est une baisse de 80 à 95% qui est visée. La décarbonisation se ferait principalement grâce aux énergies renouvelables et au maintien du nucléaire. Cela est possible en respectant la stratégie établie sur la feuille de route « Énergie » établie en 2011 (Renouvelle, 2012) dont les priorités sont :

- La réduction de la consommation d'énergie grâce à une meilleure efficacité énergétique ;
- L'augmentation de la part des énergies renouvelables (10% actuellement, 32% en 2030 et de 40 à 62% en 2050) ;
- Le maintien de la consommation de la part du gaz naturel (25% de l'énergie consommée) ;
- La diminution progressive du nucléaire (15%) ;
- La forte réduction de la part du pétrole et du charbon.

Ces stratégies pour passer vers un monde décarboné et plus durable concernent également le secteur de la construction. Celui-ci est par ailleurs responsable de 39% des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie (UNEP, 2019). L'impact du secteur de la construction est considérable et des efforts doivent être faits pour le réduire. Le « Net Zero Energy Building » est une solution pour respecter les engagements climatiques de l'Europe. L'objectif est que 85% des bâtiments soient zéro carbone d'ici 2050 (IEA, 2021). On mise avant tout sur la rénovation pour plus d'efficacité énergétique, et sur les communautés d'énergie renouvelable pour une meilleure gestion de l'énergie produite localement.

En dehors des enjeux climatiques, la transition énergétique s'inscrit également dans un contexte socio-économique particulier. En effet, les coûts de l'énergie ne cessent d'augmenter actuellement, depuis la reprise économique après la pandémie de Covid-19 (European Commission, 2021). Plus particulièrement, c'est le prix du gaz qui a connu une envolée, ce qui impacte également le prix de l'électricité qui est en partie produite grâce au gaz. Le conflit géopolitique entre la Russie et l'Ukraine

aggrave encore la situation, et rend le marché de l'énergie instable pour l'Union Européenne dont 40% du gaz importé provient de la Russie. Il devient donc primordial pour l'Europe d'atteindre l'indépendance énergétique, afin d'éviter la flambée des prix pour les consommateurs vulnérables, et d'améliorer la résilience économique contre de futurs chocs (European Commission, 2021).

Dans sa quête pour la neutralité carbone, la Belgique s'était fixée comme objectif pour 2020 d'atteindre les 13% d'énergie renouvelable. Les derniers chiffres communiqués par Energie Commune (2018) donne une production de 9,4% de renouvelable en 2018. Cette production concerne essentiellement des usages d'électricité renouvelable et de chaleur renouvelable, tandis que le transport renouvelable ne constitue qu'une faible part (16%). En revanche, les chiffres sont à jour pour le mixte électrique belge. En 2021, notre électricité provenait pour 50% du nucléaire, 25% du gaz et 25% de sources renouvelables. Une grande partie de notre électricité est donc décarbonée, même si le nucléaire n'est pas une solution optimale.

En ce qui concerne le secteur de la construction, la réglementation Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) vise à but réduire la consommation en énergie primaire (combustible fossile ou uranium) des bâtiments. La réglementation s'axe sur trois domaines : la qualité de l'enveloppe, l'efficacité des systèmes et des auxiliaires et le recours aux énergies renouvelables (Wallonie énergie SPW, 2016). Les normes sont devenues de plus en plus strictes ces dernières années pour intensifier le changement. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021, tous les bâtiments neufs doivent être « Q-ZEN », c'est-à-dire à consommation quasiment nulle (Espec  $\leq 85$  kWh/m<sup>2</sup>.an, correspondant au label PEB A), autrement appelé "NZEB" (Nearly Zero Energy Building). Il s'agit d'une exigence minimale, mais il est possible d'atteindre de plus hautes performances, avec les bâtiments passifs. Avant 2020, on ne considérait pas la production d'énergie renouvelable pour le certificat « bâtiment passif ». Aujourd'hui, dans le cadre de la transition énergétique, la certification évolue afin de favoriser les constructions qui intègrent des systèmes de production d'énergie pour compenser leur consommation. Un des systèmes idéaux pour la production à petite échelle, tout en étant assez compact, est le photovoltaïque (PV). Les surfaces extérieures du bâtiment peuvent ainsi être directement exploitées au bénéfice de celui-ci. La figure ci-dessous illustre les trois différents labels qui existent pour les bâtiments passifs : le Passif Classique, le Passif Plus ou bâtiment zéro-énergie, et le Passif Premium ou bâtiment à énergie positive, qui produit plus d'énergie que ce qu'il n'en consomme (Maison Passive, 2020a).





LABELS	BNE [kWh/m <sup>2</sup> .an]	Étanchéité [vol/h]	Surchauffe [%]	Consommation d'EPR <sup>1</sup> [kWh/m <sup>2</sup> <sub>SRT</sub> .an]	Production d'EPR <sup>2</sup> [kWh/m <sup>2</sup> <sub>su</sub> .an]
				$\leq 60$	-
	$\leq 15$	$\leq 0,6$	$\leq 5$	$\leq 45$	$\geq 60$
				$\leq 30$	$\geq 120$
	$\leq 25$	$\leq 1^*$	$\leq 5$	$\leq 80$	-

Figure 1 : Critères à respecter pour obtenir les labels Passifs Classiques, Plus, Premium et rénovation à partir du 1er janvier 2020. Source : Maison Passive, 2020a

Dans ce contexte, on comprend que le secteur du bâtiment a un rôle majeur dans la transition vers un monde plus durable, et que l'intégration d'énergie renouvelable est un moyen clef pour y arriver.

## 1.2. Objectifs

L'objectif général de ce travail de fin d'études est d'étudier une des manières de réduire la consommation d'énergie primaire d'un bâtiment en se concentrant sur la solution de l'intégration d'un système de production d'énergie renouvelable. Dans un monde où les bâtiments à basse énergie deviennent la norme, il est important d'explorer les possibilités qui s'offrent aux architectes pour atteindre l'objectif zéro-énergie. Le photovoltaïque (PV) se prêtant particulièrement bien à l'installation sur des constructions, c'est sur ce système que ce travail se focalisera.

Dans le contexte actuel de transition énergétique, le PV se développe de plus en plus dans nos paysages, et plus particulièrement, sur nos bâtiments. Mais comment faire pour que cette union soit harmonieuse ? Cette recherche a pour but d'étudier la façon dont on peut intégrer le PV en respectant les enjeux de l'architecture. *Utilitas, firmitas, venustas*, nous disait Vitruve, sont les trois qualités indissociables et indispensables de la conception architecturale. Le premier concept renvoie à l'utilité ou l'usage du bâtiment. Celui-ci a depuis toujours un rôle d'abri protecteur, et est construit pour assurer une fonction. Le deuxième concerne la solidité, car l'édifice doit être durable dans le temps. Enfin, le troisième concept considère l'enjeu esthétique, puisque le bâtiment s'inscrit dans un contexte, qu'il tente d'intégrer harmonieusement. L'architecture, depuis toujours, relie l'art et la technique, c'est pourquoi ces composantes sont primordiales dans l'analyse de nouvelles solutions architecturales.

Le déploiement du PV s'inscrit également dans les objectifs du Développement Durable. C'est pourquoi tout au long du travail, l'analyse sera menée à la lumière des aspects environnementaux, sociaux et économiques.

Finalement, le contexte climatique considéré dans cette recherche est celui de la Belgique. Le pays n'étant pas réputé pour ses apports solaires, il y a lieu d'y étudier la légitimité de la solution PV. En outre, la Belgique est un pays dense, fortement urbanisé. En effet, 98% de la population belge habite en ville, en comparaison avec les 56% de population urbaine mondiale (Banque mondiale, 2020). Et ce chiffre tend à augmenter puisque d'ici 2050, près de 68% de la population mondiale habitera en ville. C'est donc en milieu urbain que l'intégration architecturale du PV sera étudiée, là où l'espace est le plus contraignant, mais aussi là où le besoin d'énergie est le plus important. Dans la même logique, c'est particulièrement les bâtiments tertiaires qui nous intéressent, dont la demande en électricité coïncide en plus avec les apports solaires.

## 1.3. Questions de recherche

En lien avec ces objectifs, la recherche sera guidée par deux grandes questions auxquelles ce travail tente de répondre.

### **Quel est le potentiel du photovoltaïque intégré à l'architecture d'un point de vue énergétique et esthétique ?**

Cette question ne vise pas à quantifier le potentiel énergétique en simulant les apports solaires car des études semblables ont déjà été réalisées. Elle cible plutôt à aborder l'aspect architectural de l'intégration du PV à travers des études préexistantes et l'analyse d'un cas pratique.

### **Quels sont les freins à leur application à grande échelle ?**

Le but est de trouver les raisons pour lesquelles ce type d'intégration n'est pas répandu à l'heure actuelle, en enquêtant aussi bien dans la littérature que sur le terrain.

## CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

### 2.1. Structure du travail

La démarche générale de ce travail est illustrée ci-dessous. Je vais tenter de répondre aux questions de recherche à travers deux grandes parties principales : l'état de l'art et la partie pratique.

Dans l'état de l'art, le but est de faire le point sur les technologies existantes, en mêlant trois différentes approches. L'approche technique enquête sur le contenu des articles scientifiques, l'approche commerciale s'intéresse à la disponibilité des produits sur le marché, et enfin l'approche architecturale aborde quelques projets réalisés avec des BIPV. Ces diverses perspectives sont ensuite confrontées aux critères du développement durable pour évaluer la durabilité de ces technologies. J'apporterai un avis critique personnel pour clôturer les recherches de chaque approche.

Concernant la partie pratique, elle combine deux méthodes de recherche : l'analyse d'un cas d'étude et l'enquête auprès des architectes. Celles-ci vont permettre de retirer des informations sur le terrain, et donner lieu à des analyses quantitatives et qualitatives des résultats.

Finalement, les résultats provenant des deux grandes parties seront comparés afin de répondre aux questions de recherche. La discussion finale aboutira ensuite sur une conclusion générale du travail.

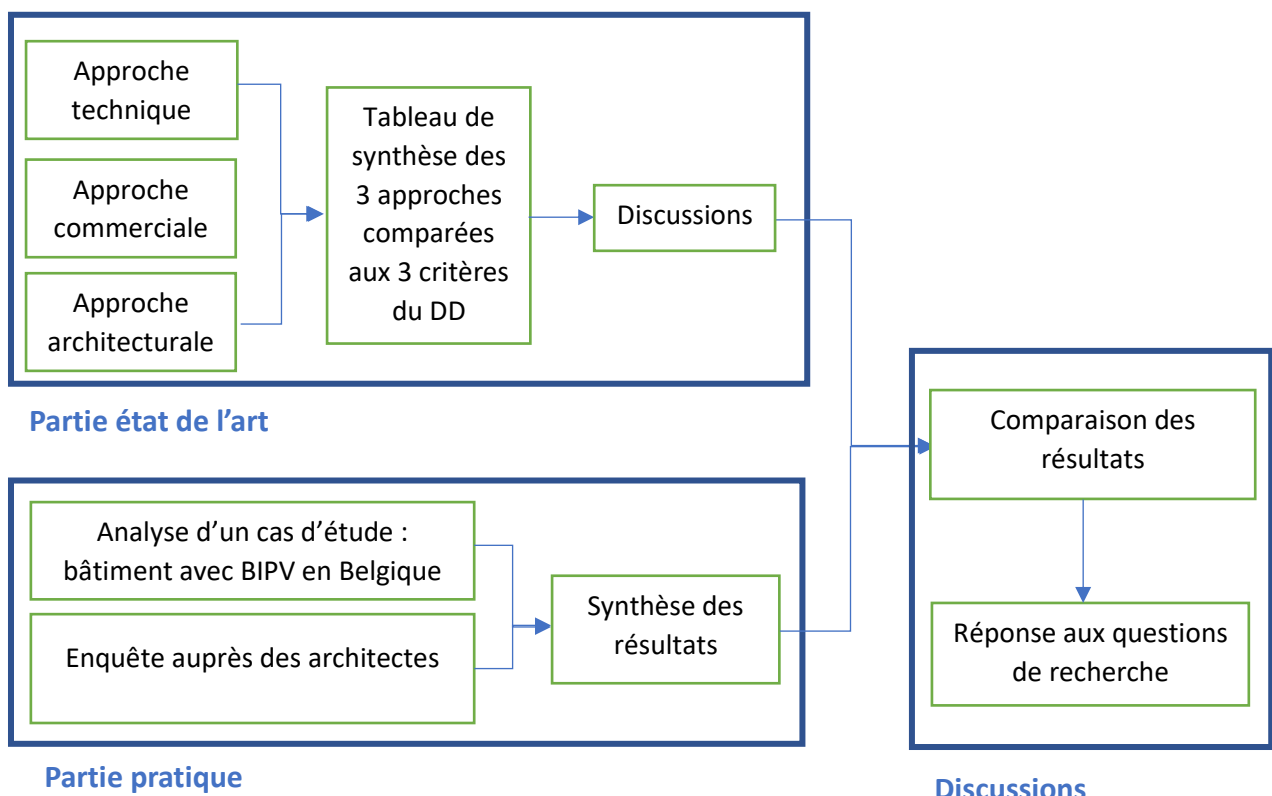


Figure 2: Schéma méthodologique simplifié

## 2.2. Méthodes de recherche

Afin de répondre aux questions de recherche, différents dispositifs spécifiques de recueil ou d'analyse des informations ont été utilisés. Ils sont présentés et expliqués ci-dessous. Les renseignements sur les différentes méthodes de recherche ont été trouvés dans le cahier méthodologique de C.Schelings (2021), dans les vidéos de S.Attia (2020) et dans l'ouvrage de Quivy & Van Campenhoudt (2006).

### 2.2.1. État de l'art

Le principal objectif de cette première partie théorique est d'apprendre ce qui a déjà été fait sur le sujet, partout dans le monde. Même si l'horizon mondial est considéré, des liens sont faits autant que possible avec la situation belge. Les recherches tentent d'apporter une réponse à la première question générale : **Quel est le potentiel du photovoltaïque intégré à l'architecture d'un point de vue énergétique et esthétique ?** La question est investiguée à travers les trois approches, qui apportent un regard différent sur le sujet. La littérature scientifique se veut technique et objective, tandis que les points de vue commerciaux et architecturaux sont empreints de subjectivité. Un avis critique personnel vient enrichir l'analyse des documents étudiés. Suite à cela, les manquements de la littérature sont identifiés, ce qui permet d'orienter la partie pratique de la recherche.

D'un point de vue méthodologique, la collecte de données est réalisée via différentes sources. La documentation scientifique provient en grande partie d'articles publiés sur Science Direct, mais aussi de livres empruntés à la bibliothèque. La communication par e-mail (à des membres de l'Université de Liège, à Edora...) a aussi été très utile pour obtenir des informations non disponibles publiquement. Des sites web sont également consultés pour les approches commerciales et architecturales.

Lors de la recherche d'articles scientifiques, les mots-clefs utilisés (*Building* et *Photovoltaics*) ont généré une grande quantité de résultats. Il a fallu faire le tri parmi ces données pour établir une liste de références pertinentes dans le cadre de la recherche. Les critères pour le choix de documents ont été les suivants :

- Thème : le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV)
- Date de parution : réalisés récemment (datant de 2009 au plus tôt)
- Source : Auteurs fiables (articles scientifiques, livres...)
- Localisation : International, mais le plus possible ciblé sur l'Europe, et sur la Belgique

Une grille de lecture a permis d'identifier les documents à choisir parmi cette liste : le but étant de remplir toutes les cases du tableau. Les trois approches citées plus tôt sont confrontées aux trois critères du développement durable, pour obtenir une vision globale sur le sujet.

	<b>Approche technique</b>	<b>Approche commerciale</b>	<b>Approche architecturale</b>
<b>Aspects économiques</b>			
<b>Aspects environnementaux</b>			
<b>Aspects sociaux</b>			

Tableau 1 : Grille de lecture croisant les critères nécessaires pour le choix de documents

Une fois le tableau rempli, cette première exploration aboutit sur la phase de discussion qui tente de répondre à la première question de recherche. La deuxième question est également brièvement répondue avec les éléments disponibles.

### 2.2.2. Analyse d'un cas d'étude

De manière plus générale, l'étude de cas permet d'étudier un phénomène sur le terrain, dans un contexte réel. Elle est donc fortement dépendante de ce contexte mais permet d'apporter une réponse à une question de recherche précise (Yin, 2003). L'étude de cas n'est pas une méthodologie en soi, mais une stratégie combinant une ou plusieurs méthodes pour récolter des données (Roy, 2003). Ces données peuvent provenir de la population (ex : entretiens, enquêtes, focus group...) ou de documents (ex : revue de littérature, recherches en ligne, plans/coupes...). On ne peut pas généraliser les résultats d'une étude de cas. Ce n'est d'ailleurs pas l'objectif, qui est plutôt d'investiguer un cas spécifique, pour comprendre un phénomène.

Les méthodes de collecte d'informations les plus appropriées pour obtenir des données approfondies sur le cas étudié sont les interviews semi-dirigées ou l'observation in situ (Bryman, 2012). Les informations peuvent provenir de sources différentes, mais doivent être confrontées par triangulation. C'est ainsi que la validité interne est vérifiée. La validation est importante pour prouver que la méthode utilisée est bien scientifique. Un cas d'étude est par définition subjectif, et celui-ci doit être complet, structuré et rigoureusement détaillé, c'est-à-dire faire ses preuves pour être crédible. Surtout, les résultats doivent apporter du savoir, apporter quelque chose de nouveau, pour que la démarche soit entièrement validée (Attia, 2020). Il est mieux d'analyser plusieurs cas d'étude afin de pouvoir les comparer, mais un cas unique peut être étudié lorsqu'il s'agit d'un cas typique « représentatif » (Yin, 2003). Les études de cas sont surtout très utiles pour explorer des phénomènes nouveaux et encore peu analysés (Roy, 2003).

Plus précisément dans ce travail, l'analyse d'un cas d'étude a pour but d'étudier la réalisation d'un cas concret : un bâtiment récent intégrant des BIPV en Belgique. Un seul cas est choisi parce qu'il est représentatif d'un phénomène rare, c'est un « bâtiment BIPV » typique dans un contexte spécifique. En effet, le fabricant belge leader du marché du PV intégré à l'architecture ne compte dans son portfolio que 12 références de bâtiments réalisés avec des BIPV en Belgique. Il y en a certainement un peu plus, mais cela reste une technologie encore peu fréquemment rencontrée aujourd'hui.

Cette partie peut apporter des éléments de réponse aux deux questions de recherche grâce au **retour d'expérience de différents acteurs en lien avec l'utilisation de BIPV dans un cas d'étude concret**. L'analyse de cas étudie donc le point de vue des experts ayant participé au projet. Leur récit de l'expérience, les contributions qu'ils ont apporté au projet et leur perception des BIPV sont investigués. L'opinion des occupants du bâtiment vient compléter l'analyse.

### 2.2.2.1. Sélection et justification du cas d'étude

#### a) Présentation du cas d'étude choisi



Nom:  
**Treurenberg Building**

Lieu:  
**Bruxelles**

Architecte:  
**Assar Architects**

Année :  
**2015 -2017**

BIPV : façades BIPV noires sur la partie supérieure

Figure 3 : Image du Treurenberg Building. Source : Assar Architectes, 2017

Ce bâtiment situé au cœur de Bruxelles a été entièrement rénové afin d'atteindre de hautes performances énergétiques. Complètement démantelé, cet immeuble administratif a été reconstruit en 2015, et est le premier « Net-Zero Energy Building » de la capitale (VK group, 2022). Il est certifié BREEAM « Excellent » (pour les étapes de conception et de post-construction) et a également reçu le prix du « Best Innovative Green Building » au MIPIM Awards en 2016 (B4F, 2022). Une enveloppe très efficace et le recours aux énergies renouvelables ont permis de faire du Treurenberg Building un bâtiment passif exemplaire. Des techniques spéciales ont été mises en place pour diminuer la consommation énergétique de ce bâtiment : un système de cogénération permet de le chauffer, des cellules solaires sont intégrées dans la façade et la toiture pour produire de l'électricité renouvelable. L'atrium est également muni d'un système d'éclairage et de ventilation régulé pour assurer le confort intérieur.

L'immeuble de 7 étages accueille les bureaux d'une instance européenne : Single Resolution Board. L'organisation est locataire de l'édifice, qui appartient à la compagnie de banque et assurance AXA Belgium. Le bâtiment se situe à côté d'un ancien mur d'enceinte de la ville historique du 14<sup>ème</sup> siècle. La nouvelle construction s'est placée en recul par rapport à ce vestige du passé qui a été conservé (Assar, 2022). En plus des 8 niveaux de bureaux, un parking souterrain de deux niveaux permet d'entreposer 60 voitures (Democo, 2016). Le plan est assez compact, et les espaces de travail sont organisés autour d'un grand atrium central qui apporte de la lumière naturelle au sein des bureaux et des salles de réunion. Au cinquième étage, un espace intérieur ouvert sur l'atrium central permet l'accès à un toit terrasse extérieur offrant une vue sur le centre historique de Bruxelles.

Les BIPV se trouvent sur le haut du bâtiment car cette partie est moins sujette aux ombrages des bâtiments environnants. Trois façades des deux derniers étages (l'est, la sud et l'ouest) sont recouvertes de verre de sécurité PV coloré noir. Les modules sont constitués de cellules de silicium monocristallin à haute efficacité, et le verre avant est structuré de manière pyramidale pour optimiser les gains sur des façades verticales. La façade nord possède quant à elle des panneaux factices, qui ont la même teinte que les vrais afin de conserver une unité d'aspect extérieur. La toiture comporte des PV classiques, et au total, l'installation atteint une puissance de 153 kWc. Couvrant une surface de 1200 m<sup>2</sup>, ces modules fabriqués par l'entreprise ISSOL produisent annuellement 102 MWh.

#### b) Justification de ce choix

##### Critère 1 : Performance énergétique

Cet immeuble a été choisi premièrement car il s'agit d'un **bâtiment exemplaire d'un point de vue environnemental**. Ses hautes performances énergétiques sont en partie dues à l'intégration de cellules PV, mais pas seulement. Cela permet de garder à l'esprit que cette technologie ne suffit pas seule, mais fait partie d'un tout. Cet exemple permet de mettre en avant la contribution des BIPV dans un bâtiment passif, et d'évaluer leur potentiel, notamment lorsqu'ils sont placés en façade.

##### Critère 2 : Esthétique attrayante

Ce bâtiment a été également choisi pour **son aspect esthétique**, qui est assez contemporain et élégant. Les cellules solaires ne sont pas visibles à première vue, bien que les façades qu'elles recouvrent se distinguent par leur couleur foncée. Le volume comprenant les BIPV est en retrait, comme posé sur la toiture, afin d'apporter plus de légèreté, et de créer un espace extérieur de qualité. En outre, ce détachement fait paraître le bâtiment moins haut, et l'intègre mieux au contexte environnant.

##### Critère 3 : Localisation géographique

Par ailleurs, la localisation du Treurenberg Building est intéressante car elle met en avant les possibilités **d'intégration en milieu urbain dense**. Malgré les masques solaires, le placement de PV peut aussi être rentable en ville, sur des surfaces ensoleillées. C'est aussi en ville que la demande en électricité est la plus forte. Une production locale pourrait couvrir une partie des besoins du bâtiment, mais aussi être partagée avec les membres d'une même communauté d'énergie. Le climat à Bruxelles, qui est tempéré océanique, et donc assez nuageux et pluvieux, est représentatif du **climat typique belge**, qui est celui étudié dans le cadre de cette étude. La capitale se situe à une latitude de 50 degrés Nord et à une longitude de 4° Est.

##### Critère 4 : Immeuble récent

Le bâtiment a été **construit en 2015**, il est donc relativement récent et a pu intégrer des technologies BIPV abouties. En même temps, on a déjà quelques années de recul pour observer le résultat.

##### Critère 5 : Fonction tertiaire

Enfin, cet immeuble accueille **une fonction tertiaire**, des bureaux, qui fonctionnent tout au long de la journée. Le moment de demande en électricité coïncide avec les moments de production solaire, ce qui est l'idéal pour favoriser l'autoconsommation. De plus, les immeubles de bureaux disposent généralement de grandes surfaces en façade et peuvent y placer une installation assez grande pour être rentable. Le budget non-négligeable nécessaire à l'intégration de BIPV semble plus à la portée de grandes entreprises qu'à de petits particuliers.



### 2.2.2.2. Collecte des données

Les données rassemblées proviennent d'une documentation écrite et d'interviews orales.

La première phase de recueil des données consiste à consulter les sites web des différents acteurs de la construction du Treurenberg Building. Certaines informations n'étant pas disponibles sur Internet, j'ai contacté les acteurs du projet par e-mail pour obtenir des documents plus spécifiques. Certains ont accepté de me partager des dossiers confidentiels, contenant une grande quantité d'informations techniques, ainsi que des plans et une maquette de la volumétrie 3D du bâtiment.

Ensuite, des données plus approfondies sont rassemblées grâce à des interviews individuelles des différents acteurs de la construction et des usagers du bâtiment. Cette méthode a été choisie pour récolter l'expérience et les points de vue individuels des participants. La méthode d'interview choisie est l'entretien semi-directif, comme expliqué dans la section suivante.

### 2.2.2.3. Méthode d'interview

Un entretien, ou une interview, est une manière de collecter des données à travers une conversation entre un chercheur et un interlocuteur. C'est un processus de communication et d'interaction humaine qui est caractérisé par un contact direct entre les intervenants (Quivy et Van Campenhoudt, 2006). Le premier partage son savoir, et le deuxième son expérience, afin qu'ensemble ils construisent une compréhension commune d'un phénomène (Savoie-Zajc, 2003). Cependant, l'échange verbal est principalement asymétrique : l'interviewer est celui qui pose les questions, et l'interviewé, celui qui y répond (Lallemand et Gronier, 2015). L'entretien semi-directif est le type le plus utilisé. Il s'agit d'un entretien faiblement dirigé : les questions ouvertes favorisent l'expression de l'interlocuteur que le chercheur doit guider pour éviter qu'il ne s'éloigne du sujet. Le chercheur doit préparer des questions guides à l'avance, mais il est libre de les reformuler. Autant que possible, le chercheur doit « laisser venir » l'interviewé, et le recentre si besoin (Quivy et Van Campenhoudt, 2006). Un des atouts des entretiens individuels est qu'ils permettent un degré élevé de profondeur et de finesse des données recueillies. Les différents points de vue individuels sont nuancés, détaillés, et peuvent être comparés pour mettre en avant les contradictions (Savoie-Zajc, 2003).

L'interview est un dispositif souple qui offre la possibilité de s'adapter au langage et au cadre de références des interlocuteurs. Il faut une bonne préparation avant un entretien car celui-ci nécessite des qualités autant intellectuelles que humaines. L'expérience n'est pas tout à fait reproductible, car les réponses de l'interviewé pourraient varier dans le temps. Il faut aussi s'assurer de la fiabilité des propos relevés en confrontant les données de sources différentes (Savoie-Zajc, 2003).

Les étapes d'un entretien détaillées dans le cahier méthodologique de C.Schelings sont les suivantes :

- 1) Sélection des interviewés
- 2) Préparation des questions et d'une première grille d'analyse
- 3) Entretien
- 4) Traitement et analyse des données

Ces étapes sont appliquées pour ce cas d'étude et détaillées dans la section suivante ainsi qu'au Chapitre 4 : Analyse d'un cas d'étude.

#### 2.2.2.4. Sélection des interviewés

##### a) Entretien des experts

Pour les entretiens de type long, les personnes choisies font partie de la liste des acteurs qui sont intervenus dans le projet :

- **Le bureau d'architecte** : Assar Architectes
- **Le client** : AXA
- **Le designer solaire** : Sunsoak Design
- Le fabricant : ISSOL
- **L'entreprise de construction générale** : Democo
- Les bureaux d'étude de techniques spéciales : VK engineering pour la PEB, B4F pour le BREEAM

Ces acteurs viennent d'horizons différents mais sont tous liés au cas d'étude. Quatre d'entre eux sont interrogés, pour ne pas avoir de redondance d'information. Ce nombre est suffisant pour obtenir des données provenant des sources les plus importantes et les plus concernées par le sujet : l'architecte, le client, le designer solaire et l'entreprise de construction générale. Par ailleurs, les autres acteurs ont aussi apporté leur contribution en partageant de la documentation technique.

##### b) Entretien des usagers

A côté de cela, des entretiens de type court sont menés auprès de quelques usagers du bâtiment. Cinq membres du personnel de l'instance européenne occupant les bureaux du Treurenberg Building sont interrogés mais de manière plus concise pour ne pas les déranger trop longtemps mais aussi parce que le contenu qu'ils ont à partager sur le sujet est moins large. Néanmoins, leur avis sur le lieu dans lequel ils travaillent au quotidien est pertinent. La taille de l'échantillon est volontairement réduite puisqu'il s'agit d'une courte enquête qualitative.

#### 2.2.2.5. Création d'un guide d'entretien

##### a) Entretien des experts

Les questions posées lors de l'interview ont été préparées sur base des principes du cahier méthodologique. Les 9 questions ouvertes sont claires, concises et pertinentes et ont été validées au préalable par ma promotrice. L'objectif de l'entretien est de connaître le retour d'expérience et l'opinion sur les BIPV des acteurs de la construction du Treurenberg Building. Le guide d'interview complet est disponible en Annexe 1, mais voici les questions posées :

- Vous êtes interviewé car vous avez participé à la construction du Treurenberg Building à Bruxelles, en 2015. Est-ce bien exact ?
- Comment le projet a-t-il commencé, pour vous ? Qui est venu vous voir ?
- Qui était à l'initiative de l'idée d'utiliser des Building Integrated Photovoltaics ? (Pourquoi ?)
- Quel rôle avez-vous joué ?
- Aviez-vous déjà utilisé des BIPV auparavant ? Dans quel cadre ?
- Avec qui avez-vous coopéré ?
- Comment les BIPV ont-ils influencé le projet ?
- Quels sont les désavantages des BIPV, qu'est-ce qui vous freinerait à refaire un projet en les intégrant ?
- Au contraire, qu'est-ce qui vous a plu, ce qui vous motive à les réutiliser dans de futurs projets ?

## b) Entretien des usagers

L'objectif de l'interview des usagers est de récolter leur opinion sur le bâtiment dans lequel ils travaillent et sur les BIPV qu'il comporte. Leur perception du confort intérieur est aussi questionnée. Les questions sont posées en anglais vu que les interviewés sont des internationaux et sont consultables à l'Annexe 1. Les voici traduites en français :

- Avez-vous déjà entendu parler de BIPV (Building Integrated Photovoltaics) ?
- Saviez-vous que le bâtiment dans lequel vous travaillez en comporte ?
- Est-ce que cela change quelque chose à votre quotidien ?
- Quels sont les avantages/ inconvénients de travailler dans ce bâtiment à hautes performances énergétiques ?
- Est-ce que le bâtiment vous paraît confortable, pratique, quelle image vous renvoie-t-il ?

## 2.2.2.6. Création d'une première grille d'analyse

## a) Entretien des experts

La grille d'analyse va permettre de structurer la prise de note pendant l'entretien, et de vérifier que tous les sujets majeurs ont été abordés (Quivy et Van Campenhoudt, 2006). La grille ci-dessous est basée sur les questions prévues lors de l'entretien. L'idéal est qu'au terme de celui-ci, toutes les cases soient complétées. Il est possible que le répondant aborde d'autres sujets. Les nouvelles idées qu'il apporte peuvent être notées séparément.

La grille d'analyse permet d'objectiver les informations et d'analyser scientifiquement le contenu récolté (Quivy et Van Campenhoudt, 2006). C'est en appliquant la grille au contenu que les résultats peuvent être tirés. De plus, l'utilisation systématique de la même grille d'analyse permet d'apporter de la rigueur dans le processus, et de pouvoir comparer les résultats.

Acteur		Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
Commencement du projet	Initiative				
Actions dans le projet /rôle	Conception				
	Réalisation				
	Suivi sur chantier				
	Autre				
Expérience précédente BIPV	Oui /non				
Interactions	Client				
	Architecte				
	Entrepreneur				
	Designer solaire				
Influence des BIPV	Faible				
	Forte				
Opinion sur les BIPV	Avantages				
	Inconvénients				

Tableau 2: Grille d'analyse des interviews des acteurs du cas d'étude

## b) Entretien des usagers

Aucune grille n'a été prévue pour les entretiens avec les usagers, étant donné la brièveté de celles-ci.

### 2.2.3. Enquête

L'enquête par questionnaire « consiste à poser, à un ensemble de répondants, une série de questions relatives à leur situation sociale, professionnelle ou familiale, à leurs opinions, à leur attitude à l'égard d'options ou d'enjeux humains et sociaux, à leurs attentes, à leur niveau de connaissance ou de conscience d'un évènement ou d'un problème, ou encore sur tout autre point qui intéresse les chercheurs » (Quivy et Van Campenhoudt, 2006). Le but est de vérifier des hypothèses de départ, ou de trouver des relations entre variables. On peut aussi appeler cela un sondage, car des informations sont prélevées dans un échantillon représentatif (Blais et Durand, 2003). C'est un outil qui permet de produire des données chiffrées pour mesurer et objectiver un phénomène, dans le cadre d'une analyse quantitative. Les questions sont le plus souvent fermées, avec des réponses prédéterminées par le chercheur, pour standardiser les résultats. Elles peuvent aussi être semi-ouvertes ou totalement ouvertes, mais les résultats sont plus difficiles à interpréter, et sont moins efficaces dans les enquêtes par questionnaire. L'échantillon considéré est la population cible de laquelle on souhaite extraire des données. Le grand avantage du questionnaire est de pouvoir quantifier de multiples données, ce qui peut donner suite à des analyses variées. Si l'échantillon est assez grand, des corrélations entre les variables et des tendances statistiques peuvent en être dégagées. Cette méthode de recueil d'informations présente néanmoins des limites. Pour qu'il soit fiable, le questionnaire doit répondre à certaines conditions. L'échantillon doit être bien choisi, les questions doivent être formulées de manière claire et univoque. Un autre phénomène qui peut fausser les résultats est la désirabilité sociale : les participants ont tendance à choisir une réponse qui leur paraît la plus acceptable socialement, plutôt que de choisir celle qui leur correspond le mieux (Edwards, 1953).

#### 2.2.3.1. Objectifs et public visé

L'objectif de cette enquête est d'évaluer l'opinion, l'expérience et la connaissance sur les BIPV des architectes et autres concepteurs et réalisateurs de projets. Elle vise essentiellement à répondre à la deuxième question de recherche : **Quels sont les freins à leur application à grande échelle ?** Des éléments de réponse à la première question sont également recherchés à travers des questions concernant le potentiel architectural des BIPV.

Le public visé est le monde de la construction, plus précisément les concepteurs, réalisateurs et gestionnaires de projets de bâtiments. Ce sont donc en majorité des architectes, mais également des ingénieurs et des entrepreneurs. Les professionnels ciblés sont âgés de 23 à 65 ans et travaillent en Wallonie et à Bruxelles.

#### 2.2.3.2. Méthode utilisée pour élaborer et valider le questionnaire

Les règles à respecter pour élaborer un questionnaire sont également énoncées dans le cahier méthodologique. Elles ont bien été prises en compte lors de la réalisation de cette enquête.

Le questionnaire est élaboré sur Google Form et comporte plusieurs chemins différents, en fonction de la réponse de l'individu. Ainsi, dès le départ, les répondants sont divisés en deux catégories : ceux qui connaissent les BIPV, et ceux qui n'en ont jamais entendu parler. Les questions les plus importantes se trouvent au début de l'enquête, tandis que les questions d'ordre socio-démographiques sont posées à la fin. En tout, elle comporte entre 13 et 18 questions, dont la majorité sont fermées, afin d'encourager le taux de participation. Cependant, trois questions ouvertes viennent cibler des points

essentiels : la définition des BIPV, les exemples connus de projets en intégrant et le retour d'expérience de ceux qui ont en déjà utilisés. Des photos d'exemples illustrent l'application de BIPV dans des bâtiments, pour que les participants puissent se représenter de quoi il s'agit. Cependant, ces images peuvent influencer l'opinion du répondant, c'est pourquoi la même question a été posée avant et après le défilement des images.

Ce questionnaire a d'abord été corrigé une première fois sur base des conseils de C.Schelings, puis revu par ma promotrice S.Reiter. Ensuite, il a été prétesté à l'avance par mes parents, ma promotrice et mon co-promoteur P.Leclercq.

Les variables mesurées dans cette enquête sont multiples : le niveau de connaissance et l'expérience avec les BIPV des répondants, ainsi que leur opinion sur le sujet concernant le potentiel architectural, les freins et les motivations à l'utilisation de BIPV. Ses variables seront mises en relation aux données d'ordre sociodémographiques, via des tableaux de fréquence, des graphiques etc. pour l'analyse quantitative des résultats.

Pour ce qui est de la validation de la technique, il faut également vérifier sa fiabilité et sa reproductibilité (Attia, 2020). Le questionnaire a été élaboré au regard des résultats de l'état de l'art. Par exemple, les propositions concernant les freins à l'utilisation de BIPV proviennent des éléments précédemment identifiés. Le processus est structuré, rigoureux, et expliqué en détail dans le Chapitre 5 afin d'être facilement reproductible.

L'arbre des chemins possibles, synthétisant le questionnaire, se trouve à la page suivante. Le questionnaire complet se trouve à l'Annexe 3.

2.2.3.3. Présentation du questionnaire final

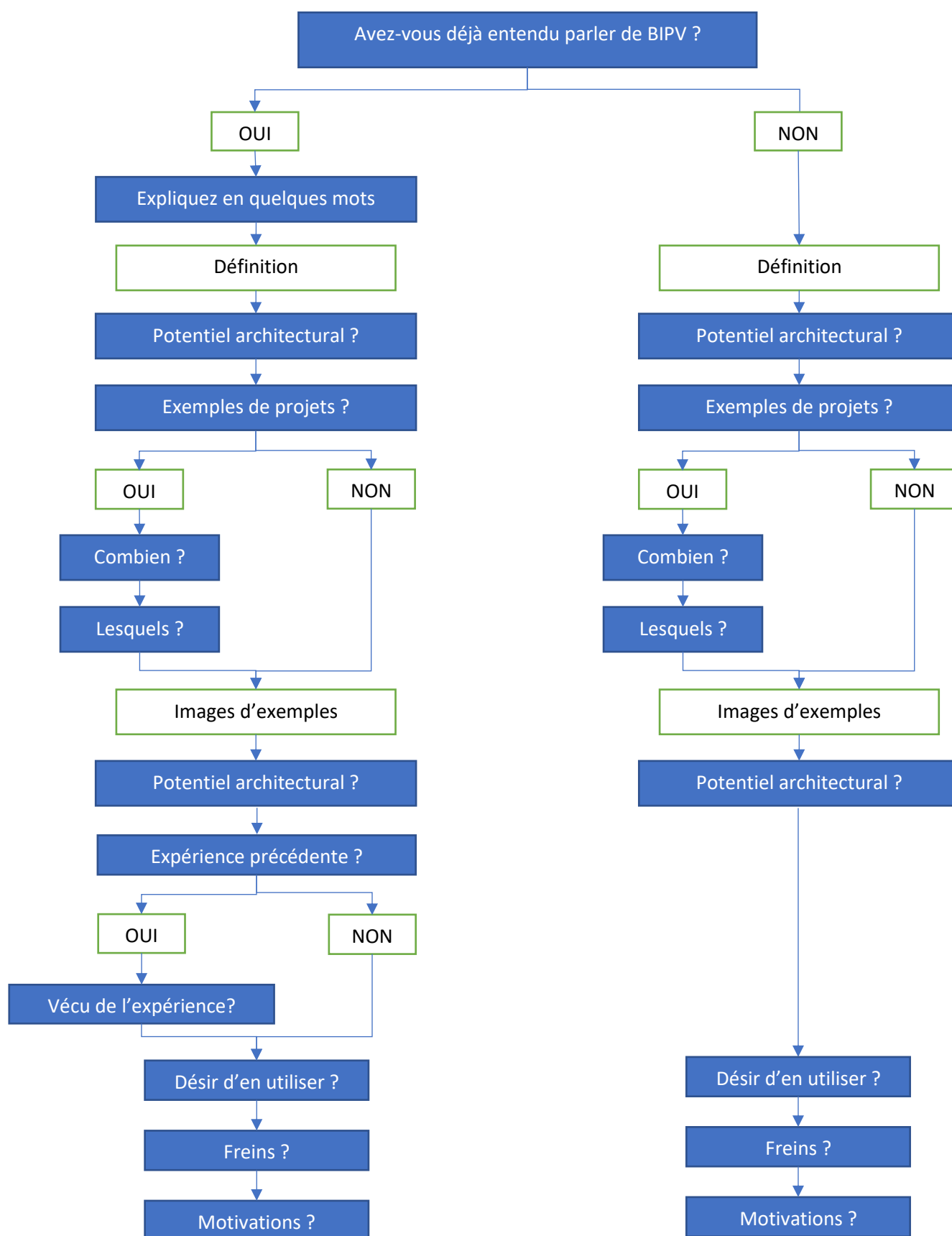


Figure 4: Schéma du questionnaire

### 2.3. Schéma méthodologique détaillé

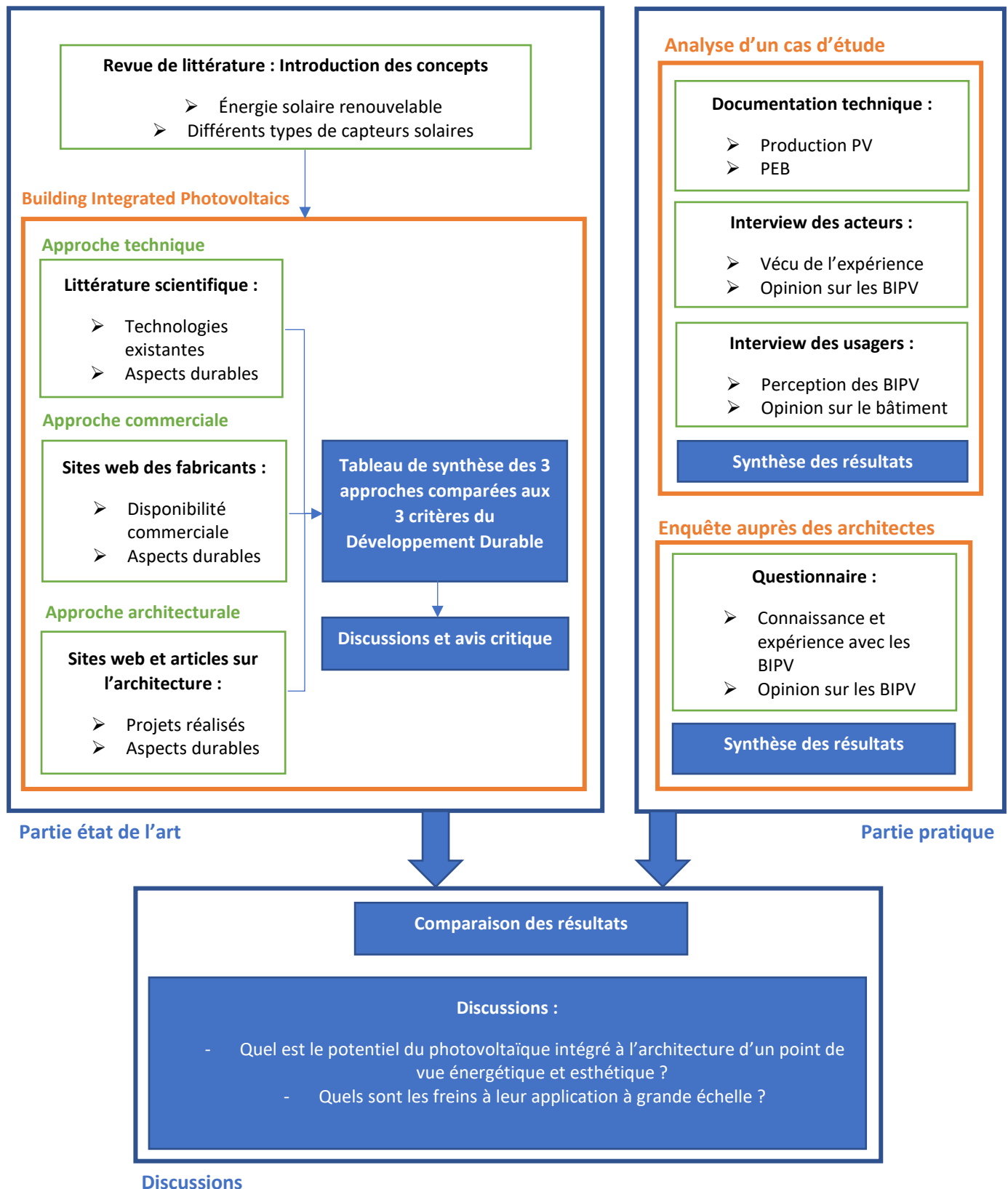


Figure 5: Schéma méthodologique détaillé

## CHAPITRE 3 : ÉTAT DE L'ART

### 3.1. Énergie solaire renouvelable

#### 3.1.1. L'énergie solaire

Le soleil est à l'origine d'une grande partie des ressources énergétiques que nous exploitons actuellement, qu'elles soient renouvelables ou non. En apportant chaleur (rayonnement infrarouge) à la terre, il déclenche des mécanismes naturels comme le cycle de l'eau ou le mouvement des masses d'air. L'énergie cinétique de l'eau et du vent peuvent être exploitées pour fournir de l'électricité, l'éolien et l'hydraulique sont donc des énergies renouvelables possibles grâce à l'action du soleil. La position privilégiée de la Terre par rapport au soleil ainsi que la présence d'une atmosphère permet d'avoir des conditions climatiques favorables au développement de la vie. La lumière du soleil (rayonnement visible) permet la photosynthèse nécessaire à la croissance des végétaux, qui sont à la base de la chaîne alimentaire animale. Le soleil est donc indispensable à la vie sur Terre. La biomasse et les énergies fossiles proviennent des organismes vivants qui ont pu se développer grâce à l'énergie solaire. Seuls l'énergie nucléaire, l'énergie marémotrice et l'énergie géothermique profonde ne proviennent pas de l'action du soleil (Multon et al., 2004).

Le potentiel de l'énergie venant du soleil est énorme : en effet, le soleil apporte à la terre en une heure une quantité d'énergie supérieure à la consommation énergétique moyenne du monde entier pendant un an (Energie Commune, 2021a). C'est une énergie gratuite et inépuisable, puisque le Soleil ne devrait pas s'éteindre avant 5 milliards d'années. Le flux énergétique provenant du soleil frappe l'atmosphère avec une intensité moyenne de  $1367 \text{ W/m}^2$ , ce qu'on appelle la constante solaire (Donev et al., 2021). Cette valeur varie très légèrement en fonction de la distance entre la Terre et le Soleil. Ce rayon est en partie réfléchi vers l'espace, ou absorbé et diffusé dans la couche d'ozone, qu'il doit encore traverser avant de toucher le sol avec une intensité de  $1000 \text{ W/m}^2$  pour une surface perpendiculaire aux rayons, et par ciel serein. L'irradiation solaire dépend également des saisons, de la position sur la Terre et des conditions météorologiques. L'épaisseur de la couche d'ozone que les rayons doivent traverser ainsi que l'angle d'incidence avec lequel ils touchent la Terre influenceront la densité d'énergie reçue sur le sol. Ainsi, les latitudes plus élevées recevront moins d'énergie que l'équateur. La couverture nuageuse affecte aussi les rayonnements qui seront plus largement réfléchis vers la voûte céleste que par temps clair. Les nuages laissent néanmoins passer des rayonnements diffus. En Belgique, on reçoit annuellement environ  $1000 \text{ kWh/m}^2$ , dont la moitié provient du rayonnement diffus (Energie Plus, 2010a).

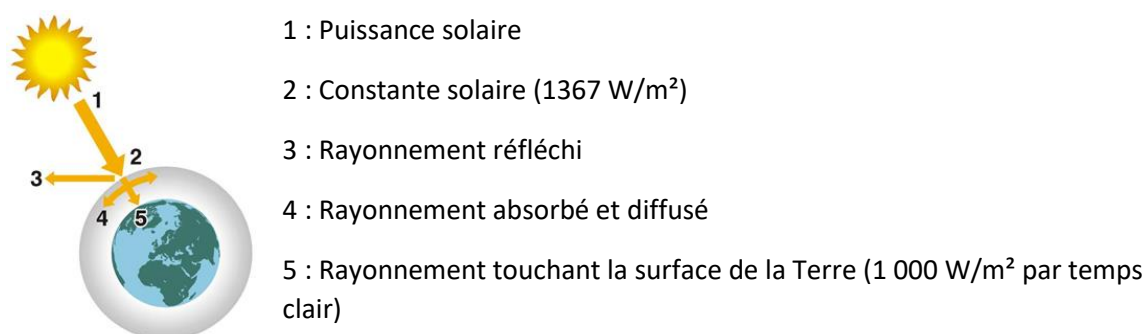


Figure 6 : Illustration du rayonnement solaire.

Source : Energie Plus, 2010a



Si l'on étudie le sujet à une échelle plus réduite, d'autres paramètres rentrent en compte dans la quantité d'énergie solaire reçue par une surface d'un bâtiment. Tout d'abord, l'environnement physique comme le relief, la végétation ou les bâtiments peuvent créer de l'ombrage. Ces masques solaires, bien qu'ils soient positifs pour se protéger contre la surchauffe, sont des obstacles pour les capteurs d'énergie solaire. L'orientation et l'inclinaison de la surface jouent également un rôle dans la quantité d'énergie solaire reçue. Sous nos latitudes, l'orientation privilégiée est le Sud (avec 40° d'écart possible en maintenant une bonne irradiation) et l'inclinaison optimale est de 38° (mais reste bonne entre 15° et 55°). Les façades verticales des bâtiments orientées au Sud reçoivent encore 70% de l'irradiation maximale. En consultant les chiffres pour la station météorologique de Uccle en Belgique (Energie Plus, 2010a), on remarque d'ailleurs que l'éclairement des surfaces verticales au sud pendant l'hiver est plus important que celui des surfaces horizontales (en décembre : 356W/m<sup>2</sup> pour les verticales contre 130 W/m<sup>2</sup> pour les horizontales) et que l'éclairement maximal est reçu en mars (525 W/m<sup>2</sup>). Au contraire, les surfaces horizontales seront plus éclairées en été (597 W/m<sup>2</sup> contre 381 W/m<sup>2</sup> pour les surfaces verticales sud). Quant aux surfaces verticales orientées à l'est ou à l'ouest, elles connaîtront leur ensoleillement maximum en été (347W/m<sup>2</sup> en fin d'après-midi à l'ouest et 419W/m<sup>2</sup> à l'est en matinée). Le potentiel en énergie solaire est donc également important sur les façades verticales qui sont bien orientées et qui ne sont pas ombragées. Le tableau ci-dessous reprend l'éclairement maximal de chaque surface selon les saisons. Pour les trois premières colonnes, le maximum parmi les données fournies a été relevé à 11h. Pour la surface verticale est, le maximum est relevé entre 9h et 11h du matin, selon l'heure du lever du soleil, et pour la surface verticale ouest, il est entre 13h et 15h.

	Éclairement énergétique global (W/m <sup>2</sup> )				
	Horizontal (11h)	Vertical sud (11h)	Vertical nord (11h)	Vertical est (Début de matinée)	Vertical ouest (Fin d'après-midi)
<b>Mi-mars</b>	387	525	181	352	239
<b>Mi-juin</b>	597	381	185	419	347
<b>Mi-septembre</b>	455	445	148	313	248
<b>Mi-décembre</b>	130	356	78	151	115

Tableau 3: Éclairement énergétique solaire maximal pour un ciel moyen à Uccle.  
Source : Energie Plus, 2010a

### 3.1.2. Les communautés d'énergie renouvelable

Une notion doit être inévitablement expliquée avant de parler de consommation et de production d'énergie à l'échelle d'un quartier : il s'agit du concept de communautés énergétiques. Selon la directive européenne pour la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables (EU, 2017), une communauté d'énergie renouvelable est « une PME ou une organisation sans but lucratif, dont les actionnaires ou les membres coopèrent en vue de la production, de la distribution, du stockage ou de la fourniture d'énergie produite à partir de sources renouvelables ». Dans la version de refonte de cette directive (EU, 2018), il est mentionné qu'il s'agit d'une entité légale qui est basée sur la participation et l'autonomie de différents actionnaires et membres vivant à proximité de projets d'énergies renouvelables. Leur but est de développer une communauté plus respectueuse de l'environnement, avec des intérêts également économiques et sociaux. Il est donc essentiel de créer de telles communautés pour vivre dans un monde plus durable, car elles permettent non seulement de diminuer l'impact carbone, mais aussi d'assurer un approvisionnement en énergie à toutes les communautés. On parle aussi de « justice ou démocratie de l'énergie » (Cielo et al., 2021).

Actuellement, ce partage d'énergie est déjà en partie effectif en ce qui concerne le chauffage, les réseaux de chauffage urbain représentant presque 10% des systèmes de chauffage dans le monde (Cielo et al., 2021). Ce qui est moins développé, c'est le partage d'électricité entre citoyens privés, qui est encore interdit dans certains pays d'Europe. Même si la directive du marché intérieur de l'électricité (EU,2019) pose le cadre légal pour les communautés énergétiques citoyennes de l'Union Européenne, tous les États Membres n'ont pas encore décliné leur réglementation.

Un article qui étudie le rôle des communautés d'énergie renouvelable dans la transition énergétique verte le l'UE (di Marco, 2018) identifie deux composantes fondamentales au fonctionnement des communautés d'énergie renouvelable : les sociétés coopératives et le réseau intelligent. Le premier concept concerne des aspects législatifs et le deuxième explique les avantages technologiques. Il faut en effet disposer d'un réseau capable de véhiculer une grande quantité d'énergie pour pouvoir répondre aux besoins de la communauté, préférablement sur de faibles distances de transport pour assurer une efficacité énergétique. Leur installation permet d'accroître la production décentralisée et renouvelable et d'encourager la participation individuelle du citoyen qui est actif sur le marché de l'électricité. Cet article conclut que la concrétisation de communautés d'énergie renouvelable nécessite l'implication et l'investissement des autorités locales pour gérer la transition vers un système d'énergie verte.

Une fois des réglementations mises en place, il est utile d'évaluer économiquement les modèles de communauté d'énergie renouvelable. Deux concepts sont utilisés dans une étude italienne (Cielo et al., 2021) afin d'évaluer l'efficacité des communautés énergétiques selon les points de vue de l'autoconsommation et de l'autosuffisance. Le premier identifie le pourcentage d'énergie produite qui est directement consommée sur place, et le deuxième représente la proportion de la demande totale qui est couverte par la production. Ces notions sont utilisées dans plusieurs études expliquées dans la section suivante.

### 3.1.3. Évaluation du potentiel solaire des quartiers

Après avoir étudié l'éclairage énergétique des surfaces et défini les communautés d'énergie renouvelable, le potentiel à l'échelle des quartiers va être estimé grâce à des études réalisées précédemment en Europe.

En Allemagne, des chercheurs (Strzalka et al., 2012) ont investigué le potentiel solaire d'un quartier résidentiel près de Stuttgart. Il s'agit d'un quartier périurbain constitué essentiellement de maisons mitoyennes et d'immeubles à appartements. Leur but était d'évaluer la production d'électricité à l'échelle d'un quartier et de la comparer à leur consommation. Les problèmes de stockage de l'électricité étant inhérents à la variabilité des productions des panneaux PV, et dans le but de ne pas surcharger le réseau, il est évidemment idéal de favoriser l'autoconsommation des ménages. Le potentiel d'énergie solaire sur les toitures du quartier a été estimé en tenant compte des ombrages et de la surface disponible adéquate. Cette surface comprend les toitures plates bien exposées et les toitures inclinées qui correspondent aux caractéristiques favorables à l'exploitation de l'énergie solaire (orientés entre 145° et 215° Sud et avec une inclinaison entre 15° et 45°). Au total, 54% des toitures du quartier peuvent potentiellement accueillir des panneaux PV. Le logiciel de simulation a démontré que seulement 3% de cette surface était partiellement ombragée. Finalement, il ressort que 35% de l'électricité consommée par le quartier pourrait être produite par des panneaux solaires installés sur les toitures adéquates, dont la moitié serait auto-consommée par les habitants. Il faut faire attention à ce bilan car la consommation énergétique dépend fortement des habitudes et modes de vie des usagers. Il est très difficile d'évaluer l'autoconsommation puisque celle-ci intègre aussi un caractère dynamique : les données se basent sur un cas d'étude où l'on a mesuré la consommation et la

production électrique d'un immeuble de logements heure par heure, mais c'est une grande simplification que d'étendre ces données à tout un quartier. Malgré tout, on peut noter que le quartier a un potentiel solaire non négligeable, et que même si plusieurs paramètres influencent ces résultats, cette étude donne un ordre de grandeur représentatif pour le cas des villes de nos régions.

Une recherche réalisée aux Pays-Bas (Litjens et al., 2018) s'intéresse plus particulièrement au cadre spatio-temporel de la production et de la consommation d'électricité à l'échelle d'une ville. Afin d'évaluer la demande en électricité qui peut être couverte par l'énergie PV, et en intégrant des considérations dynamiques, les solutions de batteries de stockage ou de rechargement de véhicules électriques ont été analysées. Le problème est que le pic de production ne correspond pas au pic de consommation et que de l'électricité doit être exportée ou importée du réseau aux moments et aux endroits où on en a besoin. Cette distribution a un coût, et engendre des pertes d'énergie durant le transport, d'autant plus que le réseau n'est pas fait pour supporter autant d'échanges d'électricité. Le but est de favoriser l'autoconsommation des producteurs d'électricité verte, et d'atteindre une autosuffisance des communautés énergétiques. La ville d'Utrecht a été le cas d'étude, et les différents quartiers qui la composent ont été analysés. La contribution des batteries et des véhicules électriques dans l'augmentation du taux d'autoconsommation a été synthétisé sur des cartes. Il en ressort qu'il y a de grandes variations d'un quartier à l'autre pour ce qui est du rendement des panneaux PV et du taux d'autoconsommation (entre 34 et 100%). Cette étude démontre cependant que ce ratio peut être augmenté en moyenne de 12% grâce au chargement des véhicules électriques et de 25% grâce aux batteries de stockage. Pour ce qui est de l'autosuffisance, elle atteint un taux entre 6 et 40%. Elle est évidemment réduite si la demande augmente avec l'intégration des bornes électriques, et bénéficie par contre d'un apport de 14% si des batteries stockent l'énergie. L'analyse spatiale a révélé les endroits propices au développement de bornes de chargements publiques, c'est-à-dire dans les quartiers à haut rendement PV. On pourra retenir que le potentiel d'énergie solaire des quartiers résidentiels est bel et bien élevé, mais que malgré les solutions proposées, la question de la gestion et du stockage de l'électricité pose encore problème.

En Wallonie, le concept du zéro-énergie a aussi été étudié à l'échelle d'un quartier (Marique and Reiter, 2014). Deux types de quartiers existants ont été étudiés afin d'étudier l'influence de la forme urbaine sur la consommation énergétique d'une communauté : un îlot urbain dense, comprenant des maisons mitoyennes datant du 19<sup>ème</sup> siècle, et un quartier périurbain composé de maisons quatre façades plus récentes.



Figure 7: Typologies représentatives de quartiers existants en Belgique, utilisés comme cas d'étude. À gauche : milieu urbain, à droite : milieu périurbain. Source : Marique et Reiter, 2014

Les facteurs principaux qui ont été considérés pour calculer la consommation d'énergie à l'échelle d'un quartier sont la consommation énergétique des bâtiments, la production d'énergie renouvelable, et l'énergie dépensée pour les déplacements. Concernant la production d'énergie renouvelable, le PV est efficace pour produire de l'électricité sur place. Il a été remarqué que le potentiel solaire est plus important en milieu périurbain qu'en milieu urbain, car la forte densité bâtie augmente les ombrages. Dans les deux cas, l'avantage de considérer l'échelle d'un quartier est la possibilité de mutualiser l'énergie produite entre bâtiments individuels.

Une étude réalisée plus tard (Kameni Nematchoua et al., 2021) conduit aux mêmes résultats concernant le potentiel solaire selon la densité bâtie : le PV est plus rentable en milieu rural. En ville, il est surtout intéressant d'utiliser des véhicules électriques pour réduire la consommation d'énergie. Il ressort que la mesure la plus efficace pour réduire la consommation d'énergie des foyers belges est avant tout de rénover le parc immobilier, qui est âgé et mal isolé. Néanmoins, la rénovation lourde peut être combinée avec d'autres mesures comme l'utilisation de véhicules électriques, l'implémentation de panneaux PV et la réduction des distances de transport, afin de réduire jusqu'à 90% l'énergie consommée en 2040 (comparée à l'année de référence 2012). On peut conclure que l'installation PV n'est qu'une solution parmi d'autres pour réduire l'impact environnemental de nos communautés, puisqu'avant tout, la meilleure énergie est celle qui n'est pas consommée.

Malgré tout, afin d'atteindre les objectifs que l'Europe s'est fixée en matière de production d'énergie renouvelable (32% en 2030), la Belgique a développé des outils pour encourager sa population à produire de l'énergie « verte ». A Bruxelles, c'est une carte solaire qui a été mise à disposition des habitants. En introduisant simplement son adresse, chaque citoyen peut ainsi évaluer en un clic le potentiel solaire de sa toiture. Que ce soit pour le solaire thermique ou le photovoltaïque, le nombre de panneau est estimé en fonction de la surface disponible. Les frais d'installation et les gains économiques et environnementaux sont également calculés (Bruxelles Environnement, 2020b). En Flandres, l'organisation de recherche VITO, qui prône le développement durable, a développé un outil (EBECS) pour aider les particuliers à rénover efficacement leur maison. Un algorithme calcule le meilleur moyen de réduire l'énergie consommée par les foyers, que ce soit par la rénovation ou par l'intégration d'une source d'énergie renouvelable adaptée (VITO, 2022). En Wallonie, un outil semblable a été développé mais n'est plus accessible aujourd'hui. SOLEN-energie.be permettait d'évaluer l'utilisation d'énergie des foyers, que ce soit la consommation d'énergie du logement ou celle consommée pour les déplacements. Il proposait ensuite les mesures les plus efficaces à adopter dans chaque situation, en chiffrant l'économie d'énergie en euros et en kWh. Le logiciel interactif estimait notamment le potentiel solaire des toitures pour l'intégration de PV. Il aidait les particuliers à prendre de bonnes décisions pour améliorer la performance énergétique de leur logement, et à savoir comment changer leurs habitudes pour être plus respectueux de l'environnement et de leur portefeuille (Renouvelle, 2014). Tous ces outils constituent de bonnes initiatives pour faciliter le changement vers un monde plus durable. Grâce à ces campagnes d'information et de sensibilisation, et au soutien des autorités, le public va pouvoir prendre conscience de ses intérêts et investir vers un meilleur futur. C'est en effet par l'action de chacun que la société peut évoluer pour tous.

## 3.2. Les différents capteurs solaires

### 3.2.1. Les panneaux photovoltaïques

#### Un peu d'histoire

Les panneaux photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en électricité. Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » qui signifie lumière et de « Volta », le physicien italien qui découvrit la pile électrique (Labouret and Viloz, 2009). C'est le français Antoine Becquerel qui découvrit en 1839 cette conversion particulière de l'énergie : le changement de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière. Le principe est basé sur l'effet photoélectrique, par lequel les photons présents dans la lumière transmettent leur énergie aux électrons dans un matériau semi-conducteur, ce qui génère un courant électrique continu. Ce n'est pourtant qu'en 1954 que la première cellule PV est mise au point, elle avait alors un rendement de 6%. Les premières applications des panneaux solaires sont dédiées aux satellites envoyés dans l'espace, et leur usage pour alimenter un bâtiment n'est expérimenté qu'en 1975 (Gerbinet, 2011). Aujourd'hui, de plus en plus d'installations PV voient le jour grâce aux avancées technologiques et à la politique incitative mise en place.

Si l'on regarde le nombre d'articles publiés sur ScienceDirect en tapant le mot clef « Photovoltaics », on peut remarquer que le secteur est en pleine croissance depuis 20 ans. Les recherches s'intensifient plus particulièrement depuis 2010, date qui coïncide aussi à un usage plus répandu des panneaux solaires chez les particuliers. On peut effectuer d'autres recherches avec les mots clefs « Building Integrated Photovoltaics », « Building Photovoltaics » et « Architecture Photovoltaics ». En comparant les chiffres, on voit qu'on obtient largement moins de résultats avec ces combinaisons de mots. Le nombre d'articles concernant « l'architecture + PV » et les « BIPV » est similaire, tandis que le duo « Building + PV » a été légèrement plus utilisé, mais reste bien en dessous des articles concernant le « PV » seul. Tout ceci pour conclure que les PV ne sont pas toujours associés au secteur du bâtiment, mais que les recherches sur ces sujets augmentent chaque année.

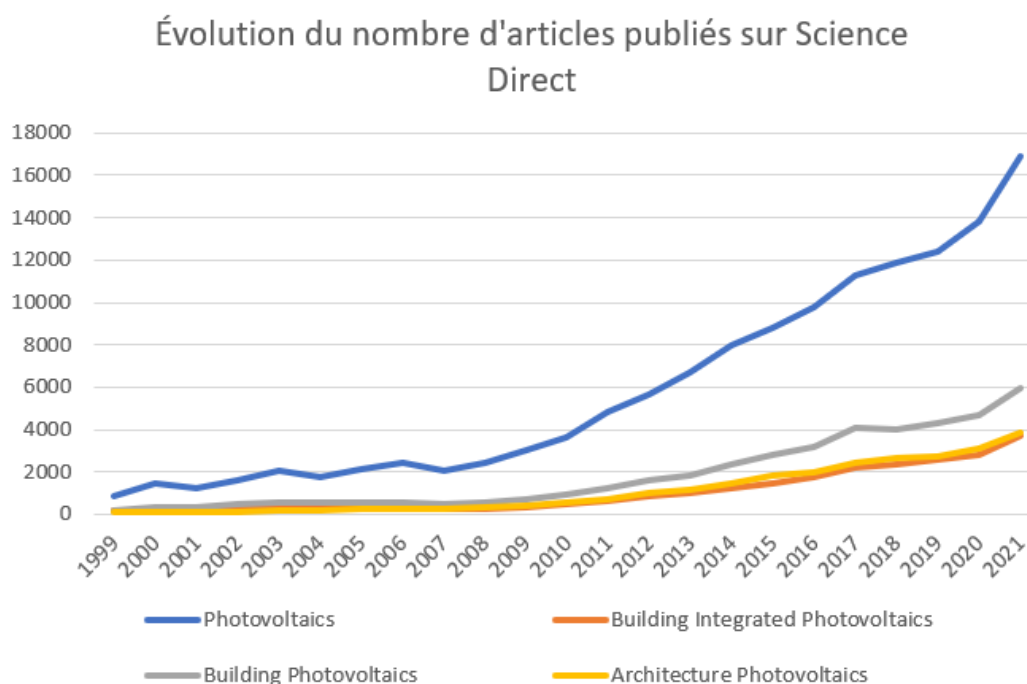


Figure 8: Graphique montrant le nombre d'articles publiés sur Science Direct selon les années

## Fonctionnement et composition

Une cellule photovoltaïque classique est composée de deux couches et fonctionne comme une pile : l'une comporte un matériau semi-conducteur de type N dopée avec du bore, qui possède un déficit d'électrons et l'autre un matériau semi-conducteur de type P dopée avec du phosphore, créant un surplus d'électrons. Sous l'effet de la lumière, les électrons du silicium vont circuler et créer un courant électrique continu à leur jonction (C'est pas sorcier, 2013).

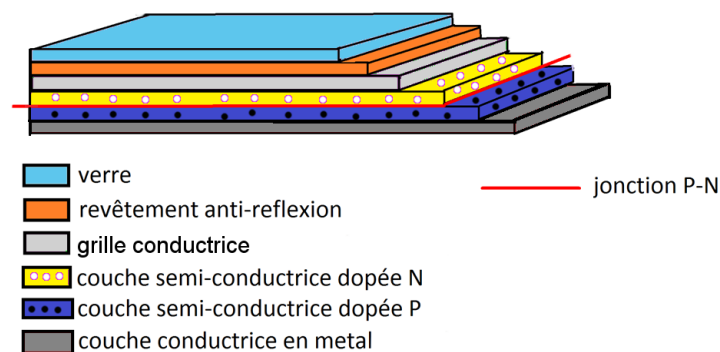


Figure 9: Composition des panneaux photovoltaïques. Source : Allo Solar, 2021

Les cellules sont ensuite assemblées pour générer assez d'énergie pour être exploitées. Elles sont connectées en série ou en parallèle, pour former un module PV. Ces modules sont encapsulés entre deux feuilles EVA (éthylène-acétate de vinyle). La face avant est recouverte d'un revêtement anti-réflexion et d'une feuille de verre, tandis que la face arrière est protégée par une couche conductrice en métal. Un cadre en aluminium est ensuite ajouté ainsi qu'un boîtier de connexion (Gerbinet, 2011).

Il existe deux familles de générateurs PV (Labouret and Villos, 2009) :

- les installations raccordées au réseau (par l'intermédiaire d'un onduleur, le courant continu est convertit en courant alternatif, qui est injecté sur le réseau.) L'avantage est que l'énergie qui n'est pas consommée est renvoyée à d'autres utilisateurs, afin de pouvoir totalement l'exploiter. Ce système ne demande presque pas de maintenance, et a une meilleure durée de vie que les batteries.

- les installations autonomes, qui fonctionnent avec ou sans batterie. Si l'électricité est stockée dans une batterie, il n'y a pas besoin d'onduleur, le courant peut rester continu. Certains systèmes ont à alimentation directe : quand il y a de la lumière, les appareils alimentés fonctionnent, et si non, cela s'arrête. Cela peut par exemple être avantageux dans les pays chauds où les demandes en électricité pour la ventilation coïncident avec la présence de soleil. D'autres systèmes sont autonomes avec batterie : les « Stand-Alone Systems ». Pour alimenter les appareils d'un habitat, il est nécessaire d'avoir un convertisseur de courant continu en alternatif. La batterie agit comme un réservoir d'électricité, mais si elle est remplie, l'énergie excédentaire est perdue, ce qui en fait un grand désavantage. Cependant, elle est utile dans les sites isolés, pour l'électrification rurale dans les pays en voie de développement, ou dans les refuges par exemple, mais pas seulement. L'usage de batterie est également indispensable pour aller vers des quartiers zéro-énergie, comme expliqué précédemment dans l'article sur la ville d'Utrecht.

## Type de cellules

Le matériau utilisé pour la composition des cellules est la silice. ( $\text{SiO}_2$ ) Celle-ci est extraite du sable et du quartz avant de subir un processus pour sa transformation en silicone, silicium pur (Si). Il y a deux catégories de matériaux actifs utilisés dans les cellules (Roberts and Guariento, 2009) :

- Les cristallins, qui sont découpées à partir de lingot composé de silicium qui est un cristal, c'est-à-dire avec un arrangement ordonné des atomes.

- Les « fines couches », qui sont déposées en couches très fines sur un support, et utilisent moins de matière.

Les cellules les plus couramment utilisées sont les cellules cristallines, qui se classifient en deux types : le monocristallin et le polycristallin. Les cellules monocristallines sont faites à partir d'un seul lingot cristallin très pur, tandis que les polycristallines sont composés de larges cristaux dont les joints entre grains diminuent un peu l'efficacité. Ces dernières ont donc un rendement légèrement inférieur mais sont aussi moins coûteuses, et dominant pour l'instant le marché. L'autre type de cellules, à couches fines, est composé de matériaux semi-conducteurs comme du silicium amorphe, du cuivre-indium-di-sélénium (CIS) ou du tellure de cadmium (CdTe). Ces cellules demandent de moins hautes températures de fabrication (200-600° contre 1500° pour les silicium cristallins), sont moins chères mais sont aussi moins performantes. Enfin, il existe aussi des cellules spéciales à haut rendement. Une technologie hybride combinant une cellule cristalline (ex : monocristalline) et une cellule de silicium à couche fine (ex : silicium amorphe) créent une jonction hétérogène, ce qui améliore le rendement. Elles sont appelées cellules à hétérojonction « HIT » pour *Heterojunction with Intrinsic Thin layer*. Le tableau ci-dessous synthétise et compare les différents types de cellules, selon leur rendement et leur surface nécessaire pour la même puissance.

Type	Efficacité typique du module	Surface nécessaire (m <sup>2</sup> /kW <sub>c</sub> )
<b>Silicium hybride à hautes performances</b>	17-18%	6-7
<b>Silicium monocristallin</b>	12-15%	7-9
<b>Silicium polycristallin</b>	11-14%	7-10
<b>Couches fines CIS</b>	9-11%	9-11
<b>Couches fines CdTe</b>	6-8%	12-17
<b>Couches fines silicium amorphe</b>	5-7%	14-20

Tableau 4: Rendement des différents types de cellules. Source : Roberts et Guariento, 2009 (p.21)

Bien que ce tableau date de 2009, et qu'aujourd'hui les rendements ont légèrement augmenté (de quelques pourcents, mais pas de manière significative), le classement de performance des types de cellules reste le même, et les chiffres représentent un bon ordre de grandeur.

### Puissance et rendement

La puissance d'un module ou d'une installation PV détermine la capacité de production d'électricité des panneaux. Elle se mesure en watt crêtes : il s'agit de la puissance électrique maximale, qui est atteinte sous des conditions de référence dites « STC » (*Standard Test Conditions*), c'est-à-dire avec un éclairage perpendiculaire de 1kW/m<sup>2</sup>, des cellules à une température de 25°, et un spectre solaire AM 1,5 (le spectre de lumière solaire qui a été filtrée en passant par 1,5 fois l'épaisseur de l'atmosphère). En réalité, ces conditions sont rarement rencontrées sous le climat belge ; ainsi les panneaux n'atteindront pas souvent leur puissance maximale. C'est pourquoi on utilise également la température nominale opérative des cellules (NOCT en anglais : *Nominal Operating Cell Temperature*) pour spécifier un module PV. La NOCT est déterminée par un niveau d'irradiation de 800 W/m<sup>2</sup>, avec une température ambiante de 20° et une vitesse du vent de 1m/s (Labouret and Villoz, 2009). Outre la puissance (W) et le coefficient de température (C°), un panneau peut être évalué selon son rendement, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'énergie produite et l'énergie solaire reçue par la

surface. On estime que 14 à 18% de la lumière captée est transformée en énergie électrique pour les cellules polycristallines, tandis que le rendement peut aller jusqu'à 24% pour le monocristallin (Engie, 2022a). Cela signifie que le reste de l'énergie solaire incidente est converti en chaleur (+/- 80%). Le désavantage des modules en silicium est que leur efficacité diminue fortement sous l'effet de la chaleur ou sous un faible éclaircissement (Gerbinet, 2011). Les technologies sont cependant en constante évolution.

### Recyclage

Les panneaux PV ont une durée de vie de 25 ans en moyenne. Selon les normes européennes, les fabricants sont responsables de la collecte et du recyclage des modules en fin de vie. Ils peuvent valoriser 93,5% des déchets en les réutilisant pour produire de nouveaux panneaux ou en les fournissant comme matière première à l'industrie (ex : métaux). Les matériaux recyclables dans la composition des panneaux sont le verre, l'aluminium et les métaux conducteurs. Cependant, le recyclage reste compliqué pour les cellules composites (Energie Commune, 2021a).

### Énergie renouvelable

L'Agence Internationale de l'énergie a calculé qu'une aire représentant 4% de la surface des déserts les plus arides (145 000 km<sup>2</sup>) est suffisante pour approvisionner la planète en électricité (Labouret and Viloz, 2009). Les installations PV fonctionnent silencieusement, sans bouger, nécessitent peu de maintenance et n'émettent pas de polluant. En plus de freiner les changements climatiques, elles permettent une meilleure qualité de l'air et un approvisionnement local en énergie, avec des coûts moins élevés que ceux des énergies fossiles dont le prix tend encore à augmenter. C'est un des secteurs des énergies renouvelables qui croît le plus rapidement, surtout dans le contexte socio-économique actuel où le marché de l'énergie connaît une hausse des prix historique (Engie, 2021). En outre, le silicium utilisé pour fabriquer les cellules est l'un des matériaux les plus abondants de la croûte terrestre. Même si de l'énergie est nécessaire pour extraire et transformer ce silicium, ainsi que fabriquer, transporter et recycler les panneaux PV, l'énergie grise dépensée est compensée en moins d'1,5 an par la production d'électricité (Energie Commune, 2021a). Des études détaillant l'impact environnemental du PV seront décrites plus tard (cf. 3.3.1.2 Aspects durables). En Belgique, en 2021, les énergies renouvelables produisent presque 25% de la consommation électrique du pays, dont 8% sont produits par le PV (Energie Commune, 2021b).

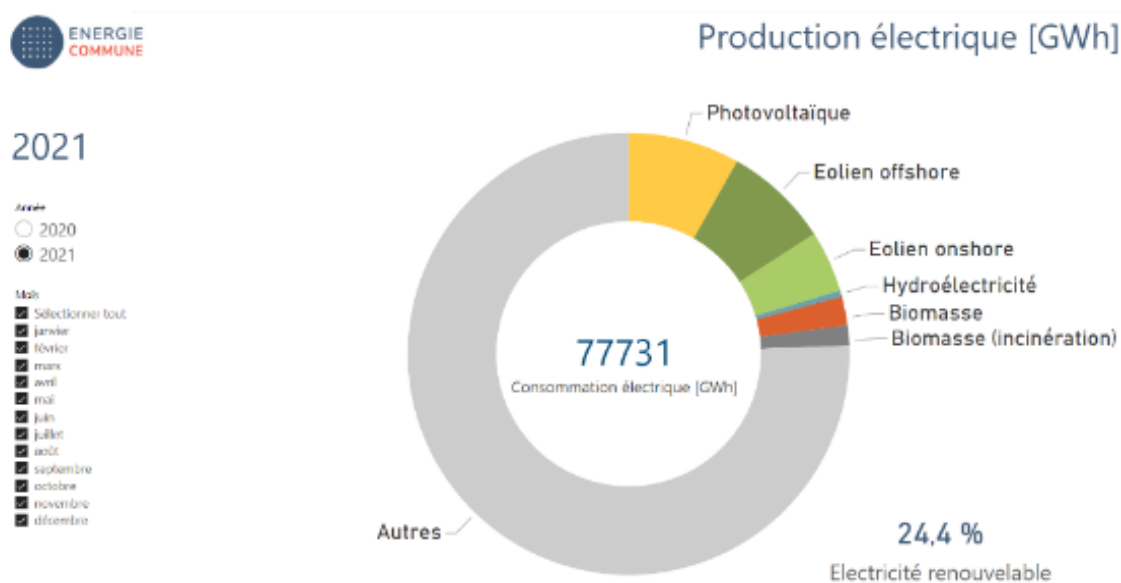


Figure 10: Mixte électrique belge, Source : Energie Commune, 2021b



## Facteurs influençant le rendement des panneaux PV

Comme mentionné dans l'introduction sur l'énergie solaire, il y a de nombreux facteurs qui influencent la production des panneaux PV :

### - La localisation

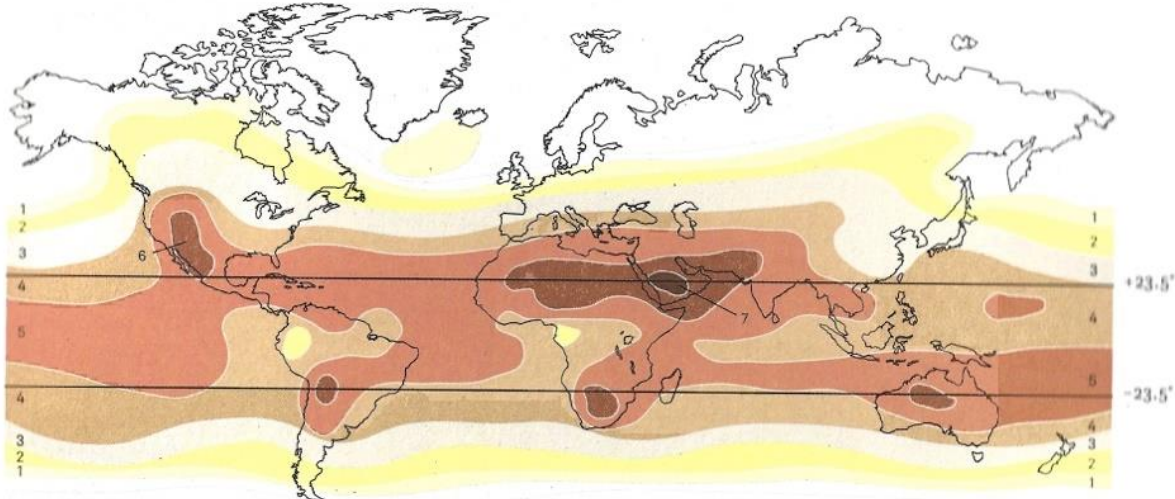


Figure 11: Irradiation solaire moyenne journalière horizontale à travers le monde, Source : Roberts and Guariento, 2009 (p.41)

La planète ne reçoit pas la même quantité d'énergie solaire partout : les latitudes proches des tropiques reçoivent plus d'énergie solaire. Les zones proches de l'équateur sont plus sensibles aux phénomènes nébuleux (moussons et orages). Cependant, elles connaissent peu de variations saisonnières et ont un rayonnement global journalier presque constant. Au contraire, aux latitudes plus élevées, le contraste été/hiver s'accroît, ce qui cause des périodes creuses au niveau de l'éclairement. Outre la latitude, les saisons et la couverture nuageuse, il y a d'autres facteurs qui influencent également le rayonnement solaire d'une région, comme l'altitude et l'albédo. En montagne par exemple, on se trouve souvent au-dessus de la couverture nuageuse, et donc le rayonnement direct sera plus élevé. La neige joue aussi un rôle par sa réflectivité, qui est quatre fois plus élevée que pour un sol ordinaire. La mer augmente également le rayonnement réfléchi, grâce à son albédo élevé. En revanche, la présence de polluant dans l'air peut altérer le rayonnement direct perçu par les surfaces (Labouret and Viloz, 2009).

### - L'effet de la température et la ventilation

L'efficacité des cellules baisse avec leur augmentation de température. On sait que 10-15% de l'énergie solaire incidente est convertie en électricité, et que le reste est transformé en chaleur. Celle-ci diminue presque linéairement la rentabilité des cellules cristallines, avec une perte d'environ 0,4% par degré au-dessus de 25°. En été, les cellules peuvent atteindre une température de 70°, ayant un impact considérablement négatif. Le silicium amorphe n'est pas aussi sensible à la variation de chaleur, et produit davantage d'électricité que les cellules à base de silicium cristallin dans les climats désertiques et très ensoleillés. Néanmoins, il est essentiel de ventiler la face arrière des modules PV, grâce à une lame d'air. Les façades sont moins faciles à rafraîchir que les toitures. Pour avoir un ordre de grandeur, avec une bonne ventilation, les toitures ne perdent que 2% d'efficacité contre 4% pour les façades pour une température de cellules de 29° à 35° plus élevée que celle de l'air ambiant (Roberts and Guariento, 2009).

### - L'inclinaison et l'orientation

Les courbes de la figure précédente donnent le taux d'irradiation sur une surface plane, mais ce taux peut être augmenté si les surfaces sont inclinées. L'inclinaison optimale varie selon la hauteur du soleil, qui dépend d'une saison à l'autre, et d'une latitude à l'autre. La lumière étant plus rasante dans les latitudes élevées, il est intéressant d'incliner plus fortement les modules dans ses régions pour récupérer un maximum d'énergie solaire en hiver (Règle de l'inclinaison optimale en hiver : la latitude +10°) (Labouret and Viloz, 2009). Quant à l'inclinaison optimale pour la production estivale, il vaut mieux qu'elle soit plus faible, de 10° à 20°. Une autre version est donnée dans un livre différent (Roberts and Guariento, 2009). L'inclinaison optimale pour toute l'année peut être estimée en soustrayant 20° à l'angle de la latitude étudiée. Sous nos latitudes, elle serait donc approximativement égale à 50° - 20° = 30°. Dans l'hémisphère nord, la meilleure orientation est le sud, et ce sera l'inverse dans l'hémisphère sud. Le graphe ci-dessous illustre le niveau d'éclairage d'une surface en fonction de son orientation et de son inclinaison. Ainsi, l'optimum sous le climat belge est une surface inclinée de 38° au Sud.

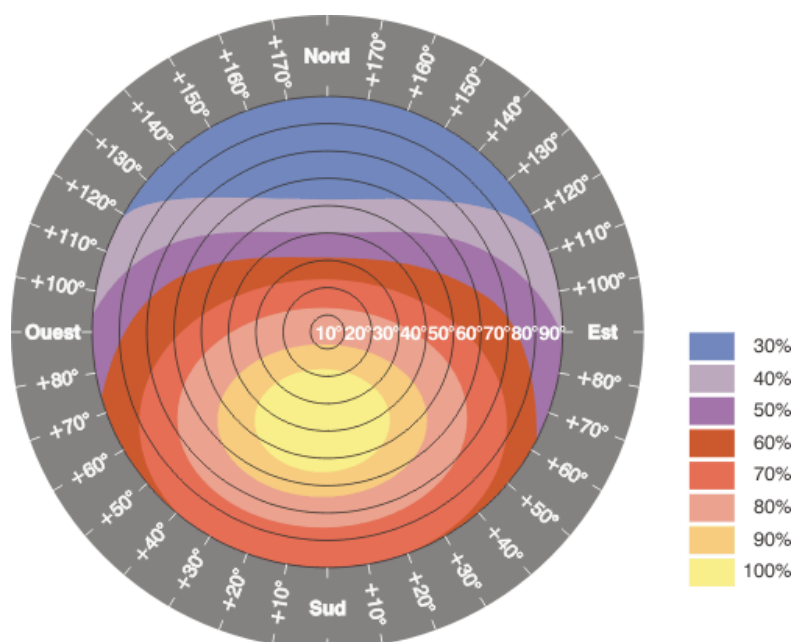


Figure 12: Graphe de la quantité d'énergie solaire reçue sur une surface en Belgique, selon son inclinaison et son orientation. Source : Energie Plus, 2010a

### - L'ombrage

Les cellules PV sont plus efficaces si elles sont éclairées uniformément. Même un léger ombrage ponctuel influencera grandement la capacité de production. On peut comparer cet effet à un tuyau d'arrosage : si l'on comprime le tuyau à un seul endroit, il y aura moins d'eau à la sortie. Si un arbre, une cheminée ou un poteau vient ombrager une cellule, la production totale d'électricité de l'installation sera diminuée (Roberts and Guariento, 2009).

### 3.2.2. Les capteurs thermiques

Les panneaux solaires thermiques ont un tout autre mode de fonctionnement. Ils utilisent l'énergie solaire pour la transformer en chaleur utile. Le rayonnement solaire infrarouge est absorbé par une surface noire et les calories sont captées pour chauffer un fluide. Plus exactement, les capteurs thermiques absorbent les photons de la lumière et les convertissent en chaleur. Celle-ci est ensuite cédée à un fluide caloporteur qui circule dans des tubes. La plupart du temps, le circuit chauffe ensuite l'eau sanitaire, mais il peut aussi être utilisé pour le chauffage des habitations. Le système sera d'autant plus efficace que la différence de température entre la source froide et l'eau chaude désirée est faible. C'est pourquoi il est plus souvent utilisé dans les pays chauds, qui bénéficient de beaucoup d'ensoleillement et n'ont pas besoin de chauffage central (Labouret and Viloz, 2009). Il est également adapté pour le chauffage des piscines, ou pour le chauffage par le sol, où les températures d'eau sont moins élevées ( $\pm 30^\circ$ ).

Il y a plusieurs types de capteurs : capteurs plans vitrés ou non, tubes sous vides. Les capteurs plans sont constitués d'un absorbeur, une « surface noire » qui absorbe l'énergie solaire, qui est transférée aux tubes dans lequel circule le fluide caloporteur. Un isolant vient compléter la composition pour limiter les déperditions thermiques. Une couverture en verre permet de créer un effet de serre au sein du panneau et diminue les pertes de chaleur par convection. Les capteurs non vitrés sont des installations plus simples qui peuvent être utilisées pour chauffer l'eau des piscines en été. Les capteurs à tubes sous vides ont le même fonctionnement sauf que le vide diminue encore les déperditions thermiques. Cette technologie est plus efficace et son rendement est de 70%, même pour des écarts de température de  $60^\circ$  entre l'eau froide de distribution et l'eau chaude du ballon (Energie Commune, 2021c).

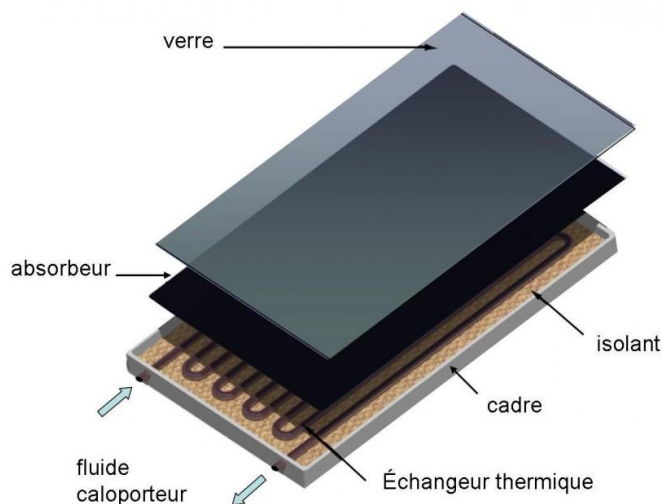


Figure 13: Composition des capteurs thermiques plans vitrés, Source : 2ES, 2021

En moyenne, le rendement du solaire thermique est de l'ordre de 30-40%, ce qui est plus élevé que le rendement du photovoltaïque (15-20%) (Energie Plus, 2010b). Bien que les besoins d'un ménage en kWh en électricité et en eau chaude sanitaire soit approximativement du même ordre de grandeur ( $\pm 3\,500$  kWh/an), la demande en eau chaude sanitaire est plus difficilement couverte à cause des grosses pertes de rendement en hiver, lorsque les températures extérieures sont froides, ce qui au contraire est profitable pour l'efficacité des cellules PV. Le système est également très sensible à la variabilité des apports solaires, un faible ensoleillement diminuant fortement le rendement. En hiver en Belgique,

l'effet combiné des faibles températures extérieures et du faible éclaircissement rend la production insuffisante pour répondre à la demande d'eau chaude sanitaire d'une habitation : il faudra donc prévoir un autre système de chauffe. Le solaire thermique permet de couvrir en moyenne 60% des besoins annuels en eau chaude sanitaire d'un ménage.

Les experts estiment que les capteurs peuvent fonctionner pendant 25 ans. La dette énergétique est remboursée après une ou deux années d'utilisation, ce qui est similaire aux panneaux PV. En ce qui concerne le recyclage, 90% des panneaux peuvent être recyclés. En effet, des composants comme le verre, l'aluminium, le plastique et le cuivre sont des matériaux entièrement recyclables (Energie Commune, 2021c).

Le coût d'une installation de panneaux solaires thermiques varie entre 4 300 et 5 300€. Il existe des primes en Wallonie pour amortir le coût d'installation. Cela dépend de conditions particulières mais celle-ci s'élève en moyenne à 2 500 €. L'investissement de départ est donc fortement réduit comparé à l'installation de panneaux PV. En revanche, sur le long terme, les panneaux thermiques sont moins lucratifs, puisqu'il n'y a pas le système des Certificats Verts. Néanmoins, ils permettent d'économiser environ 10% sur la facture d'énergie (guide-panneaux-photovoltaïques.be, 2022)

Il existe un autre type de technologie thermique : les centrales solaires thermodynamiques à concentration. Ce sont de grands dispositifs qui intègrent des lentilles spéciales combinées à des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et chauffer l'eau d'un fluide caloporteur à de très hautes températures. Cette chaleur produit de la vapeur qui permet de faire tourner des turbines, produisant ainsi de l'électricité. Ce système est encore très peu développé actuellement, mais peut s'avérer prometteur dans les régions recevant un flux solaire direct (peu nuageux) (Labouret and Viloz, 2009).

### 3.2.3. Les panneaux hybrides

Les panneaux hybrides combinent ces deux technologies solaires afin de remédier à la baisse d'efficacité des cellules PV à cause de l'augmentation de température (Baljit et al.,2016). Dans ce système, les cellules PV produisent de l'électricité tandis que l'absorbeur thermique capte la chaleur des cellules et l'évacue, ce qui permet d'améliorer leur rendement. De plus, la chaleur est récupérée pour d'autres usages domestiques comme le chauffage du bâtiment. Deux fluides ont été étudiés pour jouer le rôle caloporteur : l'air et l'eau. Les systèmes utilisant de l'eau auraient de meilleures performances, mais seraient plus compliqués à installer. Ils sont propices pour se raccorder au circuit d'eau chaude sanitaire. Les systèmes utilisant l'air sont utilisés pour fournir un chauffage d'appoint des locaux, ou pour se coupler aux technologies de pompes à chaleur (aérothermiques ou géothermiques).

Les producteurs vantent surtout l'économie d'espace de ce système, pour optimiser la surface des toitures plus petites. De plus, le rendement électrique est plus élevé que dans un panneau PV traditionnel. Cependant, le rendement thermique est plus faible que dans une technologie traditionnelle, et ce chauffage ne peut être utilisé qu'en appoint à un autre système. La durée de vie des panneaux serait de 30 ans (Panneausolaire-info, 2022).

### 3.2.4. Les modules intégrés au bâtiment

Les technologies abordées précédemment peuvent être intégrées au bâtiment et ainsi former des BIPV (Building Integrated Photovoltaic) et des BIPV/T (Building Integrated Photovoltaic /Thermal). Ces modules font partie du bâtiment, et remplacent des matériaux de construction traditionnels : ils ne sont pas juste posés sur le revêtement extérieur, mais ils deviennent le revêtement extérieur. Ils assurent une double fonction : celui de matériau actif, produisant de l'énergie et celui d'enveloppe, protégeant le bâtiment de son environnement extérieur et lui donnant son aspect esthétique. Les BIPV sont une solution intéressante pour les bâtiments qui visent à réduire leur empreinte carbone et être énergétiquement autonomes. Toutes les surfaces bien exposées pourraient contribuer à approvisionner le bâtiment en électricité. Que ce soit en façade, en toiture, dans les vitrages ou dans les éléments complémentaires comme les protections solaires ou les balcons, les cellules PV peuvent s'intégrer partout où l'ensoleillement est suffisant. Les BIPV, en tant qu'éléments constructifs, doivent remplir des fonctions architecturales variées : résistance mécanique et stabilité, protection contre les intempéries (pluie, neige, vent...), isolant thermique et acoustique, apport de lumière, protection contre les incendies... (Wallonie énergie SPW, 2017).

Le coût élevé des BIPV est la raison pour laquelle ils sont généralement employés dans le secteur tertiaire et industriel, qui dispose souvent de grandes surfaces à exploiter. Mais ils peuvent être intéressants aussi dans le résidentiel, que ce soit dans un bâtiment neuf ou en rénovation. L'important est de prévoir un emplacement bénéficiant d'apports solaires réguliers et d'estimer à l'avance le rendement de l'installation, afin de mieux gérer les coûts engendrés (Wallonie énergie SPW, 2017).

Le principe général d'un élément PV intégré au mur d'une habitation est illustrée sur la figure 3, qui provient d'une étude réalisée pour comparer les différentes technologies solaires (Baljit et al., 2016). Afin de rafraîchir les cellules PV, une lame d'air prévue à l'arrière des panneaux ventile l'interstice avec le mur ou le toit. Dans les systèmes BIPV, l'air est évacué vers l'extérieur, tandis que dans les BIPV/T, la chaleur de l'air est récupérée pour le chauffage de l'habitation, le séchage ou la production d'eau chaude sanitaire.

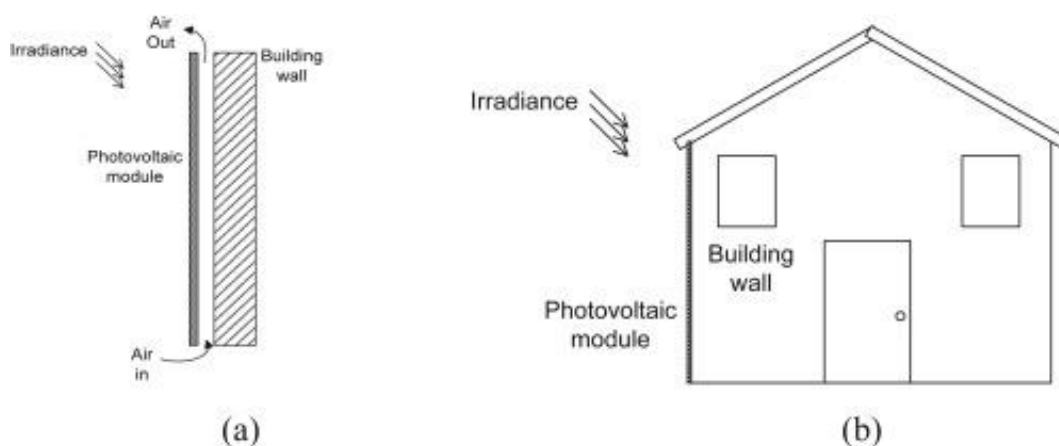


Figure 14: Building Integrated Photovoltaics (BIPV), a) illustrant la ventilation du mur par une lame d'air, b) montrant l'intégration au bâtiment. Source : Baljit et al., 2016

Plus de détails sur les technologies existantes sont donnés dans la section suivante.

### 3.3. BIPV : Le photovoltaïque intégré au bâtiment

#### 3.3.1. Approche technique

##### 3.3.1.1. Technologies existantes

Dans cette partie, les recherches sur les différentes technologies existantes vont être présentées. Les technologies concernant les façades et les toitures se basent en partie sur l'état de l'art réalisé par des chercheurs du « Solar Energy Research Institute » d'une université en Malaisie (Baljit et al., 2016). Rappelons la différence entre les modules BIPV, qui ne produisent que de l'électricité, et les modules BIPV/T, qui sont des éléments hybrides produisant de l'électricité et récupérant la chaleur pour d'autres usages domestiques. Ces derniers peuvent être aérovoltaiques, et utiliser l'air comme fluide transportant la chaleur, ou hydrauliques, et fonctionner avec de l'eau.

##### a) Façade

Comme nous l'avons vu dans la partie sur l'énergie solaire, il existe un vrai potentiel solaire pour les surfaces verticales, surtout en mi-saison et pendant l'hiver, lorsque le soleil est plus bas dans le ciel. Les façades sud mais aussi les façades est et ouest peuvent être exploitées pour capter l'énergie solaire durant toute la journée. La condition est que ces surfaces ne soient pas ombragées par les éléments du contexte. L'influence de l'inclinaison a été étudiée sur un cas pratique en Suisse (Chatzipanagi et al., 2016). A Lugano, des modules inclinés à 90° sont préférables, car les modules inclinés à 30° connaissent des températures de cellules plus élevées, ce qui réduit leur performance. Les modules inclinés à 30° produisent néanmoins davantage d'électricité l'été, même si leur efficacité est moins bonne, car l'irradiation solaire est nettement plus élevée. En hiver, le soleil est bas et les ombres des arbres diminuent l'éclairement des surfaces verticales, bien que celles-ci produisent légèrement plus que le module à 30°. La position et l'inclinaison des panneaux doit être bien réfléchi au cas par cas, en prenant également en compte les variations saisonnières afin d'évaluer au mieux la performance du système.

#### Les façades BIPV

Examinons tout d'abord les BIPV en façade, lorsque la chaleur évacuée n'est pas récupérée. Différents facteurs de conception influencent leur performance : l'épaisseur de la lame d'air ventilée, les vannes induisant une convection naturelle ou forcée.

La façade double et son comportement thermique ont été étudiés dans de nombreuses recherches. Ce type de façade a été conçu dans les pays à climats difficiles, afin d'empêcher l'humidité de la pluie de traverser le mur et de pénétrer la maison. La façade double comporte un bardage extérieur séparé du mur porteur intérieur et de l'isolation par une lame d'air ventilée. Traditionnellement en brique, le parement extérieur qui protège des intempéries, peut aussi être constitué de BIPV opaques. Les modules solaires sont fixés sur des montants métalliques et les câbles électriques s'insèrent derrière la lame d'air ventilée. Concernant cette dernière, une étude (Zogou et Stapountzis, 2011) compare la convection naturelle et la convection forcée par des vannes pour l'entrée et la sortie d'air. Il en résulte que la ventilation mécanique augmenterait les transferts de chaleur, permettant de refroidir d'avantage les cellules, ce qui améliore leur efficacité. La largeur de la lame d'air joue un rôle majeur puisqu'elle influence la vitesse de l'air (Gan, 2009). Plus la lame est étroite, plus l'air y circule vite. Une grande vélocité de l'air augmente les échanges de chaleur par convection. Là encore, cet effet est bénéfique pour le rendement des cellules. Il est donc important de bien dimensionner le système afin d'optimiser le rafraichissement des panneaux.

La performance électrique et thermique d'une façade photovoltaïque bifaciale intégrée au bâtiment a été évaluée lors d'une expérience réalisée pendant un an en Savoie (Assoa et al., 2021). Le but était d'étudier un module applicable à la rénovation des bâtiments ; c'est pourquoi le système a été placé sur un mur préexistant, sur lequel on a apposé une couche d'isolation possédant un revêtement en béton fibré, séparé des modules BIPV semi-transparents par une lame d'air ventilée. Le béton fibré sert de surface réfléchissante pour augmenter l'effet PV à l'arrière des cellules. Il s'agit donc d'un élément de façade BIPV biface. Ce prototype a été comparé avec un mur en béton non isolé, notamment au niveau de la consommation d'énergie.

Tout d'abord, les performances électriques de l'installation sont évaluées. Deux facteurs primordiaux font varier la production d'électricité d'un mois à l'autre de l'année : l'ensoleillement et les températures. D'une part, l'irradiation solaire est deux fois et demi moins élevée en hiver (à cause du temps plus couvert et de l'intensité lumineuse plus faible). Or, on sait aussi que les cellules sont moins chaudes en hiver et auront donc un meilleur rendement. Ces deux effets pris en compte donnent pour résultat que la production en hiver n'est pas beaucoup plus faible que la production estivale. Les cellules produisent le plus d'électricité et atteignent leurs meilleures performances en mi-saison (février-mars et septembre-octobre).

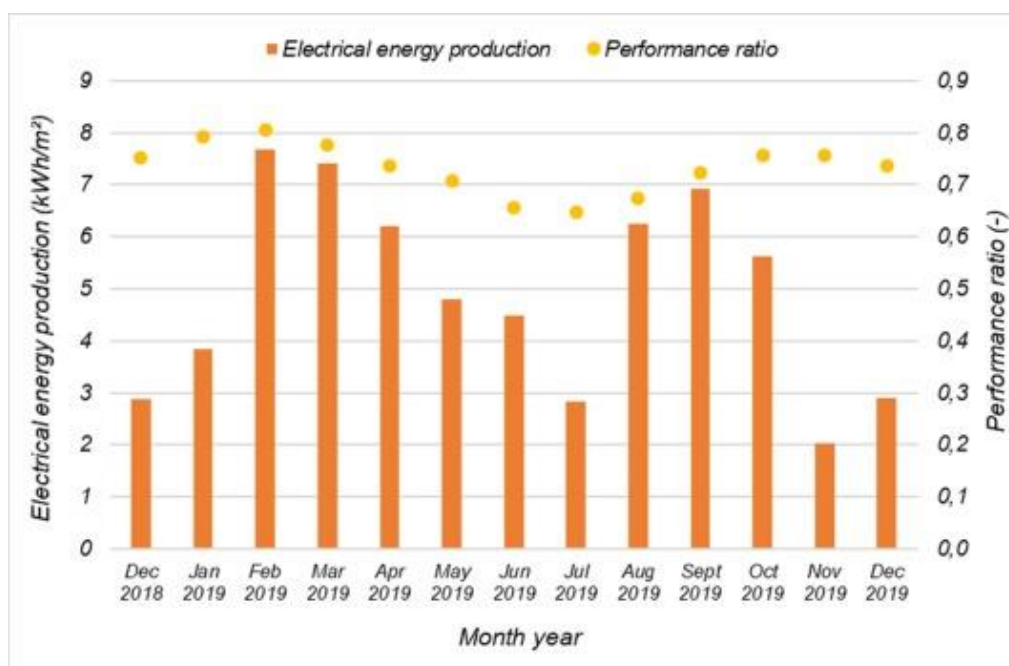


Figure 15: Production d'électricité et ratio de performance d'un module BIPV en façade sud (avec surface réfléchissante arrière) au cours de l'année. Source : Assoa et al., 2021

En outre, ce système possède de bonnes performances thermiques grâce à la couche d'isolant qui a été posée. Le module BIPV ne joue pas de rôle dans l'isolation du mur puisque la lame d'air est ventilée pour refroidir les cellules. En conclusion, les éléments de façades bifaces peuvent être utilisés lors de la rénovation énergétique de murs non isolés, en complément d'une couche d'isolation thermique possédant une surface réfléchissante. L'isolant apportera le bénéfice thermique sur la consommation d'énergie du bâtiment, tandis que le système biface apporte un gain de production de 22% en plus que son homologue mono-face.

Un autre type de façade étudié est le mur rideau. Grâce à l'usage des colonnes en acier ou en béton armé, la façade n'est plus requise pour supporter les charges. Celle-ci peut donc être faite d'un matériau non porteur prolongé sans limite d'étage pour fermer l'enveloppe du bâtiment. Ce système

est idéal pour les constructions de grande hauteur. Les modules BIPV vitrés peuvent être montés et étanchéifiés de la même manière que les panneaux de vitrages ordinaires. Concernant ses performances thermiques, une façade vitrée intégrant des cellules PV a été comparée à une façade en verre traditionnelle à Hong Kong. L'étude a démontré que la façade BIPV permet de réduire le risque de surchauffe à l'intérieur des bâtiments (Han et al., 2013).

Finalement, les façades double-peau sont brièvement abordées. Cette enveloppe est composée de deux couches de vitrage, séparées par un espace d'air, qui forment un tampon thermique pour atténuer les variations climatiques. Ce modèle a été inventé pour améliorer les performances thermiques des façades vitrées. Le système peut en effet capter les gains solaires en hiver, et rafraîchir le bâtiment en été par une ventilation couplée à des dispositifs d'ombrage amovibles. La peau extérieure convient pour l'installation de BIPV car elle ne contient qu'un simple vitrage effectivement ventilé, et peut également être opaque ou semi-transparente pour créer de l'ombrage (Roberts and Guariento, 2009).

### Les façades BIPV/T

Je vais aborder à présent les technologies BIPV/T. Premièrement, les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur sont investigués (Kim and Kim, 2012). La récupération de la chaleur de l'air permet de réaliser de grandes économies d'énergie. Une étude compare les trois types de mur : BIPV attaché au mur sans ventilation (Cas I), BIPV avec une lame d'air (Cas II) et BIPV/T ventilé par un flux d'air intérieur (Cas III). Le dernier système est sans surprise le plus rentable, car il augmente l'efficacité électrique des cellules et réduit la demande de chauffage de 27% par rapport au deuxième cas.

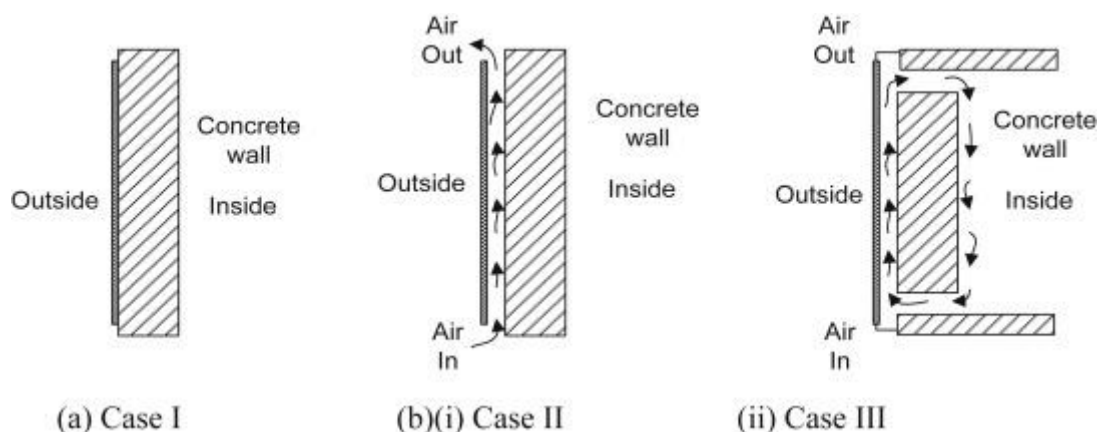


Figure 16: Comparaison des 3 types de mur. Source : Baljit et al., 2016

Deuxièmement, la performance des systèmes utilisant l'eau comme fluide caloporteur est évaluée (Baljit et al., 2016). L'intégration d'un système de circulation d'eau dans le mur permet de préchauffer les parois du bâtiment. Les pompes et le diamètre des tuyaux peuvent être optimisés pour favoriser l'absorption de chaleur. Le tout doit être combiné à un large réservoir d'eau. Ce système peut également être utilisé pour refroidir les bâtiments en été.



## b) Vitrage

Il existe de nombreux produits de vitrages comprenant des cellules solaires, avec des formes variées, des angles d'inclinaison différents, et même de toutes les couleurs. Ils transmettent une partie plus ou moins importante du rayon lumineux et servent de protection contre les intempéries. L'écart entre les cellules PV est déterminé en fonction de la transparence et de la production électrique désirée. La lumière ne passe qu'entre les cellules, leur donnant un effet mosaïque. Les cellules peuvent aussi être semi-transparentes, en couches minces. Les modules laissent passer une partie de la lumière en leur surface, par la transparence partielle de l'empilement des couches. Les vitrages peuvent apporter de l'ombrage permanent à l'intérieur du bâtiment et laisser pénétrer une lumière diffuse (Jelle and Breivik, 2012).



Figure 17: À gauche : Vitrage solaire coloré du SwissTech Convention Center. Source : Solaronix, 2022  
À droite : Fenêtre à cellules solaires opaques espacées. Source : LPVO, 2019

Les vitrages BIPV présentent un avantage thermique dans les pays chauds. Puisqu'ils sont plus isolants, ils laissent moins passer la chaleur en été et limitent ainsi les besoins de rafraîchissement à l'intérieur des bâtiments (Yu et al., 2021). Comme vu pour les façades rideaux, ces vitrages sont donc intéressants dans les gratte-ciels qui ont un pourcentage élevé de fenêtres par rapport aux murs, et donc un risque accru de surchauffe.

La performance des vitrages BIPV peut être analysée selon trois aspects : électrique, thermique et optique (Yu et al., 2021). La génération d'électricité est évaluée selon le rendement des cellules et le pourcentage de production par mètre carré. La qualité thermique est exprimée grâce au CGCS (coefficient de gain de chaleur solaire) et le coefficient de transmission thermique (valeur U). Le CGCS détermine la quantité d'énergie solaire incidente dans la pièce, tandis que le U quantifie les pertes/gains de chaleur à travers la paroi. Pour ce qui est de la performance optique, le confort et la quantité de lumière à l'intérieur sont évalués grâce aux facteurs de transmission visuelle de la lumière (TVL) et la probabilité d'éblouissement. Les vitrages BIPV ont un impact sur la consommation en énergie du bâtiment comme expliqué à travers ces trois critères, puisqu'ils produisent de l'électricité qui permettra de diminuer la consommation électrique d'air-conditionné et d'éclairage, tout en améliorant les performances thermiques et optiques d'une façade vitrée traditionnelle.

Différents types de vitrage BIPV ont été étudiés : simple vitrage, double vitrage avec couche d'air fermée, double vitrage avec une couche d'air ventilée, double vitrage avec une couche de vide (Yu et al., 2021). Une étude réalisée récemment (Guo et al., 2020) compare les trois premières configurations, pour cinq villes chinoises ayant des climats différents (voir la figure ci-dessous). Il en ressort que les fenêtres naturellement ventilées avaient de meilleures performances énergétiques annuelles. En effet, la convection naturelle de l'air engendre une diminution de la température des cellules PV, qui ont

donc un meilleur rendement. Le mode été convient mieux aux climats chauds puisque la chaleur des cellules est ventilée vers l'extérieur, tandis que le mode hiver s'adapte mieux dans les climats plus froids où la chaleur évacuée est réutilisée pour chauffer la pièce à l'intérieur. Le double vitrage BIPV serait également plus performant que le simple vitrage BIPV. L'influence de l'orientation et du degré de transparence du vitrage a aussi été étudié, avec comme conclusion le fait qu'une transmission de 10% de la lumière était plus efficace dans la plupart des climats étudiés qu'une transmission de 5%, sauf pour celui d'une ville proche de l'équateur où l'ensoleillement est beaucoup plus important donc une transmission plus faible serait plus bénéfique. Ces chiffres sont valables pour les villes chinoises étudiées qui ont un climat relativement chaud et influencé par la mousson. Une si faible transmission de lumière ne serait pas applicable en Belgique. Nous pouvons en retenir que la conception des vitrages BIPV est à adapter en fonction du climat dans lequel ils se trouvent.

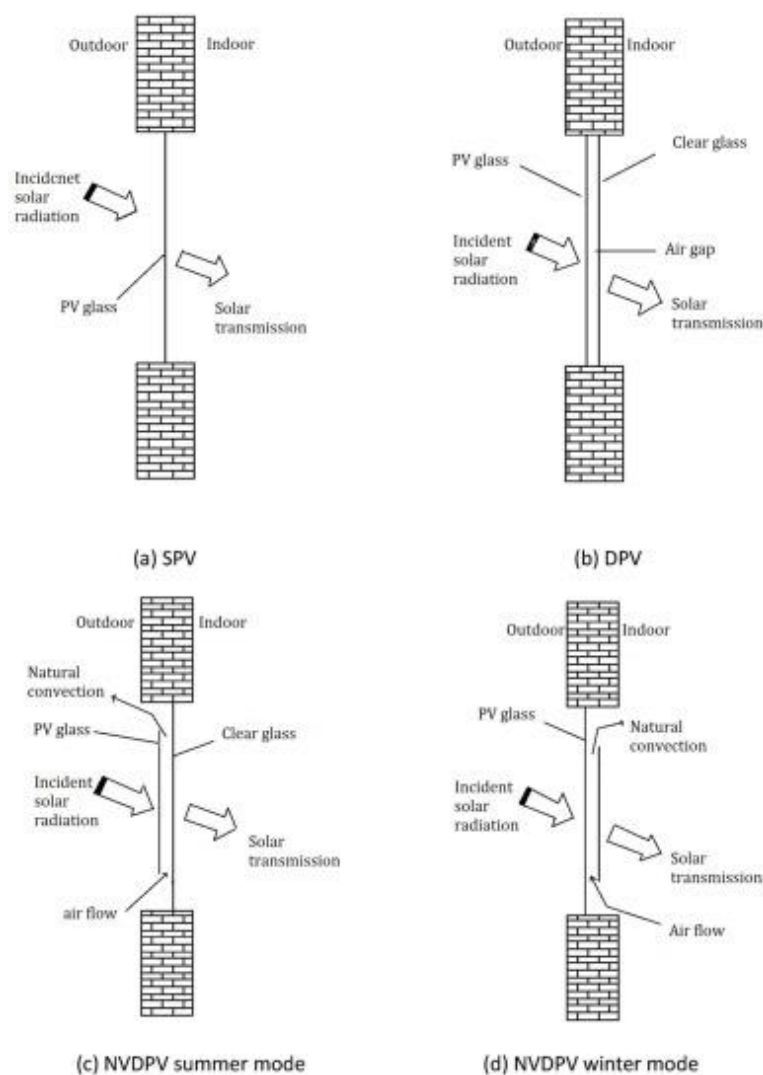


Figure 18: Différentes configurations de vitrage BIPV : a) Simple vitrage BIPV, b) Double vitrage BIPV, c) et d) Double vitrage BIPV naturellement ventilé. Source : Guo et al., 2020

Pour ce qui est des vitrages sous vide, leur valeur U est bien plus faible ( $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) que pour tous les autres vitrages considérés plus tôt (Yu et al., 2021). Ils ont de meilleures performances thermiques car les échanges de chaleur sont diminués, et cela convient aussi pour les climats froids. Le fait d'avoir un vide améliore aussi l'isolation acoustique et protège les cellules PV de l'érosion due à l'humidité dans l'air.

Malgré leur intérêt indéniable, ces technologies présentent plusieurs défauts (Yu et al., 2021). Tout d'abord, les fenêtres BIPV placées en façade sont souvent ombragées par les éléments du contexte, ce qui baisse leur production électrique. Le fait d'intégrer des cellules PV dans le vitrage diminue l'apport de lumière à l'intérieur, ce qui peut être un inconvénient pour l'éclairage des espaces. Il existe beaucoup d'études sur les climats chauds, la plupart réalisées en Chine qui est très avancée sur ces technologies. Des recherches pour des climats plus proches du nôtre bénéficiant de moins d'ensoleillement manquent à l'heure actuelle. De plus, d'autres technologies de vitrage (triple, vide) sont plus performantes du point de vue thermique et plus accessibles financièrement que celles intégrant des cellules PV.

### c) Toiture

En ce qui concerne les produits BIPV appliqués en toiture, on retrouve des membranes étanches, des modules et des tuiles. Le toit solaire souple est un revêtement étanche et flexible, qui convient pour les toits-terrasses de surfaces importantes, comme sur les bâtiments industriels et commerciaux. Malgré son faible rendement, il a l'avantage d'être très léger, et peut être facilement applicable en rénovation. Il faut cependant veiller à avoir une pente de 5% pour l'évacuation des eaux (Labouret and Villos, 2009).

Les tuiles présentent avant tout un avantage esthétique : en termes de couleur, le silicium amorphe rouge sombre est semblable à la couleur des tuiles traditionnelles, tandis que le silicium cristallin bleu sombre est assez proche des ardoises. Grâce à cette similarité, les tuiles BIPV sont idéales pour la rénovation de bâtiments puisqu'elles présentent les mêmes caractéristiques et apparence que des tuiles classiques qu'elles substituent (Jelle and Breivik, 2012). Elles peuvent avoir des formes variées, courbées ou plates, et intégrer différents types de cellules, même si la plupart sont poly- ou monocristallines. Quant aux modules, ils ressemblent à des panneaux PV classiques, avec comme différence qu'ils sont imperméables contre les intempéries. Ils sont simples à installer et peuvent remplacer des anciennes toitures à changer. Certains sont préfabriqués en intégrant une couche d'isolation sous leur face.

Un autre type d'application en toiture concerne les puits de lumière, comme les atrium et canopées (Roberts and Guariento, 2009). Ce sont des surfaces horizontales ou inclinées vitrées où les cellules PV peuvent être intégrés. Elles présentent souvent l'avantage d'être peu ombragées, d'être proches de l'angle d'inclinaison optimal pour l'irradiation solaire, et faciles à ventiler. Les toitures vitrées permettent d'apporter de la lumière à l'intérieur mais peuvent poser des problèmes de surchauffe ou des pertes excessives de chaleur en hiver, ainsi que des fuites si elles ne sont pas bien conçues. Elles ont néanmoins du potentiel d'intégration de BIPV, qui pourraient apporter un ombrage supplémentaire, et donner un bel effet visuel interne. Il y a cependant des risques de condensation interne et d'accumulation de saletés si le toit n'est pas assez incliné. Pour lutter contre la condensation, il faut veiller à avoir un revêtement performant et à ventiler suffisamment la face interne. L'eau doit être évacuée rapidement de la toiture pour éviter les dépôts. Lors de la pose des modules, un joint doit assurer la connexion entre les unités de vitrage pour en assurer l'étanchéité. Les modules BIPV peuvent être mis en place de la même manière que les doubles vitrages classiques. Ils peuvent être semi-transparents ou opaques, et combinés éventuellement à des lames d'ombrage amovibles.

L'emplacement de BIPV sur le toit des gratte-ciels est intéressant car comme la vitesse de l'air augmente avec la hauteur, la ventilation naturelle des panneaux sera suffisante. Cependant, sur les immeubles moins hauts, les risques de surchauffe sur les toits sont considérables en été. La température se voyant augmenter, les cellules PV seront moins efficaces si le système n'est pas

correctement ventilé. Une largeur de lame d'air de 4 cm serait suffisante pour prévenir ce risque sur un toit en tuile d'argiles comme on en retrouve beaucoup en Italie (D'Orazio et al., 2014).

Comme pour les façades, il est aussi possible de récupérer la chaleur à l'arrière des modules de toiture. Pour ce qui est des BIPV/T aérovoltaiques, un circuit d'air à boucle ouverte permet de baisser la température des cellules tout en contribuant au chauffage intérieur des espaces. Concernant les matériaux de toitures intégrant des BIPV/T, une étude en compare deux différents (Rajoria et al., 2016) : des tuiles solaires opaques et des matériaux BIPV semi-transparents. Il s'avère que les systèmes semi-transparents sont plus efficaces thermiquement car ils augmentent d'avantage la température de l'air, ce qui produit des gains de chaleur utile en hiver.

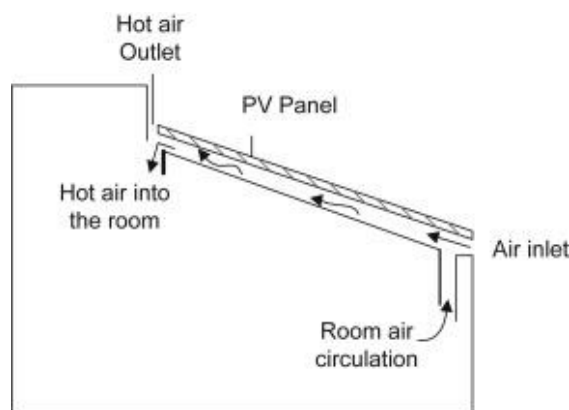


Figure 19: Principe d'un BIPV/T (air) en toiture. Source : Baljit et al., 2016

Pour les BIPV/T hydrauliques, deux modes de circulation de l'eau ont été testés : le mode de circulation naturelle et le mode de circulation forcée (Chow et al., 2009). Il en résulte que la circulation naturelle assure de meilleures performances thermiques. En effet, les gains de chaleur du fluide sont plus importants, et par ailleurs, ce système réduit aussi les pertes de chaleur vers l'environnement. En plus d'apporter de la chaleur et d'être une meilleure couche isolante, ce système permet également le refroidissement passif des bâtiments dans des climats chauds. Ses performances électriques restent bonnes également. Le BIPV/T hydraulique a du potentiel surtout dans les pays chauds, où il est nettement plus avantageux que le BIPV classique.

#### d) Autres : garde-corps, protections solaires

Les protections solaires visent à améliorer le confort intérieur des bâtiments en limitant les gains de chaleurs excessifs sans compromettre l'entrée de lumière et les vues. Les persiennes amovibles apportent de la flexibilité mais sont moins durables et résistantes. Néanmoins, les protections solaires se prêtent à l'implantation de BIPV car elles sont bien orientées et ventilées. Il faut cependant faire attention à l'auto-ombrage des éléments qui doivent être bien inclinés et suffisamment écartés. Les protections solaires BIPV sont trop fragiles pour être rétractables, et il est préférable qu'elles soient fixes également pour garder une bonne inclinaison. Il existe cependant des systèmes mécaniques où les persiennes sont tournées automatiquement selon la position du soleil. Par simplicité et efficacité, il vaut mieux utiliser une seule protection d'ombrage large à chaque fenêtre plutôt que plusieurs éléments étroits (Roberts and Guariento, 2009).

Les dispositifs d'ombrage intégrant des cellules PV permettent de produire de l'électricité tout en protégeant les espaces intérieurs des rayons de soleil indésirés. Il existe des panneaux d'ombrage fixes et des stores d'ombrage, ces derniers pouvant être intérieurs, extérieurs ou même intégrés dans le vitrage (Yu et al., 2021). Les stores ont l'avantage d'être amovibles et permettent de contrôler l'apport

de lumière et d'ombrage. Ils apportent une grande flexibilité et peuvent avoir une bonne inclinaison pour capter les rayons du soleil. Les stores BIPV extérieurs reçoivent plus d'irradiation qu'un vitrage vertical, et génèrent jusqu'à 70% plus d'énergie mais comme ils sont chers, ils sont moins utilisés pour le moment. Leur application peut être adaptée pour maximiser la production d'électricité et réduire l'effet éblouissant. Les doubles vitrages intégrant des stores d'ombrages en leur milieu sont également efficaces, et peuvent même être combinés à un système intelligent pour contrôler les persiennes. Comparé à un double vitrage classique, les stores BIPV aurait une valeur U moins élevée et un CGCS plus élevé. Cependant, ces technologies restent également onéreuses. Pour les stores intérieurs, une technologie complexe a été développée en Suède, avec des stores bifaces ayant une face absorbante comprenant des cellules PV et une face avec des réflecteurs. De plus, la chaleur serait récupérée pour chauffer les espaces intérieurs. Ce système se prête mieux au climats froids puisqu'une grande partie de la lumière pénètre à l'intérieur.

Outre les protections solaires, il existe des membranes BIPV qui présentent l'avantage d'être flexibles et légères, et qu'on peut appliquer à peu près n'importe où (Jelle and Breivik, 2012). Les cellules la constituant sont très fines afin de garder la feuille flexible et efficace en cas de hautes températures. Elles peuvent se poser sur une surface de n'importe quelle inclinaison et s'adaptent parfaitement à la rénovation puisqu'elles n'engendrent pas de poids supplémentaire. On peut les retrouver sur des garde-corps, des terrasses, des balcons, et autres éléments annexes.

En conclusion, l'atout principal des stores BIPV est la possibilité d'ajuster la lumière à l'intérieur, contrairement aux vitrages, variant ainsi la production et les gains solaires pour s'ajuster aux besoins des occupants. Le frein à leur expansion est leur coût et leur installation parfois complexe. Les revêtements souples représentent, quant à eux, des solutions moins performantes mais plus faciles à installer.

#### e) Comparaison des différents éléments

Une étude a cherché à optimiser le choix d'éléments BIPV appropriés en fonction du climat (Skandalos and Karamanis, 2021). Trois climats différents ont été investigués à travers la simulation de bâtiments dans trois villes différentes : Prague (semi-continentale), Athènes (méditerranéenne) et Dubaï (chaud et aride). Le modèle utilisé est le BESTEST Case 600 (standard de ASHRAE) pour la comparaison des différents éléments BIPV : façade opaque, vitrage semi-transparent, vitrage avec cellules opaques espacées, casquettes solaires et persiennes. Il en ressort que les technologies adaptées varient fortement d'un climat à l'autre. Dans le climat connaissant des hivers très froids, comme à Prague, les BIPV opaques en façade sont les plus intéressants. Les fenêtres doivent avoir du double vitrage pour diminuer les déperditions de chaleur, et être transparentes pour laisser entrer la lumière et les gains thermiques. Les casquettes solaires sont efficaces pour lutter contre la surchauffe en été mais ne changent pas significativement l'utilisation d'énergie nette du bâtiment. On peut estimer que ces conclusions sont aussi valables pour la situation belge. Pour le climat méditerranéen, les dispositifs d'ombrage comme les « casquette solaires BIPV » sont la meilleure option. Bien que les fenêtres BIPV semi-transparentes réduisent la demande de rafraîchissement en été, elles augmentent fortement la demande de chauffage en hiver ; cette solution n'est donc pas optimale. Enfin, dans les contextes chauds et arides, les vitrages intégrant des cellules PV semi-transparentes sont les plus efficaces. Ils diminuent la surchauffe tout en maintenant un apport de lumière agréable, et ils n'ont pas d'impact sur les besoins de chauffage. Les casquettes solaires ou persiennes sont moins efficaces que le vitrage BIPV pour ce type de climat.

### 3.3.1.2. Aspects durables

#### Aspects économiques

Le critère le plus décisif pour le choix de technologies solaires intégrées au bâtiment est sans doute son coût. Avant la réalisation du projet, il est nécessaire de réaliser une étude de faisabilité pour estimer la rentabilité du système. L'analyse des coûts peut être réalisée grâce au Life Cycle Cost (LCC) et au calcul du temps de retour sur investissement.

Plusieurs études réalisées dans le monde analysent les aspects économiques des BIPV et arrivent à des résultats différents en fonction du climat et de l'économie du pays. Un résumé est donné par Baljit et ses collègues (2016). L'article conclut que le temps de retour sur investissement reste très long. Cela est dû en partie aux prix élevés des composants des cellules PV. En plus du coût important du produit, il faut encore payer l'installation sur le bâtiment, qui peut se révéler complexe et plus onéreuse que pour des panneaux simplement apposés sur le bâtiment. Dans les panneaux hybrides, le coût du système hydraulique est plus élevé que celui du système aérovoltaique. Tandis que l'installation est simple et moins coûteuse pour le système basé sur l'air, une lourde installation est requise pour pomper l'eau et l'acheminer dans les tuyaux dans l'autre système. C'est pourquoi il reste moins choisi en pratique, même si son efficacité est meilleure.

Cependant, selon Jelle et Breivik (2012), le prix des BIPV tend à baisser puisque la production augmente fortement et que la technologie s'améliore. Les BIPV permettent d'économiser de l'espace et d'économiser des nouveaux matériaux pour les bâtiments qui doivent remplacer leur enveloppe. Pour les bâtiments commerciaux, l'intégration de cellules PV ne représente qu'un coût marginal supplémentaire de 5% par rapport à des autres matériaux comme l'acier ou le verre. L'achat et l'installation vont peu à peu être remboursés grâce à l'électricité produite durant la vie du BIPV. Même si ce temps de retour peut être long, on s'attend à ce qu'il diminue grâce aux avancées technologiques. L'augmentation du coût de l'énergie devra aussi booster leur application.

Malgré tout, peu de personnes osent s'engager dans les BIPV car ils n'ont pas confiance en la viabilité économique de ces solutions. C'est pourquoi il est utile d'en évaluer la faisabilité économique. Weerasinghe et ses collègues (2021) utilisent des paramètres comme le coût actualisé de l'énergie, la valeur actuelle nette et la période de récupération actualisée pour estimer la rentabilité financière des BIPV sur 45 projets BIPV non résidentiels dans 12 pays différents, principalement en Europe, mais aussi en Australie et en Amérique du Nord. La moitié de ces projets concernent la rénovation et l'autre moitié, les bâtiments neufs. Il en découle que les BIPV sont avantageux quand aussi bien les bénéfices directs et indirects sont pris en compte. En effet, il n'y a pas que la valeur de la génération d'électricité qui est bénéfique, mais il y a aussi des effets indirects comme l'économie sur le coût parfois élevé des matériaux conventionnels de construction. La performance économique des BIPV selon diverses caractéristiques a également été identifiée : type d'élément, fonction du bâtiment, type de cellule... Les éléments de constructions les plus intéressants pour l'application de BIPV sont les murs rideaux, les façades doubles peaux, les balustrades, les toits et les puits de lumière. Pour ce qui est de la fonction, les bâtiments d'éducation sont les plus appropriés, grâce à l'économie d'échelle et au « bon timing d'exploitation ». Enfin, le type de cellules optimales sont celles à base de silicium cristallin. Ces informations devraient être données aux différents acteurs de la construction, aux politiques et au public afin d'aider à la prise de décisions. Le fait de comprendre la réelle valeur d'un BIPV va permettre d'étendre son application et de pouvoir investir sans crainte.

Une autre étude analyse le potentiel économique des BIPV dans les 28 pays de l'Union Européenne, ainsi qu'en Suisse et en Finlande (Gholami and Røstvik, 2020). Une LCCA (Life Cycle Cost Analysis)

étudie le remplacement de matériaux de construction traditionnels par des BIPV sur la totalité de l'enveloppe du bâtiment. Il en ressort que les BIPV sont économiquement intéressants dans tous les pays, puisque l'investissement de départ est toujours remboursé, et dans certains cas, ils deviennent aussi une source de revenu. En Belgique, même la façade Nord est faisable économiquement, notamment à cause des coûts élevés de l'électricité du réseau. Même si l'irradiation solaire est moins élevée sous le climat belge que dans d'autres pays, d'autres paramètres entrent aussi en compte dans le calcul de la rentabilité financière, comme le tarif de l'électricité du réseau, la taxe carbone, les pertes de distribution... Le matériau remplacé influence aussi les résultats : certaines façades conventionnelles sont plus chères que d'autres. Évidemment ces valeurs sont très variables, mais le tableau suivant donne un ordre de grandeur des prix des matériaux d'enveloppe dans les pays européens.

	Conventionnel	BIPV
<b>Façade</b>	230€/m <sup>2</sup>	450€/m <sup>2</sup>
<b>Toiture</b>	130€/m <sup>2</sup>	350€/m <sup>2</sup>

*Tableau 5: Estimation des coûts des matériaux de façade et de toiture en Europe.*

*Source : Gholami and Røstvik, 2020*

Il résulte de l'étude que l'investissement serait plus rentable à Chypre, en Espagne et au Portugal grâce à leur bon ensoleillement. Concernant le temps de retour sur investissement, il n'est pas aussi long que les précédents articles le prétendaient. On peut se fier à cette étude plus récente, spécialisée dans les aspects économiques et qui calcule précisément sur base de données pour notre pays. En Belgique, il faudrait 5 ans pour rembourser une façade BIPV orientée à l'est et à l'ouest, 4 ans pour une façade au sud, et 3 ans pour une toiture plate (et 27 ans pour une façade nord !). Après ce temps de retour, l'installation produit des bénéfices pour le reste de sa durée de vie, qui est de 30 ans. On peut conclure que les BIPV sont rentables en Belgique et sont une solution intéressante pour remplacer des matériaux de construction traditionnels.

### Aspects environnementaux

La méthodologie scientifique la plus couramment utilisée pour évaluer l'impact environnemental d'un produit pendant toutes les étapes de sa durée de vie est l'analyse en cycle de vie, ou Life Cycle Analysis (LCA) en anglais. Il n'y a pas que l'émission de dioxyde de carbone qui a une incidence négative sur notre planète. Les répercussions peuvent être classées en différentes catégories, qui sont des indicateurs environnementaux : le dommage à la santé, l'épuisement des ressources, l'utilisation d'eau, le dommage à la biodiversité, la production de déchets, l'émission de gaz à effet de serre, l'eutrophication, l'acidification et bien d'autres... Chaque étape peut avoir un poids différent dans la répartition des impacts : depuis l'extraction des matières premières, en passant par le transport, la transformation, l'installation et l'utilisation des matériaux, jusqu'à leur fin de vie (recyclage, mise en décharge...). Les différents éléments constituant le produit peuvent également être classés en fonction de leur effet. Les quatre études ci-dessous utilisent cette méthode et la dernière propose une analyse comparative entre les coûts économiques (Life Cycle Cost) et les impacts environnementaux.

Tout d'abord, en ce qui concerne les panneaux PV classiques, plusieurs études ont déjà été réalisées afin d'étudier leurs effets sur l'environnement. Deux d'entre elles m'intéressent particulièrement ici car le site étudié est situé au Sart Tilman, en Belgique. Ces études portent sur deux échelles : celle de l'immeuble et celle d'un quartier.

L'impact environnemental de l'intégration de panneaux PV sur un bâtiment a été étudié dans un mémoire de l'Université de Liège (Malmedy, 2020). Il en ressort que la quasi-totalité des indicateurs de dommages environnementaux de la variante intégrant des panneaux solaires sont à la baisse

comparativement au scénario de base. Le seul indicateur qui est augmenté (de 5%) est celui du dommage à la biodiversité. Le reste montre que le PV a un effet bénéfique pour l'environnement, puisque non seulement la demande cumulative d'énergie du bâtiment diminue significativement (17,5%), mais les émissions de gaz à effet de serre et l'épuisement des ressources abiotiques connaissent aussi une diminution non négligeable ( $\pm 10\%$ ).

A l'échelle d'un quartier, par contre, le bilan de l'intégration de panneaux PV est moins bon (Kameni Nematchoua et al., 2020). Certains indicateurs augmentent, tandis que d'autres baissent fortement. Ceux qui diminuent sont, par ordre d'importance : la production de déchets radioactifs, la demande cumulative d'énergie, l'épuisement des ressources abiotiques et l'effet de serre. A côté de cela, d'autres impacts augmentent significativement (+20%) : le dommage à la biodiversité et la production de déchets.

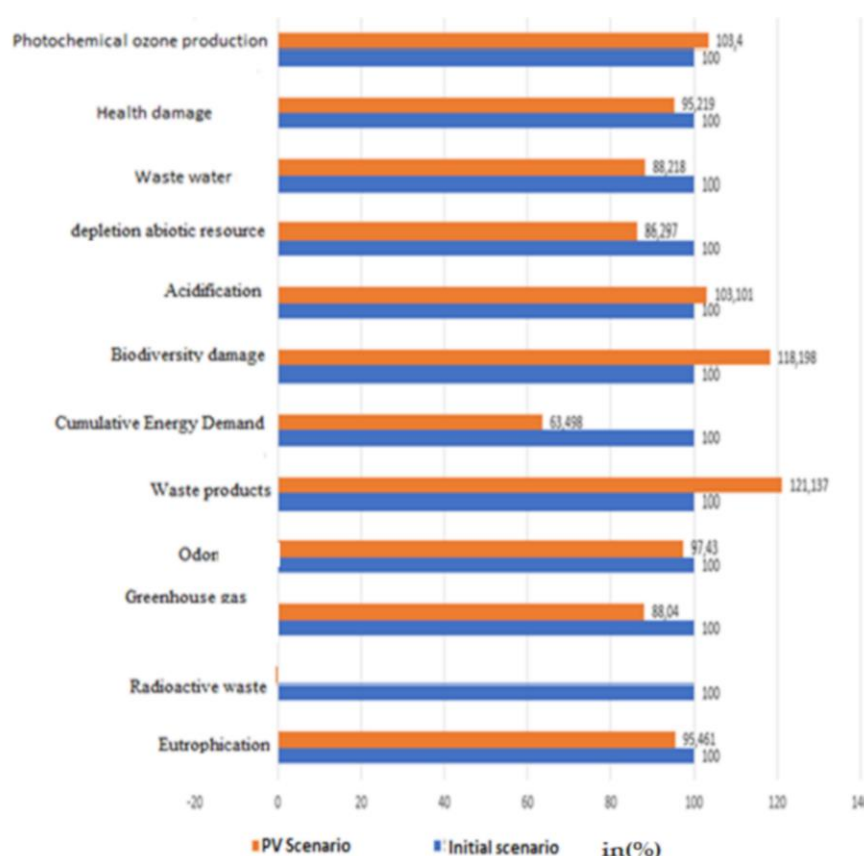


Figure 20: Comparaison des impacts environnementaux d'un quartier. Source : Kameni N. et al., 2020

Les résultats obtenus à l'échelle du bâtiment et du quartier vont globalement dans le même sens, malgré quelques différences. Une des variations est expliquée par le fait que des indicateurs considérés dans l'étude à l'échelle du quartier manquent à l'échelle du bâtiment : la production de déchets et la quantité de déchets radioactifs. Or ce sont deux paramètres qui varient énormément avec l'implémentation de PV, comme nous le voyons dans la LCA du quartier. En ce qui concerne les indicateurs communs aux deux études, ils présentent une même tendance, mais ont parfois des ordres de grandeur différents. Ainsi, la demande cumulative d'énergie diminue plus fortement à l'échelle d'un quartier (-35%) qu'à l'échelle d'un bâtiment (-17,5%). Cela peut être dû à la seule différence détectée dans les hypothèses de base : les panneaux étant inclinés à 20° dans l'étude de Malmedy, et à 35° dans l'étude de Kameni Nematchoua et ses collègues. Une autre explication pourrait être qu'un quartier forme une communauté d'énergie, ce qui optimise l'utilisation d'énergie, puisque des échanges sont possibles entre producteurs et consommateurs, ce qui réduit la demande d'énergie extérieure.



Une analyse en cycle de vie d'un module de façade BIPV/T s'est concentrée sur les effets des différents éléments constituant le module et sur les étapes du cycle de vie (Lamnatou et al., 2019). Il en résulte que les cellules PV et les supports en acier sont les deux composants qui ont le plus d'impact, selon tous les indicateurs. L'acier peut cependant être recyclé, ce qui diminuerait énormément son impact (de 50% à 85% en moins en fonction des cas). Différents facteurs influencent le profil environnemental d'un BIPV : l'orientation, l'inclinaison et la latitude, le type d'intégration (façade ou toit), le type de cellules (semi-transparent ou opaque), le type de fluide caloporteur, l'ajout d'une batterie, le recyclage en fin de vie des composants... Leur importance peut être quantifiée en calculant le temps de retour énergétique, c'est-à-dire le temps qu'il faut au module pour rembourser sa dette énergétique ou pour produire autant d'énergie qu'il n'en a fallu consommer pour sa fabrication. La même logique peut être utilisée en termes d'émission de CO<sub>2</sub>, autrement dit le temps de retour de l'empreinte carbone. Au plus les cellules sont efficaces, au plus ce temps diminuera et l'impact environnemental sera moindre. C'est pourquoi tous les facteurs influençant la performance du système (orientation, inclinaison, ombrages, le type de cellules...) ont une grande importance. Il s'avère que les BIPV/T à air auraient un temps de retour plus long que les systèmes hydrauliques, parce que l'air est moins performant thermiquement. L'ajout d'une batterie impacte négativement le bilan puisqu'il faut utiliser plus de matières premières pour la produire. Mais en fin de compte, c'est toujours les cellules PV qui ont le plus d'impact, et émettent presque deux fois plus de kg CO<sub>2,eq</sub> que le support métallique. Elles représentent 86% de l'impact total du module sur la toxicité humaine non cancérigène. Au total, pour un scénario basé sur les matières premières, le module PVT émettrait 0.34 t CO<sub>2,eq</sub> par mètre carré d'absorbeur thermique.

Finalement, afin de mettre en corrélation les enjeux environnementaux et économiques, une recherche de Rossi et ses collègues (2020) a effectué une LCA et LCC d'un Solar Home System (SHS), qui est un ensemble composé de systèmes photovoltaïques (PV), d'une batterie, d'un contrôleur de charge, d'un onduleur et d'une source d'alimentation de secours (le réseau). Ce système permet d'approvisionner en électricité les zones reculées et de favoriser les gains économiques (autoconsommation ou revente au réseau). Deux scénarios ont été comparés pour optimiser le système : celui du coût économique le plus bas, et celui de l'impact environnemental le plus bas

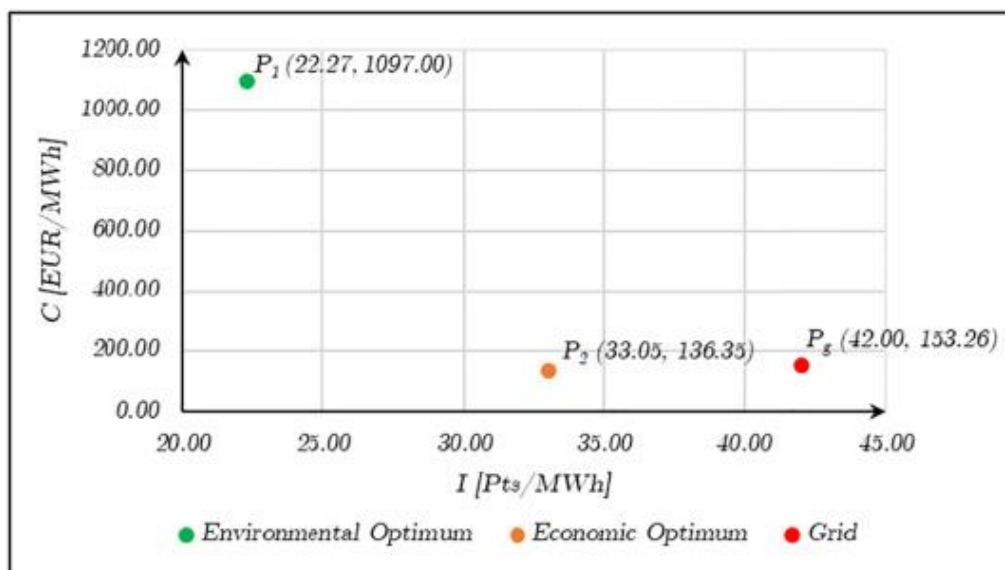


Figure 21: Graphique illustrant les solutions optimales environnementales (en vert) : coût élevé et impact faible ; et économiques (en orange) : faible coût et impact modéré, comparé au réseau d'électricité Italien (en rouge) : faible coût et impact élevé. Source : Rossi et al, 2020

La comparaison des deux scénarios va permettre d'identifier le coût qu'aurait l'amélioration environnementale des SHS, et aider à la décision des politiques pour générer des incitations financières pour le développement des énergies renouvelables. Sur base du cas d'étude qui comprenait un SHS installé pour trois bâtiments en Italie, il résulte que passer du scénario de base rattaché au réseau au scénario optimisant le coût est possible facilement en intégrant des panneaux PV, ce qui diminuerait légèrement l'impact environnemental. Si on veut aller plus loin dans cette diminution, l'installation de système PV plus puissants et d'une batterie permettrait d'atteindre l'optimal environnemental, mais le coût de cette amélioration est très élevé. La solution serait de réduire le coût des technologies pour atteindre l'optimum durable.

### **Aspects sociaux**

L'acceptation sociale et commerciale des technologies vertes (panneaux solaires et pompes à chaleur) a été étudiée en Europe (Peñaloza et al., 2022). Il existe trois grandes barrières à l'implémentation de PV sur les bâtiments : le manque d'informations sur ces technologies, les inquiétudes financières et les facteurs sociodémographiques (ex : revenus, niveau d'éducation...). Plus particulièrement en Belgique, ce sont des freins financiers et légaux qui priment. Les belges trouvent que le gouvernement n'intervient pas assez et que les subsides sont inadéquats. Ils pensent également qu'il y a peu de communication sur les énergies renouvelables dans les médias. L'effet visuel des panneaux PV sur le paysage est aussi perçu négativement. Au contraire, les citoyens considèrent cette technologie comme fiable, et pensent que cela peut améliorer leur statut social. Même si les belges perçoivent les panneaux solaires comme un moyen d'engendrer de l'argent, ils sont néanmoins refroidis par l'investissement de départ. L'article conclut en donnant des pistes de solutions pour encourager le recours aux énergies renouvelables : il faut sensibiliser d'avantage les citoyens à l'environnement, développer des campagnes d'informations sur le sujet, permettre des études de faisabilité aux particuliers... Les politiques d'incitation peuvent également être mises en place pour influencer le comportement du public, en accordant des primes financières.

Un autre aspect social de l'entreprise du PV est l'impact de la production des modules PV sur la santé des travailleurs (Bakhiyi, 2014). En effet, des substances potentiellement toxiques peuvent être dégagées durant le cycle de vie du panneau. Il existe peu d'informations sur la toxicité des substances utilisées, mais il y aurait un risque chimique et physique pour la santé des travailleurs, qui doit être investigué plus en profondeur pour améliorer leur sécurité. La phase d'installation ne porte généralement pas de problèmes quand des mesures de sécurité sont prises sur le lieu de travail, mais il y a davantage de préoccupations quant aux matériaux dangereux manipulés pendant la fabrication. D'autre part, les déchets des panneaux sont considérés comme dangereux et sont assimilables aux déchets électroniques. Ceux-ci posent encore des problèmes au niveau de leur collecte, de leur élimination sûre et de l'amélioration de leur taux de recyclage. Une solution est à trouver dans une action combinée des fabricants, des chercheurs et du gouvernement pour rendre la recherche plus transparente afin de pouvoir prendre des mesures préventives pour protéger la santé des travailleurs et de responsabiliser les fabricants de produits PV sur leur impact sur la santé, de leur conception jusqu'à leur fin de vie.

### 3.3.1.3. Avis critique

Au terme de cette première approche, on peut conclure que le discours scientifique est assez encourageant quant à l'implémentation des BIPV. Les éléments clefs à retenir de cette approche technique sont résumés ci-dessous :

- Les façades verticales sud qui ne sont pas ombragées ont du potentiel durant toute l'année sous nos latitudes, et particulièrement à la mi-saison.
- De nombreux systèmes permettent de refroidir la température des cellules (ventilation ou captage de la chaleur grâce à un fluide) et diminuent ainsi l'impact négatif de la hausse de température sur le rendement des cellules. En outre, il est possible de récupérer l'air chaud comme appoint au chauffage.
- Dans nos régions, il vaut mieux mettre des BIPV opaques en façade et non en vitrage, car il est plus facile de les ventiler et ils ne compromettent pas l'entrée de lumière et de gains de chaleur par les fenêtres.
- Les vitrages BIPV semi-transparents sont plus appropriés pour les pays chauds car ils diminuent le risque de surchauffe tout en laissant passer une lumière diffuse à l'intérieur des bâtiments. Ils sont également adéquats en Belgique pour les bâtiments présentant de larges surfaces vitrées exposées au sud.
- Des casquettes solaires BIPV ou stores BIPV sont les plus efficaces dans les climats tempérés chauds, mais ils peuvent également être utilisés dans le climat tempéré froid de la Belgique pour réduire la surchauffe en été. Les stores BIPV sont plus efficaces que les vitrages BIPV même s'ils ont un coût élevé.
- Pour les BIPV en toiture, il faut prévoir une bonne ventilation car les risques de surchauffe sont accrus. Les surfaces horizontales et légèrement inclinées au sud bénéficient d'un bon ensoleillement toute l'année, en moyenne meilleur que celui des surfaces verticales et sont idéales pour le placement de panneaux PV classiques.
- Du point de vue économique, les BIPV sont onéreux et conviennent mieux pour des bâtiments tertiaires et industriels que résidentiels privés. Les coûts tendent cependant à diminuer grâce au volume de production croissant et aux avancées technologiques.
- Les BIPV restent néanmoins rentables en Belgique, puisqu'il ne faut que quelques années pour rembourser l'investissement de départ, après quoi ils deviennent une source de revenus. Ce temps de retour est d'autant plus bas que le matériau de construction non-actif remplacé est cher.
- Du point de vue social, le public en sait peu sur les BIPV, a peur de l'inconnu et est freiné par l'important investissement de départ. De plus, des potentiels dommages sur la santé des travailleurs peuvent menacer le marché.
- Du point de vue environnemental, l'effet des BIPV est globalement bénéfique, mais il faut faire attention aux déchets dangereux, surtout pour une application à grande échelle. L'effet négatif sur la biodiversité provient également de la phase de fabrication et de remplacement des panneaux. Il faudrait dès lors encourager une plus grande part de recyclage.

On peut constater que les articles sur le sujet sont très nombreux, et qu'ils apportent énormément d'informations qu'il est important de traiter avec un regard critique. Des technologies parfois complexes sont développées pour optimiser le système, peut-être parfois trop compliquées pour être mises en œuvre. Je pense notamment aux BIPV/T hydrauliques qui doivent intégrer tout un réseau de canalisations pour transporter l'eau, qui au final ne sera pas assez chaude pour couvrir tous les besoins de chauffage du bâtiment, et devra être complété par un autre système. Selon moi, cette technologie n'est ni réalisable ni rentable pour des applications concrètes. Les BIPV/T en général sont peut-être attrayants en théorie, mais sont moins faisables en pratique.

Malgré tout, les BIPV sont encore très peu employés dans le monde de la construction, même s'ils vont sûrement se développer dans les années à venir, grâce à la prise de recul et à un meilleur savoir sur ces technologies. Celles-ci représentent un espoir dans la transition vers des bâtiments impactant moins l'environnement. Les BIPV s'appliquent aussi en rénovation, ce qui est intéressant pour réduire la consommation énergétique du parc immobilier existant très ancien et énergivore. Le problème est que toutes les surfaces ne sont pas adéquates, surtout en milieu urbain où la densité bâtie crée des masques solaires. L'emplacement urbain idéal se situe sur les hauts bâtiments, particulièrement les immeubles de bureaux qui présentent de grandes façades, ou sur les grandes surfaces des bâtiments commerciaux, souvent éloignés des autres édifices, les préservant ainsi des ombrages. Les toitures bien exposées peuvent également être exploitées, y compris sur des immeubles d'appartements. Les fonctions les plus adéquates sont cependant celles qui sont actives durant la journée, afin de pouvoir favoriser l'autoconsommation. En général, il me semble que, malgré leurs qualités intéressantes, les BIPV ne sont pas encore suffisamment utilisés mais qu'ils conviennent mieux pour des projets de grande taille, afin de bénéficier d'économies d'échelle et pour augmenter l'autoconsommation de l'électricité produite.

### 3.3.2. Approche commerciale

#### 3.3.2.1. Disponibilité commerciale

Au niveau de la disponibilité commerciale, il existe de nombreux fabricants de BIPV en Europe. Lorsque l'on recherche sur le net des vendeurs, on peut par exemple trouver les sites de :

- Sunovation (<https://sunovation.de>) qui est une entreprise allemande de renommée internationale. Elle propose des produits fabriqués en France, comme des panneaux de toiture et de façade, mais aussi des vitrages et des lamelles brise-soleil. Il y a la possibilité d'ajouter des options : verre de sécurité feuilleté, verre isolant, verre bombé, surfaces mates ou anti-reflet, panneaux accessibles (pour le nettoyage sur les toits).
- Solarlab (<https://solarlab.dk>) qui est une entreprise danoise. Cette société produit notamment des panneaux de façade customisables, avec teintes et dimensions au choix (catalogue). Ils sont utilisables pour des bâtiments neufs comme pour de la rénovation, pour tout type de fonctions (résidentiel, tertiaire) mais sont préférablement applicables à grande échelle (bâtiments publics).

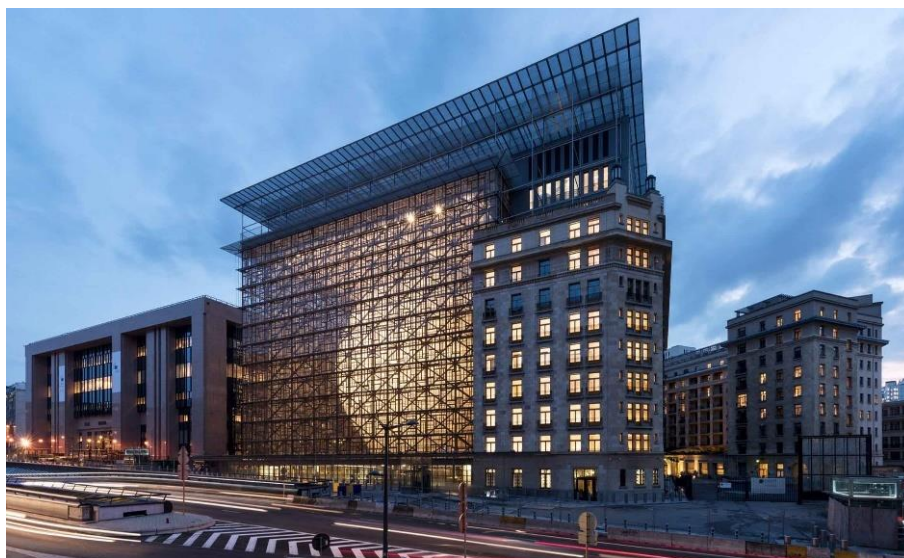
Le secteur visé essentiellement est le secteur tertiaire : édifices d'utilité publique, bâtiments à finalité industrielle et immeubles de bureaux, qui consomment l'électricité produite tout au long de la journée. Les surfaces visées sont les plus grands possibles, que ce soit sur la toiture d'abri de parking, en façade de grands immeubles, sur les toitures des hangars...

Évidemment, ces sites web ne mettent en avant que les avantages de leurs technologies :

- Modules sur mesure : dimensions, formes et couleurs ajustables
- Structure en verre spécifique au projet (options personnalisées)
- Bonne isolation phonique
- Bonne classe de résistance au feu
- Rendement PV élevé
- Fixations masquées
- Installation facile

En Belgique, c'est la société verviétoise ISSOL (<http://www.issol.eu/>) qui est leader du marché. À la fois fabricant et bureau d'étude, ce bureau développe des projets en Belgique et en France. Centré sur l'intégration architecturale des panneaux PV, l'entreprise fabrique des produits qui sont des matériaux de construction actifs, c'est-à-dire qu'ils produisent de l'électricité en assurant les fonctions d'enveloppe (étanchéité, isolation, protection solaire et esthétisme). Les ingénieurs et architectes du bureau d'étude ISSOL conçoivent le projet, étudient les performances mécaniques et énergétiques de l'enveloppe, estiment le budget pour vérifier la faisabilité du projet. Quant aux produits fabriqués, ils découlent tous de la même base, qui est du verre feuilleté de sécurité intégrant des cellules PV monocristallines à haut rendement. Ils s'appliquent sur des façades, des toitures ou des verrières grâce à des techniques de pose traditionnelles. Selon le président d'ISSOL, l'entreprise se considère innovante puisqu'elle se concentre sur la fonction architecturale des BIPV ; elle n'essaye pas de concurrencer les chinois et allemands qui sont imbattables du point de vue technologique. Elle vise aussi bien des entreprises que des particuliers, puisqu'elle décline des solutions pour « Monsieur Tout le Monde ». Leur production est essentiellement des BIPV, les panneaux solaires classiques ne représentent plus que 10 à 20% de son volume de production.

Un des enjeux primordiaux des BIPV, qui les distingue des panneaux solaires classiques, est leur aspect esthétique. Ils font partie intégrante du bâtiment, et en tant que parement, contribuent à l'aspect extérieur de celui-ci. Le design peut s'adapter pour ne pas heurter l'aspect extérieur d'un bâtiment classé, en se confondant avec des tuiles anciennes par exemple. Les produits peuvent être sérigraphiés à base de nano-encre pour imiter l'aspect du bois ou du marbre. Au contraire, les BIPV peuvent aussi se décliner en plusieurs couleurs pour donner un aspect plus contemporain. Ils participent également à l'image que renvoie le bâtiment, respectueux de l'environnement et tournés vers l'avenir, ce qui peut participer à la publicité d'une entreprise qui l'emploierait pour ses bureaux, par un « marketing vert ».



*Figure 22: Europa Building, Bruxelles, 2017. Toute la surface de la toiture est couverte de BIPV.  
Source : ArchDaily, 2022*

On voit que l'on peut intégrer du neuf à l'ancien dans l'architecture de P. Samyn pour le nouveau bâtiment du Conseil de l'Union européenne à Bruxelles (European Council, 2017). Des BIPV couvrent toute la surface de la toiture. L'intervention est lisible, se démarque de l'ancien bâtiment mais le complète harmonieusement, montrant qu'une note de contemporanéité intégrant des technologies « vertes » peut aussi se combiner à la sauvegarde d'un patrimoine existant. Répondant parfaitement aux enjeux esthétiques, ce projet donne une image de modernité à la capitale européenne, tout en intégrant des considérations écologiques.

### *3.3.2.2. Aspects durables*

#### **Aspects économiques**

Le grand avantage d'un matériau actif est qu'il produit de l'électricité « gratuite ». En fait, il faut déduire le temps qu'il faudra pour rembourser les BIPV avant de pouvoir générer des revenus. Le coût des produits doit être comparé au coût de son équivalent non-actif. Pour les vitrages, la base résistante aux intempéries est la même, et il faut donc compter uniquement le prix de l'intégration des cellules PV. Selon ISSOL, il faudrait donc 7,5 années avant de bénéficier de l'électricité gratuite produite par des vitrages BIPV. Étant donné que les produits ont une durée de vie de 30 ans en moyenne, il reste encore de nombreuses années pour engendrer des bénéfices.

L'illustration ci-dessous provient du site web d'ISSOL et est à destination du public. Aucun détail n'est donné sur les hypothèses considérées dans le calcul des revenus générés par an. On ne connaît pas l'orientation ni l'inclinaison de la surface qui permettrait d'atteindre ce chiffre. Il faut donc considérer cette information avec précaution.



Figure 23: Coût de l'intégration de la technologie BIPV dans du double vitrage. Source : ISSOL, 2016a

On peut également comparer le prix des BIPV et des panneaux PV traditionnels. La consommation moyenne d'un ménage belge en électricité est de 3 500 kWh par an. Pour couvrir ses besoins via une installation PV, il faudra un budget de l'ordre de 6 000 à 7 000 euros (selon WikiPower, 2022 et Engie, 2022b). A cela, il faut ajouter le coût de l'onduleur à remplacer tous les 10-15 ans (1 500-2000 euros), et le tarif prosumer à payer pour l'utilisation du réseau ( $\pm 400\text{€}$  par an), dont 54% est remboursé par la Région Wallonne jusqu'en 2024. Le principe du « compteur qui tourne à l'envers » continue de s'appliquer en Wallonie, même s'il a été supprimé en Flandres et à Bruxelles. En Wallonie, il n'existe d'ailleurs plus de mécanisme de soutien aux petites installations solaires (<10 kWc) car elles sont devenues plus performantes et moins chères ces dernières années, ce qui signifie qu'elles sont rentables même sans aide financière (Wallonie énergie SPW, 2022).

Quant aux coûts des BIPV, il est très difficile de l'estimer étant donné ses caractéristiques variables : différents types d'applications (vitrage, bardage, toiture...), type de cellules, diversité des composants qu'ils remplacent, variabilité des aspects extérieurs (forme, couleur, transparence...). En plus, le coût des technologies PV est sans cesse en évolution. Cependant, on peut s'attendre à ce que les prix pour la plupart des applications soient plus élevés que ceux d'un panneau classique. Le président d'ISSOL a lui-même déclaré dans une interview (Wallonie énergie SPW, 2017) que leurs produits sont réputés comme assez coûteux, mais que leur logique va beaucoup plus loin qu'un certain nombre de fabricants ou d'opérateurs dans le PV, car ils produisent des « beaux » matériaux de construction.

### Aspects environnementaux

La société ISSOL garde le secret de ses procédés de fabrication et ne détaille pas l'impact environnemental de ses produits. Le président d'ISSOL a pourtant déclaré dans cette même interview (Wallonie énergie SPW, 2017) que leur empreinte carbone est la plus faible possible. On ne sait pas trop ce que cela veut dire.

On peut néanmoins considérer le plus grand avantage écologique de ses technologies : l'économie d'énergie et l'économie de dioxyde de carbone qui en résulte. La production en électricité des BIPV au mètre carré dépend de nombreux paramètres, comme déjà expliqué auparavant, et il est difficile de donner un chiffre standard. Néanmoins, dans la brochure des projets réalisés par ISSOL (2017a), ainsi

que sur le site de l'Université de Liège, la puissance et la production annuelle de certains projets de référence sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Projet	Surface	Puissance	Énergie produite annuellement	CO <sub>2</sub> économisé annuellement
Façade BIPV à Paris	600 m <sup>2</sup>	44 kWc	29,4 MWh Soit 49 kWh/m <sup>2</sup>	6 780 kg 11,3 kg/m <sup>2</sup>
Toiture + façade courbée BIPV à Bruxelles (Tour & Taxis)	700 m <sup>2</sup>	104 kWc	90 MWh Soit 128 kWh/m <sup>2</sup>	20 650 kg 29,5 kg/m <sup>2</sup>
Panneaux PV installés sur les parkings du Sart Tilman	2670 m <sup>2</sup>	466 kWc	450 MWh Soit 168,5 kWh/m <sup>2</sup>	103 500 kg 38,75 kg/m <sup>2</sup>

Tableau 6: Production d'électricité et CO<sub>2</sub> économisé de diverses installations PV et BIPV.

Source : ISSOL, 2017a et Liège Université Durable, 2020

Sachant qu'en Belgique, 10 kWh d'électricité équivaut à 2,3 kg de CO<sub>2</sub>, selon le site d'écoconso, cela représenterait des économies annuelles variant de 6,8 tonnes de CO<sub>2</sub> pour la façade BIPV à Paris jusqu'à plus de 100 tonnes de CO<sub>2</sub> sur toute la surface du parking au Sart Tilman ! C'est une quantité non négligeable, puisqu'on peut se représenter une tonne de CO<sub>2</sub> comme l'équivalent de la consommation par passager d'un aller-retour Bruxelles - New York, ou encore de 6 000 à 8 000 km parcourus en voiture (Écoconso, 2018).

Le site énergie du Service Public de la Wallonie donne deux autres grands bénéfices des BIPV. Premièrement, ils utilisent moins de matière que les deux matériaux qu'ils substituent (l'élément constructif + les panneaux PV apposés dessus). De plus, ils augmentent l'attractivité du bâtiment, grâce à l'utilisation d'une technologie verte (Wallonie énergie SPW, 2017).

### Aspects sociaux

Le marché des BIPV est créateur d'emploi à haute valeur ajoutée, et non délocalisable. Les innovations des dernières années offrent du travail aux métiers de la construction mais aussi dans d'autres domaines. Des concepteurs de projet (architectes, ingénieurs, bureaux d'étude...) se développent, et des installateurs doivent renouveler leurs compétences pour pouvoir mettre en place ce nouveau type de produit. Les fabricants accroissent le marché PV grâce à cette « gamme » de produits. Les investisseurs y voient aussi une nouvelle opportunité de rentabilité.

D'ailleurs, selon les informations récoltées dans l'étude de Bakhiyi et ses collègues (2014), le nombre d'emplois dans l'industrie mondiale du PV est appelé à augmenter de 2 millions en 2030 à 6 millions en 2050. Chaque étape de la vie des panneaux nécessite le développement de métiers variés, dont la plupart ne sont pas nouveaux. Dans la recherche et le développement, les physiciens, chimistes et experts des matériaux seront utiles. Pour ce qui est de l'ingénierie et la fabrication des modules, on trouvera des ingénieurs mécaniciens, des techniciens de haute technologie, des vitriers, des opérateurs de machines, métallurgistes, assembleurs... Pour la mise en place, les métiers de la construction seront sollicités : ingénieurs civils, ouvriers, opérateurs d'équipement lourds, soudeurs, travailleurs de la sidérurgie. Les électriciens, ingénieurs électriciens et plombiers peuvent être requis pour la maintenance. Enfin, il faudra également des ouvriers pour le démantèlement et le recyclage des produits.



D'autre part, les PV et BIPV peuvent accroître les standards de vie dans les pays en voie de développement qui bénéficient généralement d'une grande irradiation solaire, en favorisant l'accès à l'électricité dans ces régions. Le PV a aussi un intérêt dans nos régions. Depuis les récents événements en Ukraine, l'indépendance énergétique est devenue une des priorités en Wallonie et dans de nombreux pays européens. Pour ne plus subir de crises, il vaut mieux en effet pouvoir produire sa propre énergie.

### *3.3.2.3. Avis critique*

Évidemment, tout cela dresse un beau portrait des BIPV puisque les commerçants cherchent avant tout à vendre leur produit. Il faut faire attention au « greenwashing » des entreprises qui orientent leur discours marketing en prônant les bénéfices écologiques de leurs produits, qui restent à vérifier. Il faudrait investiguer plus en profondeur les procédés de fabrication dans les entreprises comme ISSOL, et voir comment les déchets sont traités en fin de vie. Au niveau de l'empreinte carbone, on peut imaginer que celle-ci est effectivement faible, puisque même si la fabrication a émis beaucoup de gaz à effet de serre (production des cellules, des cadres en acier...), elle est probablement largement compensée par les tonnes de dioxyde de carbone épargnées durant 30 ans de durée d'utilisation (par la production d'une électricité renouvelable, n'émettant aucun gaz à effet de serre). D'autre part, il est vrai que puisque la technologie est assez jeune, on n'a pas encore de recul sur leur fin de vie : le taux de recyclage, les déchets néfastes occasionnés, les risques pour la santé des travailleurs... Il faudrait réaliser une analyse en cycle de vie de ces produits pour avoir une idée représentative de leur réelle contribution « verte ».

Je reste sceptique également quant à la sécurité énergétique « pour tous » que prônent les partisans du BIPV. Même s'il est vrai que le potentiel solaire est énorme dans les pays précarisés d'Afrique ou d'Amérique du Sud, il faut aussi posséder le budget nécessaire pour mettre en place de telles installations. Or, comme nous l'avons vu, le coût de ces technologies est très élevé, et les fabricants européens ou chinois recherchent avant tout le profit, en visant un public nanti pouvant se permettre l'achat de leurs produits. Je ne connais pas exactement la situation dans les pays en voie de développement, mais cela m'étonnerait que les villages dans le besoin aient les moyens d'investir dans le PV. Même s'il existe des politiques d'aide au développement d'énergies renouvelables pour ces contrées, (ONU, UE, OCDE...) la priorité va d'abord à l'accès à l'électricité pour tous, sans considération de l'intégration à l'architecture. Le PV est une solution appropriée qui permettrait d'électrifier les régions rurales reculées, en ayant des impacts positifs sur la santé publique et le niveau de vie des habitants : refroidissement des vivres, des médicaments, meilleur confort intérieur (ventilation) et environnement de travail, agriculture et artisanat simplifié...

En revanche, le grand point positif selon moi est la richesse formelle et la flexibilité architecturale que les BIPV proposent. Les architectes peuvent trouver leur bonheur parmi la multitude de produits proposés, afin de correspondre au mieux à un projet spécifique. C'est la fin des panneaux solaires qui défigurent nos toitures : avec les BIPV, on peut ne même pas se rendre compte que des cellules PV sont intégrées à l'édifice. Le choix d'un beau parement extérieur qui produit également de l'électricité est une bonne manière de joindre l'utile à l'agréable. C'est pour moi une technologie d'avenir, permettant de construire des bâtiments à hautes performances énergétiques tout en contribuant à l'esthétisme de l'architecture contemporaine.

### 3.3.3. Approche architecturale

#### 3.3.3.1. Projets réalisés

Dans cette approche, quelques projets comportant des BIPV vont être présentés. Ils ont été choisis pour leur richesse formelle et une intégration discrète des technologies à grande échelle. Ce sont des bâtiments du secteur tertiaire, publics ou privés, qui ont de bonnes performances énergétiques. Ils sont construits en Europe, dans un climat tempéré (océanique ou continental).

##### a) Novartis Campus



Lieu : Bâle, Suisse

Architecte : Frank Gehry

Année : 2009

BIPV : 85% de la surface de la toiture est couverte de vitrage intégrant des cellules monocristallines semi-transparentes.

Figure 24: Novartis Campus. Source : Pinterest, 2022

Ce bâtiment de bureaux fait partie du campus de la Novartis Pharma AG à Bâle. Il a été choisi comme exemple dans ce travail car il est l'œuvre d'un architecte mondialement célèbre : Frank Gehry. Celui-ci a déjà construit de nombreux projets aux formes audacieuses évoquant des sculptures, faisant d'elles des architectures iconiques. Ce projet montre que même dans les formes les plus compliquées, il est possible d'utiliser des BIPV. Les architectes peuvent totalement exprimer leur créativité tout en respectant l'environnement. Ce bâtiment a d'ailleurs obtenu un label Minergie Standard, grâce à sa façade énergétiquement efficace. Le toit est couvert sur 85% de sa surface, représentant 1300 m<sup>2</sup>, par des cellules PV (92 kWc) (sbp.de, 2022). L'accent a été porté sur la qualité de l'espace intérieur, confortable en été comme en hiver. Non seulement le bâtiment consomme peu d'énergie, mais le climat intérieur est aussi équilibré, avec un apport d'air frais et de la lumière naturelle en abondance.

L'enveloppe de cet assemblage de volumes est réalisée en triple vitrage. En façade, des protections solaires incluses dans la cavité du vitrage ont été spécialement conçues pour s'accommoder aux formes courbées. Le toit comprend des cellules monocristallines semi-transparentes qui sont capables de produire l'énergie nécessaire à couvrir la demande en électricité du bâtiment (production de 65 000 kWh par an). Les modules ont été fabriqués sur mesure, avec des motifs perforés et une couleur grise personnalisée grâce à la collaboration entre architecte et fabricant (bipv.ch, 2013).

Le projet se situe sur un ancien site industriel à Bâle, qui a été transformé depuis 2001 en un centre de recherche tourné vers l'avenir où se trouve le siège social de Novartis, groupe pharmaceutique suisse. Leur but était de réaménager le site en créant un espace de développement et de gestion, favorable à

la coopération multidisciplinaire. L'accent est aussi tourné vers le développement durable, en participant au mouvement de décarbonisation par l'exploitation des énergies renouvelables. Une architecture innovante est mise en place par des architectes de grande renommée : Sanaa, Renzo Piano, Tadao Ando, Frank Gehry... (Architektur-Online, 2012). Le centre administratif réalisé par ce dernier possède une géométrie caractéristique lui donnant une apparence futuriste. Ses volumes possèdent de grandes surfaces idéales pour y intégrer des modules de production d'électricité. L'architecte américano-canadien a pu intégrer ses solutions sans changer son vocabulaire formel. Cela a même contribué à définir un rythme, un motif de l'enveloppe en général, dont le toit est une cinquième façade. Et pourtant les cellules PV ne sont pas visibles depuis l'extérieur du bâtiment, elles s'intègrent parfaitement dans l'architecture. On peut conclure que les bâtiments emblématiques se prêtent bien à l'intégration de BIPV grâce à leurs grandes surfaces, leur apparence « libre », moins contraignante que celle des bâtiments traditionnels, avec des budgets souvent nettement plus élevés. En plus d'être autonome en énergie, l'édifice renvoie une image symbolique combinée à un caractère éco-responsable et une esthétique contemporaine (Devetakovic et al., 2020).

#### b) Copenhagen International School



Lieu : **Copenhague, Danemark**

Architecte : **C.F. Møller**

Année : **2017**

BIPV : **Bardage de la façade sur une surface de 6 000 m<sup>2</sup>**

Figure 25: École internationale de Copenhague. Source : ArchDaily, 2018

Situé dans le port au Nord de la ville, cette grande école accueille 1200 élèves. Le projet a été primé en 2017 (Iconic Award) grâce à sa façade BIPV exemplaire, qui est d'ailleurs la plus grande du monde. Le bardage comprend des modules solaires qui s'articulent pour former une mosaïque bleu vert évoquant la mer à proximité. Les volumes parallélépipédiques formant l'édifice rappellent les containers environnants, assemblés comme dans un jeu de Lego. La base du bâtiment contient des espaces communs et ouverts, sur lesquels se posent quatre tours contenant les classes. La toiture terrasse du « socle commun » sert de cour de récréation surélevée par rapport au niveau de la mer, procurant un espace sécurisé pour les enfants (ArchDaily, 2018). La façade comporte 12 000 modules BIPV de la même couleur mais qui sont inclinés différemment, induisant un effet pailleté-écaillé. Ils constituent une maille, une séquence de composition de l'architecture. Il n'y a pas de pigments dans

les modules afin de pas réduire leur performance énergétique. Avec ses 6000 m<sup>2</sup> et sa puissance de 720 kWp, elle constitue une des installations BIPV les plus grandes du Danemark. La production annuelle de 250 MWh couvre plus de la moitié des besoins en électricité de l'école. Le but des concepteurs n'était pas seulement de produire de l'énergie verte, mais d'également jouer un rôle dans l'apprentissage des élèves, et de les sensibiliser au développement durable. Des écrans donnent les chiffres de production en temps réel, ce qui permet d'avoir un impact pédagogique. D'ailleurs, ils peuvent être utilisés dans les exercices de mathématiques ou de physique et servir d'expérience grandeur nature. En conclusion, ce projet participe au redéveloppement d'une zone reculée (le port) en s'intégrant parfaitement à son environnement. Les BIPV clairement visibles donnent de la texture à l'enveloppe de l'édifice, et contribuent à mettre en valeur la géométrie caractérisant le bâtiment. De plus, celui-ci vise à impacter la société en portant un message éducatif de responsabilité environnementale (Devetakovic et al., 2020).

### c) Tour Paradis



Lieu : Liège, Belgique

Architecte : Jaspers & Eyers

Année : 2014

BIPV : Vitrages BIPV au niveau des trois derniers étages du versant orienté vers le sud.

Figure 26: Tour des Finances. Source : ISSOL, 2016b.

Cette tour de 118 mètres de haut accueille les bureaux du Service Public Fédéral des finances à Liège. Avec l'antenne, elle culmine à 136 mètres de haut, ce qui fait d'elle la plus haute tour de Wallonie. Construite sur un ancien parking, elle fait partie du projet de reconversion du quartier des Guillemains, et s'inscrit dans l'axe reliant la gare de Calatrava au parc de la Boverie et à la Médiacité. Elle constitue un point de repère dans le territoire liégeois puisqu'elle est visible à des kilomètres à la ronde. La tour compte 28 étages, dont les deux derniers niveaux sont réservés à la technique. Les différents services sont répartis par étage, permettant une organisation interne « par niveaux » lisibles pour les usagers. Ce bâtiment à haute qualité environnementale a obtenu la certification BREEAM. En effet, il a été conçu dans une logique de développement durable : un soin particulier a été apporté au choix des

matériaux, au confort acoustique mais aussi aux énergies renouvelables. Les trois derniers étages du versant sud comportent des vitrages BIPV. Les cellules sont masquées par une plaque de verre imprimée, avec un motif semblable à celui de la façade. De plus, la tour possède du triple vitrage, un système d'éclairage intelligent et une chaudière haut rendement, qui lui permettent de consommer 36% moins d'énergie qu'une tour de forme semblable non-équipée. Sa PEB est classée en catégorie B, correspondant à une émission de 35 kg de CO<sub>2</sub> par mètre carré et par an (Régie des bâtiments, 2017).

Fabriqué par l'entreprise ISSOL, les modules installés ont une puissance totale de 65 kWc. Le vitrage feuilleté contient des cellules PV entre deux épaisseurs de verre : un verre clair en face avant et verre émaillé bleu à l'arrière qui lui donne sa couleur pour se fondre dans la façade de la tour. On ne distingue pas les vitrages traditionnels des vitrages BIPV. Ils disposent des mêmes châssis en aluminium, des mêmes dimensions et du même système de fixation que le matériau classique (ISSOL, 2017b).

On peut retenir de cet exemple que les BIPV ne contribuent pas toujours à donner une image spécifique au bâtiment, mais peuvent parfois être invisibles. Ici substitués à des matériaux classiques, ils sont discrets et n'influencent pas l'aspect extérieur de la tour. Toutefois, la future intégration des modules solaires a été prise en compte dès le début du processus de conception, en orientant une partie de toiture inclinée au sud. Cet immeuble de bureaux à hautes performances énergétiques se veut modeste dans un sens, non pas par sa hauteur qui dépasse largement celle du contexte bâti environnant, mais par son intégration subtile de technologies en faveur de la durabilité.

### *3.3.3.2. Aspects durables*

Le PV intégré au bâtiment peut être considéré sous deux aspects, qui sont les fonctions premières de l'architecture : l'esthétique et la technique. La raison pour laquelle on a voulu développer des BIPV était tout d'abord d'ordre esthétique, afin de mieux incorporer les technologies à l'architecture. Cette ambition a posé des défis d'ordre technique : pour que le PV se fonde dans l'enveloppe, il fallait que ceux-ci en fassent partie, et assurent les mêmes fonctions d'étanchéité et de stabilité. Ces deux composantes de l'architecture vont être discutées à travers les enjeux du développement durable.

#### **Aspects économiques**

Du point de vue technique, on sait que les BIPV doivent remplir certaines fonctions constructives, comme le transfert des charges, l'évacuation de l'eau et une isolation thermique et/ou acoustique. Il faut penser à l'entretien des modules pour éviter les dégâts. Une perte d'étanchéité pourrait être très problématique pour les cellules et pour l'intérieur du bâtiment. Un article aborde le sujet de la maintenance et du remplacement des BIPV en fin de vie (Peng et al., 2011). En effet, les BIPV ne peuvent pas « vivre » aussi longtemps qu'un édifice : la durée de vie des cellules PV est d'environ 25 à 30 ans, alors que celle d'un bâtiment est d'environ 60 ans. Étant donné que les technologies évoluent rapidement, il vaut mieux aussi changer les cellules pour actualiser leurs performances. Par ailleurs, le coût des BIPV est plus élevé que celui de panneaux classiques, notamment à cause de leur structure plus compliquée, de leur mise en place et maintenance moins aisée qu'un panneau apposé sur le toit qu'on peut tout simplement retirer en fin de vie. Cette problématique a été étudiée par les chercheurs, qui proposent donc un système de fixation des BIPV plus flexible, basé sur des joints à ressorts, qui permettent de pouvoir détacher plus facilement le cadre métallique de la structure que s'il était boulonné. Le système est complété par un auto-verrouillage et une intégration des circuits électriques dans les supports en acier. On peut conclure qu'il est essentiel de pouvoir remplacer les BIPV en fin de vie pour mettre à jour leurs capacités fonctionnelles, et que s'ils étaient aussi « simples » à installer que les panneaux apposés sur le bâtiment, leur marché s'étendrait d'autant plus.

### Aspects environnementaux

Les BIPV permettent de créer des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (NZEB). En plus de générer de l'électricité in situ, ils peuvent aussi collaborer au confort thermique à l'intérieur des édifices, par leur protection contre la surchauffe dans le cas de vitrages solaires ou de brise-soleil. La consommation d'énergie pour la ventilation s'en voit diminuée, ce qui est opportun surtout dans un contexte de réchauffement climatique où les canicules seront de plus en plus fréquentes en Belgique.

D'autre part, les BIPV permettent d'enrichir le paysage bâti. Comme cela a été observé dans les exemples de bâtiments précédents, on voit que l'utilisation de BIPV sur l'enveloppe d'un bâtiment favorise son intégration à son environnement proche, et lui offre une qualité architecturale. Que ce soit par des modules apparents ou invisibles, le BIPV donne la possibilité de respecter le contexte bâti existant, et de pouvoir être combiné au patrimoine culturel ancien.

La problématique de la rénovation et de la conservation du patrimoine est abordée dans une étude récente (Lopez et al., 2021). Elle a pour but d'évaluer la compatibilité d'une intervention visant à améliorer la PEB d'anciens édifices en respectant leur valeur patrimoniale. C'est plus précisément le cas de l'intégration d'énergie solaire renouvelable qui est investigué. L'implémentation de PV dans les bâtiments historiques a été analysée à travers plusieurs cas d'étude, au regard des critères de faisabilité technique et économique, de performance énergétique, de confort intérieur et d'impact extérieur sur l'environnement. Dans la plupart des cas étudiés, l'intégration de BIPV n'a d'impact ni sur le confort intérieur, ni sur l'usage de l'édifice. Pour ne pas perturber l'esthétique extérieure, plusieurs solutions existent. S'il s'agit de panneaux PV, dont la réversibilité est un grand atout. Il vaut mieux les positionner sur le toit de telle sorte qu'ils ne soient pas visibles depuis le rez-de-chaussée. Il est également possible de « camoufler » les modules, grâce à des BIPV conçus sur mesure, avec des couleurs similaires aux matériaux existants. Dans tous les cas, avant d'installer un système solaire, une approche multidisciplinaire est requise pour trouver la réponse la plus adaptée à la situation.

### Aspects sociaux

Ce qui fait l'attraction des BIPV, c'est avant tout leur aspect esthétique. C'est d'ailleurs ce qui les caractérise, les différencie des panneaux classiques, c'est cette recherche de la beauté. C'est important pour les fabricants de pouvoir développer une large gamme de produits afin de répondre aux envies des architectes et des maîtres d'ouvrage. Les beaux produits fonctionnent comme des aimants qui attirent les clients. C'est ce qu'a démontré une étude (Awuku et al., 2021) qui interroge le rôle de l'esthétique dans l'adoption des BIPV. Les chercheurs ont identifié des éléments essentiels de conception : il s'agit de la forme, la couleur, la texture. Les principes de conception comme le rythme, la variété, l'équilibre, le contraste et les proportions sont des outils utiles pour élaborer les façades du bâtiment. C'est d'ailleurs cette richesse de design qui contribue à faire des beaux bâtiments, comme nous l'avons vu dans les exemples précédents. Ainsi, l'esthétique des BIPV participe à améliorer l'acceptation sociale (du point de vue des concepteurs mais aussi de tous les citoyens) de l'intégration de la technologie PV à l'architecture.

Cependant, un des désavantages pour les usagers est l'éblouissement qui peut être provoqué par les modules en façade. Une étude de Sun et ses collègues (2021) cherche à déterminer la faisabilité des BIPV en milieu urbain, non pas seulement en analysant le potentiel d'exploitation solaire, mais également en considérant l'impact sur la visibilité des piétons dans les zones densément bâties. Pour cela, ils ont développé un outil cartographique représentant le quartier d'analyse en 3D, avec les surfaces étudiées selon leur niveau d'irradiation solaire (à maximiser) et leur impact visuel (à minimiser). Suite à cela, des stratégies différentes s'appliquent à chaque cas. Pour les surfaces hautement irradiées qui ont peu d'impact visuel (comme sur les toits), des cellules à hautes

performantes peuvent être déployées. Pour ce qui est des surfaces à haut potentiel solaire et impact important sur la visibilité des piétons (le plus souvent en façade), des solutions plus recherchées doivent être mises en place. Il existe des BIPV de couleur blanche qui s'approchent de l'aspect extérieur conventionnel d'une façade. Au contraire, on peut aussi mettre en avant la couleur des modules en les faisant améliorer l'esthétique du bâtiment, comme c'est le cas de l'école à Copenhague. Une autre solution pour contribuer à la beauté du bâtiment peut être l'utilisation de cellules solaires colorées appliquées comme des vitraux, ou encore « organiques », individualisant chaque cellule pour en faire ressortir la finesse et la légèreté. C'est par exemple ce qui a mené le concept « d'arbre solaire » sur le pavillon allemand de l'exposition de 2015 où les cellules ont été placées comme des « feuilles » suspendues dans la canopée. Elles peuvent aussi être insérées et alimenter un « mur média » dans les zones commerciales, comme on en voit souvent dans les grandes métropoles américaines ou asiatiques. Finalement, le rôle des arbres urbains a été identifié comme améliorant le confort visuel des piétons, sans pour autant impacter l'irradiation solaire des cellules situées sur les façades des hauts immeubles. Il y a donc de nombreuses solutions pour lutter contre l'éblouissement des BIPV.

### 3.3.3.3. *Avis critique*

En conclusion, on peut dire que le BIPV est une solution très attrayante esthétiquement, et permet une grande variété de designs donnant le choix aux architectes. Le point de vue technique est davantage problématique. Suite à l'évolution constante des technologies, les modules deviennent rapidement obsolètes et sont en décalage avec la durée de vie d'un bâtiment. C'est un inconvénient indéniable, même si en fin de compte les matériaux de construction classiques nécessitent aussi de l'entretien et un renouvellement (changement des fenêtres et des châssis, de la couverture de toit...).

À travers l'analyse de trois exemples de bâtiments, nous avons pu constater que l'objectif recherché en donnant une belle apparence aux BIPV n'est pas uniquement de « faire joli ». Le but est de pouvoir intégrer le bâtiment à son environnement, et de pouvoir incorporer et même utiliser les modules dans la composition architecturale. Ils ne sont pas toujours visibles, et même s'ils sont apparents, un public non averti ne se rend pas forcément compte que l'enveloppe comporte des cellules solaires. Par contre, dans le cas où le public est au courant, ils peuvent aussi avoir un rôle subsidiaire de communication : que ce soit dans un but éducatif, de sensibilisation aux énergies renouvelables, ou encore dans le but d'impressionner, ou de faire de la publicité.

Personnellement, je suis convaincue de la valeur ajoutée que les BIPV peuvent avoir dans la conception architecturale. Par leur aspect modulaire, ils peuvent servir de grille de composition et donner un rythme à l'architecture. Par leurs cellules de petites tailles, ils peuvent s'intégrer facilement dans n'importe quelle forme. Par leur semi-transparence, ils permettent des jeux d'ombre et de lumière, de plein et de vide. Voilà pourquoi les BIPV contribuent à la richesse des espaces construits. Ce qui reste dommage, c'est que ces technologies semblent réservées à certaines élites et peuvent être considérées comme « un luxe de l'avancée scientifique ». Il faudrait démocratiser les prix pour étendre les usages à un public plus large. De plus, ce système seul ne suffit pas toujours à approvisionner totalement un bâtiment en électricité. Malgré de grandes surfaces déployées, la production reste parfois insuffisante pour couvrir tous les besoins, et d'autres moyens doivent alors être développés pour apporter de l'électricité pendant les périodes sombres ou nuageuses. Il est encore compliqué, voire impossible dans certains projets, de créer des bâtiments passifs et autosuffisants uniquement avec le recours aux BIPV.

## 3.3.4. Analyse des trois approches

## 3.3.4.1. Tableau récapitulatif

Ce tableau permet de mettre en relation les BIPV face aux trois piliers du développement durable, selon les trois différentes approches abordées précédemment.

	<b>Approche technique</b>	<b>Approche commerciale</b>	<b>Approche architecturale</b>
<b>Aspects économiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investissement financier de départ important.</li> <li>- Convient mieux pour les bâtiments tertiaires et industriels.</li> <li>- Coût onéreux des BIPV (2-3 fois plus chers que des matériaux de construction traditionnels).</li> <li>- Rentables en Belgique : temps de retour de quelques années.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le coût des BIPV doit être comparé à la somme du coût des matériaux de construction classiques et des panneaux PV traditionnels.</li> <li>- Temps de retour selon ISSOL : 7,5 années.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peut être utilisé comme stratégie de « marketing vert ».</li> <li>- Importance de considérer le remplacement des modules pendant la vie du bâtiment pour mettre à jour les performances des cellules.</li> </ul>
<b>Aspects environnementaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impact environnemental globalement bénéfique.</li> <li>- Importance de recycler les panneaux en fin de vie pour réduire le dommage à la biodiversité et la production de déchets engendrés lors de la fabrication.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production d'électricité verte et grande quantité de CO<sub>2</sub> économisé.</li> <li>- Nécessité de mener des analyses en cycle de vie des produits vendus sur le marché.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intégration harmonieuse dans son environnement immédiat.</li> <li>- Possibilité de créer des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (NZEB).</li> </ul>
<b>Aspects sociaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principaux freins d'ordre financiers et légaux. Peu d'infos sur le sujet données au public.</li> <li>- Nécessité d'évaluer plus en détail le risque sur la santé des travailleurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Créateurs d'emplois.</li> <li>- Sécurité d'accès à l'énergie, en particulier dans les régions isolées/précarisées.</li> <li>- Indépendance énergétique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acceptation sociale des usagers et des concepteurs grâce à leur esthétique.</li> <li>- Nécessité de prendre en compte le risque d'éblouissement dans l'espace public.</li> </ul>

Tableau 7: Croisement des trois approches avec les trois critères du développement durable



### 3.3.4.2. Discussions

Au terme de cette analyse, les informations rassemblées dans les trois approches vont permettre de donner une première réponse aux questions de recherche. Pour rappel, celles-ci étaient :

- **Quel est le potentiel du photovoltaïque intégré à l'architecture d'un point de vue énergétique et esthétique ?**
- **Quels sont les freins à leur application à grande échelle ?**

Concernant le potentiel énergétique et esthétique, on peut se poser plusieurs sous-questions :

- Est-ce que les BIPV peuvent produire assez d'électricité pour couvrir les besoins d'un quartier/bâtiment ?
- Quelles surfaces peuvent être utilisées ?
- Quel est le potentiel d'économie d'énergie, en lien avec des considérations économiques et environnementales ?
- Quel impact esthétique a l'intégration de BIPV sur l'architecture ?

Pour répondre à la question concernant la quantité d'énergie, les modules PV et BIPV ne suffisent généralement pas à produire l'intégralité de l'électricité nécessaire à un bâtiment ou à un groupe de bâtiments. Deux études réalisées en Allemagne (Strzalka et al., 2012) et aux Pays-Bas (Litjens et al., 2018) donnent un ordre de grandeur d'un tiers d'autosuffisance pour un quartier équipé de PV. Le problème est double : l'instabilité de la source et le stockage de l'énergie. En effet, la production fluctue tout au long de la journée et des saisons, et même si on arrivait à stocker entièrement l'électricité produite, elle serait inférieure à notre consommation. Grâce au concept de communautés d'énergie renouvelable qui permet de « partager » l'électricité et de l'échanger selon les besoins des différents membres, une meilleure gestion de l'énergie est possible. Il existe d'autres solutions pour stocker l'énergie comme le chargement de véhicules électriques, ou les batteries. Malgré tout, sous le climat belge, la capacité de production en milieu urbain est insuffisante, car toutes les surfaces ne sont pas exploitables (Marique and Reiter, 2014). Cela dépend non seulement de leur orientation et de leur inclinaison, mais aussi des ombrages dus à la densité bâtie. Ce système repose également sur l'intensité de la lumière et celle-ci est très variable. On ne peut donc pas se fier uniquement sur cette source d'énergie pour subvenir à nos besoins. Le rêve du quartier à énergie positive ne semble pas facile à atteindre sous notre climat, il faudrait coupler les BIPV à d'autres énergies renouvelables. Cela n'est pas vrai pour d'autres régions du monde, où le potentiel est énorme : en théorie, 4% de la surface des déserts arides suffirait à produire toute l'électricité nécessaire sur la Terre ! En pratique, c'est plus compliqué, puisqu'il faut prendre en compte le transport de cette électricité.

Concernant les surfaces exploitables, on doit aussi respecter certaines contraintes. Une orientation préférentielle au sud, sans masque solaire environnant. Les meilleures surfaces pour un maximum de production annuelle sont les surfaces inclinées à 38 degrés. De ce fait, les toitures sont plus intéressantes que les façades, même si celles-ci peuvent compléter l'apport d'électricité pour un bâtiment ayant de grands besoins durant la journée et de grandes surfaces disponibles. Les orientations est et ouest peuvent également compléter la production électrique renouvelable lorsque la demande a lieu tout au long de la journée. Quant au matériau de construction à substituer, il vaut mieux en Belgique ne pas placer de fenêtres BIPV car les cellules obscurcissent les espaces à l'intérieur et permettent moins de gains solaires en hiver. On peut en revanche les placer en toitures, dans un atrium vitré par exemple, où les modules BIPV apportent ombrage et jeu de lumière zénithale. Placer des BIPV en façade est avantageux aussi dans la mesure où les cellules solaires resteront plus fraîches

et plus performantes, dans le cas d'un mur double ventilé. En mur rideau ou en tant que brise-soleil, ils contribuent à réduire le risque de surchauffe dans les immeubles fortement vitrés et ensoleillés.

Les économies d'énergie que les BIPV permettent varient selon les cas, mais peuvent être significatives. Quelques exemples décrits plus tôt ont donné un ordre de grandeur de 50kWh/m<sup>2</sup> d'électricité produite annuellement sur une façade, de 100kWh/m<sup>2</sup> pour une installation couvrant façade et toiture, et de 150kWh/m<sup>2</sup> pour une toiture bien exposée et bien ventilée. Cela veut dire que pour économiser une tonne de CO<sub>2</sub> par an, il faudrait recouvrir 87 m<sup>2</sup> de façade de cellules solaires, ou 29m<sup>2</sup> de toiture. Cette surface serait amplement suffisante pour couvrir les besoins en électricité d'un ménage (3500kWh/an). Outre les gaz à effets de serre, la technologie PV permet aussi de diminuer les déchets radioactifs et l'épuisement des énergies fossiles. L'empreinte carbone des BIPV est difficile à estimer, mais serait moindre puisque la dette énergétique serait remboursée après quelques années. Il faut néanmoins prendre en considération les impacts négatifs qu'ils peuvent avoir sur l'environnement tout au long de leur cycle de vie, comme le dommage à la biodiversité et la production de déchets (à recycler !). Financièrement parlant, les technologies BIPV sont onéreuses, même si leur prix tend à diminuer. Les cellules les plus intéressantes sont celles à base de silicone cristallin. Selon ISSOL, le temps de retour sur investissement serait de 7,5 années pour les BIPV intégrés dans les vitrages. Après cela, l'installation produirait des bénéfices, de l'ordre de 20€/m<sup>2</sup> par an. Une autre étude (Gholami and Røstvik, 2020) était plus optimiste et estimait un temps de retour de 4 ans pour une façade BIPV exposée au sud, et de 3 ans pour un toit plat BIPV. Les BIPV représentent donc un réel potentiel d'économie d'énergie, engendrant des bénéfices à la fois environnementaux et économiques.

En ce qui concerne l'impact de l'intégration des BIPV sur l'architecture, on peut considérer qu'il est globalement bénéfique. Comme observé dans les bâtiments présentés, ils peuvent soit s'intégrer de manière discrète, ce qui peut être un avantage pour préserver l'aspect du patrimoine bâti, soit être apparents et identifiables. Dans ce cas, ils peuvent participer activement à l'architecture par leur forme, et donner couleur et rythme aux façades. Parfois ils renvoient aussi une image, un message, pour sensibiliser les gens, impressionner, ou émerveiller devant une architecture contemporaine et écoresponsable. Les BIPV peuvent aussi avoir d'autres fonctions annexes, comme celle d'alimenter un mur publicitaire, ou celle d'œuvre d'art intégrée. Dans tous les cas, ils ont un impact sur l'esthétique du bâtiment, en se fondant harmonieusement dans l'architecture ou en offrant une valeur ajoutée à l'enveloppe.

La deuxième question interroge les freins à l'implémentation des BIPV. Les barrières déjà relevées lors de cette première partie sont essentiellement d'ordre financier et social. En effet, il faut investir une grande somme sans certitude de rentabilité. Contrairement aux panneaux PV classiques qui connaissent des mécanismes de soutien en Wallonie via les certificats verts pour encourager les gens à investir (Solwatt en Wallonie, depuis 2008), il n'y a aucune spécificité accordée pour les BIPV en Wallonie. Le cadre normatif est le même que pour les modules PV, alors que les BIPV présentent un surcoût considérable. Cependant, depuis fin 2021, la Région de Bruxelles Capitale a mis en place une politique de soutien spécialisée au panneaux intégrés au bâtiment : l'Arrêté du Gouvernement de la RGB du 28/10/2021 (Moniteur belge, 2021). Il s'agit d'un cadre incitatif adapté basé sur celui des panneaux PV avec un « bonus » pour les BIPV, afin de promouvoir ce secteur innovant qui permet en plus de respecter les contraintes urbanistiques. Selon Brugel (2020), le régulateur bruxellois pour l'énergie, cinq catégories de BIPV peuvent désormais bénéficier d'un taux d'octroi supérieur pour les certificats verts : skylight, garde-corps, brise-soleil, mur rideau et façade ventilée. Ce taux d'octroi a été calculé pour compenser le surcoût d'investissement, avec un temps de retour de 7 ans. Du point de vue social, c'est la peur de l'inconnu qui freine les auteurs de projet. Comme la technologie est

assez récente, le public a peu d'informations sur le sujet, et a peur de se lancer dans un système inhabituel, nouveau, sur lequel il n'y a pas de recul. Là aussi, la fédération des énergies renouvelables, Edora, a développé une feuille de route donnant ses objectifs pour enlever les barrières à l'implémentation des BIPV. Une solution serait de créer une plateforme regroupant les acteurs concernés (métier de la construction) afin de diffuser l'information et éradiquer les idées reçues. Le site web permettrait aux acteurs de communiquer entre eux et de prendre connaissance des aspects techniques et économiques de ces solutions. Il y aurait aussi des séminaires, des formations, des séances d'informations et de sensibilisation qui seraient organisées pour les architectes et les bureaux d'études (Edora.org, 2013). Malgré ces belles intentions, il semblerait que cette plateforme n'existe toujours pas aujourd'hui.

Les obstacles vont être examinés plus en détail dans la deuxième partie de ce mémoire qui étudie l'opinion des différents acteurs de la construction en lien avec l'utilisation de BIPV dans l'architecture.

## CHAPITRE 4 : ANALYSE D'UN CAS D'ÉTUDE

### 4.1. Fonctionnement du bâtiment

Les documents techniques qui ont servi de sources d'informations pour la section ci-dessous ont été obtenus grâce au fabricant de BIPV ISSOL et au bureau d'étude VK engineering. Les documents confidentiels reçus ne peuvent pas être partagés en annexe, mais le contenu en lien avec ce travail est partagé dans la section qui suit. Assar architects a également partagé les plans de l'immeuble.

#### 4.1.1. Introduction

Le Treurenberg Building se situe en plein cœur de Bruxelles, au croisement de la Rue Treurenberg et de la Place de Louvain. L'ancien immeuble ayant été entièrement démoli, le nouvel immeuble se devait d'être plus performant du point de vue énergétique, et harmonieusement intégré à son environnement proche.



Figure 27: Façade sud du Treurenberg Building. Source : Catherine Decrop

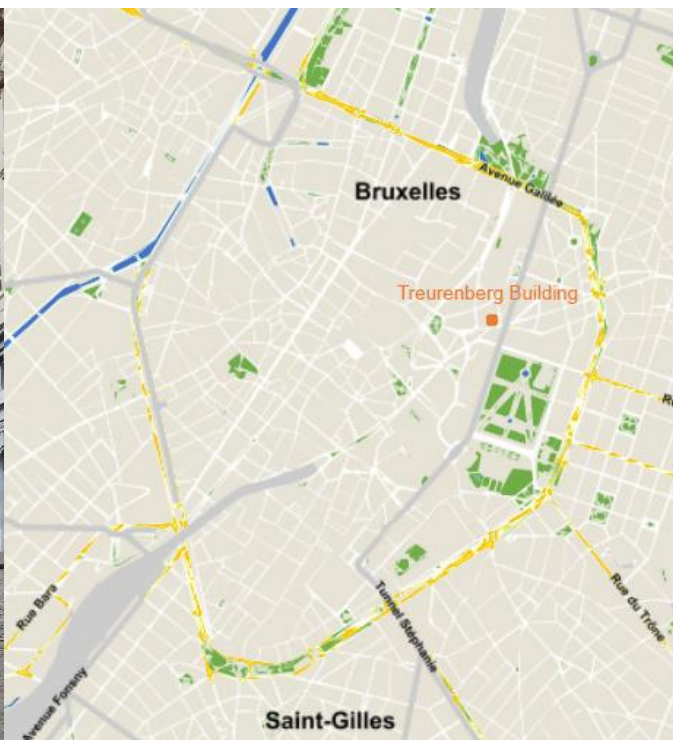


Figure 28: Localisation du Treurenberg Building. Source : geo.brussels, 2022

Pour respecter l'architecture classique du centre-ville, aussi bien les matériaux que la forme ont été pris en considération lors de la conception de l'édifice. La volumétrie extérieure du Treurenberg Building respecte le gabarit des bâtiments voisins. Les fenêtres sont verticales, et possèdent un vitrage clair. Des pierres calcaires naturelles ont été employées comme revêtement de façade, tandis que pour les trois derniers niveaux, un matériau de couleur sombre afin vient s'apparenter au langage des toitures de la rue. Au niveau de l'espace public, un volume d'accueil en double hauteur vient démarquer l'entrée du bâtiment (VK engineering, 2013).

## Présentation des plans

L'ancien bâtiment s'étendant sur une large emprise, il était difficile de faire parvenir la lumière naturelle en son centre. C'est pourquoi les architectes ont créé un grand atrium au cœur de l'immeuble, autour duquel les espaces de bureaux s'organisent. Répartis sur 8 niveaux, les bureaux et salles de réunion représentent une surface de 9 200 m<sup>2</sup>. Les circulations intérieures permettent de desservir d'un côté les espaces de travail ouverts vers l'atrium, et de l'autre, les pièces possédant des fenêtres vers l'extérieur. Au cinquième étage, une terrasse située à l'ouest offre une vue panoramique sur le centre de Bruxelles. Un espace commun intérieur en triple hauteur fait la liaison entre cette terrasse et l'atrium intérieur, comme on peut le voir sur le plan ci-dessous. Outre cela, le bâtiment comporte 500 m<sup>2</sup> d'espaces techniques et 3 000 m<sup>2</sup> de parkings souterrains (Vk engineering, 2013).



Figure 29: Plan du cinquième étage et coupe longitudinale. Source : Assar Architects, 2013

#### 4.1.2. Calcul du productible photovoltaïque (ISSOL, 2016c)

##### 4.1.2.1. Installation photovoltaïque

Les concepteurs ont choisi le PV comme moyen de générer de l'électricité renouvelable sur le site. La toiture est recouverte de panneaux solaires montés sur une structure inclinée à 5° plein sud. Cette surface ne suffisant pas pour approvisionner tout le bâtiment en électricité, les façades sud, est et ouest ont aussi été recouvertes de verres actifs. Les murs des locaux techniques en sont également équipés. La façade nord est quant à elle composée d'un matériau factice, de même teinte que les verres noirs des autres façades, mais avec du verre non-actif.

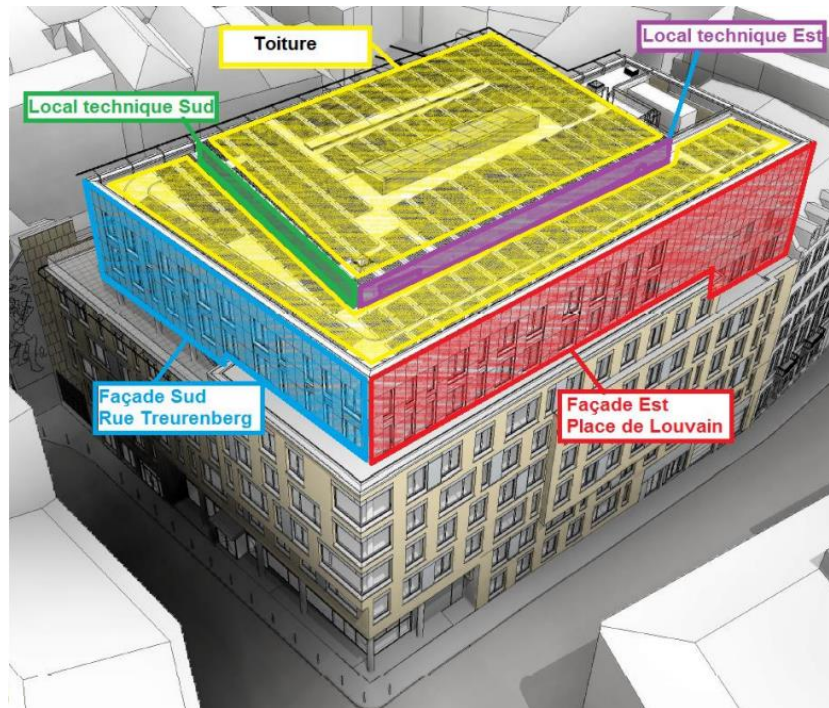


Figure 30 : Installation PV sur les façades Sud et Est, et la toiture du Treurenberg Building.  
Source : ISSOL, 2016c

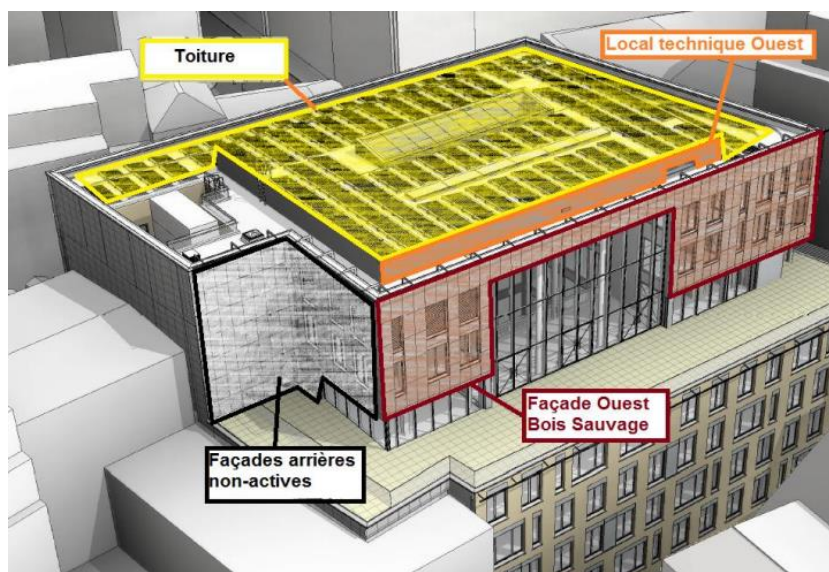


Figure 31: Vue des façades Nord et Ouest, et de la toiture du Treurenberg Building.  
Source : ISSOL, 2016c

#### 4.1.2.2. Spécificités techniques

Les modules PV ont été fabriqués par ISSOL. Ils sont composés de cellules monocristallines à haut rendement encapsulées sous une feuille de verre. Il s'agit d'un type particulier de verre, de type structuré Albarino P, pour optimiser la transmission lumineuse. Ce verre possède des facettes pyramidales, qui permet aux rayons du soleil d'entrer perpendiculairement aux cellules solaires qui se trouvent en dessous. Cette texture permet à la fois de diminuer la réflexion des rayons lumineux frappant la surface du verre, et de piéger la lumière à l'intérieur du verre, ce qui accentue l'effet PV, tout en diminuant l'éblouissement. Ainsi, le rendement annuel des cellules augmente de 3%. L'influence de ces facettes est d'autant plus grande que l'angle d'incidence des rayons lumineux est élevé : avec un angle de 70°, on peut atteindre un gain de 10% de rendement. Ce système est donc idéal pour les surfaces verticales. Il est donc utilisé dans ce cas pour les façades.

Les modules de façades ont été fabriqués sur mesure et possèdent donc des dimensions s'adaptant au calepinage de la façade. Des modules de 1635 mm sur 800 mm, présentant une puissance unitaire de 170 Wc, constituent le maillage de la façade. Le rendement des 40 cellules de 156 mm de côté constituant les modules est de 18%. Le verre avant de type Securit Albarino fait 4 mm d'épaisseur, tandis que la membrane arrière est un film Tedlar (polyfluorure de vinyle) anthracite de 1 mm donnant sa couleur foncée au module.

Les modules de toiture sont différents : il s'agit de modules bi-verres, c'est-à-dire de cellules encapsulées entre deux feuilles de verre. Également constitués de cellules monocristallines, la puissance unitaire de chaque module de 1635 mm x 984 mm est de 285 Wc. Le rendement peut atteindre jusqu'à 20,5%.

Au total, huit onduleurs ont été couplés à l'installation pour assurer la conversion du courant continu venant des modules PV en courant alternatif pouvant être injecté sur le réseau. La moitié de ses onduleurs sont prévus pour la toiture, qui produit davantage d'électricité que les façades. Ces dernières possèdent un onduleur chacune, à l'exception de la façade est, dont la surface est plus grande, et qui dispose donc d'un petit onduleur supplémentaire.

#### 4.1.2.3. Calcul de la production

##### **Logiciel utilisé**

Afin de calculer la production de toute cette installation PV, les experts d'ISSOL ont utilisé le logiciel Archelios Pro. Ce logiciel de simulation se base sur une maquette numérique 3D en réalisant des lancers de rayons pour estimer le gisement solaire reçu par chaque module PV, en tenant compte des masques d'ombres. La simulation tient également compte du dimensionnement des onduleurs et du raccordement des modules entre eux.

Le modèle numérique a été réalisé sur Sketchup à partir de la maquette des architectes. Les bâtiments voisins ont été modélisés afin de pouvoir considérer leur ombrage sur l'installation. L'architecture du Treurenberg lui-même peut également créer des masques d'ombre.



Figure 32: Modèle Sketchup de la toiture, et exemple de masque solaire d'un module sélectionné en bas de la façade est. Source : ISSOL, 2016c

## Hypothèses

Les données météorologiques utilisées pour le projet proviennent de la station météo de Bruxelles, située à seulement 13km de là. En plus de cela, différents facteurs de correction ont été ajoutés pour s'approcher au plus de la réalité, concernant les pertes à cause du masque lointain, du masque proche, de l'incertitude météo, de la réflexion des rayons, de l'encrassement des modules, de la température, de tolérance sur la puissance installée, des défauts techniques de l'installation et des pertes dans les câbles A/C et D/C.

## Résultats

Le logiciel Archelios Pro a pu calculer la production annuelle d'électricité, dont voici les résultats, comparés au nombre de modules, à la surface et à la puissance installée pour chaque partie de l'installation.

	Nombre de modules	Surface de PV (m <sup>2</sup> )	Puissance installée (kWc)	Énergie produite (MWh/an)
<b>Façade est</b>	182	238,06	30,9	16
<b>Façade sud</b>	115	150,42	19,5	12,3
<b>Façade ouest</b>	123	160,88	20,9	10,6
<b>Local technique : mur est</b>	27	43,44	7,3	4
<b>Local technique : mur sud</b>	21	33,78	5,7	4,2
<b>Local technique : mur ouest</b>	26	41,83	7	3,8
<b>Toiture</b>	223	358,77	61,9	51,2
<b>TOTAL</b>	<b>717</b>	<b>1 027,18</b>	<b>153,2</b>	<b>102,2</b>

Tableau 8: Nombre de modules, surface, puissance et production PV de chaque partie du Treurenberg Building. Source : ISSOL, 2016c



Un rapport plus détaillé présente les notes de calcul pour chaque élément. Les chiffres présentés ci-dessous sont ceux qui diffèrent le plus d'une partie de l'installation à l'autre, et ceux qui sont le plus pertinents dans le cadre de cette étude. Ils proviennent de la simulation du logiciel. Les graphiques donnent les productions mensuelles en courant alternatif de chaque surface. Le productible spécifique est l'énergie produite par l'installation PV annuellement (kWh/an) rapporté à la puissance installée (kWh/kWc). Le ratio de performance est le rapport entre le productible spécifique et l'irradiation annuelle incidente dans le plan des modules. Enfin, le dernier facteur donné est la perte d'énergie due aux ombrages, comprenant les masques solaires et les ombrages partiels.

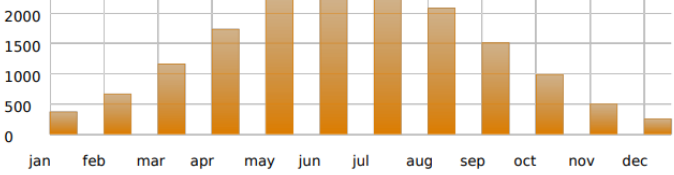
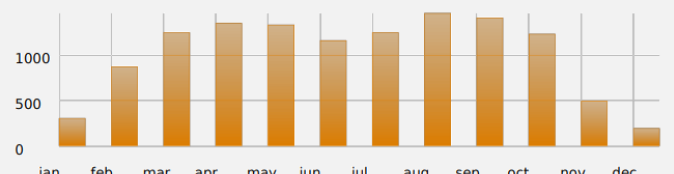
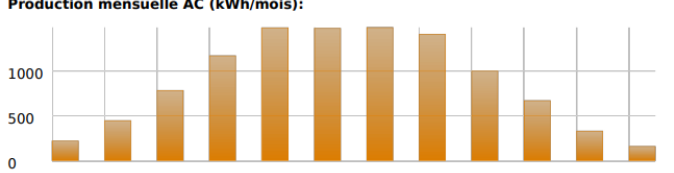
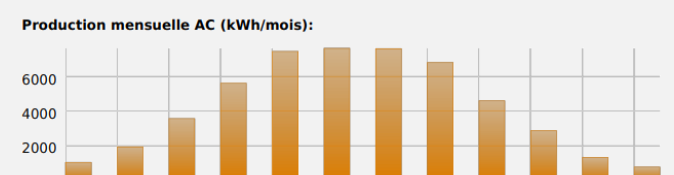
<b>Façade est</b>	<b>Production mensuelle AC (kWh/mois):</b> 	<b>Productible spécifique AC :</b> 518 kWh/kWc
		<b>Ratio de performance :</b> 82,49%
		<b>Pertes dues aux ombrages :</b> 3,22%
<b>Façade sud</b>	<b>Production mensuelle AC (kWh/mois):</b> 	<b>Productible spécifique AC :</b> 630 kWh/kWc
		<b>Ratio de performance :</b> 76,3 %
		<b>Pertes dues aux ombrages :</b> 4,45%
<b>Façade ouest</b>	<b>Production mensuelle AC (kWh/mois):</b> 	<b>Productible spécifique AC :</b> 507 kWh/kWc
		<b>Ratio de performance :</b> 80,28%
		<b>Pertes dues aux ombrages :</b> 2,67 %
<b>Toiture</b>	<b>Production mensuelle AC (kWh/mois):</b> 	<b>Productible spécifique AC :</b> 827 kWh/kWc
		<b>Ratio de performance :</b> 82,88 %
		<b>Pertes dues aux ombrages :</b> 3,98%

Tableau 9: Production mensuelle et facteurs en lien de chaque partie de l'installation.

Source : ISSOL, 2016c

### Analyse des résultats

La façade qui produit le plus est la façade est. C'est aussi elle qui a la plus large puissance installée, et qui a le meilleur ratio de performance. En revanche, son productible spécifique est moins élevé que celui de la façade sud : celle-ci produit davantage d'électricité proportionnellement à sa puissance. Cependant elle est moins performante que la façade est, si on compare l'électricité générée par rapport à l'irradiation solaire. La façade sud a beau être plus ensoleillée, elle transforme une moins grande partie de cette énergie en électricité que la façade est et ouest, probablement à cause de l'angle d'incidence des rayons, ou d'une température de cellules plus élevée. Les pertes d'ombrages sont également plus élevées sur la façade sud, à cause du bâtiment en face de la rue qui est relativement proche. On remarque aussi que la façade sud produit davantage en mi-saison qu'en plein

été. Ceci peut être comparé à un graphique similaire obtenu dans l'état de l'art. L'explication de ce phénomène est que les cellules PV sont plus chaudes en été et donc moins efficaces, et que l'angle d'incidence des rayons est plus élevé car le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui engendre plus de réflexion. Alors que sur la façade ouest et est, la production maximale est en été (le matin à l'est et l'après-midi à l'ouest). La production proportionnellement à la puissance installée est presque équivalente à l'est et à l'ouest. Elle est légèrement plus faible à l'ouest, alors qu'elle a moins de pertes dues aux ombrages. C'est probablement parce que le climat belge induit plus de problèmes de surchauffe à l'ouest.

Quant à la toiture, son productible est bien plus élevé, car l'inclinaison au sud à 5° est plus favorable pour la quantité d'irradiation solaire reçue. Elle est donc légèrement plus performante que la façade est. Une inclinaison supérieure de l'ordre de 38° aurait été optimale pour l'ensoleillement reçu, mais aurait créé plus d'ombrages sur les panneaux voisins. Le calcul a été fait de manière à maximiser la surface de captage, en diminuant l'espacement nécessaire entre chaque module. L'effet des ombrages dans ce cas est probablement dû à l'installation elle-même : les montants des modules et les rebords du bâtiment ont dû jouer un rôle.

NB : On peut noter que les murs des locaux techniques, bien qu'eux aussi inclinés à 90°, ont un meilleur ratio de performance que les façades (de l'ordre de 88%) et un productible spécifique plus élevé. Ceux-ci étant situés plus hauts et plus en retrait, ils sont à l'abri des masques solaires des bâtiments voisins. Cependant la faible surface disponible ne permet pas de produire autant d'électricité que sur les grandes façades. Les courbes de production mensuelles des murs des locaux techniques ont la même allure que pour les façades, mais à une échelle plus réduite.

#### 4.1.3. Performance énergétique du bâtiment (VK engineering, 2013)

##### 4.1.3.1. Objectif Zéro Énergie Nette

Le deuxième document technique concerne les performances énergétiques du bâtiment en lui-même. L'immeuble de bureaux a d'abord été pensé pour respecter les critères d'un bâtiment passif, puis a encore été amélioré pour devenir un Net Zero Energy Building. Le but est que la quantité d'énergie primaire annuelle utilisée pour répondre à la demande du bâtiment, c'est-à-dire pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage soit égale à 0kWh. Pour cela, la faible quantité d'énergie que le bâtiment consomme est compensée par la production d'énergie renouvelable sur le site. Cela veut dire que les critères du passif doivent d'abord être remplis, pour ensuite aller plus loin. Pour rappel, ces critères sont :

<b>Besoin d'énergie pour le chauffage</b>	≤ 15kWh/(m <sup>2</sup> .an)
<b>Besoin d'énergie pour le refroidissement</b>	≤ 15kWh/(m <sup>2</sup> .an)
<b>Étanchéité à l'air (n<sub>50</sub>)</b>	≤ 0,6 h <sup>-1</sup>
<b>Surchauffe</b>	≤ 5% du temps au-dessus de 25°
<b>Énergie primaire</b>	≤ 90 – 2,5 x compacité ≤ 82 kWh/(m <sup>2</sup> .an) dans ce cas-ci

Tableau 10: Critères à respecter pour le label PASSIF tertiaire. Source : VK engineering, 2013

NB : L'énergie prise en compte pour atteindre l'objectif Zéro Énergie Nette exclut l'électricité utilisée pour les équipements (ordinateurs, imprimantes, ascenseurs...), pour l'utilisation des espaces en dehors du volume chauffé et pour les magasins du RDC.

La demande en énergie a été déterminée grâce au logiciel de simulation dynamiques IESVE (Integrated Environmental Solutions Virtual Environment). Celui-ci permet de simuler le comportement thermique du bâtiment, en tenant compte des conditions météorologiques (pour une année typique Test Reference Year) et des propriétés physiques du bâtiment.

#### 4.1.3.2. Stratégie de conception

Le but était de créer un immeuble confortable, fonctionnel et performant énergétiquement. Le bâtiment a obtenu le label environnemental « BREEAM Excellent » avec un score de 78%. Les critères de conception qui ont permis d'atteindre cet objectif sont :

- Une architecture compacte et intégrée à son environnement
- Un haut niveau d'isolation
- L'intégration de PV sur le toit et sur les façades des 3 derniers niveaux
- Une utilisation d'énergie 6 fois plus petite que la moyenne pour les bâtiments de la Région de Bruxelles-Capitale
- L'emploi de matériaux durables et sans émissions de composés organiques volatiles
- L'usage de l'eau de pluie pour les sanitaires
- Des places de parkings pour des voitures électriques et des vélos
- Un décompte de l'énergie utilisée par surface de location
- Un contrôle centralisé de toutes les installations
- Des mesures pour assurer une qualité de l'air intérieur optimale
- Une étude de l'entrée de lumière naturelle garantissant un bon confort intérieur pour les occupants
- Des protections solaires externes (stores mobiles)
- Une bonne inertie du bâtiment (masse thermique accessible : pas de faux plafond dans les bureaux)

#### Isolation du bâtiment

Voici un tableau détaillant les valeurs d'isolation requises pour un bâtiment Zéro Énergie Nette, que les éléments de construction du Treurenberg respectent.

Treurenberg	Valeurs U (W/m <sup>2</sup> K)
Façade	0,109
Toiture	0,099
Vitrage	0,5 (avec une transmission de lumière de 72%)
Châssis	0,75
Fenêtres	0,8

Tableau 11: Valeurs U des éléments de construction du Treurenberg Building.

Source : VK engineering, 2013

#### Optimisation de la ventilation

La ventilation à l'intérieur des bureaux est variable en fonction de l'occupation des locaux. Des détecteurs permettent de déclencher la ventilation en cas de besoin de renouvellement d'air, et le reste du temps le débit d'air est fortement diminué afin d'économiser l'électricité consommée par les ventilateurs. Ainsi le débit d'air s'adapte pendant les heures de la journée, en fonction de la présence d'occupants.

### Optimisation de l'éclairage naturel

Pour optimiser l'entrée d'éclairage naturel, les fenêtres ont été rehaussées afin que la lumière du jour pénètre plus profondément dans les espaces intérieurs. La quantité de lumière qui entre est mesurée grâce au DayLight Factor (D.F). C'est le rapport entre la lumière du jour au sol qui entre à l'intérieur, et la lumière à l'extérieur, et s'exprime en %. Les résultats de l'étude donnent un DF de 4,16% pour la solution Net ZEB, comparé au 2% pour la solution passive, ce qui correspond à une luminosité de 250 LUX. L'intérieur des pièces est ainsi éclairé naturellement jusqu'à 5,16 m de profondeur. Pour obtenir le niveau de luminosité requis par le client de 500 LUX, l'éclairage artificiel complète l'apport de lumière grâce à des détecteurs de présence.

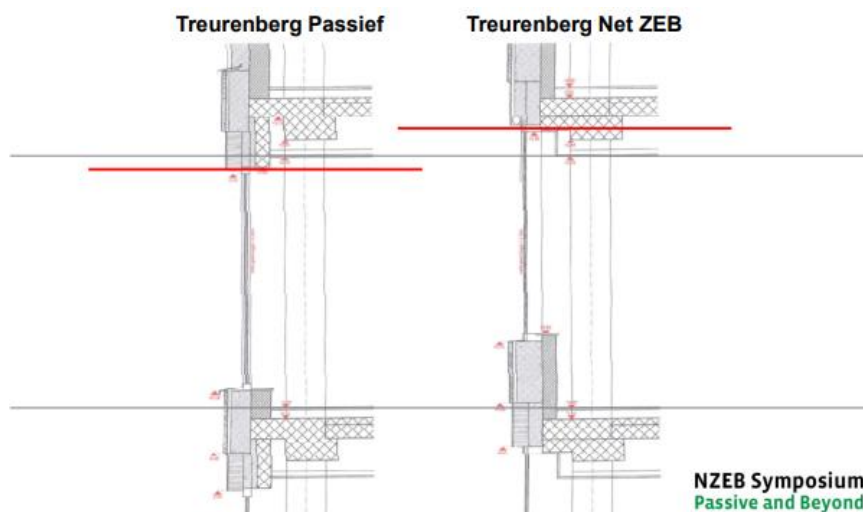


Figure 33: Détail technique montrant le rehaussement des fenêtres pour optimiser l'éclairage naturel à l'intérieur des bureaux. Source : VK engineering, 2013

### Installations techniques

Le bâtiment comporte de nombreux équipements pour l'HVAC. Ceux-ci sont listés ci-dessous.

- Chauffage : chaudière à condensation, au gaz naturel
- Refroidissement : naturel, grâce à des tours de refroidissement si la température extérieure n'excède pas les 10° ou refroidisseur haut rendement le reste du temps
- Plafonds actifs dans les bureaux et salles de réunion
- Chauffage/refroidissement par le sol dans l'atrium
- Ventilation mécanique à débit variable contrôlée par un détecteur de présence, avec récupérateur de chaleur (rendement > 85%)
- Système de Gestion Technique des Bâtiments : système informatique permettant de superviser l'ensemble des équipements installés
- Cogénération : En complément des autres systèmes, et pour compenser les pertes de l'installation PV, le bâtiment dispose aussi d'une centrale de cogénération au gaz, produisant chaleur utile et électricité. Celle-ci fonctionne environ 2h par jour, et possède une puissance thermique de 27 kWt, et une puissance électrique de 12 kWe. Le rendement global de la centrale avoisine 90% (53% de chaleur + 35% d'électricité).
- Panneaux PV : Sur le toit, les cellules PV sont à haut rendement (20%). Couvrant une surface de 584 m<sup>2</sup>, les modules produiraient 99 500 kWh/an. Sur les façades, le rendement des cellules est légèrement plus faible (18%). Disposés sur une surface de 550m<sup>2</sup>, la production annuelle serait de 39 900 kWh/an.

Les chiffres concernant l'installation solaire diffèrent selon les sources : VK engineering annonce une production annuelle d'électricité largement plus élevée qu'ISSOL. Comme on peut le voir dans le tableau suivant, la différence viendrait surtout de l'installation sur la toiture, dans laquelle on peut supposer que VK engineering comptabilise les murs des locaux techniques (LT).

	ISSOL	VK engineering
<b>Production totale (MWh)</b>	102,2	139,4
<b>Surface de PV en toiture (m<sup>2</sup>)</b>	358,8 (toit) + 119 (LT) = 477,8	584
<b>Production des modules de toiture (MWh)</b>	51,2 (toit) + 12,1 (LT) = 63,3	99,5
<b>Surface de PV en façade (m<sup>2</sup>)</b>	594,4	550
<b>Production des modules de façade (MWh)</b>	38,97	39,9

Tableau 12: Comparaison des données d'ISSOL et de VK engineering concernant la production PV

VK engineering donne 100 m<sup>2</sup> de plus de panneaux solaires en toiture, et une production presque 1,6 fois plus élevée ! Ce sont des différences considérables. En revanche, pour les façades, les résultats obtenus sont proches. Pour savoir lequel des deux est le plus proche de la réalité, il suffit de vérifier les dates des documents. ISSOL a produit son calcul de productible en 2016, en version *As-built*. Tandis que le document de VK engineering date de 2013. On peut donc estimer que c'est la version d'ISSOL, qui est plus récente et produite d'après le bâtiment tel que construit, qui est la plus fiable. Il aurait été encore mieux de pouvoir comparer ces résultats avec les chiffres réels de la production, mais cette information n'a malheureusement pas pu être communiquée par le locataire.

#### 4.1.3.3. Bilan de la PEB

Le choix de la solution Net ZEB coûte 4,8% plus cher que le standard passif. Ce surcoût sera compensé grâce aux économies d'énergie durant la durée d'utilisation du bâtiment.

Au total, l'utilisation d'énergie primaire (chauffage + refroidissement + ventilation + éclairage) est de 37,63 kWh/(m<sup>2</sup>.an) pour le Net ZEB contre 60,69 kWh/(m<sup>2</sup>.an) pour le passif, ce qui donne un gain d'énergie de 38%. L'installation PV produirait 36,63 kWh.m<sup>2</sup>.an, ce qui compenserait la consommation, permettant ainsi d'atteindre le zéro-énergie. Attention que le chiffre concernant la production des panneaux solaires est en réalité 1,3 fois moins élevé, selon ISSOL, ce qui équivaldrait 28,18 kWh.m<sup>2</sup>.an. Bien que les gains de la cogénération ne soient pas considérés, les pertes dues à l'utilisation des équipements électriques (ordinateurs, ascenseurs...) ne sont pas non plus comptabilisées. Cela veut dire que ce bâtiment ne serait pas réellement zéro-énergie, mais plutôt à très basse consommation.

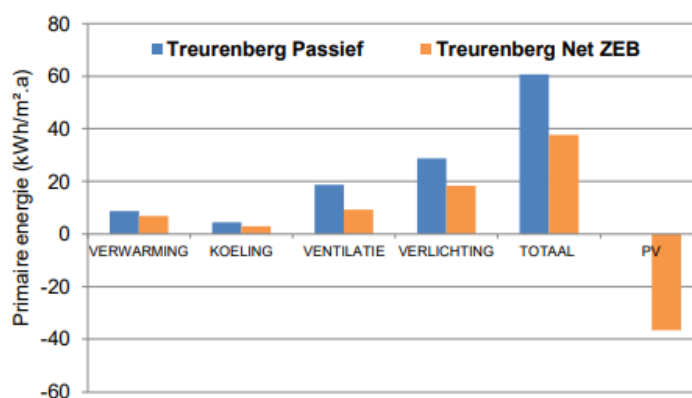


Figure 34: Comparaison de l'utilisation d'énergie primaire pour le Treurenberg Passif et le Treurenberg Zéro Énergie Nette. Source : VK engineering, 2013





## Réponses aux questions

### Thème 1 : Commencement du projet et initiative BIPV

- Comment le projet a-t-il commencé, pour vous ? Qui est venu vous voir ?
- Qui était à l'initiative de l'idée d'utiliser des Building Integrated Photovoltaïcs ?

L'histoire du projet a pu être reconstituée en confrontant les récits des différents acteurs. Même si chacun d'eux sont « apparus » dans le projet à différents moments, et que chacun a sa version des faits, il y a des informations similaires d'un récit à l'autre, ce qui confirme la plausibilité des événements. Le début du processus est expliqué par le manager de projets de AXA, puisque le client est le premier acteur concerné. Le récit est confronté à celui de l'architecte de chez Assar qui intervient aussi dès le début du projet. L'entreprise de construction générale Democo arrive plus tard, et enfin le designer solaire de Sunsoak Design est le dernier acteur à être impliqué dans l'histoire. Voici donc le fil reconstitué.

Tout a commencé avec un vieux bâtiment des années 50', appartenant à AXA Real Estate. La compagnie de banque et assurance investit régulièrement dans l'immobilier afin de garantir son portefeuille. En 2010, les précédents locataires étant partis, et le bâtiment étant devenu obsolète, les propriétaires ont voulu rénover l'édifice. AXA a donc lancé un concours d'architecture pour la rénovation lourde de cet immeuble de bureaux. Assar Architects a proposé une intervention ambitieuse et a conclu sa présentation en prônant la démolition du bâtiment. Cela a été un choc pour AXA, mais qui a cependant envisagé la proposition en organisant une deuxième phase du concours, cette fois en démolition et reconstruction. C'est Assar Architects qui l'a emporté. Cependant, il n'est pas aussi simple que cela de démolir un bâtiment de cette taille à Bruxelles, car il y a une vraie politique de maintien de l'existant. Il a fallu argumenter le projet par le fait que la démolition offrait plus de possibilités que la rénovation lourde. Le premier argument concerne le patrimoine, puisque la démolition a permis de dégager et de restaurer un ancien mur d'enceinte datant du 13<sup>ème</sup> siècle.

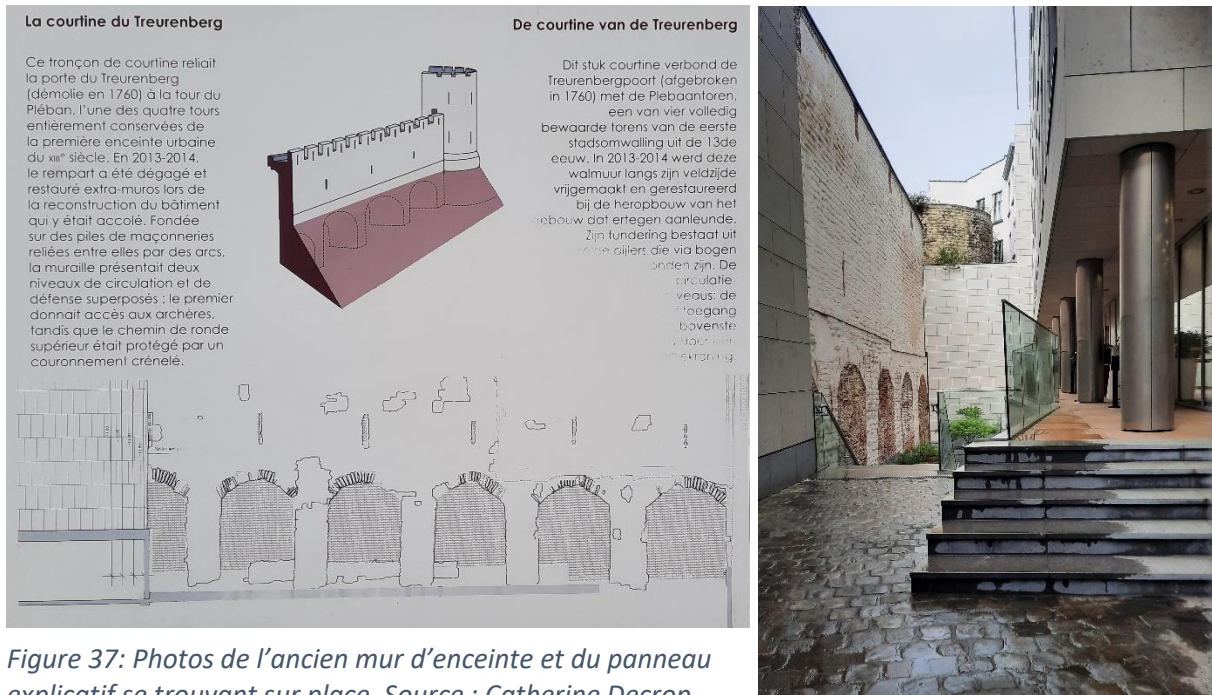


Figure 37: Photos de l'ancien mur d'enceinte et du panneau explicatif se trouvant sur place. Source : Catherine Decrop

Deuxièmement, la structure précédente était périmée. Enfin, le client et les architectes ont aussi amélioré le profil environnemental du bâtiment, afin que le nouvel immeuble soit beaucoup plus



performant que l'ancien, même rénové. Ils ont opté pour un bâtiment passif, ce qui était déjà ambitieux pour l'époque. Les architectes prévoient initialement des panneaux solaires classiques en toiture, apposés discrètement pour ne pas dénaturer le centre historique. AXA procède ensuite à une adjudication pour trouver un entrepreneur général. C'est Democo qui a été choisi, car cette entreprise proposait une variante intéressante : pour aller encore plus loin du point de vue environnemental, elle voulait que le bâtiment soit zéro-énergie nette. Avec le bureau d'étude Mark Coppen, Democo a participé à l'expertise technique et proposé des modifications du projet au bureau d'étude VK engineering, chargé de la PEB. Très vite, tous ces acteurs se sont rendus compte qu'ils n'auraient pas assez de surface de captage avec la toiture pour produire toute l'énergie nécessaire. Étant en milieu urbain, d'autres moyens de produire de l'énergie renouvelable sur le site n'étaient pas envisageables, et la seule solution était le PV. C'est comme ça qu'est arrivée l'idée de produire avec les façades. Pour respecter le contexte bâti, les architectes voulaient que les panneaux PV soient intégrés à l'architecture. Democo a recherché des spécialistes capables de faire ça, et a donc contacté le fabricant belge de BIPV, ISSOL, qui a lui-même confié la mission à Sunsoak Design. Le designer solaire a alors conçu les BIPV en collaboration avec Assar et Democo. Le client n'était au départ pas d'accord d'utiliser des BIPV pour des raisons économiques, mais a finalement été convaincu par l'esthétique discrète du produit trouvé.

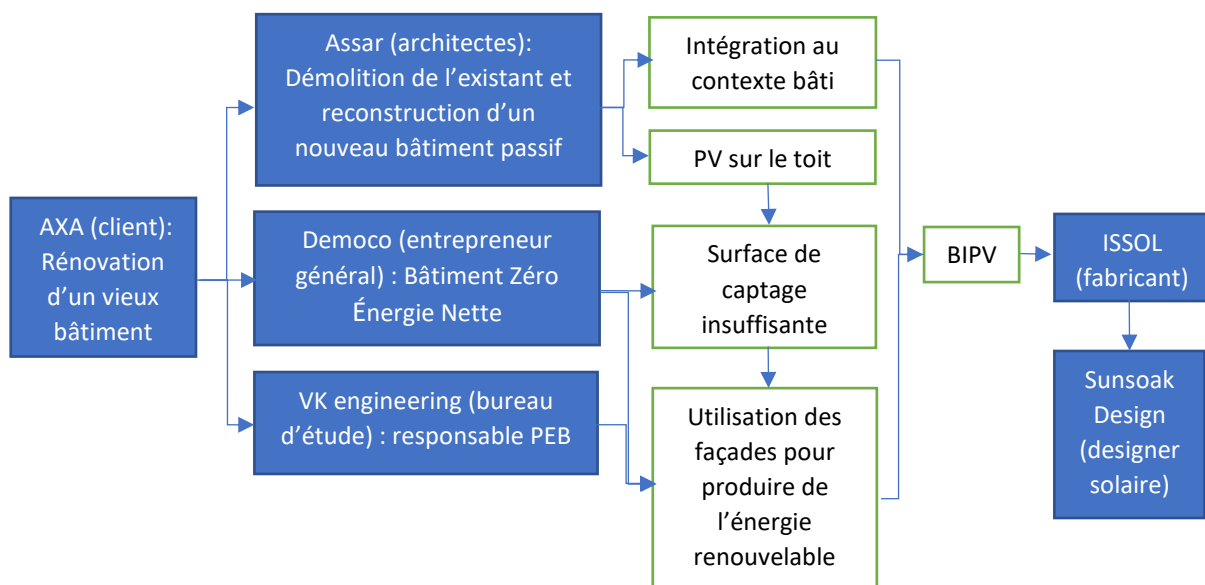


Figure 38: Résumé schématique du commencement du projet et des initiatives prises par les acteurs

Certains éléments ne sont pas clarifiés, comme la demande du label BREEAM. L'architecte parle « *des certificateurs BREEAM* », à savoir B4F, qu'aucun autre acteur n'a mentionné. Leur rôle n'a pas pu être clairement identifié, probablement parce qu'ils sont arrivés à la fin du projet pour certifier le bâtiment.

Quant à l'apparition des BIPV dans le projet, le client raconte « AXA s'est lancé dans un bâtiment passif. Ils ne parlaient pas du tout de BIPV encore à l'époque ». Selon lui, c'est Democo, l'entrepreneur, qui « a étudié entièrement le bâtiment avec nous pour passer du standard passif au standard net zéro énergie. Et c'est là que le BIPV a commencé à apparaître. » Le designer solaire se rappelle que VK engineering et les architectes voulaient placer des PV sur une seule façade, et que lui leur a proposé de couvrir trois façades. On peut conclure que l'idée de placer des BIPV découle des réflexions et des visions différentes des acteurs, et est le fruit de la collaboration entre les architectes, l'entrepreneur général et les bureaux d'étude.

## Thème 2 : Actions dans le projet / rôle

- Quel rôle avez-vous joué ?

Évidemment, la réponse à cette question varie fortement puisque chaque acteur a joué un rôle différent. On peut noter que :

L'ancien manager d'AXA Real Estate était en charge de piloter tout le projet depuis la démolition jusqu'à sa livraison. Tout d'abord, il a constitué une équipe avec des architectes et des ingénieurs autour du programme désiré par AXA. Ensuite, il a veillé à faire évoluer le projet. Avec son équipe, ils ont étudié le bâtiment et introduit une demande de permis. Après l'obtention de celui-ci, ils ont démarré les appels d'offre aux entrepreneurs pour réaliser les travaux. Ils ont désigné Democo grâce à leur variante zéro énergie nette. Enfin, le manager a suivi l'avancée des travaux et continué de gérer le bâtiment jusqu'à sa réception.

L'architecte interviewé faisait partie de l'équipe d'Assar Architects qui travaillait pour ce projet de grande ampleur. Le bureau fonctionne toujours en équipe de personnes complémentaires, avec une personne qui est le fil conducteur, le designer. Pour le Treurenberg Building, c'était la personne interviewée qui assurait ce rôle. Il a participé à la conception, au design du bâtiment, tandis qu'un collaborateur a suivi le chantier au « *Day to day* ». Pour la conception du projet, ils ont eu d'emblée une attitude très respectueuse du contexte : par la proportion verticale des fenêtres avec des meneaux centraux, par l'enveloppe en pierre naturelle, par le recul vis-à-vis de la muraille d'enceinte, par le respect des gabarits voisins et par la boîte en superstructure en hauteur assimilée à un langage de toiture. Le projet a selon lui, une assez bonne intégration dans le patrimoine du centre-ville.

Le directeur du siège d'exploitation de Democo pour Bruxelles a aussi suivi en détail le chantier car le Treurenberg Building était un projet de grande importance pour eux. Son équipe et lui ont vraiment pris en main le dossier, pas comme un entrepreneur classique qui exécute ce qui lui est demandé. Eux, ils ont participé à l'expertise technique. Avec le bureau d'étude Mark Coppen, ils ont optimisé le bâtiment et puis ils ont fait des propositions à VK pour avoir leur approbation. Ils ont fait des dessins au début du dossier pour démontrer comment ils ont transformé un peu le concept du bâtiment pour arriver à ce zéro-énergie. C'était sa fille qui a transformé le bâtiment au niveau architectural pour y arriver. Ils ont changé l'épaisseur d'isolation des façades, les facteurs énergétiques des vitrages, ils ont optimisé les châssis (bois et alu) pour diminuer les pertes d'énergie par les façades. Ils ont aussi rehaussé les fenêtres pour favoriser l'entrée de lumière à l'intérieur. Grâce à une simulation dynamique du bâtiment, ils ont adapté la ventilation. Mais surtout, ils ont optimisé les panneaux solaires, et les surfaces de captage (inclinaison, nombre et performance des panneaux).

Le fondateur de Sunsoak Design a conçu et installé les façades PV du Treurenberg. Il a dessiné les détails, en collaboration avec Assar et Democo, et les plans de montage. Les étapes du projet étaient celles d'un projet classique : avant-projet, avant-projet détaillé, permis, dossiers d'exécution, appels d'offres et chantier. Sunsoak Design est arrivé au moment du permis pour aider les architectes à dessiner les façades et les a accompagnés jusqu'à la mise en œuvre. Pour ce projet, ils ont développé un système spécifique de fixation pour simplifier la mise en œuvre et pour avoir des joints très fins. De cette manière, la façade est étanche même sans pare-pluie.

Chaque acteur a eu un rôle bien spécifique dans la construction du Treurenberg Building et c'est d'ailleurs pour ces diverses contributions que j'ai choisi de les interroger.

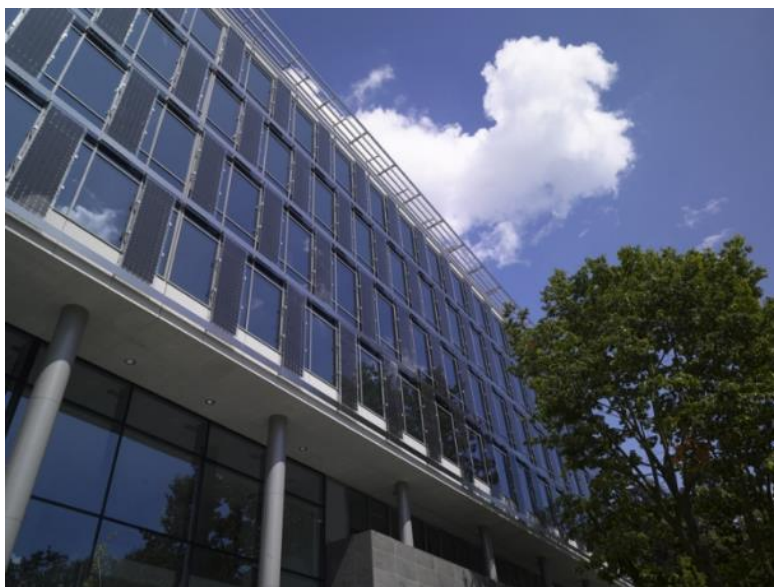
### Thème 3 : Expérience précédente BIPV

- Aviez-vous déjà utilisé des BIPV auparavant ? Dans quel cadre ?

La moitié des intervenants avait déjà travaillé avec du BIPV avant le Treurenberg Building. Le designer solaire en utilise au quotidien dans son métier et l'architecte était fier de présenter un autre bâtiment intégrant des BIPV, qu'il avait conçu il y a dix ans.

Le designer solaire est spécialisé en solaire architectural, donc il n'a que des projets comportant du BIPV. Il travaille rarement pour des particuliers car il n'a que des gros projets, principalement en Belgique et en France. D'ailleurs, ce sont souvent les mêmes architectes qui reviennent. ISSOL a une quinzaine de projets rien qu'à Bruxelles.

D'emblée, avant même de commencer l'interview, l'architecte a présenté un autre immeuble qu'il a réalisé avec des BIPV avant le Treurenberg : le Solaris à Bruxelles. Cet immeuble de bureaux comporte à la fois du PV en toiture et en façade, en tant que pare-soleil. Le PV a permis d'avoir une identité « green » très marquée esthétiquement et a permis de réduire considérablement la surchauffe à l'intérieur. Le système est combiné à de la géothermie, ce qui fonctionne bien, selon l'architecte. Il est très fier de cet immeuble qui était précurseur à l'époque, même s'il est aujourd'hui un peu dépassé en termes d'isolation et de stratégie de protection solaire.



*Figure 39: Façade sud du bâtiment Solaris à Bruxelles. Source : Solaripedia, 2010*

Au contraire, c'était la première fois que l'ancien représentant d'AXA travaillait avec un bâtiment comportant des BIPV mais désormais, il n'arrête plus. Le manager immobilier envisage la solution BIPV dans ses autres projets et recontacte à chaque fois le même designer solaire. Actuellement, il n'a réalisé qu'un seul projet avec des BIPV parce que les autres projets n'ont soit pas aboutis, soit sont en cours d'étude. Dans un projet sur lequel il travaille en ce moment, il aimerait placer du BIPV dans un grand atrium vitré pour résoudre des problèmes de surchauffe.

Le directeur de Democo à Bruxelles non plus n'avait jamais utilisé de BIPV auparavant. Le Treurenberg est le seul bâtiment que son entreprise ait réalisé avec des panneaux intégrés dans la façade. Selon lui, c'est parce que « c'est clair qu'ils sont plus chers que des panneaux classiques et aussi un peu moins performants parce qu'ils sont mis à la verticale, ce n'est pas l'optimum pour profiter du soleil. »

Thème 4 : Interactions

- Avec qui avez-vous coopéré ?

Le tableau ci-dessous synthétise les interactions durant le projet. En titre de chaque colonne se trouve les acteurs interviewés, et les lignes donnent les acteurs avec qui ils disent avoir coopéré. Ainsi, dans l'interview du client, celui-ci indique sa collaboration avec l'architecte, l'entrepreneur, le designer solaire et le fabricant de BIPV. Les croix représentent les interactions, et les O indiquent simplement que l'acteur en a parlé. Si la case est vide, cela signifie que l'intervenant n'a pas mentionné l'acteur considéré.

	Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
<b>Client : AXA</b>		X	X	
<b>Architecte : Assar</b>	X		X	X
<b>Entrepreneur : Democo</b>	X			X
<b>Designer solaire : Sunsoak Design</b>	X	X		
<b>Fabricant : ISSOL</b>	X	X		X
<b>Bureau d'étude : VK engineering</b>			X	O
<b>« Certificateurs BREEAM »</b>		X		
<b>Contrôle d'assurance : SECO</b>			X	
<b>Bureau d'étude : Mark Coppen</b>			X	

Tableau 13: Interactions entre intervenants du projet

On peut remarquer qu'aucun des interviewés ne cite tous les acteurs concernés par le projet. Néanmoins, le client, en tant que manager du projet, mentionne tous les acteurs principaux (c'est-à-dire les acteurs interviewés). Il a en effet un regard plus large puisqu'il a dû former une équipe pour faire avancer le projet. À l'inverse, le seul acteur dont tout le monde ait parlé, c'est l'architecte. Il faut dire que son rôle est central dans la conception de l'immeuble.

### Thème 5 : Influence des BIPV

- Comment les BIPV ont-ils influencé le projet ?

Les éléments de réponse à cette question ont été catégorisés par thématique dans un tableau disponible à l'Annexe 5 et comportant les extraits de verbatim détaillés. Les facteurs influencés ou non par les BIPV sont repris dans la liste ci-dessous et sont illustrés par les extraits les plus significatifs. La personne à l'origine du verbatim est indiquée entre parenthèses. L'initiale A correspond à l'architecte, C le client, E l'entrepreneur et DS le designer solaire.

#### **Éléments peu impactés par les BIPV**

- **Volumétrie** : « Architecturalement, ça n'a rien changé à la forme. » (A)
- **Esthétique du bardage** : « Les matériaux sont passés d'une façade en bardage noir à une façade en bardage noir PV. » (DS)
- **Procédure de certification** : « En Belgique on nous laisse faire avec le BIPV. En France, le SCTC a très peur du BIPV, demande plein de certifications. » (DS)
- **Confort intérieur** : « Ça ne change rien au confort intérieur, qui est lié essentiellement au plafond actif. » (A)
- **Quantité et complexité du travail** : « Ce n'était pas tellement plus compliqué. Il n'y a pas plus de travail [...]. » (E)
- **Gestion du projet** : « Ça n'a pas tant d'influence que ça parce qu'on ne fait pas les projets autour de ça. » (C)

#### **Éléments fortement impactés par les BIPV**

- **Technique** : « Ça influence fortement la technique [...]. Il y a plus de paramètres à prendre en compte. (Ex : câbles) » (DS)
- **Budget** : « Au niveau des prix cela change, c'est plus cher, même si avec le temps le prix a baissé. » (E)
- **Planning** : Forte influence (DS)
- **Valeur commerciale** : « Commercialement, le bâtiment est plus vendeur. » (C)
- **Image de l'entreprise** : « On a gagné des prix grâce à ce bâtiment, donc ça a donné à Democo une image de société qui va pour la durabilité. » (E)

En conclusion, on peut voir que selon les « experts », les BIPV influencent très peu la conception et la construction du Treurenberg Building. Le projet entier ne tourne pas autour de ça, mais c'est plutôt une contrainte technique supplémentaire que l'on vient ajouter. Évidemment, il faut en tenir compte dans le budget, dans le planning et dans les détails techniques mais finalement, c'est juste un matériau de construction un peu différent de ce que l'on a l'habitude de voir. Les BIPV diffèrent surtout des autres matériaux par l'image « verte » et la génération d'électricité in situ qu'ils engendrent.

## Thème 6 : Opinion sur les BIPV

- Quels sont les désavantages des BIPV, qu'est-ce qui vous freinerait à refaire un projet en intégrant ?
- Au contraire, qu'est-ce qui vous a plu, ce qui vous motive à les réutiliser dans de futurs projets ?

La réponse complète à ces questions se trouve également dans un tableau à l'Annexe 5. Pour simplifier la lecture, seuls les extraits de verbatim principaux ont été repris pour justifier les avantages et les inconvénients retirés en pratique par les experts suite à leur expérience.

### **Principaux avantages des BIPV**

- **Production d'électricité** : « Sans ces éléments de façade, nous n'aurions jamais pu atteindre le zéro-énergie. » (E)
- **Esthétique du bardage** : « [en parlant de la couleur anthracite et du verre texturé, matte et sans effet miroir] : C'est ça qui fait que c'est beau, ça ressemble vraiment à un bardage. » (DS)
- **Intégration discrète** : « Ce qui est assez réussi, c'est l'aspect du PV qui est très discret, surtout en milieu urbain et en centre historique c'était important de ne pas exprimer du PV bleuté. » (A)
- **Optimisation de l'espace** : « Vu le site, en plein centre-ville, très urbain où il n'y a pas de surface pour faire de la géothermie, et avec des fondations existantes et de la pollution des sols, la seule solution pour produire de l'énergie sur place c'était le PV. Et avec la toiture ils n'avaient pas assez. » (C)
- **Image du bâtiment** : « Ça peut donner une identité à l'immeuble (Ex : Solaris). » (A)
- **Valeur commerciale** : « On affiche un bâtiment net zéro-énergie, ce qui apporte beaucoup de visibilité au projet sur le marché immobilier. » (C)
- **Réduction de la surchauffe** : « Dès qu'on a une façade sud ou une verrière qui surchauffe un peu, c'est très intéressant parce que l'ombre lutte contre la surchauffe (ex : gare maritime à Tour & Taxis, piscine de Nivelles). » (DS)
- **Réduction de l'éblouissement** : « [en parlant d'un type particulier de BIPV intégré au vitrage] : Ça atténue très fort la quantité de lumière qui rentre, l'éblouissement. » (C)
- **Compatibilité avec le verre** : « C'est surtout pour les façades et 5ème façades (les verrières, atrium) que c'est intéressant. Le BIPV se met assez bien dans du double vitrage. » (DS)
- **Solidité** : « C'est un matériau très stable, il résiste bien au temps, il ne se dégrade pas, se nettoie facilement, s'il est bien conçu il est solide. C'est un matériau stable, inerte, c'est du verre. » (C)
- **Politique d'incitation** : « Bruxelles est une ville solaire, tout est mis en œuvre pour avoir de la rentabilité en 7 ans, niveau Certificats Verts. » (DS)

### **Éléments discutables**

- **Procédure de certification** : Facile en Belgique, compliqué en France. (DS)
- **Performance** : Moindre : « Ce qui est embêtant, c'est qu'en façade, on n'est pas incliné de manière optimale. On est vertical, [...] on perd pas mal en efficacité comme ça. » (C)  
Intéressante : « C'est assez efficace quand c'est bien étudié. En Belgique il y a moins de problème de surchauffe avec les BIPV qu'au Qatar par exemple. » (DS)
- **Complexité du projet** : Moindre : « Ce n'est pas plus compliqué niveau construction. » (E)  
Élevée : « C'est contraignant parce que tout ça doit être modulé sur des proportions de panneaux ayant tous la même largeur. » (A)

- **Evolution des technologies** : « Depuis quelques années, les PV augmentent régulièrement de puissance, et ça va encore évoluer. Ça peut encourager une rénovation dans 20 ans pour remplacer les panneaux anciens par des nouveaux beaucoup plus puissants pour avoir plus de capacité. » (A)
- **Rentabilité financière** : Chaque acteur a donné son avis quant à la rentabilité financière des BIPV. Ils sont tous d'accord pour dire que ce sont des produits très chers, plus chers que des PV classiques et que la plupart des matériaux de façade (sauf le marbre ou autres matériaux luxueux). Le client précise d'ailleurs que l'installation PV au Treurenberg Building n'est pas rentable puisque que le retour sur investissement est de 30 ans. « Si ça avait été uniquement un calcul financier, on ne l'aurait pas fait. Ici le calcul est commercial. » déclare-t-il. Néanmoins, le designer solaire et le client nuancent qu'avec une standardisation des modules et une grande répétitivité dans la façade, les BIPV peuvent devenir économiquement intéressants. L'entrepreneur affirme que les prix du PV sont en décroissance, et le designer solaire parle de la nouvelle politique de Certificats Verts à Bruxelles, qui permet de rendre les BIPV très rentables (mais de manière artificielle).

### Principaux inconvénients

- **Ombre** : « Certains projets ont des problèmes d'ombres (bâtiments, arbre en face) et les micro shadow (à cause des petits débords) qui bloquent tout une partie du circuit de l'électricité continue. » (DS)
- **Chaleur des panneaux** : Le designer solaire explique que les cellules PV fonctionnent mieux quand elles sont ventilées. Les panneaux trop chauds perdent beaucoup de rendement. Dans les façades non ventilées (ex : mur rideau), les hautes températures des cellules posent problème. Au Treurenberg, la façade est ventilée par une lame d'air, donc les cellules sont bien refroidies. Le problème est fréquent dans du double vitrage (ex : verrières très ensoleillées), où il faut faire attention aux températures dingues qu'il peut y avoir.
- **Durée de vie** : L'architecte trouve que le principal inconvénient des BIPV est leur durée de vie limitée (25 ans) et le déclin de leur performance. Selon lui, c'est une obsolescence programmée car les PV se dégradent avec le temps. Le renouvellement de la façade coûte cher et impose des travaux lourds. (A)
- **Conflit avec les toitures vertes** : « L'avantage de ne pas mettre des PV c'est qu'on peut encore utiliser les toitures comme toitures vertes, tandis qu'avec les PV on ne sait pas. » (E)
- **Manque de connaissance** : « Les bureaux d'étude connaissent mal. » (DS)

Beaucoup de facteurs ont été mis en avant lors des interviews. Ce qui revient le plus fréquemment dans les avantages, c'est l'esthétique de la façade BIPV, qui est discrète, et se fond parfaitement dans le décor du centre-ville. La compacité de cette source d'énergie renouvelable est également un atout que plusieurs acteurs du projet ont souligné. Une fois encore, sans les BIPV, la production d'électricité n'aurait jamais été suffisante pour atteindre l'objectif zéro énergie. Les acteurs ont également parlé d'autres projets pour expliquer d'autres avantages auxquels ils pensaient, notamment la réduction de la surchauffe et l'identité verte marquée.

Ce qui freine les acteurs, c'est avant tout la perte de performance des BIPV en façade due à leur verticalité. Pour le client, c'est le coût qui est déterminant. Le projet doit répondre à certaines conditions pour que l'investissement soit intéressant : grandes surfaces bien orientées, non-ombragées, et bien ventilées. Trois des quatre interviewés parviennent à considérer cet investissement rentable, d'une certaine façon, tandis que l'architecte reste plus sceptique, et insiste sur l'obsolescence programmée des BIPV.

### Thème 7 : Autres réflexions apportées et analyse comportementale

Durant l'interview, certains acteurs ont abordé d'autres sujets ou développé plus profondément leur réflexion sur les BIPV. Ils ont partagé leur opinion personnelle et fait part de leur ressenti. Ces éléments sont expliqués ci-dessous et sont complétés par une analyse aussi objective que possible de leur comportement pendant l'entretien.

Le designer solaire a apporté beaucoup d'éléments techniques puisqu'il s'y connaît bien dans le domaine. Grâce à son métier, il a forgé son expérience avec les BIPV depuis plusieurs années. Il a déjà pu travailler pour de grands bureaux où il apporte son expertise et partage son savoir-faire avec des ingénieurs et des architectes reconnus. Il m'a d'ailleurs confié qu'il existait d'autres projets à sa connaissance bien plus intéressants que le Treurenberg Building et les a brièvement expliqués. Il est resté modéré durant l'interview, répondant aux questions qui lui étaient posées. Il a pourtant critiqué les tuiles solaires, qu'il ne considère pas vraiment comme du BIPV mais comme une catégorie à part. Selon lui, il y a plus d'intérêt technologiquement à mettre un panneau solaire au-dessus des tuiles classiques, que de les intégrer au bardage. Concentré sur le sujet, il n'a pas divagué ni ajouté beaucoup d'autres éléments supplémentaires. Globalement, il est resté neutre, objectif quant à la question du BIPV, en expliquant aussi bien leurs bénéfices que les inconvénients.

L'architecte a expliqué spontanément la stratégie architecturale du bâtiment. Il a utilisé des vues Google Street View pour avoir un support visuel à son discours, aussi bien pour le Treurenberg Building que pour le Solaris. Il a apporté des explications quant à la conception du projet et a aussi donné son avis sur les sujets qui lui tenaient à cœur. L'architecte n'a pas hésité à parler d'autres aspects, et à rentrer dans les détails. Son discours était assez critique et il a conclu l'interview par une réflexion plus générale à propos des solutions disponibles pour améliorer la performance environnementale des bâtiments. On peut remarquer qu'il est assez sceptique par rapport aux BIPV car selon lui, la stratégie de non-consommation est plus importante que celle de production. En tant qu'architecte, il mise plus sur les protections solaires, sur l'isolation que sur le PV. Il aime bien l'idée et d'ailleurs l'Europe aussi, dit-il, car elle cherche à multiplier les moyens de produire de l'électricité, surtout depuis la crise en Ukraine. Il trouve que ça reste une démarche intéressante, mais ce qui est encore mieux, selon lui, c'est de ne pas devoir climatiser un immeuble. Pour ça, il y a d'autres stratégies passives (inertie, protections solaires, isolation, matériaux durables...) « Tout ce qui est biosourcé, ça c'est le vrai développement durable, » déclare-t-il. Même s'il pense que le marché n'est pas encore tout à fait prêt pour payer les surcoûts que cela engendre, il y croit.

L'interview avec l'entrepreneur général s'est davantage porté sur des documents techniques. Il a montré avec intérêt les adaptations que lui et son équipe avaient proposées. Il a expliqué en détail les slides qu'il partageait par écran, présentant les différentes solutions faisant du Treurenberg un bâtiment zéro-énergie. Le directeur semblait assez enthousiaste quant au projet, et à la contribution que Democo y a apportée. Il confesse cependant que le bâtiment actuel n'est plus à énergie nulle, à cause d'exigences particulières du locataire. L'instance européenne a en effet des horaires d'occupation plus larges que prévus (jour et nuit), et a demandé un dédoublement des groupes d'éclairage et de ventilation. Il est resté assez objectif et concentré sur les aspects techniques du bâtiment à hautes performances énergétiques. On ressent toutefois qu'il considère que les BIPV sont une bonne solution pour atteindre le zéro-énergie.

Quant à lui, le manager immobilier s'est montré assez complet et précis dans ses explications. Il a répondu avec patience aux questions posées et a aussi abordé d'autres sujets. Par exemple, il a expliqué en quoi consistait son métier, a parlé d'un autre bâtiment sur lequel il travaille et a détaillé le principe général du passif et du zéro-énergie, ...etc. Le manager semble admirer l'évolution de ces



technologies. Son discours soutient globalement l'utilisation de BIPV, même s'il reconnaît que ce n'est financièrement pas rentable. À la fin de l'interview, il a pensé à l'organisme FAST, qui est un groupe de réflexion sur l'évolution des méthodes de construction, sur l'art de bâtir, avec une approche de durabilité. Ce groupe a une approche plus globale de la durabilité et est assez critique. Il est d'accord pour dire qu'il faut aborder le sujet selon différents points de vue : les conclusions ne sont pas les mêmes pour les aspects énergétiques, économiques et cycle carbone. En effet, selon lui, au niveau énergétique, les BIPV sont clairement avantageux, par contre, au niveau économique, il n'y a pas d'avantages à le faire, sauf dans certains cas. Du point de vue carbone, il n'est pas si certain que ça, car d'après lui la fabrication des cellules a un coût carbone assez élevé. Il conclut en disant qu'il peut être intéressant de comparer ces analyses.

#### 4.2.4. Synthèse des résultats des interviews avec les acteurs

Le tableau récapitulatif suivant permet d'avoir une vue globale des réponses obtenues pour les quatre premiers thèmes abordés lors des entretiens et résume les éléments clefs qui s'en dégagent.

		Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
Commencement du projet	Début	Investissement immobilier	Concours d'architecture lancé par AXA	Appels d'offre lancés par AXA	Mission pour ISSOL
	Initiative	Rénovation Bâtiment passif	Démolition et reconstruction Bâtiment passif	Bâtiment Zéro Énergie Nette Besoin de façade actives	BIPV sur trois façades
Actions dans le projet /rôle	Gestion	Constitution d'une équipe et suivi du projet			
	Conception	\	Bâtiment intégré à son environnement	Adaptations pour atteindre une bonne PEB	Façade BIPV
	Suivi sur chantier	Tous			
Expérience précédente BIPV	Oui /non	Non, pas avant. Maintenant oui, projets en cours d'étude.	Oui, le Solaris. Avantages thermiques et publicitaires des BIPV.	Non, aucun.	Oui, plein d'autres.
Interactions	Client		X	X	
	Architecte	X		X	X
	Entrepreneur	X			X
	Designer solaire	X	X		

Tableau 14: Synthèse des réponses concernant les quatre premiers sujets

Étant donné le grand volume d'informations récoltées pour les deux autres thèmes, des tableaux séparés ont été prévus pour simplifier la lecture. Les éléments faiblement influencés sont représentés par un signe –, et à l'inverse les éléments fortement influencés comportent un signe +.

		Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
Influence des BIPV	Volumétrie		-		-
	Esthétique du bardage		-		-
	Certifications				±
	Confort intérieur		-		
	Complexité du travail			-	
	Gestion du projet	-			
	Technique			-	+
	Budget			+	+
	Planning				+
	Valeur commerciale	+	+		
	Image de l'entreprise			+	

Tableau 15: Synthèse des facteurs influencés ou non par les BIPV

Les avantages sont représentés par le signe + tandis que les inconvénients comportent un signe -.

		Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
Opinion sur les BIPV	Production d'électricité	+		+	
	Esthétique du bardage	+	+		+
	Intégration discrète		+		
	Optimisation de l'espace	+	+	+	
	Image du bâtiment	+	+		
	Valeur commerciale	+			
	Réduction de la surchauffe	+			+
	Réduction de l'éblouissement	+			
	Compatibilité avec du verre	+			+
	Solidité	+			+
	Politique d'incitation				+
	Certifications				±
	Efficacité	-		-	+
	Evolution des technologies	+	±		
	Complexité du projet		-	+	-
	Rentabilité financière	±	-	±	±
	Durée de vie			-	
	Ombrage				-
	Chaleur des panneaux				-
Manque de connaissance				-	
Conflit avec les toitures vertes			-		

Tableau 16: Synthèse des facteurs perçus comme avantages ou inconvénients des BIPV

## 4.3. Interview des usagers

### 4.3.1. Entretien

Les usagers ont été interviewés au Treurenberg Building le 25 avril 2022. Le bâtiment est sous haute surveillance étant donné qu'il accueille une instance européenne, mais j'ai pu quand même me rendre sur place pour le visiter et mener les interviews. Cela m'a permis de découvrir le bâtiment de mes propres yeux, et de mieux comprendre de quels espaces parlaient les personnes interviewées. Les photos à l'intérieur étaient malheureusement interdites. Au total, cinq personnes ont participé aux entretiens, dont deux étaient en télétravail ce jour-là et ont répondu via une vidéo-conférence. Un formulaire de consentement détaillant la politique de confidentialité de l'entretien a été demandé par l'organisation. Il a été présenté aux participants au début de chaque interview. Celui-ci se retrouve en Annexe 2. Les entretiens se sont déroulés en anglais puisque la plupart des gens travaillant là-bas sont des internationaux. Cela a duré de 10 à 15 min par personne.

### 4.3.2. Traitement des données

Les interviews n'ayant malheureusement pas pu être enregistrées, par choix de l'organisation, la phase de transcription n'a pas pu être possible. Seules les notes prises pendant l'entretien constituent la matière à analyser. Celles-ci ont cependant été traduites en français dans ce travail.

### 4.3.3. Analyse des données

Pour l'analyse des données, je vais également procéder question par question, pour comparer directement les réponses obtenues. Toutes les personnes interrogées tiennent à rester anonymes, ainsi je les désignerai par un numéro : interviewer n°1, n°2, n°3... etc.

**Note importante : Les réponses ci-dessous représentent l'opinion personnelle des participants et ne représentent en aucun cas l'opinion de l'organisation à laquelle ils appartiennent.**

#### 1) Aviez-vous déjà entendu parler de BIPV ?

Sur les cinq personnes interviewées, trois n'avaient jamais entendu parler de BIPV (n°1, 3 et 5). Les deux qui ont répondu positivement ont expliqué le contexte auxquels ils pensaient. Une personne (n°2) a parlé des panneaux solaires sur des bâtiments à Malte, et aussi sur ce bâtiment. L'autre personne (n°4) mentionne qu'en Grèce ils placent souvent des panneaux solaires sur les toits car ils ont beaucoup d'accès au soleil.

#### 2) Saviez-vous que le bâtiment dans lequel vous travaillez en comporte ?

A nouveau, trois personnes ont répondu négativement à cette question (n°1, 4 et 5), dont l'interviewé n°4 qui avait pourtant dit avoir déjà entendu parler de BIPV. Elle savait qu'il y en avait en Grèce, mais pas sur ce bâtiment. Même s'ils ne savaient pas que la façade était PV, ces personnes savaient quand même que le Treurenberg Building était performant. « *High tech, green building* » sont les termes qu'ils ont utilisés. L'interviewé n°2, qui est en fait le « *facilities manager* », c'est-à-dire le gestionnaire des installations du bâtiment, connaît bien le système. Il dit « nous sommes satisfaits de la production d'énergie verte, mais celle-ci n'alimente que l'éclairage et l'air conditionné, mais pas les serveurs qui consomment pourtant beaucoup. » Il dit aussi que d'autres personnes les ont déjà contactés car ils étaient intéressés par le bâtiment « *self-sustained* » (autonome), même si en réalité il n'est pas autonome. L'interviewé n°3 savait lui aussi qu'il y avait des PV en façade car on le lui a expliqué lors de sa première visite du bâtiment.

3) Est-ce que cela change quelque chose à votre quotidien ?

Les cinq interviewés s'accordent pour dire que les BIPV n'impactent pas vraiment leur quotidien. L'interviewée n°4 déclare cependant, après que je lui ai expliqué que la façade était PV : « *Oh, that's why it's so hot !* ». Elle dit qu'elle a trop chaud dans son bureau du 7ème étage, quand le soleil tape, et qu'elle utilise des ventilateurs pour se rafraîchir. Elle déclare « *I am all into environmental solutions, except if it affects my life* ». Les interviewés n°2 et 3 soulignent qu'ils sont contents de travailler dans un « *green building* », que c'est bon pour leur conscience environnementale. Même si, comme le dit la personne n°3, il utilise l'électricité sans trop se poser de questions, tant que ça marche, ça lui va. Il dit « *even if it's not green energy, you still have to come to the office anyway* ».

4) Quels sont les avantages/ inconvénients de travailler dans ce bâtiment à hautes performances énergétiques ?5) Est-ce que le bâtiment vous paraît confortable, pratique, quelle image vous renvoie-t-il ?

Les réponses à ces deux questions ont été catégorisées dans un tableau de même type que pour les interviews avec les experts. Ils se trouvent en Annexe 5.

L'opinion des usagers sur le bâtiment dans lequel ils travaillent est synthétisée par les éléments ci-dessous. Sans surprise, ils parlent beaucoup de l'immeuble en lui-même, mais très peu des BIPV. Le numéro de l'interviewé dont émane le commentaire est précisé après chaque extrait.

**Avantages :**

- **Moderne** : « On a de la chance de travailler dans un bâtiment neuf et pas vieux comme les autres de la Commission Européenne. » (2)
- **Lumineux** : « C'est lumineux grâce à l'atrium, sauf en bas c'est plus sombre. » (1)
- **Transparent** : « J'aime les fenêtres et la visibilité dans le bâtiment. » (4)
- **Impressionnant** : « Les gens font Waouh devant l'atrium car c'est un design moderne, avec tellement de hauteur et de lumière. » (2)
- **Fonctionnel** : « C'est un gros bloc avec des bureaux, mais c'est bien conçu. » (5)
- **Vues agréables** : « J'ai de la chance d'être au 7<sup>ème</sup> étage car j'ai une grande vue sur Bruxelles, on est plus haut que les autres bâtiments. » (4)
- **Bien chauffé** : « On n'a pas de soucis de chauffage en hiver. » (1)
- **Maintenance aisée des BIPV** : « Il faut juste les laver une fois par an, et sinon on peut les garder 25 ans. » (2)

**Éléments discutés :**

- **Aspect financier** : « C'est probablement un avantage pour les factures, mais ce n'est pas moi qui les paye. » (5)
- **Parking** : « Il y a trop de places de parking au sous-sol, alors qu'on est à 7 min à pied de la gare centrale. » (1)
- **Isolation acoustique** : « Je n'entends rien de l'extérieur. Mais d'un bureau à l'autre, ça pourrait être mieux. » (5)
- **Confort intérieur** : « Dans l'ensemble, c'est confortable, sauf quand il fait chaud. » (4)

**Inconvénients :**

- **Impossibilité d'ouvrir les fenêtres** : « C'est embêtant de ne pas pouvoir ouvrir les fenêtres, car on n'a pas d'air frais dans le bureau. » (1)
- **Mauvaise ventilation** : « La circulation d'air dans le bâtiment n'est pas comme elle est supposée être. » (5)
- **Disfonctionnement du mécanisme automatique des stores** : « Les stores automatiques font du bruit quand ils montent ou descendent. Mais pour le moment, ils ne marchent plus parce que quelqu'un les a désactivés. » (4)
- **Surchauffe** : « Dès qu'il y a du soleil, il fait chaud au bureau (même en mars). On doit utiliser des ventilateurs. » (4)
- **Déficience du système de rafraîchissement** : « L'air-co ne marche plus. » (3)
- **Impossibilité d'agir sur son confort intérieur** : « J'essaye toujours de tourner le thermostat mais je ne vois aucun effet, je crois que c'est juste placebo. » (3)
- **Manque d'indications** : « J'aimerais des panneaux pour m'y retrouver. » (1)
- **Météo belge** : « Pour les panneaux solaires, ici il fait plus souvent pluvieux qu'ensoleillé. » (2)
- **Hygiène de la moquette** : « La moquette contient beaucoup de poussière, et je ne sais pas à quel point c'est lavé. » (4)
- **Manque d'espace** : « C'est toujours des open space (2-8 personnes) et je n'aime pas ça, mais nous n'avons pas assez de place. » (3)
- **Esthétique du BIPV** : « Je trouve que la façade BIPV n'est pas très belle, enfin ce n'est pas extraordinaire au niveau de l'architecture. » (3)
- **Vibrations** : « Le bâtiment tremble quand un métro ou un train passe. » (3)
- **Espaces ou fonctions inutilisés** : « La terrasse est très chouette en été, on devrait plus souvent l'utiliser. » (3)

On peut constater que la plupart des usagers apprécient leur lieu de travail. L'atrium est admiré par les usagers, pour la lumière et la hauteur qu'il offre. Il est omniprésent dans l'immeuble, se répétant au centre de chaque étage, et accueille le visiteur dès l'entrée dans le bâtiment, en leur procurant une sensation d'émerveillement. L'édifice est jugé lumineux dans l'ensemble, excepté pour les bureaux des étages inférieurs. La terrasse au cinquième étage est également réputée agréable, surtout pour la belle vue sur le centre historique de Bruxelles. Néanmoins, les travailleurs s'y rendent peu, principalement parce qu'elle se situe à côté du bureau de la direction, et qu'ils n'aiment pas se sentir observés par leur chef.

S'ils donnent au bâtiment de nombreuses qualités spatiales (lumière, hauteur, transparence...), le confort à l'intérieur ne leur paraît pas optimal. Ils se plaignent particulièrement de la surchauffe en été et en mi-saison dans les bureaux des derniers étages. Les systèmes automatiques n'ont pas un franc succès auprès des occupants qui les considèrent comme déficients. Ils aimeraient vraiment pouvoir agir personnellement sur leur confort intérieur. Ne pas pouvoir ouvrir la fenêtre pour avoir de l'air frais, ne pas pouvoir contrôler la température ambiante, ni fermer les stores, sont des éléments qui les gênent énormément. De plus, en temps de Covid-19, le renouvellement d'air leur paraît primordial et doit être ressenti.

#### 4.3.4. Synthèse des résultats des interviews des usagers

L'analyse ci-dessous se base sur les interviews de cinq usagers. Bien sûr, avec un échantillon si faible, comparé aux 400 personnes travaillant dans l'immeuble, les résultats ne se veulent pas représentatifs. Cependant, ils permettent de dégager certains aspects qualitatifs de la perception du bâtiment par quelques personnes qui y travaillent.

Sur les cinq personnes interviewées, une personne présentait un profil un peu différent : le responsable des installations. Il a partagé un point de vue divergent des « simples travailleurs », car il a un rôle particulier dans le bâtiment, dont il connaît bien le fonctionnement. Il connaît bien les installations techniques qui s'y trouvent, et se montre très enthousiaste par rapport à toutes ces technologies. À propos des BIPV, il dit qu'il trouve le design spécial, tout noir, et qu'il faut vraiment être expert pour voir qu'il s'agit de modules solaires. Il trouve que leur entretien est facile et que c'est bien de pouvoir les garder 25 ans.

Les autres usagers interviewés n'ont en général pas dit grand-chose sur les BIPV, qu'ils connaissent mal et dont ils ignoraient pour la plupart la présence. Leur quotidien au travail est donc peu impacté par les BIPV, même si certains soulèvent un sentiment de satisfaction pour leur conscience environnementale. Ils n'ont pas partagé d'opinion sur les BIPV, excepté l'un d'eux qui a dit : « *The facade is not really beautiful, I mean, it's not outstanding architecture wise.* » En revanche, les usagers avaient pleins de remarques à faire concernant le confort intérieur du bâtiment, en lien avec la conception zéro-énergie.

Les personnes interviewées ont bien conscience qu'elles travaillent dans un bâtiment à hautes performances énergétiques, car il dispose de systèmes « high tech » de ventilation, d'ombrage, de chauffage et de refroidissement. Ces-derniers sont assez critiqués, excepté le chauffage qui est le seul système qui fonctionnerait bien. Le plus gros problème soulevé étant la surchauffe dans les bureaux des étages supérieurs. On ressent une grande frustration de certains d'entre eux de ne pas pouvoir agir personnellement sur leur confort intérieur.

Au contraire, les avantages mis le plus fréquemment en évidence sont liés à la conception spatiale de l'immeuble. Ils apprécient bien sûr la « modernité » à l'intérieur, et c'est plus particulièrement l'atrium qui les émerveille. Ils s'estiment également chanceux d'avoir accès à un toit-terrasse et à une belle vue sur Bruxelles.

En conclusion, on peut retenir que les usagers sont assez indifférents aux BIPV, mais qu'ils ont leur avis sur le bâtiment zéro-énergie dans son ensemble. Les techniques HVAC sont perçues assez négativement, les systèmes automatiques sont dits déficients. Tandis que l'architecture du lieu est admirée, grâce aux espaces lumineux et ouverts qu'elle offre.

## CHAPITRE 5 : ENQUÊTE AUPRÈS DES ARCHITECTES

### 5.1. Réponses au questionnaire

#### 5.1.1. Taux de participation

L'enquête a été ouverte le 15 mars 2022 et s'est clôturée le 30 avril 2022. J'ai d'abord envoyé le questionnaire à des amis et connaissances architectes, à des professionnels rencontrés pendant mes stages, à des bureaux dans ma région, à des anciens professeurs, etc. Durant le week-end du 26 & 27 mars a eu lieu le salon « Bois et Habitat » à Namur. Ça a été l'occasion pour moi de rencontrer des professionnels de la construction et de leur partager directement le formulaire sur une tablette. Ces deux après-midi-là, le questionnaire n'a pas été auto-administré puisque j'étais à côté des répondants, et que ceux-ci me posaient parfois des questions, ou me faisaient des commentaires. L'Union Wallonne des Architectes (UWA) a partagé le questionnaire sur les réseaux sociaux, même si cela semble avoir eu peu d'impact sur les réponses. Le canal officiel n'a pas suffi, ce qui montre que les architectes sont une population difficile à toucher. En comparaison, une enquête aux architectes menée en 2013 par l'Ordre des Architectes a obtenu un taux de réponse de 10%, soit 600 personnes ayant répondu sur un total de 6000 membres sollicités (Defays & Elsen, 2018). Si les annonces sur les réseaux sociaux n'ont pas aidé, les mails semblent avoir été plus efficaces. Grâce à un listing comprenant les adresses e-mails de plusieurs bureaux d'architecture en Wallonie, j'ai pu envoyer le lien à une petite centaine de personnes en dehors de ma région, dont de nombreuses ont répondu.

Au total, 136 personnes ont répondu au questionnaire. Sur une population d'environ 10 000 architectes, ingénieurs et entrepreneurs en Wallonie et à Bruxelles, ce nombre n'est pas assez grand pour représenter la réalité. En effet, selon la formule statistique permettant de calculer la taille de l'échantillon, un maximum de 370 personnes doivent répondre au questionnaire dans le cas le plus défavorable où 50% des sujets ont le facteur d'intérêt. Ce résultat est obtenu par l'outil de calcul en ligne développé par Dhand et ses collègues (2014) et serait le chiffre fixé pour une enquête professionnelle. Cependant, dans ce cas-ci, les architectes n'ont pas tous entendu parler de BIPV, et on peut estimer d'après les résultats de l'enquête que seuls 30% d'entre eux ont le facteur d'intérêt. Ce chiffre est en réalité sûrement plus faible puisque les personnes qui ont répondu à l'enquête sont plus susceptibles d'être déjà sensibilisées par le sujet. Avec un facteur d'intérêt déterminé à 25%, un échantillon aléatoire de 136 réponses obtenues pour un niveau de confiance de 95% donne une marge d'erreur de 7,2%.

De plus, il peut y avoir un léger biais introduit pour les personnes interrogées lors du salon Bois et Habitat, qui représentent presque un quart de l'échantillon. En effet, le public qui s'y trouve est en général déjà sensibilisé aux questions environnementales.

Ces résultats sont donc à interpréter avec précautions, ils ne prétendent pas atteindre la vérité absolue, mais dégagent néanmoins une première tendance quant à la connaissance et l'opinion des architectes wallons et bruxellois sur les BIPV.

### 5.1.2. Profil des répondants

En ce qui concerne le profil des répondants, on peut utiliser les données socio-démographiques pour vérifier que l'échantillon est représentatif de la population ciblée.

Le premier point commun des répondants est qu'ils travaillent tous dans le monde de la construction actuellement. Il y a 80% de répondants qui ont indiqué qu'ils travaillaient (entre autres) dans la conception de projet. Les 20% restant travaillent dans la mise en œuvre de projet, dans l'expertise technique et la gestion de bâtiments. Ils sont aussi susceptibles de rencontrer des BIPV dans leur carrière professionnelle.

Un tiers des répondants est de sexe féminin. Sachant qu'il y a autant d'hommes que de femmes inscrits à l'ordre des architectes, cela signifie que le sexe féminin est sous-représenté. D'ailleurs, si l'on regarde uniquement les 107 diplômés en architecture ou en ingénieur architecte ayant participé à l'enquête, 62,6% d'entre eux sont des hommes. Concernant les autres filières, on sait qu'elles sont généralement plus prisées par les hommes : les ingénieurs civils en construction, les bacheliers en construction, et les autres types d'ingénieurs (civils ou industriels). C'est une raison pour laquelle le taux d'homme de l'échantillon est plus important.

Parmi les autres diplômés, on retrouve également deux doctorats en ingénieur civil architecte. Onze autres personnes travaillent aujourd'hui dans le secteur de la construction sans avoir un des diplômes précédemment cités. Elles proviennent de tout horizon : architecture d'intérieur, bachelier en environnement, en marketing, bioingénieur, gradué dans l'administration, ...

Sur la carte ci-contre, on remarque que plus de la moitié des répondants proviennent de Namur (21,1 %) et de Liège (33,8 %), ce qui surreprésente ces provinces au sein de la Wallonie.

Pour la taille du bureau, la répartition est assez homogène, excepté pour les bureaux comprenant de 21 à 50 personnes, qui ne comptent que 3,7% des participants. Ce type de bureau est donc sous-représenté. Un tiers des répondants appartient à des petites structures (jusqu'à 5 personnes). Cela rejoint les résultats de l'enquête de l'OA, où les petites agences prédominent (Defays & Elsen, 2018).

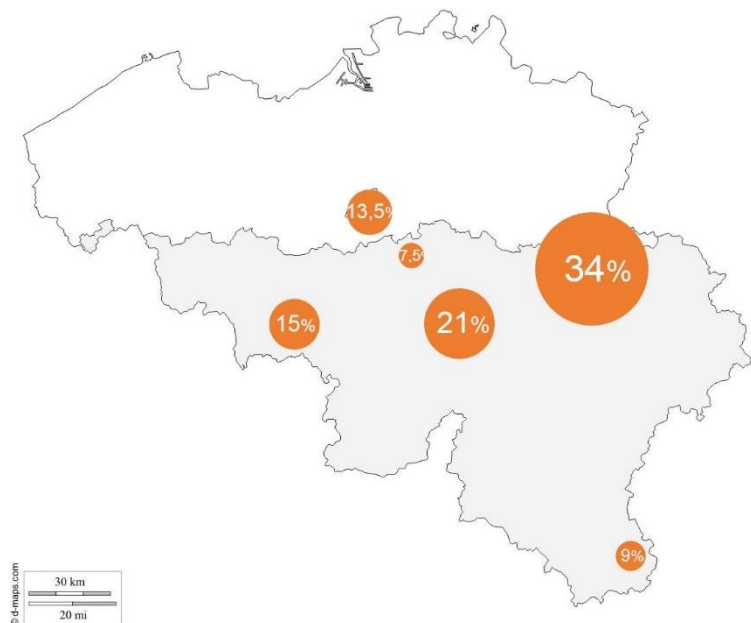


Figure 40: Répartition des répondants au sein de la Belgique

Concernant l'âge des participants, il y a autant de personnes de moins de 40 ans que de personnes de plus de 40 ans qui ont participé à l'enquête. Cela signifie que la répartition est assez équilibrée entre les « jeunes » et les « moins jeunes ». La classification des participants selon les âges est expliquée dans la section suivante.

Même si l'échantillon n'est pas tout à fait représentatif de la population, les résultats sont néanmoins dignes d'intérêt et sont analysés dans la section suivante.



## 5.2. Analyses transversales

### 5.2.1. Traitement des données

La première étape avant d'analyser les résultats du questionnaire a été d'importer le fichier des réponses sur Excell, et de nettoyer les données. Ainsi, deux réponses non-valides ont dû être supprimées, car elles ne correspondaient pas au public ciblé. Les réponses ont été unifiées pour faciliter le traitement des données. Par exemple, pour l'âge, certaines personnes avaient écrit « 38 ans » et d'autres « 38 », il y a eu quelques fautes de frappe pour le nom du diplôme et une personne a écrit « sexe masculin » au lieu de simplement cocher « homme », etc. Une fois les réponses homogénéisées, des sous-catégories sont établies pour trier certaines données socio-démographiques très dispersées. Pour ce qui concerne l'âge, les données chiffrées obtenues sont regroupées par tranches d'âge définies pour avoir des tailles d'échantillon plus ou moins équivalentes dans chaque catégorie. Ainsi, on aura les 23-29 ans, les 30-39 ans, les 40-49 ans, et les 50 ans et plus. Ces derniers étant moins nombreux à participer à l'enquête, ils sont englobés dans une tranche d'âge plus large. Les codes postaux sont associés à leur province correspondante. Les diplômes les moins courants sont rassemblés dans une catégorie « Autres », tandis que les ingénieurs civils spécialisés dans d'autres secteurs que l'architecture ou la construction, ainsi que les ingénieurs industriels se retrouvent sous le nom « Ingénieur ».

### 5.2.2. Analyse des données

Les réponses au questionnaire vont être analysées question par question. Pour rappel, le but est d'évaluer le niveau de connaissance, l'expérience et l'opinion des architectes, ingénieurs et autres réalisateurs de projets, sur l'intégration architecturale du PV en Belgique.

#### Niveau de connaissance des BIPV

Les réponses à la première question, « Avez-vous déjà entendu parler de BIPV ? », permettent de distinguer deux catégories de personnes :

- Celles qui ont répondu « Oui » sont appelées par la suite les « connaisseurs »
- Celles qui ont répondu « Non » ou « Je ne sais plus » sont appelées les « profanes »

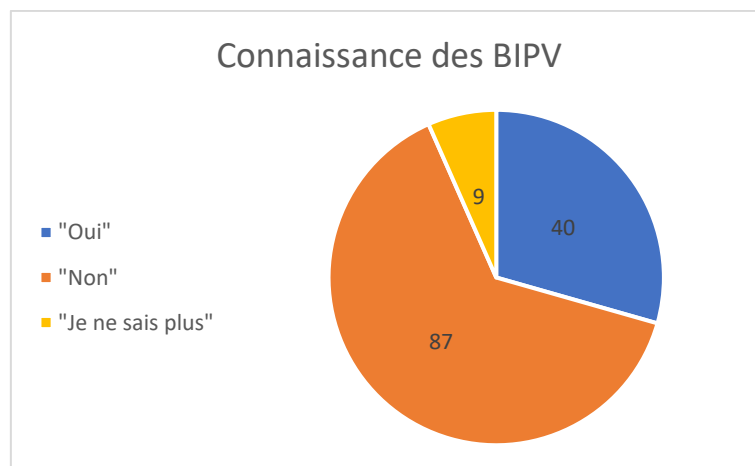


Figure 41: Répartition des réponses à la première question

On peut remarquer que 40 sur 136 participants (30%) ont déjà entendu parler de BIPV.

On peut croiser ces résultats avec les données sociodémographiques qui pourraient influencer la connaissance des BIPV des répondants : c'est-à-dire l'âge, le diplôme et la taille du bureau.

On peut remarquer que les « très jeunes » architectes ont moins entendu parler de BIPV que leurs collègues plus âgés, sous doute par manque d'expérience. En revanche, les architectes dans la trentaine semblent s'intéresser davantage à ce sujet que les architectes de plus de 50 ans : ils sont probablement davantage sensibilisés à l'innovation que les professionnels en fin de carrière.

		Connaissance BIPV			
		Oui	Non / Je ne sais plus	TOTAL	Pourcentage de « connaisseurs »
Tranche d'âge	23 – 29 ans	8	28	36	0,22
	30 – 39 ans	12	21	33	0,36
	40 – 49 ans	12	26	38	0,32
	50 +	8	21	29	0,28
TOTAL GENERAL		40	96	136	0,29

Tableau 17: Comparaison de la connaissance des BIPV et de l'âge des répondants

Concernant les diplômes, la catégorie des « connaisseurs » est constituée en majorité d'ingénieurs civils architectes, et d'autres ingénieurs civils. Seuls 18% des architectes ayant participé à l'enquête avaient déjà entendu parler de BIPV.

		Connaissance BIPV			
		Oui	Non / Je ne sais plus	TOTAL	Pourcentage de « connaisseurs »
Diplôme	Architecte	13	59	72	0,18
	Ingénieur architecte (+docteur)	15	22	37	0,4
	Ingénieur (construction et autres)	9	6	15	0,6
	Autres	3	9	12	0,25
TOTAL GENERAL		40	96	136	0,29

Tableau 18: Comparaison de la connaissance des BIPV et du diplôme des répondants

On peut également observer une corrélation entre la taille du bureau et la connaissance des BIPV dans le tableau ci-dessous.

		Connaissance BIPV			
		Oui	Non / Je ne sais plus	TOTAL	Pourcentage de « connaisseurs »
Taille du bureau	0 - 5 pers.	9	35	44	0,20
	6 – 10 pers.	6	20	26	0,23
	11 – 20 pers.	10	26	36	0,28
	21 -50 pers.	2	3	5	0,4
	51 +	13	11	24	0,54
TOTAL GENERAL		40	96	136	0,29

Tableau 19: Comparaison de la connaissance des BIPV et de la taille du bureau des répondants

Même s'il y a un manque de représentation des bureaux de grande taille comportant entre 21 et 50 personnes, on peut remarquer que le pourcentage de « connaisseurs » a tendance à augmenter selon la taille du bureau : plus le bureau est grand, plus les personnes qui y travaillent connaissent les BIPV. Cela peut être dû au fait que les bureaux de grande taille ont des projets plus complexes, avec de plus gros budgets, et sont dès lors plus susceptibles de rencontrer des projets intégrant des BIPV.

### Définition

Les définitions données par les « connaisseurs » sont généralement correctes. Deux aspects sont surtout mis en avant : le rôle esthétique de l'intégration de PV au bâtiment, et le rôle constructif dans l'enveloppe. Ils insistent sur le fait qu'il s'agit un matériau de construction qui est incorporé à l'architecture du bâtiment. La substitution de matériaux classiques par des BIPV est soulevée par plusieurs réponses, dont voici un exemple : « Les BIPV sont des panneaux intégrés dans la composition de l'enveloppe de manière à remplacer le matériau extérieur de l'enveloppe plutôt qu'à se superposer à lui. » L'aspect esthétique revient fréquemment : « L'installation de panneaux solaires qui entrent dans la composition partielle ou totale d'une construction de manière à créer une combinaison alliant esthétique et technique », ou encore « de panneaux PV intégrés au bâti pour éviter de dénaturer les surfaces comme les toitures. » Une seule personne a mentionné le gain de place des BIPV : « Des panneaux photovoltaïques intégrés dans la façade, habituellement quand il "manque" de la place pour avoir une installation traditionnelle (meilleur marché). Rendu visuel plus que pas mal. » Certaines personnes ont moins développé leur réponse et ont juste indiqué les endroits où l'on retrouve des BIPV : façades, vitrages, toitures, éléments architecturaux...

### Exemples de projet

Deux tiers des « connaisseurs » peuvent citer au moins un exemple de projet intégrant des BIPV, dont la moitié en connaissent plus de 3. Dans les exemples cités, on retrouve une multitude de bâtiments différents, principalement à Bruxelles et dans les environs de Liège. Plusieurs d'entre eux ont dit ne pas se souvenir du nom d'un projet précis, mais ont déjà vu des BIPV sous forme de tuiles ou ardoises PV, ainsi que comme parement de façade. Chez les « profanes », il y a quand même 40 personnes sur 96 qui peuvent citer au moins un exemple de projet, après avoir lu la définition. La plupart n'en connaissent qu'un ou deux (27). Là aussi, les tuiles et ardoises solaires sont fréquemment citées. Ci-dessous figurent quelques illustrations de bâtiments fréquemment cités.

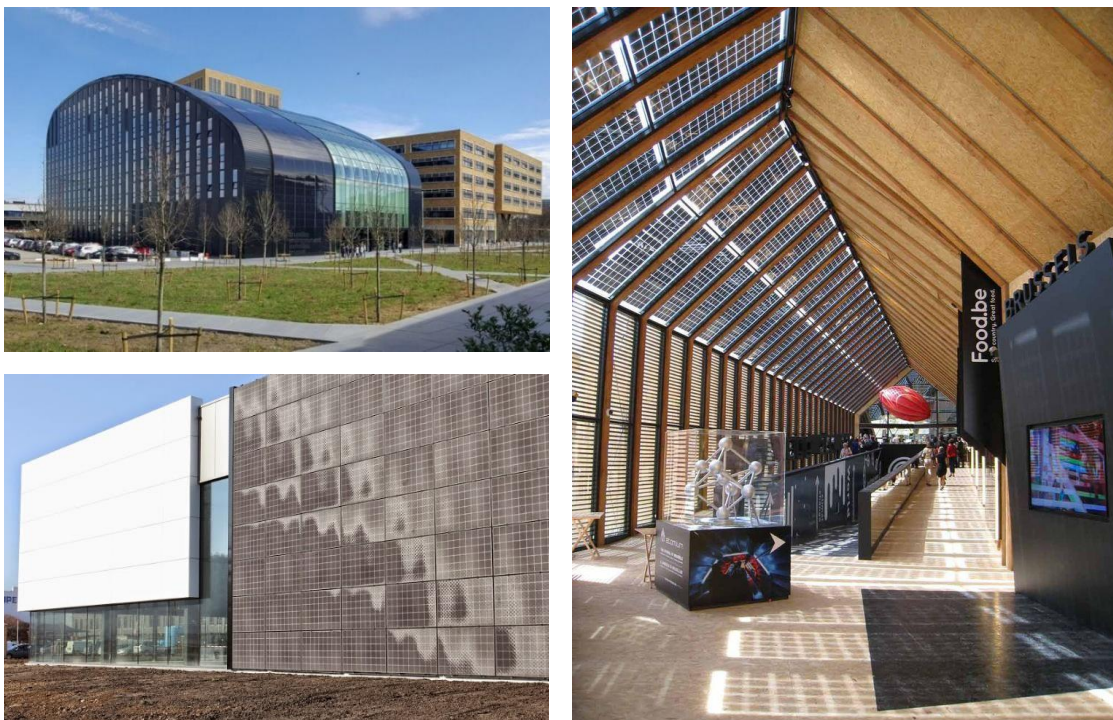


Figure 42: Exemples de bâtiments cités. De haut en bas : Bureaux de Bruxelles Environnement, Superplastic Liège et Pavillon belge de Milan. Source : Bruxelles Environnement (2020a), ISSOL (2016b) et weekend.levif (2015)

### Expérience précédente

Un tiers des « connaisseurs » ont déjà utilisé des BIPV auparavant, c'est-à-dire 13 personnes au total. Les avis sur leur expérience précédente sont partagés. La plupart décrivent uniquement le contexte du projet concerné, en restant neutre sur le sujet. Trois d'entre eux ont une réaction relativement positive. « Très bonne expérience », « l'intégration s'est bien passée » et « mise en évidence de l'accroissement du potentiel PV » sont les termes qu'ils ont utilisé. Au contraire, deux personnes ont un retour négatif : « Peu pratique, démultiplication du temps de travail (tuiles) et matériaux jugé fragile » et « cher et peu performant ». Enfin, une personne s'est montrée mitigée « Intéressant - Potentiel intéressant - Reste fort cher par rapport à des PV traditionnel. » En définitive, le bilan des avis des personnes « expérimentées » en la matière ne penche pas plus d'un côté que de l'autre, mais reste globalement neutre.

On peut également croiser ces résultats aux données socio-démographiques, pour connaître le profil des « expérimentés ». A nouveau, ce sont le diplôme et la taille du bureau qui sont les plus significatifs.

		Expérience BIPV			
		Oui	Non	TOTAL	Pourcentage « d'expérimentés »
Diplôme	Master en architecture	0	13	13	0
	Master : Ingénieur Civil Architecte	2	11	13	0,15
	Master : Ingénieur Civil Construction	2	0	2	1
	Master : Autres Ingénieurs	7	0	7	1
	Doctorat	0	2	2	0
	Autres	2	1	3	0,67
	<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>13</b>	<b>27</b>	<b>40</b>	<b>0,33</b>

Tableau 20: Comparaison de l'expérience BIPV et du diplôme des répondants

Les personnes qui ont déjà eu recours à des BIPV par le passé sont essentiellement des ingénieurs. Dans l'enquête, aucun des diplômés d'un master en architecture n'a eu d'expérience précédente en la matière.

Dans 61% du temps, les « expérimentés » proviennent de bureaux de plus de 51 personnes, ce qui confirme l'hypothèse posée précédemment : les gros bureaux ont plus l'opportunité de travailler sur de tels projets. D'ailleurs, aucun bureau de 5 personnes ou moins ayant participé à l'enquête n'a pu expérimenter les BIPV.

### Potentiel architectural

La question concernant le potentiel architectural que les participants donnent aux BIPV est posée deux fois : une fois en début de questionnaire, après la définition, et une fois après le défilement de photos d'exemples. Les participants devaient choisir une valeur sur une échelle de Likert allant de 1 - Très faible à 5 - Très élevé. Le but de poser à deux reprises la même question était de voir l'éventuelle influence des images sur l'opinion des répondants.

Chez les « connaisseurs », la première évaluation résulte en un potentiel architectural moyen de 3,675, ce qui n'est pas trop mauvais. Après les images, cette moyenne baisse légèrement à 3,625. Bien que sur les 40 réponses, 31 n'ont pas changé d'avis, 5 personnes ont augmenté leur valeur de 1 et 4 personnes ont diminué leur note. Les personnes ayant augmenté sont donc plus nombreuses, et pourtant la moyenne baisse. C'est parce qu'une personne est passée d'une note de 5 à une note de 1. Cela paraît plutôt incohérent comme réponse, surtout qu'à la question suivante, cette même personne

déclare que son désir d'utiliser des BIPV est noté à 5 – Très fortement l'intention. Il s'agit probablement d'une erreur d'encodage de sa part. On peut exclure sa réponse de la moyenne, qui passe à 3,7 après le défilement des images. On peut en déduire que les images n'ont pas eu d'influence sur l'opinion des « connaisseurs », ce qui prouve qu'ils savaient bien ce qu'étaient les BIPV.

Si l'on observe les notes données par les « expérimentés » en particulier, elles sont à peu près du même ordre de grandeur. Ils ne sont que deux à avoir changé de note après les images, dont un l'a diminuée, et l'autre l'a augmentée.

Du côté des « profanes », la moyenne du potentiel architectural des BIPV après la définition s'élève à 3,75, tandis qu'après les photos, elle augmente à 4,1. Les illustrations ont eu plus d'impact sur cette catégorie de personnes. Cela peut s'expliquer par le fait que puisqu'ils ne savaient rien des BIPV à part la définition fournie, ils n'imaginaient peut-être pas ce que c'était concrètement avant les photos. D'ailleurs, après celles-ci, presque 40% d'entre eux augmentent leur note, alors qu'ils ne sont que 8% à l'avoir baissée.

Le tableau ci-dessous résume les résultats trouvés.

« Connaisseurs »		« Expérimentés »		« Profanes »	
Note après la définition	Note après les images	Note après la définition	Note après les images	Note après la définition	Note après les images
3,675	3,7	3,84	3,63	3,75	4,1

Tableau 21: Moyenne des notes attribuées au potentiel architectural des BIPV

### Désir d'en utiliser

La question sur le souhait des participants à utiliser des BIPV pour leurs futurs projets se présente également sous la forme d'une échelle de Likert, allant de 1 – Pas du tout l'intention à 5 – Très fortement l'intention. On peut constater que la majorité des répondants a voté 3, c'est-à-dire la réponse neutre intermédiaire. Cependant, certains d'entre eux se sont montrés plus motivés à faire usage des BIPV : la moitié des « profanes » a voté 4 ou 5, et un tiers des « connaisseurs », ce qui fait au total 61 personnes sur 136, soit presque autant que les 63 ayant voté neutre. En revanche, une minorité de répondants n'a pas l'intention de recourir aux BIPV. Concernant les « expérimentés », ils attribuent une note moyenne de 3,63, ce qui se situe à peine au-dessus de la moyenne générale (3,5).

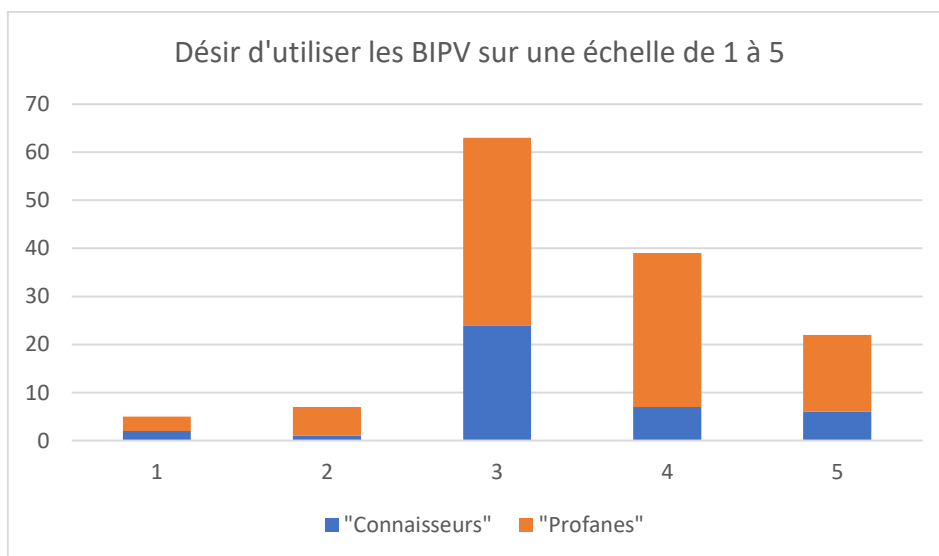


Figure 43: Graphique illustrant le désir des répondants d'utiliser des BIPV

### Freins à l'utilisation de BIPV

Les freins qui empêcheraient les participants à recourir aux BIPV se résument sur le graphique suivant :

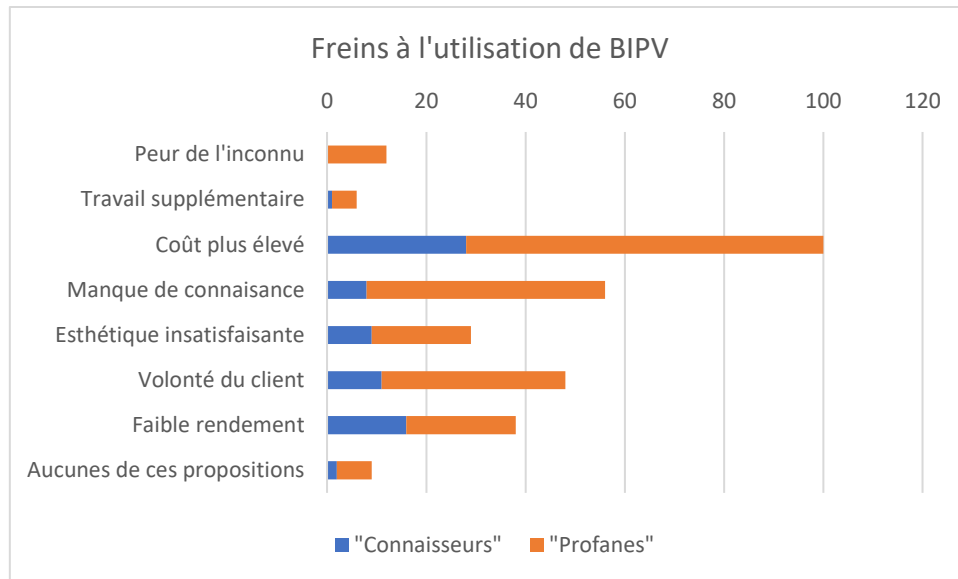


Figure 44: Graphique illustrant les raisons qui empêcheraient les répondants d'utiliser des BIPV

Parmi les propositions prédéfinies, les « connaisseurs » et les « profanes » sont unanimes pour identifier le coût plus élevé pour le client comme l'obstacle numéro un à l'emploi de BIPV. Suite à cela, c'est le manque de connaissance sur le sujet, surtout pour les « profanes », qui est mis en avant. Ces derniers sont les seuls à mentionner leur peur de l'inconnu. Ce constat est cohérent puisqu'ils n'en savent pas beaucoup sur le sujet, dont ils n'avaient jamais entendu parler avant ce questionnaire. Les « connaisseurs », quant à eux, ciblent le faible rendement des BIPV. L'un d'eux mentionne d'ailleurs en proposition supplémentaire : « faible efficacité en Belgique ». D'autres « connaisseurs » ont également partagés d'autres désavantages. Dans les éléments supplémentaires apportés, on retrouve :

- L'incompatibilité avec le patrimoine
- Le manque de savoir-faire des corps de métier
- Le « cas par cas » des projets
- Les problèmes de stabilité structurelle
- Les ombrages
- Des considérations environnementales : énergie grise, « métaux rares »
- La baisse de rendement au cours du temps

Dix personnes n'ont pas coché de freins du tout : cela veut peut-être dire qu'ils ne voient pas d'inconvénients aux BIPV. Une seule personne a au contraire coché toutes les propositions.

On peut aussi s'intéresser plus particulièrement à ce que les « expérimentés » ont identifié comme freins. Les deux personnes dont le retour d'expérience était assez négatif ont indiqué le coût, la charge de travail, le faible rendement, et les ombrages en milieu dense. Trois sur 13 « expérimentés » n'ont pas donné d'inconvénient : cela peut signifier qu'ils n'en voient pas et qu'ils sont positifs vis-à-vis des BIPV, ou qu'ils n'ont pas pris le temps de répondre correctement à la question.

### Motivations à l'utilisation de BIPV

Tout comme pour les freins, les motivations sont synthétisées sous forme d'un graphique.

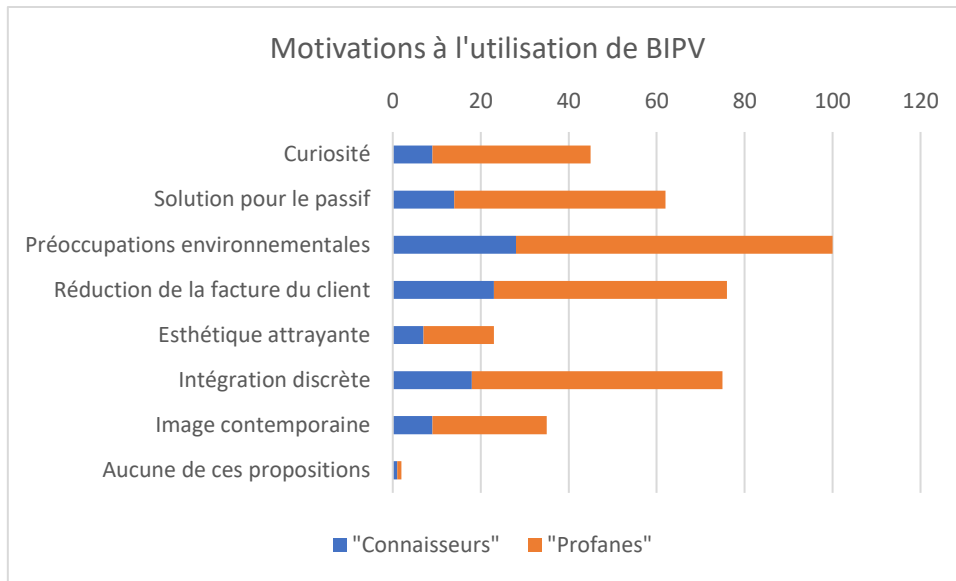


Figure 45: Graphique illustrant les raisons qui favoriseraient les répondants à utiliser des BIPV

Dans les avantages, la proposition prédominante est la préoccupation environnementale des participants, aussi bien pour les « connaisseurs » que pour les « profanes ». Ils sont également d'accord pour indiquer les bénéfices économiques pour le client ainsi que l'intégration discrète comme points positifs principaux. Au niveau du nombre de propositions cochées, on compte huit personnes qui ont sélectionné plus de 6 atouts, et ils sont également nombreux à en avoir coché cinq, ce qui traduit un certain enthousiasme quant aux BIPV. De plus, il n'y a que deux personnes qui n'ont pas du tout coché de motivation pour utiliser les BIPV.

Concernant les réflexions supplémentaires, plusieurs « connaisseurs » ont insisté sur l'attrait énergétique de ce type d'installation, perçue comme une solution pour atteindre des bâtiments autonomes, zéro-énergie ou zéro-carbone. Un répondant a rétorqué que le PV n'était pas une solution pour atteindre un bâtiment passif. Cela vient probablement d'une confusion de la définition d'un bâtiment passif, qui peut signifier que le bâtiment est bioclimatique, qu'il ne doit pas être chauffé ni refroidi par des systèmes actifs. Or, les principes du passif incluent certes une bonne isolation et ventilation, une étanchéité à l'air et des gains solaires optimaux ; mais aussi des systèmes performants (pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, éventuellement pour le refroidissement et pour la production d'énergie renouvelable) (Maison passive, 2020b). Les labels Passif Plus et Passif Premium imposent d'ailleurs une production d'énergie renouvelable sur le site pour compenser l'énergie consommée dans l'habitat. Si l'on considère uniquement le Passif Classique, et avant 2020, il n'y avait aucune obligation de production d'énergie renouvelable. Le terme « passif » prête à croire qu'il n'y a pas de systèmes actifs, ce qui est faux en réalité puisque même si la consommation en énergie primaire est fortement réduite, elle n'est pas égale à zéro, donc le bâtiment aura besoin de systèmes pour apporter l'énergie manquante. De plus, on ne prend pas seulement en compte l'énergie pour le chauffage ou l'ECS, mais aussi l'électricité dont le bâtiment a besoin. Tout cela peut induire un amalgame, et pourtant, d'après les arguments précédents, le PV peut être considéré dans les bâtiments passifs.

D'autres « connaisseurs » sont plus critiques dans leurs commentaires : l'un d'eux s'interroge sur la maintenance et le remplacement de telles installations. L'autre émet encore des réticences à cause des métaux rares.

A nouveau, on peut regarder ce que les « expérimentés » en ont pensé. La plupart voient de nombreux avantages aux BIPV, sauf une personne qui sort du lot. Elle semble visiblement opposée aux BIPV : après leur avoir donné un potentiel architectural de 2, un désir d'en utiliser de 1, et les avoir décrits comme « chers et peu performants », elle ne coche aucune motivation qui l'encouragerait à utiliser des BIPV. Dans les remarques en fin de questionnaire, la personne écrit : « A mon sens, le BIPV est de l'argent mal investi au profit d'une architecture ostentatoire. »

Parmi les « profanes », on retrouve aussi une personne hostile aux BIPV. Elle juge leur potentiel architectural et son désir d'en utiliser au plus bas, mais ne donne ni aucun frein ni aucune motivation justifiant son opinion. Par contre, le répondant explique sa pensée par une remarque finale : « Un matériau de façade doit être choisi pour sa pérennité et son rapport au contexte bâti. Il vaut mieux implémenter les PV là où ils peuvent être aisément entretenus et remplacés, soit en toiture sur des éléments autonomes de la structure du bâtiment. Il est crucial de distinguer la durée de vie d'un bâtiment de celle de ces composantes techniques. La solution proposée par le BIPV va à l'encontre de toute logique de circularité. »

#### Autres remarques pertinentes

Dans les commentaires en fin de questionnaire, les participants ont parfois insisté sur un point, ou encore apporté de nouvelles réflexions. Celles-ci sont synthétisées dans le tableau suivant.

Réticences		Motivations
Coût inaccessible et peu de rentabilité (en Belgique, actuellement)	Solution adaptée pour les projets de grande ampleur, les bâtiments publics ou très impactant	« Eviter les doublons revêtement / panneaux PV »
Énergie grise	Solution plus intéressante en toiture qu'en façade	Indépendance énergétique
Contraintes techniques et temporelles (délais)		Gain de place
Manque d'enthousiasme du secteur de la construction pour les nouvelles technologies		Environnemental : production d'énergie renouvelable
Obtention du permis d'urbanisme compliqué		
Entretien compliqué		
Intermittence de la production, surcharge du réseau		

Tableau 22: Remarques complémentaires des répondants



### 5.3. Synthèse des résultats du questionnaire

#### Connaissance et expérience des BIPV

Sur les 136 réponses obtenues, 40 ont été classés dans la catégorie des « connaisseurs », et 96 dans la catégorie « profanes ». Même si ces chiffres ne sont pas représentatifs de tous les architectes et réalisateurs de projets en Belgique, ils reflètent néanmoins une certaine tendance. La connaissance des BIPV dans le secteur ne semble pas encore très répandue, puisque seulement un tiers des répondants en avaient déjà entendu parler. Concernant leur expérience en la matière, celle-ci est encore moins fréquente puisqu'à peine 9% des participants ont déjà réalisé des projets intégrant des BIPV (dont certains sont restés au stade de projet).

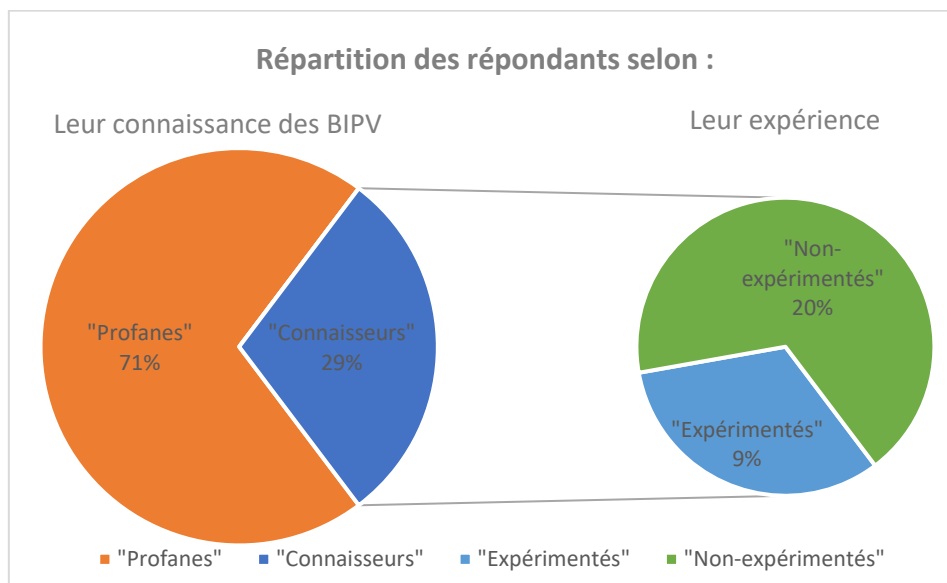


Figure 46: Graphique illustrant la proportion de « connaisseurs » et « d'expérimentés » parmi les répondants

#### Opinion sur les BIPV

Grâce aux notes attribuées pour le potentiel architectural des BIPV et pour le désir d'en utiliser, ainsi qu'aux réticences et motivations soulevées, les participants peuvent être classés selon leur opinion. On peut distinguer quatre catégories de répondants : les « favorables » aux BIPV, les « neutres », les « mitigés » et les « réticents ». La première partie de la classification se fait de manière quantitative. La moyenne des notes attribuées permet en effet d'avoir une première indication sur l'opinion du répondant.

Potentiel architectural après la définition	Potentiel architectural après les photos	Désir d'utiliser des BIPV	Moyenne	Classe
1 - 2 - 3 - 4 - 5	1 - 2 - 3 - 4 - 5	1 - 2 - 3 - 4 - 5	$1 \leq M < 3$	« Réticents »
			$3 \leq M < 3,5$	« Neutres »
			$3,5 \leq M < 5$	« Favorables »

Tableau 23: Classement des participants selon la moyenne des notes attribuées

Après cette première approche quantitative, les réponses concernant les freins et les motivations des participants à utiliser des BIPV, ainsi que leurs commentaires supplémentaires ont été analysés de

manière qualitative. C'est ainsi que la classe des « mitigés » est identifiée : un « mitigé » est une personne qui argumente aussi bien en faveur qu'en défaveur des BIPV, ou partage un avis personnel pondéré sur la question. Pour les repérer, le plus facile est tout d'abord de lire les quelques commentaires supplémentaires, où la personne explicite clairement son avis. Ensuite, on inspecte la moyenne des personnes qui n'avaient pas un avis tranché sur le sujet, c'est-à-dire oscillant autour de 3. Contrairement aux personnes neutres, un « mitigé » tient à donner son avis sur la question, ou identifie considérablement plus de facteurs dans l'une des deux catégories (avantages ou inconvénients). Parmi les « favorables » peuvent aussi se cacher des « mitigés » : si le répondant a identifié de plus gros inconvénients que de motivations, cela veut dire qu'il est assez nuancé sur le sujet. Cela fonctionne aussi inversement, si la moyenne des notes classe une réponse parmi les « réticents », alors que la réponse n'identifie que des motivations, c'est un peu contradictoire, et cela peut vouloir dire que la personne est mitigée.

## Résultats

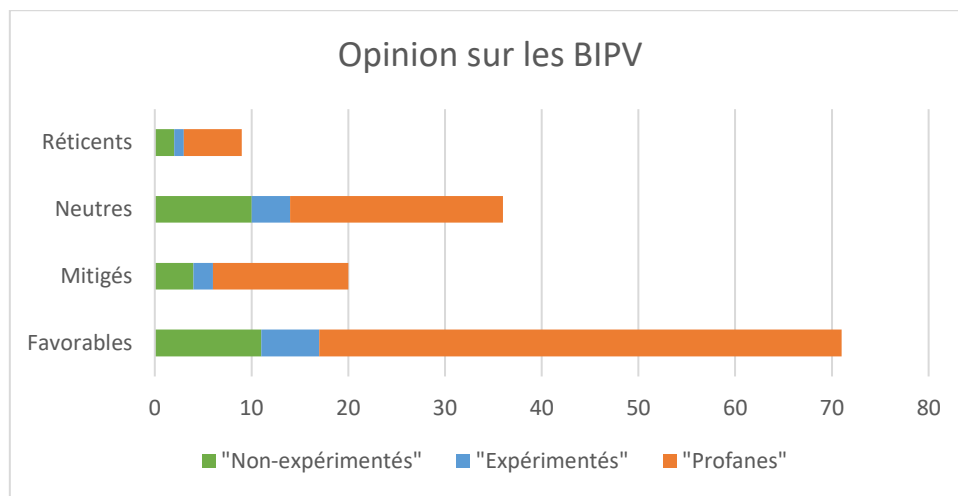


Figure 47: Graphique montrant la répartition de l'opinion des répondants

Dans ce graphique, la catégorie « connaisseurs » est subdivisée entre les « expérimentés » et les « non-expérimentés ». Ils sont rassemblés à nouveau dans le tableau suivant.

	« Connaisseurs » (40)	« Profanes » (96)	Total des répondants (136)
<b>Favorables</b>	42,5%	56,3%	52,2%
<b>Mitigés</b>	15%	14,5%	14,7%
<b>Neutres</b>	35%	22,9%	26,5%
<b>Réticents</b>	7,5%	6,3%	6,6%

Tableau 24: Tableau montrant la répartition de l'opinion des répondants

Grâce à ces résultats, on peut voir que la moitié des répondants semble favorable aux BIPV. Alors qu'un quart des participants n'a pas d'avis particulier sur le sujet, le dernier quart se montre un peu plus critique. Les « réticents » s'opposent réellement à cette technologie, tandis que les « mitigés » y voient du bon et du mauvais. On peut constater également que parmi les « connaisseurs », on retrouve plus d'un tiers de personnes neutres qui ont voulu rester objectives.

On peut conclure que dans le monde de la construction, les avis sont partagés concernant les BIPV. Néanmoins, on remarque que la tendance est que la plupart des répondants sont plutôt enthousiastes, et qu'il n'y a qu'une très faible part qui conteste les BIPV.

## CHAPITRE 6 : DISCUSSION DES RÉSULTATS

### 6.1. Comparaison des résultats

Les différentes méthodes de recherche (état de l'art, cas d'étude et enquête) ont toutes les trois investigué le potentiel des BIPV et les freins à leur utilisation. Les résultats obtenus pour les trois parties sont croisés dans les tableaux suivants.

#### 6.1.1. Potentiel des BIPV

Le potentiel des BIPV a été mis en lumière à travers de nombreux bénéfices, listés ci-dessous par ordre de pertinence. Ainsi, les éléments jugés les plus avantageux dans les résultats des trois parties sont cités en premier, tandis que les facteurs qui ont été moins fréquemment soulignés ou sont davantage discutables se trouvent à la fin du tableau.

Bénéfices	Littérature	Cas d'étude	Enquête
La production d'électricité	X	X	X
Les préoccupations environnementales	X	X	X
L'intégration discrète	X	X	X
L'apport d'une solution pour concevoir un bâtiment performant	X	X	X
L'image du bâtiment	X	X	X
L'esthétique attrayante (grande variété de design)	X	X	X
L'optimisation de l'espace	X	X	
La valeur commerciale que prend le bâtiment	X	X	
La réduction de la facture d'électricité		X	X
L'économie du matériau de construction substitué	X		X
L'économie de CO2	X		X
La compatibilité avec le patrimoine	X	X	
La réduction de la surchauffe	X	X	
La réduction de l'éblouissement (à l'intérieur)	X	X	
Le rôle de communication, de sensibilisation aux énergies vertes	X	X	
L'indépendance énergétique	X		X
La création d'emplois	X		
La rentabilité financière	X		
La contribution à l'acceptation sociale du PV	X		
La sécurité d'accès à l'électricité	X		
L'attrait pour la nouveauté			X

Tableau 25: Potentiel des BIPV selon les trois méthodes de recherche

## 6.1.2. Freins à l'utilisation de BIPV

Les freins ont été classés de la même manière, du plus pertinent au moins pertinent.

<b>Freins</b>	<b>Littérature</b>	<b>Cas d'étude</b>	<b>Enquête</b>
<b>Le coût élevé</b>	X	X	X
<b>Le manque de connaissance</b>	X	X	X
<b>La durée de vie</b>	X	X	X
<b>Les ombrages</b>	X	X	X
<b>L'efficacité</b>		X	X
<b>La chaleur des panneaux</b>	X	X	
<b>La rentabilité financière</b>		X	X
<b>L'empreinte carbone</b>	X		X
<b>La peur de l'inconnu</b>	X		X
<b>La volonté du client</b>		X	X
<b>La complexification du projet</b>		X	X
<b>Le conflit avec les toitures vertes</b>		X	
<b>Le dommage à la biodiversité et la production de déchets</b>	X		
<b>Le risque sur la santé des travailleurs</b>	X		
<b>L'éblouissement des surfaces PV</b>	X		
<b>L'esthétique insatisfaisante</b>			X
<b>L'incompatibilité avec le patrimoine</b>			X
<b>La stabilité structurelle</b>			X

*Tableau 26: Freins à l'utilisation de BIPV selon les trois méthodes de recherche*

Ceci donne un premier aperçu des éléments-clefs relevés lors de cette recherche. Des réponses plus détaillées sont développées dans la section suivante.

## 6.2. Discussions

Maintenant que les résultats ont été comparés, le potentiel d'intégration architecturale du PV sous le climat belge va être évalué à travers les deux questions de recherche. Une première réponse avait déjà été rédigée à la suite de l'état de l'art. Je vais désormais apporter de nouveaux éléments de réponses, sous l'angle de l'analyse du cas d'étude et de l'enquête aux architectes.

### 6.2.1. Potentiel du photovoltaïque intégré à l'architecture (BIPV) d'un point de vue énergétique et esthétique

On peut tout d'abord rappeler les thématiques des sous-questions déjà posées dans l'état de l'art : le degré d'autosuffisance d'un bâtiment intégrant des BIPV, les surfaces utilisables, le potentiel d'économie d'énergie (en lien avec des considérations économiques et environnementales) ainsi que l'impact esthétique sur l'architecture. En plus de ces éléments, d'autres considérations émanant du retour d'expérience des acteurs de la construction du Treurenberg Building sont évoquées. Finalement, le potentiel architectural des BIPV estimé par les architectes wallons et bruxellois est également discuté.

#### Potentiel énergétique

Dans le cas du Treurenberg Building, l'objectif proposé par l'entrepreneur était d'atteindre le zéro-énergie. Les bureaux d'étude avaient tout mis en place pour optimiser les performances énergétiques du bâtiment. Tout d'abord, ils ont diminué au maximum les consommations, qu'ils ont ensuite tenté de compenser par la production d'énergie renouvelable sur le site. En théorie, l'installation PV devait couvrir tous les besoins en électricité pour l'éclairage de l'immeuble, ainsi que pour assurer le bon fonctionnement des systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de refroidissement et de ventilation. Mais en réalité, le bâtiment n'est pas zéro-énergie, puisque l'énergie renouvelable produite ne couvre « que » 75% de la demande annuelle, selon un croisement des chiffres communiqués par le fabricant de PV et les bureaux d'étude. De plus, la consommation des équipements électriques (serveurs, ascenseurs, etc.) n'est pas considérée dans le calcul, et pourtant elle est assez élevée étant donné les besoins de l'instance européenne qui occupe l'immeuble. C'est ce qu'a confirmé le gestionnaire des installations, sans pouvoir me révéler les chiffres exacts de la consommation des années précédentes. **On peut conclure que la combinaison des BIPV et des panneaux PV ne sont pas suffisants pour produire toute l'électricité nécessaire au Treurenberg Building.** L'intégration de BIPV sur les façades des derniers étages a tout de même permis de doubler la production annuelle d'électricité obtenue avec les panneaux classiques en toiture. Alors que la puissance installée en façade est près d'1,5 fois plus élevée que celle en toiture, les modules en façade produisent autant que des modules sur le toit. Cela signifie que les BIPV sont 1,5 fois moins performants que les PV classiques. Ce constat peut être expliqué par l'inclinaison moins optimale des BIPV et par des cellules à rendement plus bas : 17% en façade contre 20% en toiture. Même si la performance des modules en façade n'est pas idéale, sans eux, le bâtiment n'aurait jamais pu atteindre le standard zéro-énergie et la notoriété qui l'accompagne.

Ceci rejoint les résultats obtenus à la fin de l'état de l'art : le PV ne suffit généralement pas à produire l'intégralité de l'électricité nécessaire à un bâtiment ou à un groupe de bâtiments, sous nos latitudes et en milieu urbain. Il faut donc compléter la production par d'autres moyens. Personnellement, je trouve que l'unité de cogénération déjà installée au Treurenberg Building est une piste intéressante pour compléter les besoins d'électricité en hiver. La centrale fonctionnant actuellement au gaz, elle n'est pas considérée comme une source d'énergie renouvelable, mais un biogaz ou un biocarburant pourrait le substituer. Ainsi, la biomasse et la cogénération permettraient de compenser

l'intermittence du PV. Je pense aussi que le bâtiment devrait faire partie d'une communauté d'énergie afin de participer au développement d'un réseau électrique performant et plus durable.

**Les surfaces utilisées dans le cas du Treurenberg Building sont les façades ouest, sud et est des trois derniers niveaux, ainsi que les murs des locaux techniques et la toiture.** Les bureaux d'étude avaient suggéré d'utiliser la façade sud pour compléter la production d'énergie des panneaux PV de la toiture, mais le designer solaire leur a conseillé d'utiliser également les façades ouest et est. En effet, il n'y a pas que la façade sud qui a du potentiel. Si celle-ci produit en effet une plus grande quantité d'électricité proportionnellement à sa puissance installée, son ratio de performance est moins élevé que pour les façades est et ouest, qui transforment une plus grande partie du rayonnement solaire reçu en électricité. Elles permettent aussi de lisser la courbe de production dans le temps. Dans cet immeuble de bureaux occupé toute la journée, la demande en électricité peut être comblée alternativement par chaque partie, en fonction de la position du soleil dans le ciel. La variation se fait également à l'échelle d'une année, puisque les façades ouest et est produisent plus en été, tandis que la façade sud est plus performante en mi-saison. Évidemment l'environnement proche joue un rôle prépondérant pour le choix des surfaces à exploiter. Surtout en milieu urbain, où les bâtiments du contexte peuvent ombrager fortement l'installation. Au Treurenberg, c'est la façade sud qui est la plus impactée par les ombrages, et c'est aussi une raison pour laquelle il était intéressant d'utiliser les façades ouest et est, plus reculées des immeubles voisins.

Dans la littérature, la possibilité d'utiliser les façades ouest et est pour compléter l'apport d'électricité dans un haut bâtiment ayant de grands besoins durant la journée avait également été mis en avant. Par ailleurs, le fait de placer des BIPV dans une façade ventilée est intéressant car les cellules solaires resteront plus fraîches, et donc plus performantes.

Du point de vue économique, les conclusions de l'état de l'art étaient assez optimistes, donnant un temps de retour sur investissement de 4 à 7,5 années pour des BIPV à la verticale en Europe du Nord. Je vais vérifier si c'est bien le cas au Treurenberg Building. Le montant total communiqué par le fabricant concernant l'installation de panneaux en façade et en toiture s'élève à 492.000€. Il n'est pas précisé si les 8 onduleurs sont exclus du prix, auquel cas il faudrait ajouter 3.000€ \* 8 = 24.000€ à la facture finale. Si on compare le coût total de l'installation à l'économie d'énergie annuelle qu'elle permet, on obtient :

Coût total de l'installation	Coût d'un kWh d'électricité*	Production annuelle de l'installation	Économie annuelle sur la facture d'électricité	Temps de retour sur investissement
492.000 € + 24.000 € = <b>516.000 €</b>	<b>0,25 € / kWh</b>	<b>102.200 kWh</b>	0,25*102.200 = <b>25.550 € / an</b>	$\frac{516.000 \text{ €}}{25.550 \text{ €/an}}$ <b>= 20,2 années</b>

Tableau 27: Évaluation de la rentabilité économique de l'installation PV du Treurenberg Building

\*Le coût de l'électricité évolue constamment et il est difficile d'estimer son évolution au cours du temps. Pour simplifier le calcul, le coût considéré est le tarif mono-horaire d'Engie, à Bruxelles pour mai 2022 (Comparateur-Energie.be, 2022). Attention que le coût de l'électricité est particulièrement élevé pour le moment, ce qui est en faveur de la rentabilité du PV.

Ce calcul simplifié nous permet d'avoir un ordre de grandeur de l'économie d'argent que l'installation PV engendre. Ces résultats ne prétendent pas à la vérité absolue, car beaucoup plus de paramètres sont à prendre en considération, comme le tarif prosumer pour l'utilisation du réseau, les Certificats

Verts, le coût du remplacement des onduleurs, la modification de la production et du prix d'un kWh au cours du temps, etc. De plus, le coût du bardage traditionnel substitué n'est pas déduit du montant de l'installation, ce qui impacterait pourtant positivement le bilan. Lors de la construction du projet en 2015, les coûts de l'énergie étant moins élevés, le retour sur investissement devait être plus long. Le manager du projet a d'ailleurs affirmé que le temps de retour sur investissement était de 30 ans, ce qui est tout à fait plausible si l'on imagine que l'électricité coûtait 30% moins cher qu'aujourd'hui. On peut conclure que **l'investissement dans le BIPV n'est pas financièrement rentable dans ce cas**, sauf si le coût de l'électricité du réseau reste à un niveau élevé. En réalité, l'installation de BIPV est donc beaucoup moins rentable que ce qu'affirment les articles scientifiques et les sites web des fabricants. Quoiqu'il en soit, **l'emploi de BIPV ne présente pas de surcoût au bout du compte et épargne même l'achat d'un bardage classique.**

Du point de vue environnemental, à la fois le manager du projet et plusieurs participants au questionnaire ont émis des doutes quant au bilan carbone du PV. Voyons voir ce qu'il en est dans le cas d'étude. D'après les chiffres d'Écoconso (2018) qui donnent l'empreinte carbone d'1kWh, il résulte que l'électricité produite annuellement au Treurenberg Building permet d'économiser 23,5 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit 23 personnes dans un avion faisant l'aller-retour Bruxelles - New-York, ou environ 164.500 km parcourus en voiture. Ce chiffre est à comparer avec l'énergie grise qu'il a fallu dépenser pour produire les modules. Cette information n'est pas communiquée par les fabricants. Il est difficile de l'estimer, étant donné la multiplicité de paramètres qui entrent en compte lors de la fabrication, du transport et du recyclage des modules. En se basant sur l'état de l'art, on peut reprendre les hypothèses de l'analyse en cycle de vie d'un bâtiment à Liège (Malmedy, 2020). Le scénario étudiant l'ajout de panneaux PV monocristallins sur la toiture donne une augmentation de l'impact carbone de la phase de construction, avec une émission de 216 kg de CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> de panneaux. Pour les 1027 m<sup>2</sup> de modules PV installés sur le Treurenberg Building, cela équivaldrait à 221,8 tonnes de CO<sub>2</sub>.

Empreinte carbone de l'installation	Empreinte carbone du kWh d'électricité	Production annuelle de l'installation	Remboursement annuel	Temps de retour de l'empreinte carbone
221.832 kg CO <sub>2</sub>	0,23 kg CO <sub>2</sub> /kWh	102.200 kWh	0,23*102.200= 23.506 kg CO <sub>2</sub> /an	$\frac{221\ 832}{23\ 506}$ = <b>9,4 années</b>

Tableau 28: Évaluation du bilan carbone de l'installation PV du Treurenberg Building

On peut donc constater qu'il faudra approximativement 9 ans et demi pour rembourser la dette énergétique de l'installation. Ce temps est considérablement plus long que les 2 années annoncées par Energie Commune (2021a) dans l'état de l'art. C'est probablement parce que cette source prend en compte des conditions optimales d'inclinaison, d'orientation et d'ensoleillement, et ne considère pas les onduleurs et les câbles de connexion. Même si l'on recommence le calcul en considérant cette fois que les façades BIPV produisent aussi bien que les panneaux PV sur le toit du Treurenberg, c'est-à-dire avec une productivité de 800 kWh / kWc, il faudrait tout de même plus de 7 ans et demi pour rembourser l'énergie grise dépensée pour l'installation PV. On peut noter que ces résultats restent intéressants comparés à la durée de vie du système, qui est de 25 à 30 ans. **Au final, pendant au moins 15 ans, la production d'électricité du bâtiment sera 100 % verte, ce qui contribuera à épargner plus de 350 tonnes de dioxyde de carbone.**

## Potentiel esthétique

**Dans le cas du Treurenberg Building, le potentiel esthétique des BIPV peut être résumé en deux points : discrétion et respect du patrimoine.** Des résultats similaires sont obtenus dans l'état de l'art, qui définit deux catégories d'impact esthétique des BIPV : ceux qui se fondent harmonieusement dans l'architecture, et ceux qui participent à la conception et à l'image de l'enveloppe.

En effet, selon les usagers du bâtiments, l'intégration de BIPV n'a pas d'impact esthétique puisque la plupart ne sont même pas au courant que les façades comportent des cellules solaires. On peut interpréter ça autrement et dire que les BIPV ont eu l'effet escompté puisque leur intégration à l'architecture est très discrète.

Parmi les experts, ce sont surtout l'architecte et le designer solaire qui sont satisfaits de l'esthétique du bardage PV. Par sa couleur sombre et sa surface rugueuse, le bardage ressemble vraiment à un revêtement classique, et s'intègre bien dans l'architecture du centre historique de Bruxelles. Les BIPV n'ont pas impacté l'architecture du Treurenberg Building puisque sa conception avait été réalisée avant le choix de l'emploi de ce type de matériau. Cependant, l'architecte précise que dans d'autres cas, cela peut influencer la volumétrie d'un projet, et aussi l'esthétique extérieure, comme dans le cas du Solaris. Selon lui, ça peut compliquer la composition des façades, et contraindre le dimensionnement de l'édifice, car il faut prendre en compte la modularité du bardage.

## Autres considérations

Le retour d'expérience des experts a mis en évidence d'autres facteurs entrant en compte dans le potentiel d'intégration architecturale du PV. Tout d'abord, il est judicieux de connaître leur avis sur l'influence des BIPV sur l'architecture.

Ils considèrent que le Treurenberg Building n'est pas un projet hors du commun. Au niveau de sa conception et de sa réalisation, c'était un immeuble comme les autres, mis à part qu'il devait atteindre de hautes performances énergétiques, ce qui était assez contraignant et constituait un vrai défi pour les bureaux d'étude. L'architecte n'a pas dû adapter la volumétrie du bâtiment, ce qui veut dire qu'il est également possible d'appliquer des BIPV à un projet existant. L'intégration de BIPV n'a pas fortement impacté le travail des experts, excepté celui du designer solaire qui ne s'est spécialisé que là-dessus. En revanche, cela a fortement impacté le budget, ce qui a freiné le client au début, qui s'est ensuite laissé convaincre par l'aspect esthétique du bardage.

Quant à savoir si les experts pourraient réitérer l'expérience avec des BIPV, les réponses divergent, mais sont globalement positives. Les principales motivations à l'utilisation de BIPV étaient d'accroître les performances énergétiques du bâtiment, en vue d'obtenir le label BREEAM, tout en intégrant discrètement le dispositif de production d'énergie renouvelable à l'architecture. L'obtention d'un label environnemental n'est pas seulement désirée par souci d'écologie des concepteurs et du client, mais il s'agit aussi d'un calcul commercial, comme l'explique le manager du projet. Pour le client, le bâtiment prend beaucoup de valeur et de visibilité sur le marché de l'immobilier. Pour les locataires actuels, le label permet de montrer que l'instance européenne est un bon élève environnementalement parlant. Pour les concepteurs du projet, il s'agit d'une bonne référence de projet à ajouter à leur liste, afin de montrer à leurs clients qu'ils agissent en faveur du développement durable. Chacun des acteurs bénéficie donc à sa manière de cette démarche.



## Potentiel architectural

L'avis des métiers de la construction en Wallonie et à Bruxelles a aussi été sondé. Il leur a été demandé d'évaluer le potentiel architectural des BIPV sur une échelle allant de 1 – Très faible à 5 – Très élevé. La moyenne des notes attribuées par les répondants au questionnaire s'élève 3,84. **Cela signifie que la plupart des concepteurs et des gestionnaires de projet attribuent aux BIPV un potentiel architectural relativement élevé.** Leur jugement se base à la fois sur la définition qui présente les BIPV en tant que matériau de construction actif assurant les rôles d'un revêtement extérieur, mais aussi sur les images d'exemples où l'esthétique des BIPV est bien mise en valeur.

Par rapport à cette question de recherche, une réflexion émise par l'un des participants au questionnaire mérite discussion. Celui-ci déclare : « *A mon sens, le BIPV est de l'argent mal investi au profit d'une architecture ostentatoire.* » Tout d'abord, on peut se poser la question de ce qu'est de l'argent bien investi. Investir signifie « Placer des fonds dans quelque chose en vue d'en tirer un bénéfice ». Si l'on se tient à cette définition, il est vrai que les BIPV ne sont pas lucratifs, du moins financièrement parlant. L'intégration architecturale de PV poursuit d'autres objectifs, il s'agit d'une approche écoresponsable mêlant l'utile à l'agréable. Quant au caractère ostentatoire des BIPV, je ne suis absolument pas d'accord, surtout parce que le mot « discret » en est l'opposé. Le fondement des BIPV est d'intégrer le PV à l'architecture, de faire partie de son enveloppe. Dans de nombreux cas, ils sont invisibles, et ne contribuent en rien à vanter les qualités de l'architecture. En revanche, ceux qui peuvent faire preuve d'ostentation, ce sont les acteurs d'un projet intégrant le BIPV, étant donné la publicité verte que le projet leur procure, mais je n'irais quand même pas jusqu'à dire que c'est fait de manière exagérée. A mon propre sens, le BIPV est de l'argent investi au profit d'une architecture plus respectueuse de son environnement.

### 6.2.3. Freins à l'application à grande échelle des BIPV

Concernant les obstacles qui ont pu freiner l'utilisation de BIPV au Treurenberg Building, on a pu noter les réticences du client, le reproche des concepteurs sur l'inclinaison non-optimale des modules, la complexification du projet (multiplicité de paramètres à prendre en compte : technique, dimensionnement, planning...). Le designer solaire a aussi mis en avant le fait qu'il vaut mieux que les BIPV ne soient pas accessibles au public, afin de réduire le risque de brûlure au contact de la surface chaude du bardage. Le plus gros problème soulevé par l'architecte est l'obsolescence programmée des BIPV. Après 25 ans, les cellules solaires produisent beaucoup moins d'électricité, et le remplacement de ce bardage de façade nécessite des travaux lourds. Mais le premier obstacle est avant tout financier, car les BIPV sont onéreux, et que l'investissement n'est pas toujours rentabilisé sur sa durée de vie. Par contre, ils sont d'accord pour dire que ce constat tend à changer car l'évolution combinée du coût des BIPV (à la baisse) et du coût de l'électricité du réseau (à la hausse), ainsi que les subsides apportés par les Certificats Verts vont participer à la rentabilité économique des BIPV.

Selon les usagers, l'intégration de BIPV aux façades n'impacte pas leur quotidien. Néanmoins, les occupants des derniers étages ressentent une sensation d'inconfort en été et en mi-saison. La surchauffe n'est pas due à la présence de BIPV, mais simplement au fait que le volume est bien exposé. Les apports solaires sont les bienvenus sur les façades actives, mais le sont moins sur les fenêtres qui transmettent la chaleur à l'intérieur du bâtiment. Les concepteurs du bâtiment avaient pourtant prévu de remédier à cela, grâce à divers systèmes de rafraîchissement : plafonds actifs, pare-soleils amovibles automatiques, système de ventilation mécanique contrôlée... Dans la réalité du terrain, tous ces systèmes ne fonctionnent pas toujours correctement.

La revue de littérature a mis en évidence un autre frein primordial : la nouveauté de la technologie, et le peu de recul et d'information disponible qui l'entraîne. Ce facteur a été confirmé lors de l'enquête aux architectes, qui ont peu de connaissance et d'expérience en la matière. Un autre point discuté est le faible rendement des BIPV évoqué à la fois par les experts du cas d'étude et les architectes sondés. Pour les surfaces verticales, ils n'ont pas tort puisque qu'on a vu dans le cas du Treurenberg Building que les BIPV en façade produisent 1,5 fois moins d'électricité que les PV en toitures dont l'inclinaison à 5° n'est pas non plus optimale. En comparant avec la littérature, qui donne l'irradiation annuelle des surfaces en fonction de leur inclinaison et de leur orientation (50% pour des surfaces verticales à l'est et à l'ouest, 70% pour une surface verticale au sud, et 80% pour une surface inclinée à 5° au sud), on tombe sur les mêmes résultats : les surfaces verticales reçoivent 1,5 fois moins d'énergie solaire que les surfaces horizontales. Cependant, posés à la verticale, ils prennent moins de place. Cet avantage prévaut dans le cas où il y a peu de surface horizontale disponible.

Par ailleurs, certains ont exprimé leurs craintes quant aux « métaux rares » utilisés pour la fabrication des cellules PV. On sait cependant grâce à la littérature que le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre, et que le PV ne contient pas de « terres rares ». Le problème environnemental que pose le PV ne concerne pas l'épuisement des ressources abiotiques, mais plutôt leur impact sur la biodiversité. Par ailleurs, les modules en fin de vie doivent être récoltés par le fabricant afin d'être recyclés. En Belgique, c'est l'organisation PV cycle qui organise la collecte et le recyclage.

Après avoir fait la balance des « pour » et des « contre », on ne peut pas porter un jugement unilatéral sur les BIPV, en les qualifiant de bonne ou de mauvaise solution. La réponse est plus complexe que ça. Tout dépend de la situation dans laquelle le projet se trouve. Le BIPV n'est pas une solution miracle, généralisable, ils ne sont adéquats que dans certains cas.

Dans le cas du Treurenberg, je trouve que l'approche est intéressante mais qu'il est frustrant d'avoir dépensé autant d'énergie et d'argent pour qu'au final les cellules solaires ne soient pas utilisées à leurs capacités maximales. Avec les BIPV en façade, il faut accepter de ne pas atteindre l'optimum, mais au moins, toutes les surfaces à disposition du bâtiment sont rentabilisées et un matériau de bardage classique a pu être économisé.

Par ailleurs, il est vrai que les performances des cellules solaires diminuent avec le temps, mais on pourrait imaginer de garder le bardage même s'il ne produit plus d'électricité. En effet, la plaque de verre en face avant des modules peut continuer de protéger le bâtiment contre les intempéries quelques années supplémentaires. D'autres revêtements de façade ont également une durée de vie estimée à 30 ans, comme le bois, les revêtements métalliques comme l'acier galvanisé, et les enduits comme le crépi. Au final, rien n'est éternel, même le bâtiment a une durée de vie de 60 ans, après quoi de gros travaux sont nécessaires. Certes, les cellules PV sont plus sujettes à l'obsolescence, surtout avec la vitesse à laquelle les technologies évoluent. Mais selon moi, ce n'est pas un réel argument en défaveur des BIPV, parce que même si leur performance n'est pas toujours à la pointe de la technologie, en attendant, pendant au moins 25 ans, les cellules produisent plus d'énergie que ce qu'il n'en a fallu pour les fabriquer. Un matériau ordinaire n'a pas cette possibilité de compenser son énergie grise, à l'exception peut-être du bois et des matériaux biosourcés. En effet, leur bilan carbone est déjà neutre puisqu'ils ne font que restituer le CO<sub>2</sub> qu'ils ont capté durant leur vie.

À propos de ce type de matériaux, une réflexion intéressante a été soulevée lors de l'interview avec l'architecte. Celui-ci a déclaré : « Tout ce qui est biosourcé, ça c'est le vrai développement durable. » D'une part, je suis d'accord avec lui, car ces matériaux n'émettent pas plus de gaz à effet de serre que ceux qui ne sont déjà présents dans l'atmosphère. De plus, ils sont considérés comme renouvelables

s'ils sont gérés de manière durable et luttent ainsi contre l'épuisement des ressources. Comme ils proviennent d'organismes vivants, ils sont totalement biodégradables et ne créent pas de déchets. C'est surtout sur ce dernier point qu'ils présentent un atout considérable comparés aux BIPV, dont les déchets ne sont pas encore entièrement recyclés. D'autre part, certains inconvénients valables pour le BIPV le sont aussi pour le biosourcé : ils sont généralement chers et leur durée de vie n'est pas infinie (surtout s'ils sont exposés à la pluie). Dans les deux cas, le problème reste peut-être leur application à grande échelle. Si tout le monde n'utilisait que des matériaux biosourcés, on ne pourrait pas les produire en suffisamment grande quantité et aussi rapidement qu'impose le rythme de consommation de notre monde actuel. Le constat est le même pour les cellules PV. Sur ce point, je rejoins également l'avis de l'architecte, car on doit avant tout penser à diminuer notre consommation. Produire c'est bien, mais ne pas consommer, c'est mieux. Voilà pourquoi la rénovation énergétique des bâtiments s'impose. Ne pas construire du neuf, mais privilégier l'existant autant que possible est une première stratégie à suivre. Ensuite, l'amélioration de la qualité de l'enveloppe, mais aussi de l'efficacité des systèmes et la conception bioclimatique sont à valoriser. La non-consommation est un prérequis avant de penser à la production d'énergie renouvelable, et conjointement, ils contribueront à réduire l'impact environnemental du secteur de la construction.

## CHAPITRE 7 : CONCLUSION

### 7.1. Synthèse des travaux

Lors de ce travail, l'intégration architecturale du photovoltaïque sous le climat belge a été étudiée à travers trois grandes parties : l'état de l'art, l'analyse d'un cas d'étude et l'enquête auprès des architectes. Ces trois approches ont permis d'évaluer le potentiel des *Building Integrated Photovoltaics* et les freins à leur application. L'état de l'art a mis en évidence les enjeux des BIPV au regard des trois critères du développement durable. À travers l'étude de cas, la documentation technique, ainsi que les interviews avec les experts et les usagers m'ont permis de confronter divers points de vue et de développer un avis critique. Enfin, l'enquête auprès des architectes wallons et bruxellois a dégagé des tendances quant à la perception des BIPV du monde de la construction.

Il en ressort que les BIPV sont assez prometteurs, même dans des climats comme le nôtre, pour remplacer des matériaux de construction conventionnels. Économiquement, le bilan n'est pas très avantageux, car ces technologies sont encore très onéreuses et leur production d'électricité n'est généralement pas assez élevée que pour rembourser l'investissement de départ sur une durée raisonnable. Ce constat tend cependant à évoluer et des subsides, déjà disponibles actuellement à Bruxelles, vont permettre de rendre les BIPV financièrement rentables. D'un point de vue environnemental, par contre, le résultat final est bénéfique puisque la dette énergétique est remboursée après quelques années. Les BIPV contribuent donc à réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais ont quand même un impact négatif sur la biodiversité et la production de déchets. Dans le bâtiment étudié, l'installation PV permet de compenser trois quarts de l'énergie primaire consommée sur l'année. Selon le retour d'expérience des acteurs de sa construction, il s'agit d'une solution intéressante pour créer des bâtiments zéro-énergie qui intègrent discrètement un système de production d'énergie renouvelable. Au niveau social, le manque de connaissance des BIPV dans le monde de la construction est un des principaux freins à leur utilisation. Très peu de concepteurs de projet ont déjà eu l'occasion d'en utiliser, même si la plupart d'entre eux semblent favorables à ce type d'intégration à l'architecture.

### 7.2. Contributions

Ce travail contribue à la fois à générer des résultats spécifiques concernant les BIPV en Belgique et à élaborer une méthodologie qui peut être transférable à d'autres cas. En effet, il existe dans la littérature énormément d'articles sur le sujet mais ceux-ci restent très théoriques et/ou concernent des cas d'étude éloignés. Dans ce cadre, il est important d'apporter un regard plus ciblé sur la situation actuelle en Belgique. L'analyse du cas d'étude a d'ailleurs démontré que le bilan de l'intégration architecturale du PV est en réalité moins financièrement avantageux que ce que prétendent la communauté scientifique et les entreprises du secteur. En outre, la méthodologie élaborée dans ce travail peut être applicable à l'analyse d'autres techniques environnementales innovantes. En effet, ma démarche, qui combine un état de l'art approfondi, une étude de cas représentative et un questionnaire envoyé à un nombre significatif de professionnels de la construction, est documentée tout au long du travail. Les étapes sont structurées et décrites en détails de manière à ce que la méthode soit transparente et reproductible. En outre, le guide d'interview et le questionnaire ont été préalablement validés par plusieurs experts. J'ai interprété les résultats de la manière la plus objective possible, avant d'apporter un avis critique personnel quand cela se justifiait.

### 7.3. Limites

L'analyse d'un cas d'étude est par définition dépendante du contexte étudié. Les résultats ne sont donc pas généralisables. Bien que le bâtiment choisi soit représentatif d'un « bâtiment avec BIPV » typique, la recherche aurait été étouffée si j'avais étudié d'autres cas pour pouvoir comparer les résultats. En effet, des projets réalisés plus tôt offrent plus de recul, ce qui permettrait de voir l'évolution de ce type de matériau dans le temps. D'autres, au contraire, sont plus récents et bénéficient d'une technologie encore plus avancée. Comme me l'a d'ailleurs signalé l'architecte lors de notre entretien, il existe d'autres projets intégrant des BIPV qui sont, selon lui, plus intéressants.

De plus, le cas d'étude choisi est un bâtiment abritant les bureaux d'une instance européenne importante, ce qui n'a pas facilité la collecte des informations. Leur politique de sécurité étant très stricte, il m'a fallu négocier pendant plusieurs semaines l'autorisation d'interviewer les usagers et de me rendre sur place. On ne rentre pas dans un bâtiment de l'Union Européenne comme on entre dans une gare, et il m'a fallu montrer « patte blanche ». Après de nombreux échanges par e-mail, où j'ai notamment partagé mes informations personnelles et rédigé un formulaire détaillant la politique de confidentialité, ils ont finalement accepté de me recevoir. La visite a été très surveillée, mais j'ai finalement pu obtenir le point de vue des usagers et observer le bâtiment de l'intérieur. Ce qui est dommage, c'est que je n'ai pas pu obtenir les chiffres concernant la production actuelle d'électricité renouvelable. Cela aurait été idéal pour comparer la réalité avec les résultats du logiciel de simulation (même si celui-ci se base sur le projet tel que construit) et aurait peut-être influencé la réponse concernant le potentiel énergétique des BIPV.

Les entretiens qui ont eu lieu avec les experts du Treurenberg Building ont été à chaque fois très enrichissants. La combinaison des quatre différents points de vue ont permis de reconstituer les faits et d'apporter de la crédibilité aux données récoltées. Mon regret est que la commune de Bruxelles n'a pas souhaité participer à une interview. Il aurait été pertinent d'entendre leur position, d'autant plus que les BIPV influencent certainement la procédure de permis de bâtir, et ont un rôle significatif à jouer en matière d'urbanisme.

Concernant le questionnaire, la taille de l'échantillon (136 personnes) n'est pas assez importante que pour être statistiquement représentative de la population ciblée. De plus, la répartition des profils des répondants ne correspond pas tout à fait à la situation réelle. Certaines catégories sociodémographiques sont sous-représentées. Les résultats de l'enquête sont donc à interpréter avec précaution. Pour bien faire, il aurait fallu diffuser l'enquête à de plus larges horizons, et pondérer les résultats pour s'approcher au plus près de la réalité.

Par ailleurs, malgré le peu de questions ouvertes posées dans le questionnaire, les réponses écrites sont assez brèves et contiennent peu d'information. C'est le désavantage de ce type de récolte de données : on sait facilement procéder à une analyse quantitative des résultats, mais il est difficile de creuser plus loin. J'aurais aimé que les personnes ayant fait l'expérience des BIPV auparavant détaillent davantage leurs réponses, afin d'en apprendre plus sur le sujet. Peut-être que des entretiens semi-dirigés auraient pu être prévus avec ces personnes expérimentées, afin qu'elles puissent développer leur opinion.

## 7.4. Perspectives

En plus des pistes d'améliorations évoquées précédemment, notamment la proposition de mener plusieurs analyses de cas pour comparer les résultats obtenus, d'autres perspectives de recherche se profilent au terme de ce travail.

Comme mentionné dans l'état de l'art, il existe de nombreuses analyses en cycle de vie pour les panneaux PV classiques, mais encore très peu pour les BIPV. Pourtant, leur fabrication diffère puisqu'en plus des cellules solaires et du verre, les BIPV peuvent comporter d'autres éléments selon qu'ils sont appliqués comme revêtement de façade, comme double vitrage, ou encore comme tuile solaire. Les fabricants ne détaillent pas leur procédé de fabrication ni l'impact carbone de leurs produits. Afficher le temps de remboursement de leur dette énergétique pourrait contribuer à crédibiliser leur publicité et prouver qu'ils ne font pas de « greenwashing ». Dès lors, il serait à la fois dans l'intérêt des chercheurs et des entreprises du secteur de réaliser des analyses en cycle de vie des BIPV.

Les résultats ont démontré que l'électricité produite par une installation PV est rarement suffisante pour couvrir tous les besoins d'un bâtiment. C'est pourquoi il faudrait étudier cette solution en combinaison avec d'autres sources d'énergie renouvelable, et à plus grande échelle. Le problème de l'intermittence et de la temporalité doit également être géré. Par exemple, on sait que les pompes à chaleur sont un bon moyen de chauffer un bâtiment de manière durable, or ce système demande de l'électricité pour fonctionner, et en a le plus besoin en hiver, au moment où les apports solaires sont moindres. La production solaire coïncide mieux avec la période chaude, et peut aisément fournir l'électricité nécessaire pour faire fonctionner les systèmes de refroidissement. La mise en place de capteurs sur des surfaces avec d'autres inclinaisons et orientations permet de répartir la production pendant la journée, et les batteries des voitures électriques peuvent stocker en partie l'excédent. Ceci montre que la problématique est complexe, qu'elle doit être étudiée de manière dynamique, et à l'échelle d'une communauté énergétique.

Une remarque faite par l'un des interviewés est le conflit que posent les BIPV avec les toitures végétalisées. Bien qu'il s'agisse de deux manières de « rentabiliser » les surfaces d'un immeuble au profit de l'environnement, il faut choisir entre les deux. Il pourrait être intéressant de mener une étude comparative des deux techniques, à l'échelle d'un quartier, pour voir si elles sont applicables dans les mêmes situations. S'il y a une concurrence entre les deux, il faudrait faire la balance de leur bénéfices respectifs pour l'écologie, entre production d'énergie et bienfaits pour la biodiversité.

## BIBLIOGRAPHIE

### Livres et Articles scientifiques

Assoa, Y. B., Thony, P., Messaoudi, P., Schmitt, E., Bizzini, O., Gelibert, S., ... & Chabuel, F. (2021). Study of a building integrated bifacial photovoltaic facade. *Solar Energy*, *227*, 497-515.

Awuku, S. A., Bennadji, A., Muhammad-Sukki, F., & Sellami, N. (2021). Myth or gold? The power of aesthetics in the adoption of building integrated photovoltaics (BIPVs). *Energy Nexus*, *4*, 100021.

Bakhiyi, B., Labrèche, F., & Zayed, J. (2014). The photovoltaic industry on the path to a sustainable future—Environmental and occupational health issues. *Environment International*, *73*, 224-234.

Baljit, S.S.S., Chan, H.Y., & Sopian, K. (2016). Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems, *Journal of Cleaner Production*, *137*, 677-689.

Blais, A. & Durand, C. (2003). Chapitre 16 - Le sondage. In B. Gauthier (Ed.), *Recherche sociale - De la problématique à la collecte des données (4e édition)*, 387-429. Sainte Foy.

Bryman, A. (2012). Chapter 3 - Research Designs. In *Social research methods 4th edition*, 44-78. Oxford, New York.

Chatzipanagi, A., Frontini, F., & Virtuani, A. (2016). BIPV-temp: a demonstrative building integrated photovoltaic installation. *Applied Energy*, *173*, 1-12.

Chow, T.T., Chan, A.L.S., Fong, K.F., Lin, Z., He, W., & Ji, J. (2009). Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application. *Applied Energy*, *86*, 689-696.

Cielo, A., Margiaria, P., Lazzeroni, P., Mariuzzo, I., & Repetto, M. (2021). Renewable Energy Communities business models under the 2020 Italian regulation, *Journal of Cleaner Production*, *316*, 128217.

Defays, A., & Elsen, C. (2018). Architecte et maître d'ouvrage : main dans la main, ou dos à dos ? *Archinews*, *18*, p. 15-21.

Devetaković, M., Djordjević, D., Radojević, M., Krstić-Furundžić, A., Burduhos, B. G., Martinopoulos, G., ... & Lobaccaro, G. (2020). Photovoltaics on Landmark Buildings with Distinctive Geometries. *Applied Sciences*, *10*(19), 6696.

di Marco, A. (2018). Les communautés d'énergie renouvelable et la transition verte de l'UE, *Revue juridique de l'environnement*, *43*, 47-69.

D'Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2014). Experimental operating cell temperature assessment of BIPV with different installation configurations on roofs under Mediterranean climate. *Renewable Energy*, *68*, 378-396.

Edwards, A. L. (1953). The Relationship Between the Judged Desirability of a Trait and the Probability that the Trait will be Endorsed. *Journal of Applied Psychology*, *37* (2), 90-93.

Gan, G. (2009). Effect of air gap on the performance of building-integrated photovoltaics. *Energy*, *34*, 913-921.

- Gerbinet, S. (2011). *Évaluation environnementale de systèmes de production d'électricité renouvelable*, Travail de fin d'études, Université de Liège, 186p.
- Gholami, H. & Røstvik, H.N (2020). Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*, 204, 117931.
- Guo, W., Kong, L., Chow, T., Li, C., Zhu, Q., Qiu, Z., ... & Riffat, S. B. (2020). Energy performance of photovoltaic (PV) windows under typical climates of China in terms of transmittance and orientation. *Energy*, 213, 118794.
- Han, J., Lu, L., Peng, J., & Yang, H. (2013). Performance of ventilated double-sided PV façade compared with conventional clear glass façade. *Energy and Buildings*, 56, 204-209.
- Jelle, B.P., & Breivik, C. (2012). State-of-the-art Building Integrated Photovoltaics, *Energy Procedia*, 20, 68-77.
- Kameni Nematchoua, M., Sevin, M., & Reiter, S. (2020). Towards Sustainable Neighborhoods in Europe: Mitigating 12 Environmental Impacts by Successively Applying 8 Scenarios. *Atmosphere*, 11, 603.
- Kameni Nematchoua, M., Nishimwe, A.M-R., & Reiter, S. (2021). Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110198.
- Kim, J.H. & Kim, J.T. (2012). A simulation study of air-type building-integrated photovoltaic-thermal system. *Energy Procedia*, 30, 1016-1024.
- Labouret, A. et Viloz, M., (2009). *Énergie solaire photovoltaïque*, Paris, Dunod, Ademe et Editions le Moniteur « Série Environnement et sécurité », 375p.
- Lallemand, C. & Gronier, G. (2015). Fiche 04 - Entretien. In *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*, 108–131. Eyrolles, Paris.
- Lamnatou, C., Smyth, M., & Chemisana, D. (2019). Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): LCA of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. *Science of the Total Environment*, 660, 1576-1592.
- Litjens, G.B.M.A., Kausika, B.B., Worrell, E., & van Sark, W.G.J.H.M. (2018). A spatio-temporal city-scale assessment of residential photovoltaic power integration scenarios, *Solar Energy*, 174, 1185-1197.
- Lopez, C.S.P., Lucchi, E., Leonardi, E., Durante, A., Schmidt, A., & Curtis, R. (2021) Risk-Benefit Assessment Scheme for Renewable Solar Solutions in Traditional and Historic Buildings. *Sustainability*, 13, 5246.
- Malmedy, C. (2020). *Analyse des impacts environnementaux et calcul du coût environnemental d'un immeuble à appartements sur l'ensemble de son cycle de vie pour atteindre les objectifs quasi zéro énergie et net zéro énergie*, Travail de fin d'études, Université de Liège, 167p.
- Marique, A-F. & Reiter, S. (2014). A simplified framework to assess the feasibility of zero-energy at the neighbourhood/community scale. *Energy and Buildings*, 82, 114-122.
- Multon, B., Robin, G., Ruellan, M., & Ben Ahmed, H. (2004). Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables. *La Revue 3 E. I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication*, 20-33.



- Peñaloza, D., Mata, E., Fransson, N., Fridén, H., Samperio, A., Quijano, A., & Cuneo, A. (2022). Social and market acceptance of photovoltaic panels and heat pumps in Europe: A literature review and survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *155*, 11867.
- Peng, C., Huang, Y., & Wu, Z. (2011). Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and buildings*, *43*(12), 3592-3598.
- Quivy, R. & Van Campenhoudt L., (2006). Manuel de recherche en sciences sociales, Dunod, Paris.
- Rajoria, C.S., Agrawal, S., Chandra, S., Tiwari, G.N., & Chauhan, D.S. (2016). A Novel investigation of building integrated photovoltaic thermal (BiPVT) system: a comparative study. *Solar Energy*, *131*, 107-118.
- Roberts, S. & Guariento, N., (2009). *Building Integrated Photovoltaics, a handbook*, Basel, Birhäuser, 178p.
- Rossi, F., Heleno, M., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2020). Environmental and economic optima of solar home systems design: A combined LCA and LCC approach, *Science of The Total Environment*, *744*, 140569.
- Roy, S. N. (2003). Chapitre 7 - L'étude de cas. In B. Gauthier (Ed.), *Recherche sociale - De la problématique à la collecte des données (4e édition)*, 159–184. Sainte Foy.
- Savoie-Zajc, L. (2003). Chapitre 12 - L'entrevue semi-dirigée. In B. Gauthier (Ed.), *Recherche sociale - De la problématique à la collecte des données (4e édition)*, 293– 316. Sainte Foy.
- Schelings, C., (2021). Cahier méthodologique. Université de Liège. 3-16.
- Skandalos, N., & Karamanis, D. (2021). An optimization approach to photovoltaic building integration towards low energy buildings in different climate zones. *Applied Energy*, *295*, 117017.
- Strzalka, A., Alam, N., Duminil, E., Coors, V., & Eicker, U. (2012). Large scale integration of photovoltaics in cities, *Applied Energy*, *93*, 413-421.
- Sun, H., Kiang Heng, C., En Rong Tay, S., Chen, T., & Reindl, T. (2021). Comprehensive feasibility assessment of building integrated photovoltaics (BIPV) on building surfaces in high-density urban environments, *Solar Energy*, *225*, 734-746.
- Weerasinghe, R. P. N. P., Yang, R. J., Wakefield, R., Too, E., Le, T., Corkish, R., ... & Wang, C. (2021). Economic viability of building integrated photovoltaics: A review of forty-five (45) non-domestic buildings in twelve (12) western countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *137*, 110622.
- Yin, R. K. (2003). Case study research - *Design and Methods - Third Edition*. SAGE Publications.
- Yu, G., Yang, H., Luo, D., Cheng, X., & Ansah, M. K. (2021). A review on developments and researches of building integrated photovoltaic (BIPV) windows and shading blinds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *149*, 111355.
- Zogou, O. & Stapountzis, H., (2011). Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels. *Renewable Energy*, *36*, 3488-3498.

## Ressources internet

2ES, 2021. Le solaire thermique. Image disponible sur l'URL : <https://www.2es.fr/fr/nos-competences/le-solaire-thermique/> , consulté le 31/12/2021.

Allo solar, 2021. Qu'est-ce qu'un panneau solaire photovoltaïque ? Image disponible sur l'URL : <https://allo.solar/base-de-connaissances/qu-est-ce-qu-un-panneau-solaire-photovoltaique.html> , consulté le 31/12/2021.

ArchDaily, 2014. EPFL QUARTIER NORD SwissTech Convention Center Retail and Student Housing / Richter Dahl Rocha & Associés. Image disponible sur l'URL : [https://www.archdaily.com/519434/epfl-quartier-nord-swisstech-convention-center-retail-and-student-housing-richter-dahl-rocha-and-associés?ad\\_medium=widget&ad\\_name=recommendation](https://www.archdaily.com/519434/epfl-quartier-nord-swisstech-convention-center-retail-and-student-housing-richter-dahl-rocha-and-associés?ad_medium=widget&ad_name=recommendation) , consulté le 27/02/2022.

ArchDaily, 2018. Copenhagen International School Nordhavn / C.F. Møller. Image disponible sur l'URL : [https://www.archdaily.com/879152/copenhagen-international-school-nordhavn-cf-moller?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/879152/copenhagen-international-school-nordhavn-cf-moller?ad_medium=gallery) , consulté le 26/01/2022.

ArchDaily, 2022. European Council and Council of the European Union / Samyn and Partners. Image disponible sur l'URL : <https://www.archdaily.com/802379/european-council-and-council-of-the-european-union-samyn-and-partners> , consulté le 21/01/2022.

Architektur-Online, 2012. Novartis Campus Basel : Frank Gehry, Renzo Piano, David Chipperfield, Tadao Ando, Marco Serra, Sanaa et bien d'autres. URL : <https://www.architektur-online.com/projekte/novartis-campus-basel-frank-gehry-renzo-piano-david-chipperfield-tadao-ando-marco-serra-sanaa-uvvm> , consulté le 26/01/2022.

Assar, 2022. Treurenberg. URL : [Treurenberg - assar architects](https://www.treurenberg-assar.com) , consulté le 25/02/2022.

Attia, S. 2020. Qualitative research methods. Vidéo disponible sur l'URL : <https://www.youtube.com/watch?v=l6sYXbTdl7w&list=PLEQelqigDzw-J6tOeKZLkM3xhKn6mFnCT&index=11> , consulté le 4/03/22.

B4F, 2018. Treurenberg. URL : <http://b4f.eu/fr/references/treurenberg> , consulté le 25/02/2022.

Banque mondiale, 2020. Données. Population urbaine. URL : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS> , consulté le 8/03/2022.

BIPV.ch, 2013. Novartis Campus Gehry Building. URL: [http://www.bipv.ch/images/esempi/amministrativo/novartis/Novartis\\_2013\\_ENG.pdf](http://www.bipv.ch/images/esempi/amministrativo/novartis/Novartis_2013_ENG.pdf) , consulté le 26/01/2022.

Bruxelles Environnement, 2020a. Déconfinement : reprise des réunions et visites à Bruxelles Environnement. Image prise sur l'URL : <https://environnement.brussels/news/deconfinement-reprise-des-reunions-et-visites-bruxelles-environnement> , consulté le 22/05/2022.

Bruxelles Environnement, 2020b. Le potentiel photovoltaïque des toits bruxellois. URL : <https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/en-detail/energie/le-potentiel-photovoltaique-des-toits-bruxellois> , consulté le 02/04/2022.

C'est pas sorcier, 2013. Du solaire au pays de l'or noir. Vidéo disponible sur l'URL : [https://www.youtube.com/watch?v=7BUjVyw5LaM&ab\\_channel=C%27estpassorcier](https://www.youtube.com/watch?v=7BUjVyw5LaM&ab_channel=C%27estpassorcier) , consulté le 31/12/2021.

Comparateur-Energie, 2022. Comment le tarif de l'électricité (et du gaz) est-il fixé en 2022 ? URL : <https://www.comparateur-energie.be/blog/prix-electricite-belgique/> , consulté le 28/05/2022.

Democo group, 2022. AXA. URL: <https://democogroup.com/fr/cnt/project/democo/axa-253> , consulté le 25/02/2022.

Dhand, N. K., & Khatkar, M. S. (2014). Statulator: An online statistical calculator. Sample Size Calculator for Estimating a Single Proportion. URL: [https://statulator.com/SampleSize/ss1P.html?fbclid=IwAR1ZHRWqcFcDxSWv5Z9NPbYNYp4Exdve\\_FYmdDtN22AsjecDUM7N6d3oHJM](https://statulator.com/SampleSize/ss1P.html?fbclid=IwAR1ZHRWqcFcDxSWv5Z9NPbYNYp4Exdve_FYmdDtN22AsjecDUM7N6d3oHJM) , consulté le 05/04/2022.

Donev, J., Frey, P. & Boechler, E. (2021). Encyclopédie énergie - Énergie solaire pour la Terre. URL : [https://energyeducation.ca/Encyclopedie\\_Energie/index.php/%C3%89nergie\\_solaire\\_pour\\_la\\_Terre](https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/%C3%89nergie_solaire_pour_la_Terre), consulté le 23/12/2021.

Écoconso asbl, 2018. Qu'est-ce qu'une tonne de CO2 ? URL : [Qu'est-ce qu'une tonne de CO2 ? | écoconso \(ecoconso.be\)](https://ecoconso.be) , consulté le 21/01/2022.

Edora, 2013. Feuille de route en vue de constituer une plateforme BIPV dans la Région de Bruxelles Capitale. URL : <https://www.edora.org/wp-content/uploads/2017/03/130422-feuille-de-route-bipv-version-def.pdf> , consulté le 15/02/2022.

Energie Commune, 2018. Énergie renouvelable. URL : <https://energiecommune.be/statistique/energie-renouvelable/> , consulté le 8/03/2022.

Energie Commune, 2021a. ABC du solaire Photovoltaïque. URL : <https://energiecommune.be/documentation/solaire-photovoltaique/> , consulté le 31/12/2021.

Energie Commune, 2021b. Électricité renouvelable. URL : [https://energiecommune.be/statistique/energie-renouvelable-electricite-renouvelable/?fl\\_builder](https://energiecommune.be/statistique/energie-renouvelable-electricite-renouvelable/?fl_builder) , consulté le 23/12/2021.

Energie Commune, 2021c. ABC du solaire Thermique. URL : [ABC du solaire thermique - Energie Commune](https://energiecommune.be/documentation/solaire-thermique/) , consulté le 31/12/2021.

Energie Plus, 2010a. Ensoleillement. URL : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>, consulté le 23/12/2021.

Energie Plus, 2010b. Rendement d'une installation solaire thermique. URL : [Rendement d'une installation solaire thermique - Energie Plus Le Site \(energieplus-lesite.be\)](https://energieplus-lesite.be/rendement-dune-installation-solaire-thermique/) , consulté le 03/04/2022.

Engie, 2021. Trois raisons expliquant la hausse des prix de l'énergie. URL : [https://www.engie.be/fr/business/blog/energy-market/prix\\_de\\_lenergie\\_raisons/](https://www.engie.be/fr/business/blog/energy-market/prix_de_lenergie_raisons/) , consulté le 13/03/2022.

Engie, 2022a. Quel est le rendement d'un panneau solaire ? Le verdict. URL : [Quel est le rendement d'un panneau solaire ? Le verdict \(engie.fr\)](https://www.engie.be/fr/actualites/actualites/quel-est-le-rendement-dun-panneau-solaire-le-verdict/) , consulté le 03/04/2022.

Engie, 2022b. Rentabilité panneaux solaires en Wallonie. URL : <https://www.engie.be/fr/economiser-energie/panneaux-solaires/rentabilite/exemple-de-calcul-wallonie> , consulté le 21/01/2022.

EU, (2017). Proposition de directive 2016/0382 du Parlement Européen et du Conseil relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. URL : [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:3eb9ae57-faa6-11e6-8a35-01aa75ed71a1.0002.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:3eb9ae57-faa6-11e6-8a35-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF) , consulté le 31/12/2021.

EU, (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. URL : [EUR-Lex - 32018L2001 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#) , consulté le 31/12/2021.

EU, (2019). Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU. URL: [EUR-Lex - 32019L0944 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#) , consulté le 31/12/2021.

European Commission, 2018. Paris Agreement. URL : [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en) , consulté le 7/03/2022.

European Commission, 2021. Energy Prices. URL : [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_5204](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_5204) , consulté le 7/03/2022.

European Council – Council of the European union, 2017. Europa Building. URL : <https://www.consilium.europa.eu/en/contact/address/council-buildings/europa-building/> , consulté le 21/01/2022.

Geo.Brussels, 2022. Créer une carte. URL : <https://geobru.irisnet.be/fr/maps/new/> , consulté le 03/05/2022.

Guide-panneaux-photovoltaïques, 2022. Le panneau solaire thermique : prix, fonctionnement et avantages. URL : [Le panneau solaire thermique : prix, fonctionnement et avantages \(guide-panneaux-photovoltaiques.be\)](http://Le_panneau_solaire_thermique_prix_fonctionnement_et_avantages_guide-panneaux-photovoltaiques.be) , consulté le 03/04/2022.

IEA, 2021. Net Zero Energy by 2050 - Analysis. URL : <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> , consulté le 7/03/2022.

ISSOL, 2016a. BIPV – Façade et enveloppe solaire. Image prise sur l'URL : [ISSOL | BIPV - Facade & Enveloppe Solaire - Maison écologique](#) , consulté le 21/01/2022.

ISSOL, 2016b. Références. Architecture verte et BIPV en Europe. Image prise sur l'URL : <http://www.issol.eu/fr/references-2/> , consulté le 22/05/2022.

ISSOL, 2017a. Fiches techniques projet. URL : [OK - Project Datasheet PARIS HABITAT \(issol.eu\)](#) , consulté le 21/01/2022.

ISSOL, 2017b. Le BIPV expliqué – Tour des Finances de Liège. Vidéo disponible sur l'URL : [https://www.youtube.com/watch?v=4NSc0VtMf5M&ab\\_channel=Issolsolar](https://www.youtube.com/watch?v=4NSc0VtMf5M&ab_channel=Issolsolar) , consulté le 26/01/2022.

Laboratory of Photovoltaics and optoelectronics (LPVO), 2019. PV windows. Image disponible sur l'URL : <http://lpvo.fe.uni-lj.si/en/aplikacije/pv-okna/> , consulté le 05/02/2022.

Liège Université Durable, 2020. Politique énergétique de l'ULiège : quelques chiffres. URL : [Politique énergétique de l'ULiège : quelques chiffres \(uliege.be\)](#) , consulté le 21/01/2022.

Maison passive, 2020a. Les critères. URL : <https://www.maisonpassive.be/?Les-criteres-du-passif> , consulté le 8/03/2022.

Maison passive, 2020b. Les principes. URL : <https://www.maisonpassive.be/le-passif-en-belgique/les-principes/> , consulté le 23/05/2022.

Moniteur Belge, 2021. 28 octobre 2021.- Arrêté du Gouvernement de la Région Bruxelles-Capitale modifiant l'arrêté du Gouvernement de la Région Bruxelles-Capitale du 17 décembre 2015 relatif à la promotion de l'électricité verte. URL :

[http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article\\_body.pl?language=fr&caller=summary&pub\\_date=2021-11-17&numac=2021022387%0D%0A#top](http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article_body.pl?language=fr&caller=summary&pub_date=2021-11-17&numac=2021022387%0D%0A#top), consulté le 18/02/2022.

Panneausolaire-info.be, 2022. Panneau solaire hybride. URL : <https://www.panneausolaire-info.be/panneau-solaire-hybride> , consulté le 05/01/2022.

Pinterest, 2022. The Novartis Building by Frank Gehry. Image disponible sur l'URL : <https://www.pinterest.com/pin/297870962824711796/> , consulté le 26/01/2022.

Régie des bâtiments, 2017. Tour des finances. URL : <https://www.regiedesbatiments.be/fr/projects/tour-des-finances#> , consulté le 26/01/2022.

Renouvelle, 2012. L'Europe définit sa stratégie énergétique pour 2050. URL : <https://www.renouvelle.be/fr/leurope-definit-sa-strategie-energetique-pour-2050/> , consulté le 8/03/2022.

Renouvelle, 2014. Solen : Évaluez puis améliorez votre consommation d'énergie. URL : <https://www.renouvelle.be/fr/solen-evaluez-puis-ameliorez-votre-consommation-denergie/> , consulté le 02/04/2022.

Schlaich Bergermann Partner (SBP), 2022. Novartis – Fabrikstrasse 15, Gehry Building. URL : <https://www.sbp.de/en/project/novartis-fabrikstrasse-15-gehry-building/> , consulté le 26/01/2022.

Science Direct, 2022. Photovoltaics. URL : <https://www.sciencedirect.com/search?q=Photovoltaics>, consulté le 4/02/2022.

Solaripedia, 2010. Solaris uses BIPV and passive design. Image disponible sur l'URL : [https://www.solaripedia.com/13/329/solaris\\_uses\\_bipvs\\_and\\_passive\\_design.html](https://www.solaripedia.com/13/329/solaris_uses_bipvs_and_passive_design.html) , consulté le 03/05/2022.

Solaronix, 2022. Cellules solaires. Image disponible sur l'URL : [https://www.solaronix.com/documents/solaronix\\_solar\\_cells\\_fr.pdf](https://www.solaronix.com/documents/solaronix_solar_cells_fr.pdf) , consulté le 05/02/2022.

UNEP, 2019. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction Sector. URL: [2019 Global Status Report for Buildings and Construction Sector | UNEP - UN Environment Programme](https://www.unep.org/fr/press-releases/2019-global-status-report-for-buildings-and-construction-sector) , consulté le 7/03/2022.

Vito, 2022. Building technology assessment. URL: <https://vito.be/en/application-area/building-technology-assessment> , consulté le 02/04/2022.

VK group, 2022. Treurenberg, VK A&E. URL : <https://www.vkgroup.be/fr/projets/treurenberg> , consulté le 25/02/2022.

Wallonie énergie SPW, 2016. Guide PEB 2015. URL : <https://energie.wallonie.be/fr/guide-peb-2015.html?IDC=9491> , consulté le 8/03/2022.

Wallonie énergie SPW, 2017. Zoom sur le "Building Integrated Photovoltaics" (BIPV)! URL : [Zoom sur le "Building Integrated Photovoltaics" \(BIPV\)! - Site énergie du Service public de Wallonie](https://www.energie.wallonie.be/fr/zoom-sur-le-building-integrated-photovoltaics-bipv) , consulté le 05/01/2022.

Wallonie énergie SPW, 2022. Aides et primes. URL : [Aides et primes - Site énergie du Service public de Wallonie](https://www.energie.wallonie.be/fr/aides-et-primes) , consulté le 03/04/2022.

Weekend.levif, 2015. En images : Le Pavillon Belge de l'Expo Universelle Milan 2015. Image prise de l'URL : <https://weekend.levif.be/voyage/en-images-le-pavillon-belge-de-lexpo-universelle-milan-2015/> , consulté le 22/05/2022.

Wikipower, 2022. Prix d'un panneau solaire en 2022 : combien ça coûte en Belgique ? URL : <https://wikipower.be/blog/prix-panneaux-solaires-photovoltaïque/> , consulté le 21/01/2022.

## Autres documents

Assar Architects, 2013. Plans et coupes du Treurenberg Building. Fichiers DWG.

Brugel, 2020. Projet de proposition relatif au coefficient multiplicateur appliqué au photovoltaïque – Analyse des paramètres économiques. Dossier confidentiel.

ISSOL, 2016c. Calcul du productible photovoltaïque - Projet Treurenberg – AXA. Dossier confidentiel.

VK engineering, 2013. TREURENBERG – NZEB SYMPOSIUM. Dossier confidentiel.

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Critères à respecter pour obtenir les labels Passifs Classiques, Plus, Premium et rénovation à partir du 1er janvier 2020. Source : Maison Passive, 2020a .....	2
Figure 2: Schéma méthodologique simplifié .....	4
Figure 3 : Image du Treurenberg Buidling. Source : Assar Architectes, 2017.....	7
Figure 4: Schéma du questionnaire .....	14
Figure 5: Schéma méthodologique détaillé.....	15
Figure 6 : Illustration du rayonnement solaire. Source : Energie Plus, 2010a .....	16
Figure 7: Typologies représentatives de quartiers existants en Belgique, utilisés comme cas d'étude. À gauche : milieu urbain, à droite : milieu périurbain. Source : Marique et Reiter, 2014 .....	19
Figure 8: Graphique montrant le nombre d'articles publiés sur Science Direct selon les années .....	21
Figure 9: Composition des panneaux photovoltaïques. Source : Allo Solar, 2021.....	22
Figure 10: Mixte électrique belge, Source : Energie Commune, 2021b .....	24
Figure 11: Irradiation solaire moyenne journalière horizontale à travers le monde, Source : Roberts and Guariento, 2009 (p.41) .....	25
Figure 12: Graphe de la quantité d'énergie solaire reçue sur une surface en Belgique, selon son inclinaison et son orientation. Source : Energie Plus, 2010a .....	26
Figure 13: Composition des capteurs thermiques plans vitrés, Source : 2ES, 2021.....	27
Figure 14: Building Integrated Photovoltaics (BIPV), a) illustrant la ventilation du mur par une lame d'air, b) montrant l'intégration au bâtiment. Source : Baljit et al., 2016 .....	29
Figure 15: Production d'électricité et ratio de performance d'un module BIPV en façade sud (avec surface réfléchissante arrière) au cours de l'année. Source : Assoa et al., 2021 .....	31
Figure 16: Comparaison des 3 types de mur. Source : Baljit et al., 2016 .....	32
Figure 17: À gauche : Vitrage solaire coloré du SwissTech Convention Center. Source : Solaronix, 2022 À droite : Fenêtre à cellules solaires opaques espacées. Source : LPVO, 2019 .....	33
Figure 18: Différentes configurations de vitrage BIPV : a) Simple vitrage BIPV, b) Double vitrage BIPV, c) et d) Double vitrage BIPV naturellement ventilé. Source : Guo et al., 2020.....	34
Figure 19: Principe d'un BIPV/T (air) en toiture. Source : Baljit et al., 2016.....	36
Figure 20: Comparaison des impacts environnementaux d'un quartier. Source : Kameni N. et al., 2020 .....	40
Figure 21: Graphique illustrant les solutions optimales environnementales (en vert) : coût élevé et impact faible ; et économiques (en orange) : faible coût et impact modéré, comparé au réseau d'électricité Italien (en rouge) : faible coût et impact élevé. Source : Rossi et al, 2020 .....	41
Figure 22: Europa Building, Bruxelles, 2017. Toute la surface de la toiture est couverte de BIPV. Source : ArchDaily, 2022 .....	46
Figure 23: Coût de l'intégration de la technologie BIPV dans du double vitrage. Source : ISSOL, 2016a.....	47
Figure 24: Novartis Campus. Source : Pinterest, 2022 .....	50
Figure 25: École internationale de Copenhague. Source : ArchDaily, 2018.....	51
Figure 26: Tour des Finances. Source : ISSOL, 2016b.....	52
Figure 27: Façade sud du Treurenberg Building. Source : Catherine Decrop .....	60
Figure 28: Localisation du Treurenberg Building. Source : geo.brussels, 2022 .....	60
Figure 29: Plan du cinquième étage et coupe longitudinale. Source : Assar Architects, 2013 .....	61
Figure 30 : Installation PV sur les façades Sud et Est, et la toiture du Treurenberg Building. Source : ISSOL, 2016c.....	62
Figure 31: Vue des façades Nord et Ouest, et de la toiture du Treurenberg Building. Source : ISSOL, 2016c .....	62
Figure 32: Modèle Sketchup de la toiture, et exemple de masque solaire d'un module sélectionné en bas de la façade est. Source : ISSOL, 2016c.....	64
Figure 33: Détail technique montrant le rehaussement des fenêtres pour optimiser l'éclairage naturel à l'intérieur des bureaux. Source : VK engineering, 2013.....	68

<i>Figure 34: Comparaison de l'utilisation d'énergie primaire pour le Treurenberg Passif et le Treurenberg Zéro Énergie Nette. Source : VK engineering, 2013</i> .....	69
<i>Figure 35: Nuage de mots représentant les 50 mots les plus fréquents de la transcription</i> .....	70
<i>Figure 36: Comparaison des nuages de mots des différents acteurs</i> .....	71
<i>Figure 37: Photos de l'ancien mur d'enceinte et du panneau explicatif se trouvant sur place. Source : Catherine Decrop</i> .....	72
<i>Figure 38: Résumé schématique du commencement du projet et des initiatives prises par les acteurs</i> .....	73
<i>Figure 39: Façade sud du bâtiment Solaris à Bruxelles. Source : Solaripedia, 2010</i> .....	75
<i>Figure 40: Répartition des répondants au sein de la Belgique</i> .....	88
<i>Figure 41: Répartition des réponses à la première question</i> .....	89
<i>Figure 42: Exemples de bâtiments cités. De haut en bas : Bureaux de Bruxelles Environnement, Superplastic Liège et Pavillon belge de Milan. Source : Bruxelles Environnement (2020a), ISSOL (2016b) et weekend.levif (2015)</i> .....	91
<i>Figure 43: Graphique illustrant le désir des répondants d'utiliser des BIPV</i> .....	93
<i>Figure 44: Graphique illustrant les raisons qui empêcheraient les répondants d'utiliser des BIPV</i> .....	94
<i>Figure 45: Graphique illustrant les raisons qui favoriseraient les répondants à utiliser des BIPV</i> .....	95
<i>Figure 46: Graphique illustrant la proportion de « connaisseurs » et « d'expérimentés » parmi les répondants</i> . 97	
<i>Figure 47: Graphique montrant la répartition de l'opinion des répondants</i> .....	98



## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Grille de lecture croisant les critères nécessaires pour le choix de documents.....	5
Tableau 2: Grille d'analyse des interviews des acteurs du cas d'étude.....	11
Tableau 3: Éclairement énergétique solaire maximal pour un ciel moyen à Uccle. Source :	
Energie Plus, 2010a.....	17
Tableau 4: Rendement des différents types de cellules. Source : Roberts et Guariento, 2009 (p.21).....	23
Tableau 5: Estimation des coûts des matériaux de façade et de toiture en Europe. Source :	
Gholami and Røstvik, 2020.....	39
Tableau 6: Production d'électricité et CO2 économisé de diverses installations PV et BIPV. Source : ISSOL, 2017a et Liège Université Durable, 2020.....	48
Tableau 7: Croisement des trois approches avec les trois critères du développement durable.....	56
Tableau 8: Nombre de modules, surface, puissance et production PV de chaque partie du Treurenberg Building. Source : ISSOL, 2016c.....	64
Tableau 9: Production mensuelle et facteurs en lien de chaque partie de l'installation. Source : ISSOL, 2016c.....	65
Tableau 10: Critères à respecter pour le label PASSIF tertiaire. Source : VK engineering, 2013.....	66
Tableau 11: Valeurs U des éléments de construction du Treurenberg Building. Source : VK engineering, 2013.....	67
Tableau 12: Comparaison des données d'ISSOL et de VK engineering concernant la production PV.....	69
Tableau 13: Interactions entre intervenants du projet.....	76
Tableau 14: Synthèse des réponses concernant les quatre premiers sujets.....	81
Tableau 15: Synthèse des facteurs influencés ou non par les BIPV.....	82
Tableau 16: Synthèse des facteurs perçus comme avantages ou inconvénients des BIPV.....	82
Tableau 17: Comparaison de la connaissance des BIPV et de l'âge des répondants.....	90
Tableau 18: Comparaison de la connaissance des BIPV et du diplôme des répondants.....	90
Tableau 19: Comparaison de la connaissance des BIPV et de la taille du bureau des répondants.....	90
Tableau 20: Comparaison de l'expérience BIPV et du diplôme des répondants.....	92
Tableau 21: Moyenne des notes attribuées au potentiel architectural des BIPV.....	93
Tableau 22: Remarques complémentaires des répondants.....	96
Tableau 23: Classement des participants selon la moyenne des notes attribuées.....	97
Tableau 24: Tableau montrant la répartition de l'opinion des répondants.....	98
Tableau 25: Potentiel des BIPV selon les trois méthodes de recherche.....	99
Tableau 26: Freins à l'utilisation de BIPV selon les trois méthodes de recherche.....	100
Tableau 27: Évaluation de la rentabilité économique de l'installation PV du Treurenberg Building.....	102
Tableau 28: Évaluation du bilan carbone de l'installation PV du Treurenberg Building.....	103

## ANNEXES

### Annexe 1 : Guide d'interview des entretiens semi-dirigés

#### Interview avec les acteurs de la construction

*Introduction : Bonjour, merci d'avoir bien voulu participer à mon interview. Avant de commencer, j'aimerais vous demander si vous êtes d'accord que je mentionne votre nom dans mon TFE ou si vous préférez rester anonyme ? Les informations que vous me donnerez seront rendues publiques, car les mémoires sont publiés sur le site de l'Université. Cela ne vous pose-t-il pas de problème ? Accepteriez-vous également que j'enregistre notre échange ?*

*Je vais commencer par vous remettre en contexte ce travail. Le thème de mon TFE est « l'évaluation du potentiel d'intégration architecturale du photovoltaïque ». Le but est donc d'étudier les Building Integrated Photovoltaics, ou BIPV, et leur potentiel énergétique et esthétique. Dans une première partie théorique, je me suis documentée sur le sujet grâce à une revue de littérature. Maintenant, je passe à la partie pratique, où j'analyse un cas d'étude, pour observer comment les BIPV sont intégrés sur un projet concret. L'objectif est de comprendre comment cela se passe sur le terrain, et de recueillir le retour d'expérience de différents acteurs en lien avec l'utilisation de BIPV.*

- Vous êtes interviewé car vous avez participé à la construction du Treurenberg Building à Bruxelles, en 2015. Est-ce bien exact ?
- Comment le projet a-t-il commencé, pour vous ? Qui est venu vous voir ?
- Qui était à l'initiative de l'idée d'utiliser des Building Integrated Photovoltaics ? (Pourquoi ?)
- Quel rôle avez-vous joué ?
- Aviez-vous déjà utilisé des BIPV auparavant ? Dans quel cadre ?
- Avec qui avez-vous coopéré ?
- Comment les BIPV ont-ils influencé le projet ?
- Quels sont les désavantages des BIPV, qu'est-ce qui vous freinerait à refaire un projet en intégrant ?
- Au contraire, qu'est-ce qui vous a plu, ce qui vous motive à les réutiliser dans de futurs projets ?

#### Interview avec les usagers

*Introduction: Hello, thank you for your participation to this interview. As you probably know, I study this building for my master thesis. The purpose of this interview is to have the point of view of the users of the building, the people who work there every day, to see how they feel about the building and what they think about it. As far as the privacy policy is concerned, here is the consent form. My master thesis will be published on the university website, so it will be publicly accessible, but you will stay anonymous. What you say doesn't represent your organisation's opinion. You won't be recorded and the information you will give is only used for this master thesis.*

- *Have you ever heard about Building Integrated Photovoltaics?*
- *Did you know that the building you are working in has some?*
- *Does this change anything in your daily life?*
- *What are the main advantages and drawbacks of working in this energy-efficient building?*
- *Do you find the building comfortable, practical, what do you think about it?*



## Formulaire de consentement

### Travail de fin d'études

#### Accord pour l'utilisation des données d'un entretien

**Interviewer :** Catherine Decrop, étudiante en Master 2 Ingénieur Architecte

Mail : [catherine.decrop@student.uliege.be](mailto:catherine.decrop@student.uliege.be)

Tel : +32 486 308688

**Promotrice :** Professeure Sigrid Reiter, membre du LEMA (Local Environment Management and Analysis) et du département ArGEnCo (Architecture, Géologie, Environnement et Construction) de l'Université de Liège

Mail: [sigrid.reiter@uliege.be](mailto:sigrid.reiter@uliege.be)

Vous avez été invité à participer à des interviews dans le cadre du travail de fin d'études de Catherine Decrop, étudiante en dernière année en ingénieur architecte à l'Université de Liège. Le thème du mémoire porte sur l'intégration architecturale du photovoltaïque en Belgique.

Pour la partie pratique du travail, un cas d'étude concret est analysé, d'un bâtiment intégrant des BIPV (Building Integrated Photovoltaics). Le cas choisi est le Treurenberg Building à Bruxelles, dont AXA est propriétaire et qui est loué par votre organisation.

Le but des interviews est d'obtenir le point de vue des usagers du bâtiment. À travers cinq courtes interviews de cinq à dix minutes, le personnel travaillant au Treurenberg Building sera invité à partager sa perception du bâtiment et des BIPV qu'il comporte.

En signant ce formulaire, les parties s'engagent à avoir pris connaissance des éléments suivants :

- L'interview se déroule sur une base volontaire. Le personnel a le droit de ne pas répondre aux questions ou d'interrompre l'expérience à tout moment et pour tout motif.
- Si vous remettez votre accord, les interviews seront enregistrées en audio pour servir l'étude. Vous avez le droit de révoquer cette autorisation et d'interrompre l'enregistrement à tout moment.
- Tous les enregistrements (audio) seront conservés pour une durée maximale de dix ans à compter du jour de l'interview. Les chercheurs s'engagent à supprimer l'ensemble de ces enregistrements passé ce délai.

- Les données seront manipulées dans le plus strict respect de l’anonymat et de la vie privée, et jamais utilisées à d’autres fins qu’à cette présente recherche de fin d’études.
- Les informations récoltées lors des interviews seront uniquement utilisées dans le cadre de ce TFE. Elles ne seront en aucun cas destinées à d’autres usages.
- Le TFE sera publié sur MatheO (Master Thesis Online), qui est le portail d’accès aux mémoires de master de l’Université de Liège. Tous les membres de l’Université y auront donc accès.
- Il y a la possibilité de verrouiller l’accès au mémoire : appliquer un accès restreint que seuls les membres de l’Université identifiés pourront déverrouiller. Toute autre personne devra demander une autorisation préalable pour consulter le document.
- Dans aucun cas, les personnes répondant à l’interview ne seront nommées dans le travail. Elles seront rendues anonymes.
- Les réponses données par les personnes interrogées représentent leurs opinions personnelles et non celles de l’organisation dont elles font partie. L’étudiant s’engage à spécifier ceci avant la retranscription des interviews dans le TFE.
- À cette date, dans l’état de connaissance actuel des chercheurs, aucun risque n’est encouru par les participants.

Cochez les options qui vous conviennent :

#### **Enregistrement des interviews**

- J’autorise l’enregistrement des interviews.
- J’interdis l’enregistrement de toutes les interviews.

#### **Publication du TFE**

- Le TFE peut-être publié publiquement, puisque le personnel interrogé est anonyme.
- Je souhaite que le TFE soit accessible uniquement en accès restreint.

Je, soussigné(e) \_\_\_\_\_ (prénom, nom), déclare avoir bien pris connaissance et avoir compris les informations reprises ci-dessus. J’ai obtenu des réponses claires et satisfaisantes aux éventuelles questions que j’avais à ce sujet. Je marque mon accord pour participer à cette étude. J’ai reçu une copie de ce formulaire.

Date et signature du chercheur :

Date et signature du représentant de l’organisation participante :

Si vous avez des questions ou que vous souhaitez des précisions sur l’une ou l’autre modalité de cet entretien, veuillez prendre contact avec l’interviewer ou la promotrice.

## Annexe 3 : Questionnaire aux architectes

TFE – Évaluation du potentiel d'intégration architecturale du photovoltaïque en Belgique

Bonjour,

Vous travaillez dans le monde de la construction, vous êtes concepteur, réalisateur ou gestionnaire de projet et vous êtes belge ? Alors ce questionnaire est fait pour vous !

Étant étudiante en dernière année en ingénieur architecte à l'Université de Liège, je réalise mon mémoire de fin d'études sur l'intégration architecturale du photovoltaïque en Belgique. Le but de ce questionnaire est d'évaluer votre opinion, votre expérience et votre connaissance sur le sujet. Ces données serviront uniquement dans le cadre de mon TFE, et vos réponses resteront anonymes. Y répondre ne vous prendra que quelques minutes (~3min). Merci d'avance pour votre participation !

### Questions :

**1) Avez-vous déjà entendu parler de BIPV (Building Integrated Photovoltaics) ?**

- Oui
- Non
- Je ne sais plus

**2) Pourriez-vous expliquer avec vos propres mots ce que sont les BIPV ?**

- .....

➔ Les Building Integrated Photovoltaics (BIPV) sont des matériaux de construction actifs, qui produisent de l'électricité tout en assurant les fonctions d'enveloppe du bâtiment (protection contre l'environnement extérieur, aspect esthétique...). Les cellules photovoltaïques sont directement intégrées dans le revêtement extérieur. Exemple : vitrage PV, façade PV, tuiles solaires ...

**3) Après avoir lu cette définition, quel est selon vous le potentiel architectural des BIPV ?**

Très faible 1-2-3-4-5 Très élevé

**4) Connaissez-vous des exemples de projets qui intègrent des BIPV ?**

- Oui
- Non

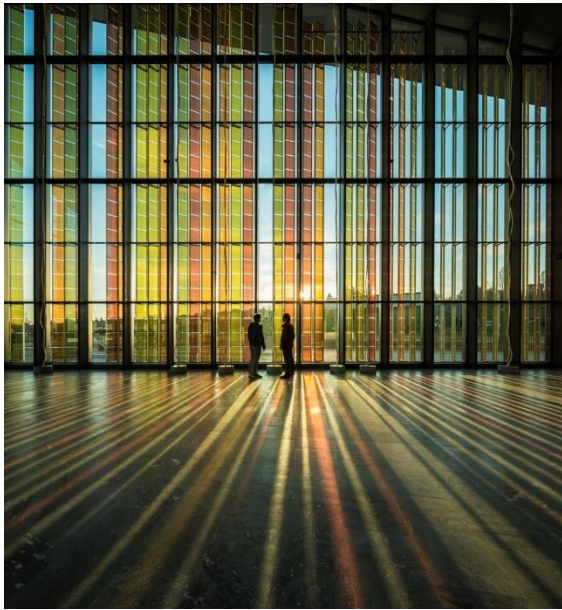
**5) Si oui, combien ?**

- 1
- 2
- 3
- Plus que 3

**6) Pouvez-vous citer un exemple ?**

...

## Quelques exemples...



Vitrage coloré intégrant des cellules solaires  
au SwissTech Convention Center à Lausanne  
Source : ArchDaily, 2014



Façade photovoltaïque à l'école internationale de  
Copenhague  
Source : ArchDaily, 2018

- 7) **Après avoir vu ces photos, est-ce que les BIPV semblent avoir un potentiel architectural ?**  
Très faible 1-2-3-4-5 Très élevé
- 8) **Avez-vous eu déjà l'occasion d'intégrer ces technologies dans un des projets sur lesquels vous avez travaillé dans votre expérience professionnelle ?**
  - Oui
  - Non
- 9) **Si oui, pouvez-vous expliquer le projet en quelques mots ? Quel a été votre vécu de l'expérience ?**  
....
- 10) **Souhaiteriez-vous utiliser des BIPV pour l'un de vos projets ?**  
Pas du tout l'intention 1-2-3-4-5 Très fortement l'intention
- 11) **Qu'est-ce qui vous en empêcherait ? (Plusieurs réponses possibles)**
  - La peur de l'inconnu
  - La charge de travail supplémentaire
  - Le manque de connaissance sur le sujet
  - Le coût plus élevé pour le client
  - L'aspect esthétique insatisfaisant
  - La volonté du client
  - Le faible rendement
  - Autre : ...
  - Aucune de ces propositions
- 12) **Au contraire, quelles seraient vos motivations ? (Plusieurs réponses possibles)**
  - L'attrait pour la nouveauté, la curiosité
  - L'apport d'une solution pour concevoir un bâtiment passif
  - Les préoccupations environnementales

- La réduction de la facture d'électricité du client
- L'aspect esthétique attrayant (grande variété de design)
- L'intégration discrète de PV à l'architecture
- L'image contemporaine que le bâtiment renvoie
- Autre :
- Aucune de ces propositions

### **Données personnelles**

**13) Quel est votre diplôme ?**

- Master en architecture
- Bachelier en construction
- Master : ingénieur civil architecte
- Master : ingénieur civil en construction
- Autre :

**14) Dans votre métier, vous travailler plutôt sur... (Plusieurs réponses possibles)**

- La conception de projets
- La mise en œuvre de projets
- La gestion de bâtiments
- L'expertise technique
- Autre :

**15) Quelle est la taille du bureau dans lequel vous travaillez ?**

- 0-5 personnes
- 6-10 personnes
- 11-20 personnes
- 21-50 personnes
- 51+

**16) De quel genre êtes-vous ?**

- Femme
- Homme
- Autre

**17) Quel âge avez-vous ?**

....

**18) Quel est votre code postal ?**

...

**19) Avez-vous d'autres commentaires, questions, remarques à ajouter ?**

....

**FACULTATIF - Si vous désirez recevoir les résultats de l'enquête, vous pouvez laisser votre adresse e-mail: ...**

Voici mon adresse e-mail si vous voulez me contacter pour de plus amples informations : [catherine.decrop@student.uliege.be](mailto:catherine.decrop@student.uliege.be)

Vos réponses ont bien été enregistrées. Merci beaucoup pour votre participation !

## Annexe 4 : Transcription des interviews dans la grille d'analyse

### Sunsoak design

Le designer solaire Jean-Didiers Steenackers fût interviewé le 18 mars 2022. Voici la grille d'analyse complétée avec les informations les plus importantes.

Acteur		Jean-Didier STEENACKERS, architecte et designer solaire depuis 2004. Il a fondé SUNSOAK DESIGN en 2015.
Commencement du projet	Initiative	C'est l'entreprise ISSOL qui est venu voir M. Steenackers, pour faire le lien entre les architectes et les ingénieurs. L'initiative de placer des BIPV a été prise par VK engineering et les architectes, car ils n'avaient pas assez d'énergie en utilisant uniquement la surface du toit. Ils avaient d'abord considéré d'en mettre sur une seule façade, mais Sunsoak leur a conseillé trois façades. La quatrième façade est couverte d'un matériau factice. Pour obtenir le label BREEAM, ils devaient atteindre une certaine production d'énergie renouvelable (MWh/an), mais ils en manquaient. En plus, le dessin de panneaux PV sur le toit était trop optimiste : à cause des coupes de désenfumage etc. on ne sait pas en mettre partout. Ils avaient un déficit d'énergie, et c'est pour ça qu'ils voulaient utiliser les façades et qu'ils ont contacté ISSOL.
Actions dans le projet /rôle	Conception	M. Steenackers a conçu et installé les façades PV. Il a dessiné les détails, en collaboration avec Assar et Democo, et les plans de montage. Les étapes du projet étaient celles d'un projet classique : avant-projet, avant-projet détaillé, permis, dossiers d'exécution, appels d'offres et chantier. Sunsoak est arrivé au moment du permis, pour aider les architectes à dessiner les façades, et les a accompagnés jusqu'à la mise en œuvre.
	Réalisation	
	Suivi sur chantier	
	Autre	
Expérience précédente BIPV	Oui /non	100%. M. Steenackers est spécialisé en solaire architectural, donc il n'a que des projets comportant des BIPV. Dans d'autres projets, la forme est parfois étudiée à l'avance pour accueillir des BIPV.
Interactions	Architecte	Il était en mission pour le fabricant (ISSOL). Il a beaucoup collaboré avec Assar et Democo.
	Client	
	Entrepreneur	
Influence des BIPV	Faible	La volumétrie du bâtiment était déjà fixée avant, et l'installation de BIPV s'est faite par après. Au permis, la volumétrie était déjà figée mais les matériaux sont passés d'une façade en bardage noir à une façade en bardage noir photovoltaïque (plutôt anthracite pour ne pas faire trop miroir). En Belgique, il n'y a pas besoin de trop de certification.
	Forte	Ça influence fortement la technique, le budget, le planning. Il y a plus de paramètres à prendre en compte, par exemple des câbles à faire sortir pour rejoindre le tableau global.



Opinion sur les BIPV	Avantages	<p>La rentabilité des BIPV en Belgique dépend fort d'un projet à l'autre. Il vaut mieux avoir une forme de module simple, répétée plusieurs fois. Dans certains cas, les clients veulent des belles pièces comme œuvres d'art, et donc financièrement ce n'est pas rentable. Il faut aussi comparer au prix des façades classiques, qui sont généralement chères, donc les prix des BIPV sont facilement absorbés. Une façade BIPV coûte entre 500 et 1500€/m<sup>2</sup>, et une façade « normale » entre 200 et 2000€. Si on remplace du marbre, alors oui on est hyper rentable.</p> <p>A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2022 à Bruxelles, les BIPV bénéficient d'une catégorie différente de Certificats Verts, du coup les façades deviennent très rentables (un peu artificiellement). Sunsoak s'est battu également pour que les tarifs des CV soient gelés au moment du permis, et que les BIPV soient reconnus comme matériau de construction.</p> <p>Il faut calculer le delta : différence de coût entre le matériau classique du bardage et l'option solaire, et parfois celui est égal à 0 (ex : le remplacement de façade sérigraphiée ne présente pas de surcoût). Les façades en marbre ou en belles pierres sont plus chères que les BIPV. Le problème c'est de remplacer des matériaux non nobles : par ex. tôle ondulée sur un carport, là ce n'est pas rentable car le matériau de base est low-cost.</p> <p>C'est surtout pour les façades et 5<sup>ème</sup> façades (les verrières, atrium) que c'est intéressant. Le BIPV se met assez bien dans du double vitrage. Dès qu'on a une façade sud ou une verrière qui surchauffe un peu, c'est très intéressant parce que l'ombre lutte contre la surchauffe (ex : gare maritime à Tour &amp; Taxis, piscine de Nivelles). Là c'est super parce que le support existait déjà : les cellules sont prises dans le verre et les câbles circulent dans les châssis, donc il y a une économie sur les systèmes.</p> <p>En Belgique on nous laisse faire avec le BIPV. C'est assez efficace quand c'est bien étudié.</p> <p>En Belgique il y a moins de problème de surchauffe avec les BIPV qu'au Qatar par exemple. Bruxelles est une ville solaire, tout est mis en œuvre pour avoir de la rentabilité en 7 ans, niveau CV, des contingents viennent de l'étranger pour voir comment c'est fait à Bruxelles parce qu'il y a paradoxalement plus de BIPV à Bruxelles qu'ailleurs.</p>
	Inconvénients	<p>Certains projets ont des problèmes d'ombres (bâtiments, arbre en face) et les micro shadow (petit débord) qui bloquent tout une partie du circuit de l'électricité continue.</p> <p>En France, problème des aspects normatifs : le SCTC a très peur du BIPV, demande plein de certifications. Les bureaux d'étude connaissent mal.</p> <p>Le solaire fonctionne mieux quand c'est ventilé. Les panneaux n'aiment pas avoir trop chaud, surtout en face arrière là où il y a le boîtier de jonction, sinon il perd des pourcentages de rendement. Quand on fait une façade, si elle est non ventilée (ex : mur rideau), la température peut monter jusqu'à 100° derrière, c'est vraiment un problème. Ce qui est fait ici c'est une façade ventilée, du bardage, avec une lame d'air à l'arrière qui les refroidit. Cela pose problème dans du double</p>

		<p>vitrage, surtout dans les verrières, où on est à 100% d'ensoleillement, on arrive aussi à des températures dingues. Il faut faire attention à ça.</p> <p>Un problème à Treurenberg est que le verre est noir et accessible par les gens, donc en été si on met la main sur le panneau c'est brûlant. Si c'était à refaire, M. Steenackers aurait prévu les premiers 2 mètres en autre chose que du BIPV. Ce n'est pas important les ombrages des gens qui passent devant car ce n'est que ponctuel. Mais la réaction exothermique combinée à la couleur noire fait que la surface est très chaude. Le problème est le même pour un bardage noir en verre non BIPV, il va aussi être très chaud.</p>
Autres éléments		<p>La spécificité technique du Treurenberg est le système de fixation : c'est la première fois qu'ils ont développé des cassettes en aluminium comme attache. Democo voulait des crochets simples pour pouvoir trouver une entreprise qui pouvait poser ce type de bardage. Cette innovation permet aussi d'avoir des joints très fins, donc il n'y a pas besoin de pare-pluie, la façade est considérée comme étanche.</p> <p>Le marché des BIPV pour les particuliers est quasi inexistant (ou alors ceux qui ont un château, endroit protégé). L'acteur ne considère pas les tuiles solaires comme du BIPV mais comme une catégorie à part, car il y a plus d'intérêt technologiquement à mettre un panneau solaire au-dessus des tuiles classiques.</p> <p>Sunsoak existe grâce à l'industrie belge, dont ISSOL qui a fourni des projets magnifiques de Renzo Piano, Jean Nouvel... et M. Steenackers a été utilisé pour faire le lien avec ces grands bureaux d'architecture et le BIPV. ISSOL a une quinzaine de projets rien qu'à Bruxelles. Il existe aussi Soltech qui a quelques beaux projets. L'utilisation de BIPV n'est pas encore systématique. C'est souvent les mêmes architectes qui viennent (Assar, Samyn...) des gros bureaux mais pas seulement, c'est culturel. Mais certains considèrent que c'est du High Tech et que ça n'a rien à faire dans leurs façades.</p> <p>NB : il existe d'autres projets plus récents et plus intéressants que le Treurenberg. Ex : les tours du World Trade Center à Bruxelles sont entièrement en BIPV (entreprise : Kyotec). Le cœur en béton est d'origine, et dans quelques mois ils vont refaire des façades.</p> <p>Il y avait une particularité à Treurenberg : la nature du verre et de la cellule PV qui ne sont pas vraiment noires, elles sont anthracites pour ne pas avoir l'effet miroir. Le verre avant est pyramidal en 3D, ce qui le rend mat. C'est ça qui fait que c'est beau, ça ressemble vraiment à un bardage.</p> <p>NB : Il existe un autre bureau à Paris qui étudie le BIPV : Active Skin.</p>

## Interview avec Assar Architects

L'entretien avec Guy Standaert, architecte chez Assar, s'est déroulé le 22 mars 2022. La même grille d'analyse a été complétée.

Acteur		Guy STANDAERT, architecte partenaire chez Assar Architects. Il est directeur du studio et membre du conseil.
Commencement du projet	Initiative	<p>C'était un concours d'AXA qui avait consulté plusieurs architectes. Assar a gagné le projet. Ils ont eu d'emblée une attitude très respectueuse du contexte : par la proportion verticale des fenêtres avec des meneaux centraux, par l'enveloppe en pierre naturelle, le recul vis-à-vis de la muraille d'enceinte, et par la boîte en superstructure en hauteur assimilée à un langage de toiture. Le projet a une assez bonne intégration dans le patrimoine.</p> <p>Le processus de ce projet a commencé par un concours ou consultation d'architectes pour un immeuble à rénover. Assar a démontré que la rénovation était un mauvais choix dans ce cas-ci car l'immeuble était de mauvaise qualité (il y a presque 10 ans). Aujourd'hui à Bruxelles, il est plus aussi facile de démolir un immeuble de cette taille, car écologiquement chaque démolition est un gaspillage énorme d'énergie parce que pour construire ce bâtiment existant, il a fallu dépenser beaucoup d'argent, mais aussi polluer. Actuellement il y a une vraie politique à Bruxelles de maintien de l'existant sauf si vous avez de vrais arguments (ex : ossature bois, plus-value par rapport à l'existant). Mais celui-ci est en béton armé. La structure d'avant était périmée. C'est pour ça aussi que le client a dû renforcer le profil environnemental du projet, pour argumenter que le nouvel immeuble serait beaucoup plus performant que l'ancien, même rénové.</p> <p>Au tout début ils avaient du zinc sur les façades, mais en discutant avec les certificateurs BREEAM, JD et le client, on a voulu pousser la puissance installée des PV. La toiture était assez limitée, avec la terrasse et surtout avec le puit de lumière au milieu. Ils ont proposé des BIPV qui au départ n'étaient pas validés par le client, car c'était trop cher et il voulait mettre des PV ordinaires mais ça Assar ne voulait pas. Les panneaux spéciaux à face diamantée avec un effet noir et matte ont convaincu le client de les réaliser. Les architectes essayaient de développer un immeuble ambitieux au niveau du développement durable et de l'énergie, ils étaient demandeurs d'améliorer les performances de cet immeuble. Et ils devaient avoir le label BREEAM.</p>
Actions dans le projet /rôle	Conception	Assar est un gros bureau d'architectes. M. Standaert a fait la conception, le design. Le plan est assez performant, il y a de très belles ambiances à l'intérieur, et la terrasse belvédère sur tout Bruxelles, c'est magnifique. Le chantier a été suivi par un collaborateur, et lui aussi mais de manière plus distante. Assar a plusieurs domaines de spécialisation (hôpitaux, bureaux, tours, logements etc), ils travaillent en équipe mais aussi en spécialisation. Les compétences demandées à un architecte sont tellement larges aujourd'hui que dans les gros projets comme celui-ci c'est rare de trouver un architecte qui sait tout faire (conception, technique et exécution). Ils fonctionnent en équipe de personnes complémentaires, avec une personne qui est le fil conducteur, le designer, en l'occurrence lui pour ce projet. Pour le Day to Day du chantier, c'était quelqu'un d'autre qui était plus orienté technique.
	Réalisation	
	Suivi sur chantier	
	Autre	

Expérience précédente BIPV	Oui /non	<p>M. Standaert a montré un autre immeuble qu'il a réalisé, qui comporte aussi des panneaux solaires en façade (via partage d'écran). C'est un immeuble qu'il a réalisé avant le Treurenberg, qui s'appelle le Solaris. Il a non seulement des panneaux solaires classiques en toiture, mais aussi des panneaux solaires « glass-glass ». Ce n'est pas du double vitrage, c'est des panneaux avec 2 plaques de verre entre lesquelles il y a un film spécial qui contient les cellules PV. Tout ça est connecté à des onduleurs. Ce qui est intéressant dans cet immeuble c'est que là le PV a permis d'avoir une identité green très marquée esthétiquement, et deuxièmement c'est aussi solution pour réduire d'1/3 les apports thermiques de cette façade plein sud. Il y a 2 rôles principaux : produire de l'électricité et réduire les apports solaires à l'intérieur. Il y aussi un troisième rôle : derrière les panneaux, on a un châssis ouvrant qui s'ouvre. Le panneau sert aussi de sécurité par rapport à l'ouvrant qui permet la ventilation naturelle du plateau. Le PV est très présent en façade sud et en toiture, et tout ça est combiné à de la géothermie, ce qui fait que la climatisation de cet immeuble de bureau est écologiquement neutre. La géothermie a besoin de pompes et de circulateurs pour faire circuler l'eau dans les plafonds actifs : plafonds froids ou chaud réversible, avec de l'eau à 18° qui circule avec des pompes actionnées électriquement par le PV. On est en équilibre entre la consommation électrique des groupes de ventilation et la production du PV. C'est performant et esthétiquement réussi. C'est une tout autre démarche que dans le Treurenberg. Les panneaux ne sont pas opaques, c'est du verre, les cellules sont ajourées, donc de l'intérieur on voit le découpage des cellules. Il est assez fier de cet immeuble, qui date de y a 8 ans, et est précurseur à Bruxelles au niveau environnemental. Maintenant il est assez dépassé en termes d'isolation et de stratégie de protection solaire. Mais il est intéressant au niveau de la démarche. Les PV étaient de l'initiative de M. Standaert. La combinaison PV et géothermique est vraiment pas mal.</p>
Interactions	Architecte	ISSOL a été un très bon partenaire pour cette façade.
	Client	Le client AXA n'est pas promoteur, mais investisseur. Un promoteur construit pour revendre tandis qu'un investisseur construit pour louer avec un rendement derrière. Selon M. Standaert, il vaut mieux travailler pour un investisseur, car il va oser faire des choix plus durables, à plus long terme, pour que l'immeuble garde de la valeur. Alors que pour le promoteur, l'immeuble ne doit pas couter trop cher et être séduisant pour être revendu. Il y a une vraie différence : l'investisseur met de l'argent dans la qualité.
	Entrepreneur	M. Standaert a travaillé avec Sunsoak Design qui fait du PV architectural, ce sont les seuls à sa connaissance qui font ça. C'est une niche qu'ils ont. Même si le PV a perdu un peu de sa superbe et s'est un peu banalisé aujourd'hui, Sunsoak avait l'idée que le PV pouvait être intégré à l'architecture de manière noble, au même titre qu'une pierre de parement ou autre matériau noble.
Influence des BIPV	Faible	Architecturalement, non, ça n'aurait rien changé à la forme. La partie supérieure c'était du zinc, et là c'est presque couleur zinc.

		<p>Ça ne change rien au confort intérieur, qui est lié essentiellement au plafond actif, puisque cet immeuble en est équipé. C'est le meilleur système utilisé aujourd'hui pour refroidir, combiné à un renouvellement d'air hygiénique (surtout avec l'effet Covid). Comme c'est un immeuble climatisé, les fenêtres sont essentiellement fermées. L'air est rafraîchi hygiéniquement et les plafonds actifs diffusent du froid à 18°, sans bruit, à tous les étages. En milieu urbain, il refuse les vitrages colorés (couleur bleutée comme sur les tours). Ce n'est pas compatible avec le patrimoine. Ce sont des verres avec un facteur solaire important pour réfléchir la lumière, et éviter la chaleur à travers les vitrages. Sur le Treurenberg le vitrage est neutre (pas tout à fait clair, performant mais moins que les bleutés). Ils ont mis aussi des stores extérieurs. L'architecture aujourd'hui c'est un peu de contextuel pour avoir une intégration, une identité, et puis c'est énormément de contraintes techniques. En tant qu'ingénieur architecte, c'est un boulot intéressant.</p>
	Forte	<p>Ça a permis de positionner l'immeuble environnementalement de manière plus performante, et c'est ce qui a permis aussi, commercialement parlant, d'attirer un occupant de prestige qui est la commission européenne. (C'est une Division Générale financière très autonome, qui cherchait un immeuble dans le centre, prestigieux avec une belle fonctionnalité et une performance énergétique importante.)</p>
Opinion sur les BIPV	Avantages	<p>Ça peut donner une identité à l'immeuble (ex : Solaris). Le fait de mettre des PV sur des façades verticales permet d'augmenter les surfaces de captage, surtout si on est bien exposé. Un cas n'est pas l'autre, c'est toujours une question de contexte (ex : projet de tour à Bxl avec PV en façade sud, là ça vaut vraiment la peine car il y a 600 m<sup>2</sup> plein sud, la puissance installée sera bien utilisée). A Treurenberg, c'était pour des questions esthétiques que les façades est ouest ont été couvertes de PV, pour avoir une unité. Si on a une façade plein sud pour une tour, avec quelques centaines de m<sup>2</sup>, ça vaut encore plus la peine que sur un petit bâtiment comme le Treurenberg.</p>
	Inconvénients	<p>L'intégration d'éléments techniques dans une façade peut faire débat. Au niveau architectural, c'est pas évident, il faut pas se planter au niveau esthétique. Principal inconvénient selon lui : Dès lors qu'on met une technique en façade comme du PV, la durée de vie est limitée. Après 25 ans, les PV déclinent en puissance. C'est une obsolescence programmée, à cause de la dégradation des PV avec le temps. M. Standaert se pose des questions et se demande s'il va refaire un immeuble avec des BIPV parce qu'il croit que c'est une contrainte dans la vie de l'immeuble qui est difficile à gérer. 25 ans, c'est la durée de vie aujourd'hui d'un immeuble de bureau, après quoi, il faut le rénover. Ça a un sacré coût. Depuis quelques années, les PV augmentent régulièrement de puissance (250Wc avant et 400 Wc maintenant), et ça va encore évoluer. Ça peut encourager une rénovation dans 20 ans pour remplacer les panneaux anciens par des nouveaux beaucoup plus puissants pour avoir plus</p>

		<p>de capacité. La durée de vie limitée des PV impose un renouvellement de la façade dans son esthétique complète et c'est des travaux lourds. Il faut des échafaudages, il faut une grue, ça ne se fait pas facilement. Alors que quand c'est des PV en toitures, il faut juste un élévateur et tout se manipule à la main. Le souci, c'est qui va décider de remplacer tout le PV, qui va remarquer que la performance diminue et prendre la décision de tout renouveler. C'est le point faible qu'il n'a évidemment jamais soulevé devant le client, car à un moment donné il faut y aller avec ses convictions qui étaient qu'il fallait développer le truc.</p> <p>Il faut un client vraiment volontaire pour que ce soit réussi. Si c'est pour mettre du PV ordinaire sur la façade, il faut oublier. C'est très cher pour mettre de la bonne qualité, donc il faut un maître d'ouvrage qui soit prêt à faire les choses très correctement. Sinon il vaut mieux se contenter du PV en toiture qui est discret et facile à poser.</p>
Autres éléments		<p>La stratégie du projet : au niveau urbanistique, il y avait une volonté d'intégration assez forte de l'immeuble dans son environnement. Il y avait du patrimoine et une intégration de gabarit. Il y a un ancien mur de fortifications, qui n'est pas extraordinaire mais ils se sont détachés de ça. Ils sont tenus par des gabarits, puis ils ont rajouté une boîte noire par-dessus. La plupart des gens ne savent pas que c'est du PV. Les architectes ont opté pour une stratégie de maximum de PV en toiture, et puis l'habillage de la boîte noire qui s'intègre aux toitures environnantes en ardoises noires. Les façades de la boîte sont entièrement recouvertes de PV d'un type assez rare, avec des faces diamantées, pyramidales. Ce qui est assez réussi, c'est l'aspect du PV qui est très discret, surtout en milieu urbain et en centre historique, c'était important de ne pas exprimer du PV bleuté. C'est assez discret mais on devine les panneaux. C'est assez cher et contraignant, parce que tout ça doit être modulé sur des proportions de panneaux ayant tous la même largeur.</p> <p>Aujourd'hui, en tant qu'architecte, M. Standaert mise plus sur les protections solaires, sur l'isolation que sur le PV. Il aime bien l'idée, et d'ailleurs l'Europe aussi, on le voit bien avec la crise en Ukraine. L'Europe veut multiplier les moyens de produire de l'électricité. Ça reste une démarche intéressante, mais ce qui est encore mieux, c'est de ne pas devoir climatiser un immeuble. Pour ça, il y a d'autres stratégies : supprimer les faux-plafond pour accéder à l'inertie du bâtiment, empêcher les apports externes par de bonnes protections solaires, ce qui fait qu'on doit juste compenser les apports internes, utiliser des isolants durables, écologiques et pas carbonés comme le PUR. Cela demande pas mal d'investissement. La stratégie de non consommation est plus importante que celle de production, tout ce qui est biosourcé, ça c'est le vrai développement durable. Le marché n'est pas encore tout à fait prêt pour payer les surcoûts que ça engendre, mais il y croit.</p> <p>AXA a investi dans un nouvel immeuble qu'ils ont mis en location pour en retirer un rendement. Les assureurs sont obligés pour garantir leur portefeuille d'assurance d'avoir 20% en immobilier par sécurité.</p>

## Interview avec Democo (29 mars 2022)

Acteur		Patrick ibens, conseiller de la direction chez Democo, une entreprise de construction générale.
Commencement du projet	Initiative	Ça a été une adjudication, mais pas classique, pour ce bâtiment. Il a été conçu par le bureau d'architecture Assar. Le client AXA a fait une adjudication, une offre à plusieurs entreprises, en disant voilà on a autant comme budget, voilà notre bâtiment, qu'est-ce que vous suggérez comme façon de collaborer ? Des collègues ont dit que ce montant était trop peu élevé, mais Democo a été très sensible du point de vue environnemental, voulait faire un pas en avant. Ils ont eu l'idée de faire de ce bâtiment passif un bâtiment zéro-énergie. Pour cela, il faudra quelques légères adaptations. Finalement, AXA a choisi Democo car ils leur avaient proposé de faire un bâtiment zéro-énergie. Avec le budget donné, ils ont essayé d'en faire un bâtiment plus performant.
Actions dans le projet /rôle	<del>Conception</del>	Ils ont fait des dessins au début du dossier pour démontrer comment ils ont transformé un peu le concept du bâtiment pour arriver à ce zéro-énergie. Au début, c'était un bâtiment qui avait déjà des panneaux PV sur la toiture et sur la façade, mais avec moins de surface. Pour arriver à ce 0 énergie, ils ont dû augmenter la surface de PV sur la façade et sur la toiture. Ils ont adapté les plans pour augmenter la surface de toiture. Ils ont été chercher des panneaux plus performants dans le temps, actuellement il y a des panneaux encore plus performants, mais avant c'était le début. Pour arriver aux bons résultats, ils ont dû chercher les éléments les plus performants sur le marché. Avec l'étude du PHPP, ils y sont arrivés. M. ibens est le directeur du siège d'exploitation de Democo pour Bruxelles, mais comme c'était un bâtiment de grande importance pour eux, M. ibens a aussi suivi en détail le chantier. C'était sa fille Joke qui a transformé le bâtiment au niveau architectural pour y arriver. Ils ont changé l'épaisseur d'isolation des façades, les facteurs énergétiques des vitrages, ils ont optimisé les châssis (bois et alu) pour diminuer les pertes d'énergie par les façades. Mais surtout, ils ont optimisé les panneaux solaires. (Partage d'écran pour montrer le document technique avec les adaptations faites au bâtiment proposées par Democo au client et aux architectes). Dans la situation de base, les panneaux étaient disposés sur le toit en forme de U, et au centre il n'y en avait pas. Ils ont fait plusieurs études pour voir comment augmenter la surface des panneaux solaires : d'une part en rajoutant des panneaux, d'autre part en optimisant la surface vitrée. Ils ont cherché à travers plusieurs variantes, avec des formes différentes de toiture, comment optimiser les surfaces de captage. Finalement, ils ont choisi les panneaux SunPower. On voit ici comment le bâtiment était conçu, avec des panneaux sur une surface plus basse, est des panneaux sur un niveau plus haut en forme de U. Les deux ensembles permettaient d'installer 276 panneaux solaires. Et finalement ils ont adapté la toiture en rajoutant 78 panneaux, pour arriver de 90 000 Wc à 116 000Wc. Il y avait encore une autre variante pour arriver à 123 000Wc, en changeant chaque fois légèrement la toiture et l'implantation des panneaux. Il y avait une coupole avec l'exutoire de fumée, et une partie avec les locaux techniques. Comme ça ils pouvaient créer au-dessus de l'atrium une « poutre Vierendeel », qui a des chants charnières,
	Réalisation	
	Suivi sur chantier	
	Autre	

		<p>des raccords fixes. Ils créent la possibilité d'avoir de la lumière dans l'atrium et des panneaux solaires horizontaux, ainsi que la possibilité d'évacuer les fumées par ces coupoles. Ils ont proposé différentes options. Finalement, ils ont fait le nécessaire, ils ont étudié l'inclinaison des panneaux pour avoir le maximum de capacité des panneaux solaires. Ils ne sont pas mis à l'horizontale, mais légèrement en pente. Pour les façades, ils ont aussi changé des détails dans l'architecture pour l'implantation des fenêtres. Ils les ont rehaussées pour que la lumière vienne plus profondément dans le bureau ; au début le niveau des allèges et du linteau était plus bas. Ils ont déplacé tout ça pour que la lumière aille plus loin dans le bâtiment afin de limiter le nombre d'éclairage artificiel. Ils ont aussi augmenté l'isolation dans le bâtiment, aussi bien au niveau de l'habillage en pierre. Ils ont adapté les détails de façade pour optimiser la construction de la façade : il y a deux couches d'isolation.</p> <p>Ils ont aussi fait une étude dynamique du bâtiment, pour voir comment le bâtiment se comporterait avec des heures d'occupation normales. Ça c'est aussi une contrainte avec la commission européenne parce qu'eux ne voulaient pas seulement travailler pendant les heures classiques (9h-18h) mais jour et nuit, et avoir la capacité de l'HVAC pour pouvoir y travailler jour et nuit. Parce que de base ils avaient prévu une ventilation classique, de 9 à 18h, et puis une ventilation naturelle pendant la nuit.</p>
Expérience précédente BIPV	Oui /non	Non, c'est le seul qu'ils ont exécuté avec des panneaux intégrés dans la façade. Parce que c'est clair qu'ils sont plus chers que des panneaux classiques, et aussi un peu moins performants parce qu'ils sont mis à la verticale, ce n'est pas l'optimum pour profiter du soleil.
Interactions	Architecte	<p>Ils ont proposé tout ça à l'architecte. Il y avait aussi le bureau d'étude VK engineering. Mais eux ils ont eu avec eux un bureau d'étude Mark Coppen, un ingénieur avec lequel ils travaillaient fréquemment pour proposer au bureau d'étude comment ils allaient faire. Ils ont vraiment pris en main le dossier, pas comme un entrepreneur classique qui exécute ce qui lui est demandé, ils ont participé à l'expertise technique. Avec Mark Coppen, ils ont optimisé le bâtiment, et puis ils ont proposé ça à VK pour avoir leur approbation.</p> <p>SECO a fait le contrôle de l'assurance pour la responsabilité décennale du bâtiment. SECO était aussi mêlé au projet, ils ont contrôlé si tout ce que Democo proposait était bon.</p>
	Client	
	Entrepreneur	
Influence des BIPV	Faible	<p>Pour la construction de la façade, ce n'était pas tellement plus compliqué.</p> <p>Il n'y a pas plus de travail, ça se pose comme d'autres éléments de façade. Il faut juste faire un peu plus attention niveau protection et pour que les panneaux ne soient pas abimés pendant la construction, mais pour le reste, ça va.</p>
	Forte	Au niveau des prix cela change, c'est plus cher, même si avec le temps le prix de ces éléments a baissé, parce que ce n'est plus nouveau sur le marché.



		<p>Ils ont gagné des prix grâce à ce bâtiment, donc ça a donné à Democo une image de société qui va pour la durabilité. Avec Democo ils essayent d'être un peu en avance sur le marché, ils voulaient être les premiers avec des bâtiments passifs, et c'était le cas, et puis ils voulaient être les premiers avec les bâtiments de bureaux zéro-énergie, et ça continue, ils veulent être en avance. Et pour ça ils peuvent utiliser ces éléments.</p>
Opinion sur les BIPV	Avantages	<p>C'est indispensable pour arriver à du zéro-énergie. S'ils étaient un bête entrepreneur, ils auraient pu faire la même proposition de mettre les panneaux sur la toiture, d'adapter la surface de toiture, et de dire au client ça reste un bâtiment passif, et nous on a mis tout sur la toiture et c'est moins cher. Mais ils ont fait l'inverse : ils ont optimisé le bâtiment en mettant le plus possible de panneaux PV sur la toiture, et en rajoutant aussi sur la façade, pour faire de ce bâtiment un bâtiment zéro-énergie. Sans ces éléments en façade, ils n'auraient jamais pu atteindre le zéro-énergie. Il recommencerait d'autres projets avec des BIPV car ce n'est pas plus compliqué niveau construction. Le prix au Wc est moins important que dans le passé. Cela ne fait que diminuer, comme les éléments sur la toiture, ça diminue aussi.</p>
	Inconvénients	<p>C'est plus cher que des éléments PV classiques, en légère pente sur la toiture. Ce n'est pas vraiment un inconvénient, car il le répète, ils n'auraient jamais pu atteindre le zéro-énergie sans ces éléments intégrés. L'avantage de ne pas mettre des PV c'est qu'on peut encore utiliser les toitures comme toitures vertes, tandis qu'avec les PV on ne sait pas. En théorie, on peut encore faire une toiture verte en dessous des panneaux, mais c'est de la triche, il n'y a rien qui pousse en dessous. Ils sont moins performants puisqu'ils sont mis à la verticale.</p>
Autres éléments		<p>Pendant qu'ils étaient en train de construire, AXA a pu louer le bâtiment à la Commission Européenne, qui y est toujours. Tous les banquiers sont là-dedans quand il y a une crise financière en Europe. Et pour ça ils devaient avoir beaucoup plus d'électricité dans le bâtiment, il fallait dédoubler tous les groupes d'électricité et de ventilation. Le bâtiment actuel n'est plus 0 énergie à cause de tout ce qu'ils ont dû rajouter. Mais le concept de base était zéro-énergie. Actuellement il consomme plus à cause des demandes du locataire (ex : pour l'électricité dans le bâtiment, ils exigeaient du 500 lux au m<sup>2</sup> pour la luminosité des bureaux), leurs exigences étaient plus élevées que pour un bâtiment normal, ce qui fait qu'il n'est plus zéro-énergie.</p>

## Interview avec AXA Real estate (8 Avril 2022)

Acteur		Eric Bloyaert était Project Manager Development Works chez AXA Belgium au moment de la construction du Treurenberg. Il travaille désormais chez Atenor.
Commencement du projet	Initiative	Il travaillait à l'époque chez AXA Real Estate, le propriétaire du bâtiment qui a été démoli et reconstruit. Il était en charge de piloter tout le projet depuis la démolition du projet existant jusqu'à sa livraison. Le projet a fait un long parcours : 6 ans. Au début c'était un bâtiment ancien, qui était en fait une succession de bâtiments qui avaient été connectés entre eux, qui dataient des années 50'-60', qui étaient donc occupés par la Régie des Bâtiments, qui est arrivé en fin de bail avec AXA. Les bâtiments se sont libérés, ils étaient tout à fait obsolètes. Ils se sont posés la question « est-ce qu'on part pour une démolition, une reconstruction, ou une rénovation lourde » ? Ils ont fait un premier concours avec 5 ou 6 bureaux d'architecture dans lequel ils optaient pour une rénovation lourde. Ils leur ont demandé d'étudier le potentiel, les pistes pour remettre au goût du jour ce bâtiment mais en le rénovant lourdement. En fait, il y a un bureau d'architecture, Assar, qui a proposé des interventions assez audacieuses en rénovation et qui a dit en conclusion de sa présentation, mais en fait il faut le démolir ce bâtiment. Donc ça a été un peu le tremblement de terre. Puis ils ont pris les deux meilleurs du concours précédent pour refaire un concours d'architecture mais en démolition et reconstruction. Et puis là ils ont vraiment été convaincu que c'était ça qu'il fallait faire. Il y avait beaucoup d'arguments. Il y a plein de particularités dans ce projet, notamment le fait que c'est un bâtiment d'époque qui était collé à la première enceinte de Bruxelles, qui est un mur du 13 <sup>ème</sup> siècle, qu'ils ont dégagé, restauré et rendu visible lors de la démolition. Il y a un tas d'interventions particulières que la rénovation lourde ne permettait pas, et donc il fallait passer en démolition et reconstruction. Donc ils ont suivi les architectes.
Actions dans le projet /rôle	Conception	Ça paraissait très audacieux à l'époque (2010-2011) mais ils ont choisi de faire un bâtiment passif. C'était dans les premiers, quelques-uns étaient déjà apparus, dont une réalisation d'Assar, le Solaris, qui était une référence à l'époque en termes de performance énergétique. Donc AXA a décidé de se lancer avec un bâtiment passif, ils ont étudié le bâtiment et introduit une demande de permis. Ils ne parlaient pas du tout de BIPV encore à l'époque. C'était un bâtiment très performant pour l'époque mais qui n'était pas à ce point-là révolutionnaire. Ils ont obtenu le permis puis ils ont démarré un appel d'offre aux entrepreneurs pour réaliser les travaux. En fait c'est l'entrepreneur général qui a proposé une variante, une autre manière de faire avec d'autres objectifs : l'entrepreneur voulait faire de cet immeuble un bâtiment net zéro énergie. Passif ça semblait ambitieux, net zéro-énergie ça semblait carrément inatteignable. Mais ils leurs ont démontré, calcul à l'appui, que c'était jouable, et donc ils les ont suivis. Ils les ont désignés pour faire ça et ils ont étudié entièrement le bâtiment avec eux pour passer du standard passif au standard net zéro énergie. Et c'est là qu'en fait le BIPV a commencé à apparaître.
	Réalisation	
	Suivi sur chantier	
	Autre	

		<p>Pour revenir au processus : l'entrepreneur propose de varier, ils réétudient tout et diminuent encore les consommations. Et puis est arrivé Sunsoak Design, à l'époque c'était ISSOL, un spécialiste belge de la fabrication de panneaux solaires sur mesure, des panneaux architecturaux. Et c'est eux qui sont venus avec des solutions pour produire l'énergie dont ils avaient besoin. Parce que vu le site, en plein centre-ville, très urbain où il n'y a pas de surface pour faire de la géothermie, et avec des fondations existantes et de la pollution des sols, la seule solution pour produire de l'énergie sur place c'était le PV. Et avec la toiture ils n'avaient pas assez. Donc c'est comme ça qu'ils ont étudié l'utilisation de panneaux solaires intégrés en façade sur les trois façades bien exposées aux derniers étages. Donc c'est ça toute l'histoire de l'apparition de ces panneaux solaires PV.</p>
<p>Expérience précédente BIPV</p>	<p>Oui /non</p>	<p>C'est la première fois que M.Bloyaert travaillait avec un bâtiment comportant des BIPV, et maintenant il n'arrête plus. Comme c'est des projets extrêmement longs, il n'en a pas fait 50 évidemment. Mais tous les projets suffisamment aboutis dans lequel ils avaient besoin de produire, ils ont au moins étudié la solution BIPV. Et là il est occupé dans un bâtiment dans lequel ils vont faire du BIPV, avec la même équipe, la même personne avec qui il était en contact à l'époque du Treurenberg, qu'il recontacte systématiquement parce que des spécialistes comme ça il y en a très peu : le designer solaire J.D Steenackers. Il est ultra compétent et a beaucoup d'expérience, c'est vraiment une personne ressource par lequel il passe à chaque fois qu'il fait du BIPV. M. Bloyaert n'a réalisé qu'un projet pour l'instant avec des BIPV, parce que les autres projets n'ont soit pas aboutis, soit sont en cours d'étude. Un autre projet c'était pour un concours mais ils n'ont pas gagné donc forcément ils ne l'ont pas réalisé. De manière générale, des bâtiments équipés de BIPV il y en a vraiment beaucoup. Ce qu'il y a beaucoup, et qu'il va d'ailleurs utiliser dans le projet qu'il étudie maintenant, c'est des feuilles de verre dans lequel les cellules sont intégrées, et qui sont soit appliquées en façade soit en toiture. Le bâtiment Solaris en a. C'est une technologie qui se fait fréquemment parce que c'est esthétiquement assez réussi, ça permet de communiquer sur le fait qu'on met des panneaux solaires. Dans le cas du Treurenberg, c'est un peu différent, c'est pas du tout la même technologie ni le même type de panneaux.</p> <p>Le projet qu'il étudie dans lequel ils mettent du solaire intégré au vitrage comme sur le Solaris, ils le font pour une autre raison. C'est un très grand atrium, complètement vitré en toiture, qui est en pente à 45° plein sud, où il y a des problèmes de surchauffe dramatiques. C'est un bâtiment des années 90' qu'ils rénovent lourdement. En mai-juin, ils ont mesuré des pointes de températures de plus de 60° dans le bâtiment, au niveau de ces vitrages. Dans l'atrium, il y a des passerelles qui permettent de passer d'une zone de bureau à l'autre, et donc quand on se retrouve dans ce volume-là, en plein soleil dans une serre, il fait 60°. C'est une catastrophe. A l'époque de sa construction, on se préoccupait moins de ce genre de choses. Pour l'époque, c'était un bâtiment révolutionnaire, un emblème de l'architecture, assez connu (le bâtiment Beaulieu à Auderghem). C'étaient des préoccupations qu'on n'avait pas. Ce qu'ils vont faire de cette immense verrière c'est qu'ils vont remplacer le vitrage actuel par des vitrages avec des cellules PV qui vont apporter de l'ombre comme les</p>

		feuilles d'un arbre. Avec cette solution, ils ne vont pas tout résoudre mais limiter fortement la surchauffe. Ils cumulent deux effets : ils produisent et font de l'ombre.
Interactions	Architecte	Avant qu'ISSOL n'arrive dans l'histoire, ils se sont rendus très vite compte qu'ils n'auraient pas le choix de produire avec les façades, et ils se sont mis à la recherche de gens qui étaient capables de faire ça, et il y en a très peu. Et c'est eux (Sunsoak Design) qui sont venus, par l'intermédiaire de l'entrepreneur général. C'est eux qui ont fait tout le design de ces panneaux solaires, qui ont été en discussion avec ces fabricants de verre et de cellules parce qu'ils ont vraiment fait des panneaux sur mesure pour le projet. Ils ont mis des verres particuliers et des cellules particulières, c'est très spécial comme technologie. La base de la réflexion où on disait « il faut produire avec les façades », ça a été le point de départ. Et puis la question qui suit ça a été : « qui est capable de faire ça ? » Et puis rapidement c'est ISSOL qui est arrivé, ils ont pris contact avec ISSOL et les ont rencontrés. Et puis là eux ont apporté tout leur savoir-faire, leur expérience et ont fait tout le design et calcul des panneaux solaires.
	Client	
	Entrepreneur	
Influence des BIPV	Faible	Ça n'a pas tant d'influence que ça parce qu'ils ne font pas les projets autour de ça. C'est une des technologies à disposition pour faire des bâtiments plus performants. Mais un cas n'est pas l'autre, parfois cela n'a pas de sens de faire ça.
	Forte	Commercialement : le bâtiment est plus vendeur.
Opinion sur les BIPV	Avantages	<p>Pas toujours si chers : dans certains cas, en façade si on arrive à avoir beaucoup de répétitions et à faire des éléments préfabriqués qui sont tous les mêmes, alors ça commence à devenir beaucoup plus intéressant. Dans le cas du Treurenberg, ce qui était particulier, c'est qu'on a voulu recouvrir 100% de la surface, et donc il a fallu faire des panneaux sur mesure. Alors que souvent, en façade, on utilise les allèges qui ont une hauteur constante et donc on peut avoir des panneaux de même dimension qui viennent se poser là. A partir du moment où on peut faire produire X centaines de panneaux tous les mêmes, ça devient plus intéressant économiquement. S'il y a de la standardisation et de la répétitivité dans la façade, ça devient une autre histoire.</p> <p>L'aspect commercial est un des avantages importants, qui permet de rendre cet investissement rentable. Le calcul ici est plus commercial, c'est-à-dire qu'ils affichent un bâtiment net zéro énergie, ce qui apporte beaucoup de visibilité au projet sur le marché immobilier, pour des gens qui veulent le louer ou l'acheter. On a cette image d'un panneau en façade et donc de beaucoup de production solaire qui permet de vendre le produit. AXA garde les produits en propriété et les met en location.</p> <p>Ça produit de l'électricité et limite la surchauffe dans les bâtiments bien exposés.</p>

		<p>C'est un matériau très stable, il résiste bien au temps, il ne se dégrade pas, se nettoie facilement, s'il est bien conçu il est solide. C'est un matériau stable, inerte, c'est du verre. Il y a des cellules encapsulées dedans, mais elles sont entre deux feuilles de verre et ne bougent pas.</p>
	Inconvénients	<p>Ce qui est embêtant, c'est qu'en façade, on n'est pas incliné de manière optimale (40°). On est vertical, ou quasi, parfois on peut leur donner un peu d'inclinaison, mais c'est assez rare. On perd pas mal en efficacité comme ça. Mais parfois on n'a pas le choix.</p> <p>Ils ont calculé en cours de route et par après que l'investissement financier pour faire ses panneaux en façade et donc atteindre le net zéro-énergie n'était jamais remboursé par la quantité d'énergie produite. Parce que c'est comme ça, ça coûte extrêmement cher, et peut-être que ça va évoluer, mais l'électricité « n'est pas encore assez chère » pour rembourser ça sur une période de temps raisonnable. Donc ils avaient remboursé l'investissement en 30 ans, ce qui est trop long. Un bâtiment, ça a une durée de vie d'une trentaine d'année, on démolit des immeubles qui ont 30 ans parce qu'ils sont obsolètes. Normalement un retour d'investissement sur des PV c'est une dizaine d'année maximum. La conclusion de tout ça c'est que si ça avait été uniquement un calcul économique et financier, ils ne l'auraient pas fait. Le BIPV surfe sur ces deux éléments là : ce sont des panneaux en général très chers et qui ne sont pas rentables économiquement.</p>
Autres éléments		<p>Il y a deux particularités, toujours le même principe quand on fait du passif ou du zéro-énergie : d'abord on réduit les consommations autant que possible (isolation, technologie pour chauffer, ventiler, amener de la lumière là où il y en a besoin, stratégie pour diminuer les consommations). Mais il n'y a rien à faire, on consomme toujours. Donc pour compenser cela, on essaye de produire avec de l'énergie renouvelable sur le site. Et quand on arrive à faire : 100% de la production sur un an = 100% de la consommation sur un an (ce n'est pas instantané), c'est ça la définition d'un bâtiment net zéro énergie. Ce n'est pas rentable de faire du net. Les efforts à faire pour les derniers écarts entre le quasi et le net sont tels économiquement parlant, tellement importants, qu'ils ont un retour sur un investissement hyper long.</p> <p>Son métier c'est d'imaginer ce qu'on peut faire d'un projet, puis de constituer une équipe autour d'un programme, avec des architectes des ingénieurs, et faire évoluer un projet jusqu'à déposer un permis et l'obtenir. Puis consulter des entreprises, trouver un entrepreneur pour exécuter les travaux, le suivre et le faire avancer, et puis après ça, gérer le bâtiment.</p> <p>C'est ça qui est extraordinaire avec les BIPV, et J.D Steenackers avait fait une présentation il y a un an, il leur avait refait une mise à jour de l'évolution de toutes les technologies, parce que d'année en année, il y a des trucs incroyables qui se font. Là maintenant ils en sont avec des systèmes où ils prennent une cellule PV carrée (12-15 cm de côté) et ils font des découpes au laser des cellules pour avoir des bandelettes de 1 mm de largeur. Ils découpent la cellule et puis ils l'étirent, donc ça fait un effet comme des lunettes solaires. Ça atténue très fort la quantité de lumière qui rentre, l'éblouissement,</p>

		<p>la chaleur mais ça produit de l'électricité quand même. Ça crée un espèce de vitrage où on a l'impression que c'est tout à fait homogène, mais en fait pas du tout, c'est des fines bandelettes de cellules PV qui produisent. C'est directement inséré dans le vitrage, entre deux feuilles de vitrage. Il y en a plein des nouvelles technologies comme ça.</p> <p>Les vitrages ne sont pas moins chers que les façades BIPV. On met toujours les cellules dans du verre car les propriétés de dilatation, d'électro conductivité sont compatibles, ce sont deux matériaux qui se complètent bien (comme acier et le béton), les cellules PV et le verre fonctionnent bien ensemble, donc c'est toujours dans des feuilles de verre. En façade, il y a des éléments en plus, des prescriptions spéciales (incendies) mais dans tous les cas c'est très cher.</p> <p>Il pense à l'organisme FAST, qui pourrait alimenter le travail avec d'autres réflexions. C'est un groupe de réflexion sur l'évolution des méthodes de construction, sur l'art de bâtir, de penser la ville, avec toujours une approche, un objectif de durabilité, de faire évoluer le secteur vers plus de durabilité de manière très générale. Ça touche énormément de domaines, le sujet BIPV en fait partie mais c'est pas leur cheval de bataille. Ils ont une vision globale de la durabilité, et peut-être plus critique. A l'époque du Treurenberg, on ne parlait que de l'énergie, mais on glisse de plus en plus depuis 1 an ou 2 vers l'impact carbone mais sur un coût en cycle de vie complet. La réflexion change complètement et ça change beaucoup de choses sur la manière d'aborder le sujet. Fabriquer les cellules demande beaucoup d'énergie et impacte pas mal le carbone. Aborder le sujet du côté cycle carbone mérite d'être soulevé. Les conclusions sont différentes du point de vue énergétique, carbone et économique de l'intérêt de faire ce genre de choses. Il n'y a pas d'avantage économique à le faire, parce que c'est cher sauf dans certains cas particuliers. D'un point de vue énergétique c'est clairement avantageux, mais d'un point de vue carbone, il n'est pas si certain que ça. Ça peut être intéressant de comparer les analyses.</p>
--	--	--

## Annexe 5 : Tableaux d'analyse des interviews

### Influence des BIPV selon les experts

Les cases sont complétées avec le point de vue de chaque acteur, plus exactement avec les extraits de verbatim justifiant l'influence des différents facteurs. Ce qui a un faible impact est en bleu clair, et les éléments impactant fortement le projet sont en rouge clair.

	Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
<b>Volumétrie</b>		« Architecturalement, ça n'a rien changé à la forme. »		« La volumétrie était déjà figée avant. »
<b>Esthétique du bardage</b>		« La partie supérieure c'était du zinc, et là c'est presque couleur zinc. »		« Les matériaux sont passés d'une façade en bardage noir à une façade en bardage noir PV. »
<b>Procédure de certification</b>				Faible en Belgique
				Forte en France
<b>Confort intérieur</b>		« Ça ne change rien au confort intérieur, qui est lié essentiellement au plafond actif. »		
<b>Quantité et complexité du travail</b>			« Ce n'était pas tellement plus compliqué. Il n'y a pas plus de travail [...]. »	
<b>Gestion du projet</b>	« Ça n'a pas tant d'influence que ça parce qu'on ne fait pas les projets autour de ça. »			
<b>Technique</b>			« [...] ça se pose comme d'autres éléments de façade. » Forte : « Il faut juste faire un peu plus attention que les panneaux ne soient pas abimés. »	« Ça influence fortement la technique [...]. Il y a plus de paramètres à prendre en compte. (Ex : câbles) »

<b>Budget</b>			« Au niveau des prix cela change, c'est plus cher, même si avec le temps le prix a baissé. »	Forte
<b>Planning</b>				Forte
<b>Valeur commerciale</b>	« Commercialement, le bâtiment est plus vendeur. »	« Ça a permis de positionner l'immeuble environnementalement de manière plus performante, et c'est ce qui a permis aussi, commercialement parlant, d'attirer un occupant de prestige qui est la commission européenne. »		
<b>Image de l'entreprise</b>			« On a gagné des prix grâce à ce bâtiment, donc ça a donné à Democo une image de société qui va pour la durabilité. »	



## Opinion des experts sur les BIPV

Ce tableau reprend les extraits de verbatim avec les avantages en vert, les inconvénients en rouge, et les éléments mitigés ou neutres en orange.

	Client	Architecte	Entrepreneur	Designer solaire
<b>Production d'électricité</b>	« Ça produit de l'électricité, bien sûr. »		« Sans ces éléments de façade, nous n'aurions jamais pu atteindre le zéro-énergie. »	
<b>Esthétique du bardage</b>	« [en parlant des feuilles de verre avec cellules intégrées] : C'est une technologie qui se fait fréquemment parce que c'est esthétiquement assez réussi. »	« A Treurenberg, c'était pour des questions esthétiques que les façades est ouest ont été couvertes de PV, pour avoir une unité. »		« [en parlant de la couleur anthracite et du verre texturé, matte et sans effet miroir] : C'est ça qui fait que c'est beau, ça ressemble vraiment à un bardage. »
<b>Intégration discrète</b>		« Ce qui est assez réussi, c'est l'aspect du PV qui est très discret, surtout en milieu urbain et en centre historique, c'était important de ne pas exprimer du PV bleuté. » « La plupart des gens ne savent pas que c'est du PV. »		
<b>Optimisation de l'espace</b>	« Vu le site, en plein centre-ville, très urbain où il n'y a pas de surface pour faire de la géothermie, et avec des fondations existantes et de la pollution des sols, la seule solution pour produire de l'énergie sur place c'était le PV. Et avec la toiture ils n'avaient pas assez. »	« Le fait de mettre des PV sur des façades verticales permet d'augmenter les surfaces de captage, surtout si on est bien exposé. [...] Ça vaut vraiment la peine pour les grandes surfaces plein sud, la puissance installée sera bien utilisée. »	« Pour arriver au zéro-énergie, on a dû augmenter la surface de PV sur la façade et sur la toiture. »	
<b>Image du bâtiment</b>	« Ça permet de communiquer sur le fait qu'on met des panneaux solaires. »	« Ça peut donner une identité à l'immeuble (Ex : Solaris). »		

<b>Valeur commerciale</b>	« On affiche un bâtiment net zéro-énergie, ce qui apporte beaucoup de visibilité au projet sur le marché immobilier. »			
<b>Réduction de la surchauffe</b>	« [en parlant d'un projet avec une immense verrière] : On va remplacer le vitrage actuel par des vitrages avec des cellules PV qui vont apporter de l'ombre comme les feuilles d'un arbre. Avec cette solution, on ne va pas tout résoudre mais limiter fortement la surchauffe. »			« Dès qu'on a une façade sud ou une verrière qui surchauffe un peu, c'est très intéressant parce que l'ombre lutte contre la surchauffe (ex : gare maritime à Tour & Taxis, piscine de Nivelles). »
<b>Réduction de l'éblouissement</b>	« [en parlant d'un type particulier de BIPV intégré au vitrage] : Ça atténue très fort la quantité de lumière qui rentre, l'éblouissement. »			
<b>Compatibilité avec le verre</b>	« [...] comme l'acier et le béton, les cellules PV et le verre fonctionnent bien ensemble, donc c'est toujours dans des feuilles de verre. »			« C'est surtout pour les façades et 5 <sup>ème</sup> façades (les verrières, atrium) que c'est intéressant. Le BIPV se met assez bien dans du double vitrage. »
<b>Solidité</b>	« C'est un matériau très stable, il résiste bien au temps, il ne se dégrade pas, se nettoie facilement, s'il est bien conçu il est solide. C'est un matériau stable, inerte, c'est du verre. »			
<b>Politique d'incitation</b>				« Bruxelles est une ville solaire, tout est mis en œuvre pour avoir de la rentabilité en 7 ans, niveau Certificats Verts. »
<b>Certifications</b>				« En Belgique on nous laisse faire avec le BIPV. »

				« En France, problème des aspects normatifs : le SCTC a très peur du BIPV, demande plein de certifications. »
<b>Performance</b>	« Ce qui est embêtant, c'est qu'en façade, on n'est pas incliné de manière optimale. On est vertical, [...] on perd pas mal en efficacité comme ça. »		« [...] ils sont aussi un peu moins performants parce qu'ils sont mis à la verticale, ce n'est pas l'optimum pour profiter du soleil. »	« C'est assez efficace quand c'est bien étudié. En Belgique il y a moins de problème de surchauffe avec les BIPV qu'au Qatar par exemple. »
<b>Ombrage</b>				« Certains projets ont des problèmes d'ombres (bâtiments, arbre en face) et les micro shadow (petit débord) qui bloquent tout une partie du circuit de l'électricité continue. »
<b>Chaleur des panneaux</b>				-fonctionne mieux quand c'est ventilé. Panneaux trop chauds : perte de rendement. Dans les façades non ventilées (ex : mur rideau), température trop haute : problème. Treurenberg : façade ventilée (bardage + lame d'air) : ok, refroidie. Problème dans du double vitrage (Ex : verrières très ensoleillées), températures dingues : attention. - Problème à Treurenberg : verre noir + réaction exothermique PV = surface brûlante, accessible par les gens.
<b>Manque de connaissance</b>				« Les bureaux d'étude connaissent mal. »

<p><b>Complexité du projet</b></p>		<p>« Au niveau architectural, c'est pas évident, il faut pas se planter au niveau esthétique. »  « C'est contraignant parce que tout ça doit être modulé sur des proportions de panneaux ayant tous la même largeur. »  « [Pour placer des BIPV] il faut des échafaudages, il faut une grue, ça ne se fait pas facilement. Alors que quand c'est des PV en toitures, il faut juste un élévateur et tout se manipule à la main. »</p>	<p>« Ce n'est pas plus compliqué niveau construction. »</p>	
<p><b>Rentabilité financière</b></p>	<p>- Pas toujours si chers : si standardisation (éléments préfabriqués de la même dimension) et répétitivité dans la façade, économiquement intéressant. Au Treurenberg : sur mesure.  - Ça coûte extrêmement cher et ce n'est pas rentable économiquement.  Remboursement d'investissement sur 30 ans pour ce projet, trop long.  « Si ça avait été uniquement un calcul financier, on ne l'aurait pas fait. Ici le calcul est commercial. »</p>	<p>« Ça a un sacré coût de les remplacer après 25 ans. »  « C'est très cher pour mettre de la bonne qualité, donc il faut un maître d'ouvrage qui soit prêt à faire les choses très correctement. Sinon il vaut mieux se contenter du PV en toiture qui est discret et facile à poser. »</p>	<p>« C'est clair qu'ils sont plus chers que des panneaux classiques. »  « Le prix au Wc est moins important que dans le passé. »</p>	<p>- dépend fort d'un projet à l'autre.  - mieux avoir une forme de module simple, répétée plusieurs fois.  - belles pièces comme œuvres d'art, non rentables financièrement.  - comparer au prix des façades classiques (200 -2000 €/m<sup>2</sup>), façade BIPV (500 – 1500 €/m<sup>2</sup>).  Ex : remplacement du marbre hyper rentable. Problème : remplacer des matériaux low-cost (Ex : tôle ondulée sur un carport)  - grâce aux CV, les façades deviennent très rentables (artificiellement).</p>

<b>Evolution des technologies</b>	« [...] on nous a fait une mise à jour de l'évolution de toutes ces technologies, parce que d'année en année, il y a des trucs incroyables qui se font. »	« Depuis quelques années, les PV augmentent régulièrement de puissance, et ça va encore évoluer. Ça peut encourager une rénovation dans 20 ans pour remplacer les panneaux anciens par des nouveaux beaucoup plus puissants pour avoir plus de capacité. »		
<b>Durée de vie</b>		Principal inconvénient selon lui : durée de vie limitée (25 ans puis la puissance décline). C'est une obsolescence programmée car les PV se dégradent avec le temps. Le renouvellement de la façade coûte cher et impose des travaux lourds. Autre souci : Qui décide de remplacer les PV ?		
<b>Conflit avec les toitures vertes</b>			« L'avantage de ne pas mettre des PV c'est qu'on peut encore utiliser les toitures comme toitures vertes, tandis qu'avec les PV on ne sait pas. »	

## Opinion des usagers sur le Treurenberg Building

	Interviewé n°1	Interviewé n°2	Interviewé n°3	Interviewé n°4	Interviewé n°5
<b>Moderne</b>	« C'est bien, c'est moderne. »	« C'est un bâtiment neuf et pas vieux comme les autres de la Commission Européenne. »			
<b>Lumineux</b>	« C'est lumineux grâce à l'atrium, sauf en bas c'est plus sombre. »	« Il y a de la lumière naturelle grâce à l'atrium et aux openspace. »	« Le plus bas tu vas, le moins de lumière tu auras. Aux étages supérieurs, c'est plus lumineux. »	« Avec les stores baissés, il fait noir à l'intérieur. »	« J'apprécie les fenêtres qui vont de haut en bas et qui apportent plein de lumière. »
<b>Transparent</b>		« Le design promeut la transparence, tout est ouvert. »		« J'aime les fenêtres et la visibilité dans le bâtiment. »	
<b>Impressionnant</b>		« Les gens font Waouh devant l'atrium car c'est un design moderne, avec tellement de hauteur et de lumière. »	« J'aime bien le bâtiment. Les gens disent Waouh c'est moderne. »	« J'aime bien le bâtiment. Il est impressionnant. » « Quand je suis venue ici pour la première fois, j'ai fait Waouh. »	
<b>Fonctionnel</b>		« Les ascenseurs sont bien placés, c'est facile pour les livraisons depuis la rue. »		« L'aménagement est bien. »	« C'est un gros bloc avec des bureaux, mais c'est bien conçu. »
<b>Vues agréables</b>			« Aux étages supérieurs, il y a une belle vue. »	« J'ai de la chance d'être au 7 <sup>ème</sup> étage car j'ai une grande vue sur Bruxelles, on est plus haut que les autres bâtiments. »	« Le chef a une belle vue. »
<b>Bien chauffé</b>	« On n'a pas de soucis de chauffage en hiver. »				

<b>Financier</b>		« C'est un avantage financier car on consomme moins. »			« C'est probablement un avantage pour les factures, mais ce n'est pas pour moi. »
<b>Maintenance des PV</b>		« Il faut juste les laver une fois par an, et sinon on peut les garder 25 ans. »			
<b>Parking</b>	« Il y a trop de places de parking au sous-sol, alors qu'on est à 7 min à pied de la gare centrale. »				« Il y a des places pour des voitures électriques, mais je n'en ai pas. »
<b>Isolation acoustique</b>	« On n'entend rien en termes de bruit. »			« Les murs sont fins, j'entends un peu le bureau à côté de moi. On peut entendre le trafic. »	« Je n'entends rien de l'extérieur. Mais d'un bureau à l'autre, ça pourrait être mieux. »
<b>Confort intérieur</b>		« Le confort intérieur est parfait. Tout est contrôlé par un système électronique central. »		« Dans l'ensemble, c'est confortable, sauf quand il fait chaud. »	
<b>Impossibilité d'ouvrir les fenêtres</b>	« C'est embêtant de ne pas pouvoir ouvrir les fenêtres, car on n'a pas d'air frais dans le bureau. »			« Je n'aime pas ne pas pouvoir ouvrir les fenêtres. On doit sortir du bâtiment si on veut de l'air frais. Parfois il fait suffoquant. » « On se sent comme dans une prison. »	« Le désavantage c'est de ne pas pouvoir ouvrir les fenêtres. »
<b>Ventilation</b>	« En termes de covid, c'est pas terrible. »				« La circulation d'air dans le bâtiment n'est pas comme elle est supposée être. »

<b>Mécanisme automatique des stores</b>	« Les stores ne fonctionnent pas. »			« Les stores automatiques font du bruit quand ils montent ou descendent. Mais pour le moment, ils ne marchent plus parce que quelqu'un les a désactivés. »	
<b>Surchauffe</b>	« On a trop chaud en été, on doit apporter des ventilateurs. »		« Les étages supérieurs deviennent trop chaud en été. »	« Dès qu'il y a du soleil, il fait chaud au bureau (même en mars). On doit utiliser des ventilateurs. »	« Le soleil de l'après-midi crée de la surchauffe dans ce coin. »
<b>Déficiences du système de rafraîchissement</b>	« La clim ne fonctionne pas bien. »		« L'air-co ne marche plus. »		
<b>Impossibilité d'ajuster le confort intérieur individuellement</b>	« On ne peut pas, de façon individuelle, changer la ventilation. »	« En tournant le thermostat d'une pièce, on peut ajuster la température 1,5° au-dessus ou en dessous de la température prévue. »	« J'essaye toujours de tourner le thermostat mais je ne vois aucun effet, je crois que c'est juste placebo. »		« Je ne peux pas ajuster la température. »
<b>Manque d'indications</b>	« J'aimerais des panneaux pour m'y retrouver. »				
<b>Météo belge</b>		« Pour les panneaux solaires, ici il fait plus souvent pluvieux qu'ensoleillé. »			
<b>Hygiène de la moquette</b>				« La moquette contient beaucoup de poussière, et je ne sais pas à quel point c'est lavé. »	



<b>Manque d'espace</b>		« On veut plus d'espaces de réunion. »	« C'est toujours des open space (2-8 personnes) et je n'aime pas ça, mais nous n'avons pas assez de place. »	« Avec le covid, on a réalisé que 2 personnes par bureau c'était mieux que 10. C'est pour ça qu'une partie va déménager. Je suis inquiète pour le jour où on devra évacuer, car 3 bureaux par pièce c'est trop. »	« Je ne partage pas mon bureau, donc c'est confortable pour moi. »
<b>Esthétique du BIPV</b>			« Je trouve que la façade BIPV n'est pas très belle, enfin ce n'est pas extraordinaire au niveau de l'architecture. »		
<b>Vibrations</b>			« Le bâtiment tremble quand un métro ou un train passe. »	« On peut sentir le trafic, surtout au 7 <sup>ème</sup> étage. On peut sentir les vibrations sur le sol, et ça fait peur. Ça me rappelle les tremblements de terre en Grèce. »	
<b>Espaces ou fonctions inutilisés</b>			« La terrasse est très chouette en été, on devrait l'utiliser plus. »	« Je ne vais pas souvent sur la terrasse, car je n'aime pas le soleil, ni la pluie. Mais quand il fait bon c'est agréable. »	« Le bâtiment n'est pas entièrement utilisé (concernant ses capacités, les stores...). » « Il y a des espaces qu'on n'utilise pas. »