
Étude des facteurs facilitant ou contraignant l'utilisation des énergies renouvelables dans des bâtiments à consommation d'énergie

Auteur : Sovet, Loïc

Promoteur(s) : Hauglustaine, Jean-Marie; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5576>

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.

2017 - 2018

**Étude des facteurs facilitant ou contraignant l'utilisation d'énergies renouvelables dans des
bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle**

Mémoire présenté par Loïc SOVET

en vue de l'obtention des grades de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement – finalité Energies Renouvelables (ULg)

Master en Développement Durable – finalité Énergie-Environnement (uni.lu)

Rédigé sous la direction de Jean-Marie HAUGLUSTAINE et Frank SCHOLZEN

Comité de lecture :

- Jean-Marie HAUGLUSTAINE (promoteur)
- Frank SCHOLZEN (co-promoteur)
- Philippe ANDRE (lecteur)
- Stéphane MONFILS (lecteur)

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

* L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et de l'Uni.Lu.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Loïc SOVET – loicsovet@gmail.com

Remerciements

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui, de près ou de loin, me sont venues en aide et m'ont soutenu dans la réalisation de ce travail.

Dans un premier temps, je tiens particulièrement à remercier mon promoteur, monsieur Jean-Marie HAUGLUSTAINE, qui s'est toujours montré très disponible pour me guider, me conseiller, me corriger et me faire parvenir de la documentation afin de m'aider au mieux pour la réalisation de ce mémoire.

Ensuite, je remercie également ma famille et mes proches qui m'ont maintes fois soutenu tout au long de la rédaction de ce travail, et qui m'ont ensuite relu, corrigé et conseillé.

Enfin, je tiens aussi à remercier à l'avance les membres du comité de lecture de ce travail pour le temps qu'ils accorderont dans la lecture de celui-ci.

Merci à vous.

Table des matières

1. Introduction	10
2. Contexte général.....	12
2.1. Réchauffement climatique	12
2.2. Épuisement des gisements énergétiques.....	14
2.3. Consommations énergétiques actuelles	15
2.3.1. Au sein de l'Union Européenne	15
2.3.2. Au sein de la Belgique	17
2.4. Performances énergétiques des bâtiments belges	20
2.4.1. Nearly Zero Energy Building	20
3. Systèmes de production d'énergie renouvelable	22
3.1. Le solaire photovoltaïque	23
3.2. Le solaire thermique	26
3.2.1. Systèmes d'eau chaude solaire	26
3.2.2. Systèmes de préchauffage solaire de l'air amené à la ventilation.....	27
3.3. Les pompes à chaleur	29
3.3.1. Pompes à chaleur à aérothermie	30
3.3.2. Pompes à chaleur à géothermie	31
3.3.3. Pompes à chaleur à hydrothermie	33
3.4. Le petit éolien	34
3.5. La biomasse	37
4. Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation des systèmes de production	
40	
4.1. La production d'électricité.....	47
4.2. La production de chauffage et/ou d'ECS	49
4.3. La production d'énergie renouvelable en général	51
5. Autres facteurs à prendre en compte	53

5.1.	Bâtiments historiques	53
5.2.	Primes et aides financières	55
5.2.1.	Les certificats verts.....	55
5.2.2.	Les primes	55
5.2.3.	Easy'Green	56
5.2.4.	Les déductions fiscales.....	57
5.3.	Concours	57
5.3.1.	Batex.....	58
5.3.2.	Green Solutions Awards.....	59
6.	Cas des bâtiments à très basse consommation	62
6.1.	Maison à Hondelange (Hugé).....	62
6.2.	Le Coating Research Institute (CoRI)	65
6.3.	Logements sociaux à Jette	67
7.	Discussion	70
8.	Conclusion.....	71
	Bibliographie.....	73

Liste des figures

Figure 1 : Anomalies des températures de surfaces du sol et des océans (NASA GISS, n.d.)	12
Figure 2 : Émissions de gaz à effet de serre par secteur dans l'UE en 2015 (European Parliament, 2018).....	13
Figure 3 : Découvertes et production de pétrole brut dans le monde (IEA, 2018)	14
Figure 4 : Évolution de l'énergie finale consommée par type de vecteur énergétique (European Environment Agency, 2017)	15
Figure 5 : Répartition de la consommation de l'énergie finale par secteur au sein de l'UE en 2014 (Eurostat, 2014).....	16
Figure 6 : Évolution des consommations par type d'énergie finale en Belgique (SPF Economie, 2016).....	18
Figure 7 : Répartition de la consommation de l'énergie finale par secteur en Belgique en 2016 (SPF Economie, 2016)	19
Figure 8 : composants d'un système photovoltaïque (Kandt et al., 2011).....	24
Figure 9 : fonctionnement d'un capteur solaire à eau chaude (EnergiePlus, n.d.-b)	26
Figure 10 : efficacité des différents types de capteurs en fonction des températures ambiantes et d'eau à l'intérieur des capteurs. Les courbes représentées ici sont basées sur un rayonnement de 80 W/m ² (ESTIF, 2006).....	27
Figure 11 : Fonctionnement d'un système de préchauffage solaire de l'air de ventilation (WBDG, 2016c)	28
Figure 12 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur (TreeHugger, 2010)	29
Figure 13 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur aérothermique (air-eau) (DepanService, n.d.).....	31
Figure 14 : PAC géothermiques à capteurs horizontaux et verticaux (ALCOR, n.d.).....	32
Figure 15 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur hydrothermique (eau-eau) (Durable, n.d.)	34
Figure 16 : Types de turbines - a. turbine à axe horizontal, b. turbine hélicoïdale, c. rotor Darrieus, d. rotor Darrieus H (Day, Lim, & Yao, 2013).....	35
Figure 17 : Fonctionnement d'une chaudière à pellets (Économie d'énergie, n.d.)	38
Figure 18 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production d'électricité	47

Figure 19 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production d'électricité	48
Figure 20 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production de chauffage et/ou d'ECS	49
Figure 21 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production de chauffage et/ou d'ECS	50
Figure 22 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production d'énergie renouvelable en général	51
Figure 23 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production d'énergie renouvelable en général	51
Figure 24 : Panneaux solaires photovoltaïques placés sur un toit de manière non visible, dissimulés par des parapets (Solar Voltaics, 2012)	54
Figure 25 : Localisation des 19 pays ayant participé à l'édition 2017 du Green Solutions Awards (Construction 21, 2018a)	60
Figure 26 : Maison à Hondelange (Activ' Architecture, n.d.)	63
Figure 27 : Évolution du CoRI, avant et après travaux (EnergiePlus, n.d.-d)	65
Figure 28 : Logements sociaux zéro énergie de Jette (A2M, 2011)	68
Figure 29 : Mutualisation d'espaces entre 2 bâtiments voisins permettant l'implantation d'un plus grand nombre de panneaux solaires (A2M, 2014)	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteur de correction de la production d'électricité annuelle en fonction de l'orientation et de l'inclinaison (EnergiePlus, n.d.-c)	24
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et vertical (Brussels, 2017).....	36
Tableau 3 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation du photovoltaïque au sein d'un bâtiment.....	40
Tableau 4 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation du solaire thermique au sein d'un bâtiment.....	41
Tableau 5 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation de pompes à chaleur au sein d'un bâtiment.....	42
Tableau 6 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation d'éoliennes au sein d'un bâtiment.....	43
Tableau 7 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation de la biomasse au sein d'un bâtiment.....	44
Tableau 8 : Comptage des facteurs encourageant l'implantation d'énergies renouvelables en fonction du type d'énergie généré et répartition de ces facteurs selon leur catégorie	45
Tableau 9 : Comptage des facteurs freinant l'implantation d'énergies renouvelables en fonction du type d'énergie généré et répartition de ces facteurs selon leur catégorie.....	46

Liste abrégations

COP : coefficient de performance

CoRI : Coating Research Institute

CV : certificats verts

CWaPE : Commission wallonne pour l'Energie

ECS : eau chaude sanitaire

EPBD : Energy Performance of Buildings Directive

GES : gaz à effet de serre

IEA : International Energy Agency

kWh : kilowattheure

PAC : pompe à chaleur

PEB : Performance Energétique des Bâtiments

PME : petites et moyennes entreprises

PV : photovoltaïque

TPE : Très petites entreprises

UE : Union Européenne

1. Introduction

La transition énergétique, prônant l'utilisation d'énergie venant de sources renouvelables, représente une des étapes indispensables d'une progression vers un développement durable. Ainsi, un intérêt croissant fût porté aux bâtiments capables de produire autant d'énergie qu'ils en consomment. Ces bâtiments étant aujourd'hui encore assez rares, les raisons pour lesquelles c'est le cas méritent d'être étudiées et analysées. Ainsi, cela conduit à se demander : quels sont les facteurs incitant ou freinant l'implantation de systèmes de production d'énergie à base de sources renouvelables au sein de bâtiments ? Dans quelle mesure ces facteurs interviennent-ils ?

La pertinence de cette problématique s'est d'ailleurs confirmée au cours des travaux préparatoires de ce mémoire. En effet, durant cette phase de recherche bibliographique, il a été constaté que le secteur de l'énergie, dont les gisements conventionnels s'amenuisent continuellement, est responsable de 78% des émissions de gaz à effet de serre dans l'Union Européenne (European Parliament, 2018). Or, 38.1% de l'énergie finale y étant consommée est destinée à assurer les besoins énergétiques des bâtiments (Eurostat, 2014). Afin de résoudre ce problème, diminuer ces besoins énergétiques est une priorité évidente. Néanmoins, ces besoins n'étant jamais nuls, l'énergie utilisée pour y répondre devrait, le plus possible, provenir de sources d'énergies renouvelables et non polluantes. Ainsi, l'implantation de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein même des bâtiments constitue l'une des solutions envisageables quant à cette problématique énergétique et environnementale. Il est donc primordial de comprendre l'origine et l'importance des différents facteurs facilitant ou freinant l'implantation de tels systèmes de production énergétique.

Ce mémoire s'appuie essentiellement sur l'analyse de données issues de la littérature ainsi que des enquêtes menées auprès de bureaux d'architecture spécialisés dans la construction durable. Les informations obtenues devant ainsi déterminer quels facteurs peuvent influencer la décision ou même la possibilité d'installer des systèmes de production d'énergie renouvelable dans le cadre d'une nouvelle construction ou d'une rénovation. L'exploitation de ces sources d'informations avait ainsi pour but de répondre à une série d'interrogations concernant cette problématique : quels sont les incitants à l'implantation de tels systèmes de production ? Quels sont les obstacles pouvant être rencontrés ? Qu'en est-il des bâtiments à très basse consommation ?

Intitulé "étude des facteurs facilitant ou contraignant l'utilisation d'énergies renouvelables dans des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle", ce mémoire tend ainsi à faire l'analyse des facilités et des difficultés rencontrées dans l'intégration de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein de bâtiments, et plus particulièrement au sein de bâtiments à très basse consommation.

Dans ce mémoire, on retrouve tout d'abord une première partie consacrée au contexte général dans lequel s'inscrit ce travail, où l'on observe l'importance et les conséquences des consommations énergétiques des bâtiments au sein de l'UE et de la Belgique.

Ensuite, un chapitre consacré aux systèmes de production d'énergie renouvelable reprend une description des systèmes d'énergie renouvelable les plus souvent rencontrés au sein de bâtiments.

Le chapitre suivant consiste en une étude des avantages et des inconvénients de chacun des systèmes de production vus au chapitre précédent. Ce chapitre propose ensuite une analyse de l'importance des différentes catégories de facteurs auxquelles appartiennent les facteurs encourageant ou freinant l'implantation de systèmes de production d'énergie renouvelable, tous systèmes confondus.

Après cela, un chapitre présente et décrit une série non exhaustive d'autres facteurs à prendre en compte concernant la problématique de l'implantation de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein de bâtiments.

Enfin, la dernière partie de ce mémoire est consacrée à l'étude de cette problématique quant aux bâtiments à très basse consommation en s'appuyant sur des témoignages de bureaux d'architectures ayant conçu de tels projets.

2. Contexte général

2.1. Réchauffement climatique

Depuis maintenant plusieurs dizaines d'années, les températures moyennes à la surface du globe ne cessent d'augmenter, les glaciers fondent, le niveau de la mer monte et la faune et la flore se démènent pour suivre le rythme. C'est ce qu'on appelle couramment le réchauffement climatique.

Il ne fait maintenant plus aucun doute que les humains sont les principaux responsables du réchauffement du siècle passé. D'après les climatologues, ces trois dernières décennies ont été témoins des températures les plus importantes rencontrées dans l'hémisphère nord de notre planète depuis plus de 1400 ans (Notre Planète, n.d.). En cause : la libération de gaz piégeant la chaleur dans l'atmosphère.

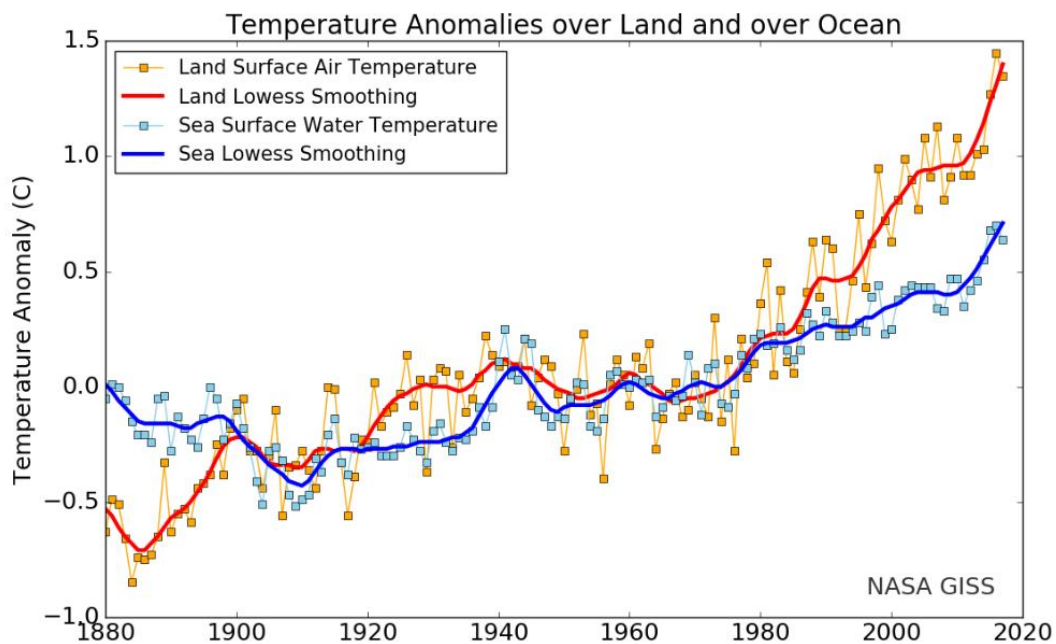


Figure 1 : Anomalies des températures de surfaces du sol et des océans (NASA GISS, n.d.)

Ces gaz, appelés gaz à effet de serre (GES), sont aujourd'hui à des niveaux plus élevés qu'au cours des 650 000 dernières années (National Geographic, n.d.). L'humanité a commencé à émettre en masse ces GES dès la première révolution industrielle, et nous continuons à en émettre en grande quantité aujourd'hui. L'accumulation des gaz à effet de serre dans notre

atmosphère a pour conséquence l'augmentation de la température de l'air et de l'eau, ce qui influence de manière non négligeable le cycle hydrologique de la planète. En effet, les précipitations se font ainsi plus rares et plus courtes, mais d'intensité plus élevée, ce qui engendre l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de certains phénomènes naturels tels que des tempêtes, ouragans, inondations, sécheresses, ... Autant de phénomènes responsables de la 6^e extinction massive en 450 millions d'années (TIR Consulting Group LLC, 2016).

Que pouvons-nous faire face à ce réchauffement ? Le diagramme ci-dessous montre l'importance des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE en 2015 en fonction des principaux secteurs sources. L'énergie est responsable de 78% des émissions de gaz à effet de serre en 2015, dont environ un tiers représente le transport. Les émissions de GES de l'agriculture contribuent à hauteur de 10,1%, les procédés industriels et l'utilisation des produits à 8,7% et la gestion des déchets à 3,2%. (European Parliament, 2018)

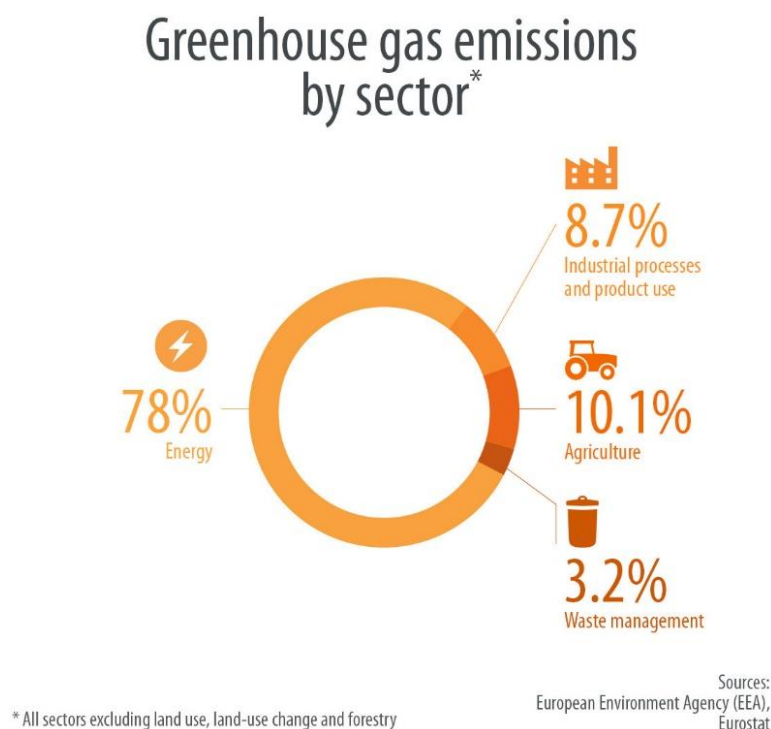


Figure 2 : Émissions de gaz à effet de serre par secteur dans l'UE en 2015 (European Parliament, 2018)

Cette infographie nous fait ainsi prendre conscience de l'importance de la part du secteur de l'énergie dans la problématique des émissions de gaz à effet de serre. Si nous voulons diminuer de manière radicale nos émissions de GES, nous n'avons d'autre choix que de nous concentrer en priorité sur le secteur de l'énergie. Il faudrait ainsi d'abord diminuer nos besoins

énergétiques (par exemple en diminuant les besoins de chauffage des bâtiments), puis en proposant des systèmes (chauffage, transports, ...) moins énergivores et/ou consommant de l'énergie provenant de sources plus respectueuses de l'environnement, n'émettant pas ou très peu de gaz à effet de serre.

2.2. Épuisement des gisements énergétiques

Outre le problème des émissions de GES, principalement en raison de nos consommations énergétiques, nous sommes témoins de l'épuisement graduel de nos gisements énergétiques exploités jusqu'alors. En effet, à force de révolutions industrielles et de développements à grande vitesse, nos gisements énergétiques, tels que des gisements de pétrole, se sont amenuisés au fil des années. Ce phénomène est repris dans la figure ci-dessous.

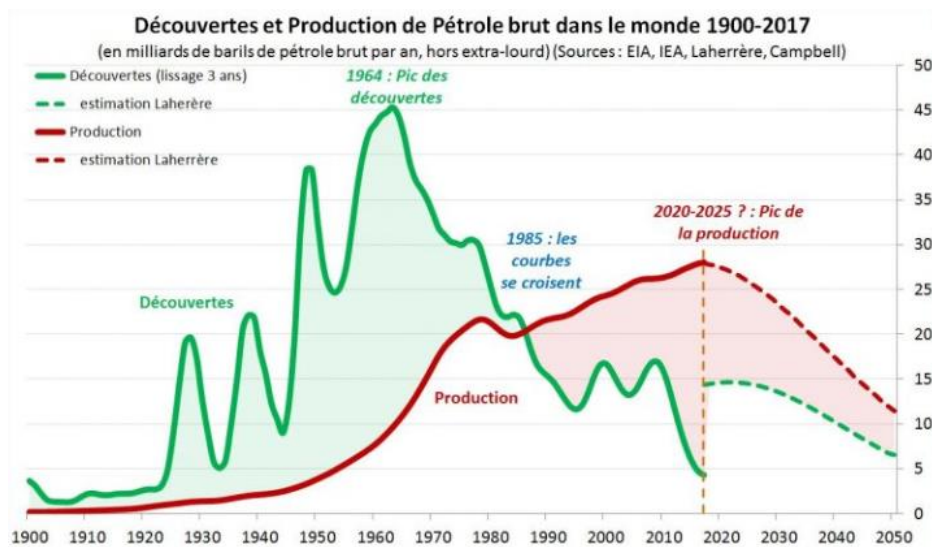


Figure 3 : Découvertes et production de pétrole brut dans le monde (IEA, 2018)

Nos réserves de pétrole, de gaz naturel, de charbon et même d'uranium étant limitées, nous ne pouvons pas continuer à les exploiter indéfiniment de manière si intense. Face à ce problème, il faut donc, cette fois encore, d'abord réduire nos consommations énergétiques d'une part, puis, lorsqu'une consommation d'énergie est malgré tout nécessaire, privilégier l'utilisation d'énergie provenant de sources renouvelables d'autre part.

2.3. Consommations énergétiques actuelles

Partant des constats précédents, il paraît intéressant de s'intéresser aux différentes formes sous lesquelles nous consommons de l'énergie et dans quels objectifs cette énergie est consommée.

2.3.1. Au sein de l'Union Européenne

Entre 2005 et 2014, la consommation d'énergie finale a baissé de 11% (1,3% par an) dans l'Union Européenne. Celle-ci a d'ailleurs diminué dans tous les secteurs, en particulier dans les secteurs de l'industrie et des ménages (16,5% et 14,8% respectivement), mais aussi dans les secteurs des transports (4,5%) et des services (1,7%). En 2014, l'UE avait ainsi atteint son objectif de 2020 concernant sa consommation finale d'énergie. (European Environment Agency, 2017)

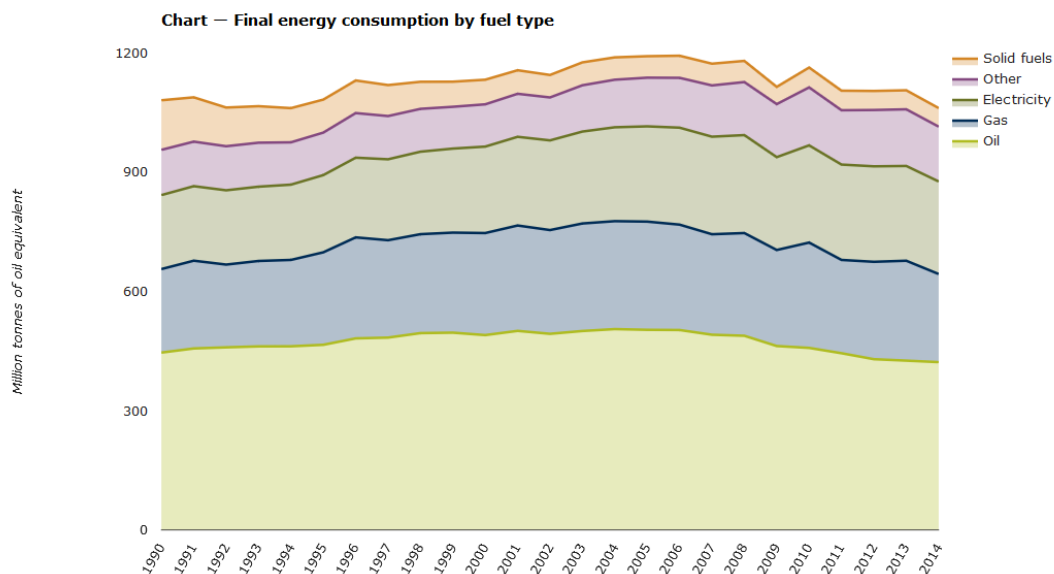


Figure 4 : Évolution de l'énergie finale consommée par type de vecteur énergétique (European Environment Agency, 2017)

Néanmoins, bien que l'énergie finale totale consommée au sein de l'Union Européenne tend à diminuer, nous pouvons observer que, dans la figure ci-dessus, le type d'énergie finale le plus utilisée au sein de l'UE reste actuellement le pétrole, dont la combustion émet des gaz à effet de serre et dont les réserves diminuent jour après jour.

Ensuite, le 2^e type d'énergie finale le plus consommé actuellement au sein de l'UE n'est autre que l'électricité. Or, il ne faut pas oublier que nous parlons ici d'énergie finale. Il est donc important de souligner que, dans l'Union Européenne, près de la moitié de l'électricité est produite à partir de combustible fossile (réserves limitées et émissions de GES) et plus d'un quart de l'électricité est produite à partir de nucléaire (réserves limitées également) (Eurostat, 2017). En outre, il faut également tenir compte du rendement de ces 2 types de production d'électricité. À savoir, en moyenne : 38% pour les énergies fossiles et 33% pour le nucléaire (Conseils thermiques, 2012).

Enfin, suivant de près l'électricité, le 3^e type d'énergie finale le plus consommé actuellement au sein de l'UE est le gaz, lui aussi un combustible fossile et donc émetteur de gaz à effet de serre et dont les réserves sont limitées.

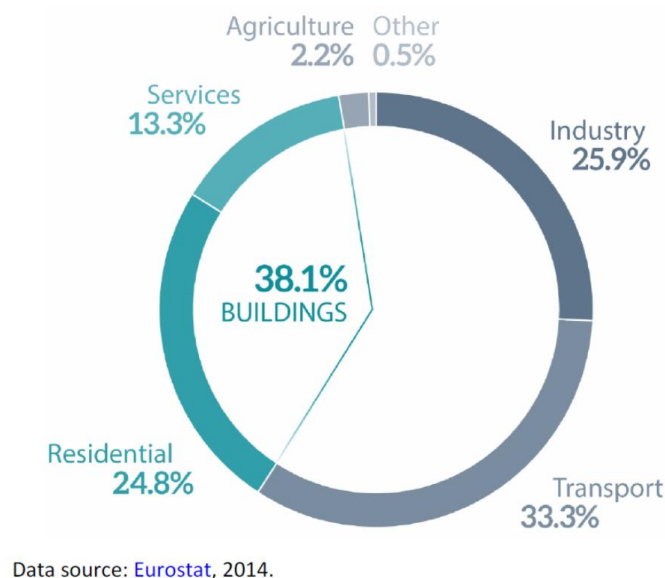


Figure 5 : Répartition de la consommation de l'énergie finale par secteur au sein de l'UE en 2014 (Eurostat, 2014)

Sur le graphique ci-dessus, on peut observer comment sont réparties les consommations d'énergie finale de l'Union Européenne entre les différents secteurs durant l'année 2014. On remarque que le secteur le plus énergivore est celui du transport (33.3%), suivi de près par les secteurs industriel (25.9%) et résidentiel (24.8%). Néanmoins, si l'on s'intéresse à ce que consomme l'ensemble des bâtiments de l'UE, il faut tenir compte à la fois du secteur résidentiel ainsi que du secteur des services. Réunis ensemble, nous observons que les bâtiments consomment 38.1% de l'énergie finale consommée par l'Union Européenne.

Au vu de ces résultats, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments semble dès lors devenir une évidente priorité dans les mesures à mettre en place afin de réduire notre consommation énergétique. De plus, il est estimé que les consommations énergétiques au sein des bâtiments contribuent à environ 36% des émissions de gaz à effet de serre de l'UE, et ce, malgré le fait que la performance énergétique des bâtiments figure à l'ordre du jour de l'UE depuis au moins 1984 (Eurostat, 2014).

La performance énergétique des bâtiments est ainsi d'une importance cruciale pour que l'UE atteigne ses objectifs énergétiques et climatiques de gains d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de GES, notamment pour atteindre l'objectif de 2050 de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 80% par rapport à 1990.

Les bâtiments pourraient également être la clé de la réalisation d'autres objectifs de la politique énergétique de l'UE. En effet, plus de 60% du gaz naturel importé dans l'UE est utilisé dans les bâtiments (Eurostat, 2014). Une demande d'énergie plus faible aiderait à réduire la dépendance aux importations d'énergie. De plus, cela pourrait également contribuer à résoudre le problème des pointes de charge et de la production d'énergie insuffisante dans l'UE, augmentant ainsi la fiabilité du système énergétique de l'UE.

2.3.2. Au sein de la Belgique

Nous venons de voir l'importance des consommations de chaque type d'énergie finale consommée au sein de l'Union Européenne et la répartition de ces consommations en fonction des différents secteurs. Nous en avons conclu jusqu'à présent que l'énergie consommée dans les bâtiments représente une part importante de cette énergie que nous consommons et qu'il serait judicieux de s'intéresser aux performances énergétiques des bâtiments de l'UE ainsi que du type d'énergie qu'ils consomment.

Qu'en est-il des consommations en Belgique ? Observe-t-on le même constat ?

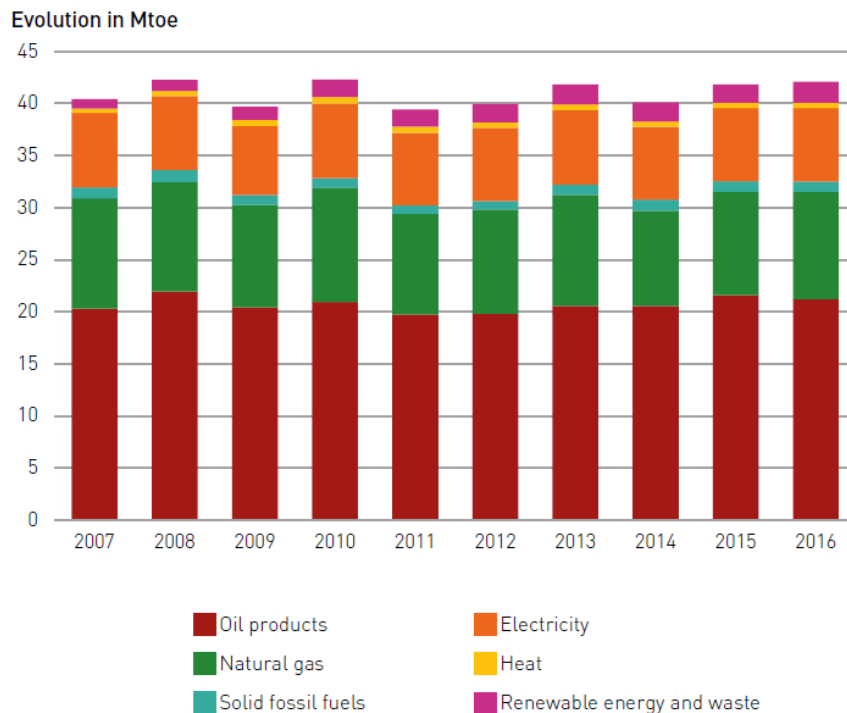


Figure 6 : Évolution des consommations par type d'énergie finale en Belgique (SPF Economie, 2016)

La figure ci-dessus représente l'évolution des consommations d'énergie finale en Belgique de 2007 à 2016. Pour chaque année, l'importance de chaque type d'énergie consommé est représentée.

Concernant la répartition de la consommation d'énergie finale selon le type d'énergie consommé, nous pouvons dire que, qualitativement, nous observons relativement le même constat que pour l'Union Européenne. À savoir : une majorité de consommations de produits pétroliers (50.4%), les 2^e et 3^e types d'énergie finale sur le podium des consommations étant le gaz naturel (24.5%) et l'électricité (16.7%). La différence résidant dans le fait qu'en Belgique, nous consommons plus de gaz que d'électricité (à l'inverse de l'UE dans sa globalité). Il est également à noter que 91,3% de la consommation de gaz naturel est utilisée à des fins énergétiques, dont 36,5% sont consommés dans le secteur domestique. (SPF Economie, 2016)

En outre, il est intéressant de relever que, bien que la tendance des consommations totales au sein de l'UE était à la baisse ces dernières années, on ne retrouve pas en Belgique le même constat. En effet, sur les 10 dernières années reprises dans ce graphique, on observe plutôt une oscillation autour d'une valeur moyenne. On ne peut donc pas dire que la tendance des consommations totale en Belgique est à la baisse, elle reste globalement constante. Voire même en augmentation si l'on ne regarde que les 3 dernières années représentées sur le graphique précédent.

Qu'en est-il de l'importance de la part des différents secteurs dans lesquels sont consommées ces énergies ?

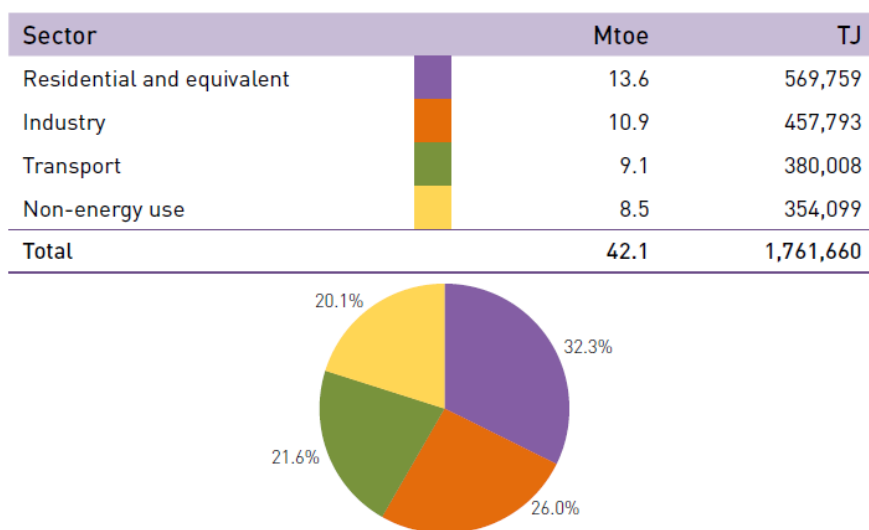


Figure 7 : Répartition de la consommation de l'énergie finale par secteur en Belgique en 2016 (SPF Economie, 2016)

Sur le graphique ci-dessus, on peut observer comment sont réparties les consommations d'énergie finale de la Belgique entre les différents secteurs durant l'année 2016.

Sur ce graphique, nous pouvons observer que, tout comme pour l'Union Européenne dans sa globalité, c'est le secteur des bâtiments (résidentiel et équivalent) qui consomme le plus d'énergie finale en Belgique. À hauteur de 32.3% en 2016, la part de la consommation d'énergie finale du secteur domestique et équivalent a été principalement couverte par le gaz naturel (40.7%), l'électricité (26,7%) et les produits pétroliers (26%) (SPF Economie, 2016).

Le deuxième secteur consommant le plus d'énergie finale est celui de l'industrie, suivi du secteur du transport. Le secteur « utilisation non énergétique » couvre les combustibles utilisés comme matières premières dans les différents secteurs et qui ne sont pas consommés en tant que combustible ou transformés en un autre combustible (IEA, n.d.) tels que le white spirit, les cires de paraffine, ...

Bien que la part de la consommation d'énergie finale du secteur des bâtiments en Belgique soit légèrement inférieure à celle de l'UE dans sa globalité (32.3% contre 38.1%), celle-ci reste néanmoins importante et mérite une attention particulière. Il est de ce fait tout à fait pertinent de s'intéresser aux performances énergétiques des bâtiments belges ainsi que des types d'énergie qu'ils consomment.

2.4. Performances énergétiques des bâtiments belges

Face à cette consommation importante d'énergie au sein de ses bâtiments, la Belgique a eu recours depuis plusieurs années à des réglementations, de plus en plus strictes à chaque mise à jour, concernant la performance énergétique des bâtiments belges. Ces réglementations ont beaucoup évolué au fur et à mesure des années, instaurant des critères toujours plus exigeants et s'appliquant à toujours plus de cas.

En Belgique, depuis les lois de régionalisation de 1980, les matières d'énergie rapportées aux bâtiments ont été reprises dans les compétences régionales, ce qui implique que les réglementations peuvent être différentes dans les trois Régions belges (Hauglustaine, Delnoy, & Levaux, 2009).

Ainsi, la première réglementation belge concernant la consommation énergétique des bâtiments provient de la Région wallonne qui, en 1985, instaure un critère relatif à l'isolation globale ainsi que la compacité des logements wallons. Les 2 autres Régions ayant instauré leur propre réglementation dans les années qui suivent. (Spies, 2013)

Ensuite, en 2002, c'est une directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) qui voit le jour. Cette directive contraint ainsi les États membres de l'Union Européenne à instaurer une réglementation sur la performance énergétique de leurs bâtiments (PEB). (CSTC, 2016)

Néanmoins, comme nous venons de le voir précédemment, la consommation d'énergie des bâtiments reste encore aujourd'hui importante. C'est pourquoi, en Wallonie par exemple, la réglementation PEB bis prévoit que, pour le 1^{er} janvier 2021, les exigences PEB atteignent le standard NZEB (Nearly Zero Energy Building) (SPW, 2017).

2.4.1. Nearly Zero Energy Building

« Nearly Zero Energy Building », pour « Bâtiment à consommation énergétique quasi nulle », est un bâtiment présentant une très haute performance énergétique et pour lequel les très faibles besoins énergétiques doivent être assurés dans la grande majorité par l'apport d'énergie provenant de sources renouvelables. L'énergie renouvelable devant être produite sur place ou à proximité. (IGBC, 2016)

Ainsi, tous les bâtiments en Wallonie dont la demande de permis de bâtir sera introduite après le 1^{er} janvier 2021 devront atteindre le standard NZEB (IGBC, 2016). Cela signifie que, en plus de devoir être très performant énergétiquement, chaque bâtiment construit devra pouvoir répondre à une grande part de ses besoins énergétiques par le biais de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein même du bâtiment ou à proximité immédiate.

Quels sont donc les systèmes de production d'énergie renouvelable pouvant être implantés au sein de ce type de bâtiment ?

3. Systèmes de production d'énergie renouvelable

Il existe différentes ressources en énergie renouvelable couramment utilisées pour les applications du bâtiment. À savoir : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la géothermie et la biomasse.

Néanmoins, avant de choisir une technologie d'énergie renouvelable appropriée à appliquer à un projet de bâtiment, il est important de prendre en compte un certain nombre de facteurs et de se poser une série de questions. Par exemple :

- Quelles sont les ressources énergétiques renouvelables disponibles sur place ou à proximité ?
- Dans quelle mesure existe-t-il un espace disponible et suffisant afin d'implanter la/les technologie(s) de production d'énergie renouvelable ou un éventuel espace de stockage de combustible (par ex. pour la biomasse) ?
- Quelles sont les incitations financières existantes pour compenser le coût de l'installation du système d'énergie renouvelable ?
- Qu'en est-il de la réglementation locale concernant les systèmes d'énergie renouvelable ?
- Dans le cas d'un bâtiment existant, y a-t-il un désir de préserver les caractéristiques architecturales existantes ?
- Dans le cas d'un nouveau bâtiment, dans quelle mesure souhaite-t-on intégrer de manière homogène le projet dans son environnement ?
- Quels sont les types et l'importance des consommations énergétiques à compenser par l'installation d'énergie renouvelable ?

Parmi les exemples de technologies de production d'énergie renouvelable pouvant être incorporées aux systèmes énergétiques des bâtiments, nous pouvons citer :

- Le solaire photovoltaïque
- Le solaire thermique
- Les pompes à chaleur
- Le petit éolien

- La biomasse

Chacune de ces technologies vont être décrites brièvement dans ce chapitre.

3.1. Le solaire photovoltaïque

Le solaire photovoltaïque (PV), utilisé généralement sous forme de panneaux photovoltaïques, reste aujourd'hui la première technologie à laquelle nous pensons lorsque l'on parle de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein d'un bâtiment.

Les panneaux photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité. Ils peuvent être montés sur un bâtiment ou à proximité. Un onduleur convertit le courant continu généré par les panneaux en courant alternatif, injectable sur le réseau ou utilisable directement sur place.

La plupart des systèmes PV installés aujourd'hui sont sous la forme de panneaux, généralement constitués de cellules solaires combinées en modules. En moyenne, une installation standard de panneaux PV en Belgique dans un bâtiment résidentiel comporte 20 panneaux PV (Energreen, n.d.). Dans la majorité des cas, les panneaux PV sont fixés dans une position unique. Néanmoins, ils peuvent également soit être montés sur des structures inclinées dont l'orientation varie en fonction de celle du soleil sur base saisonnière ou soit sur des structures possédant 2 axes de rotation qui permettent d'orienter les panneaux vers le soleil à tout moment de la journée (Kandt, Hotchkiss, Walker, Buddenborg, & Lindberg, 2011). La figure ci-dessous illustre les composants d'une installation photovoltaïque.

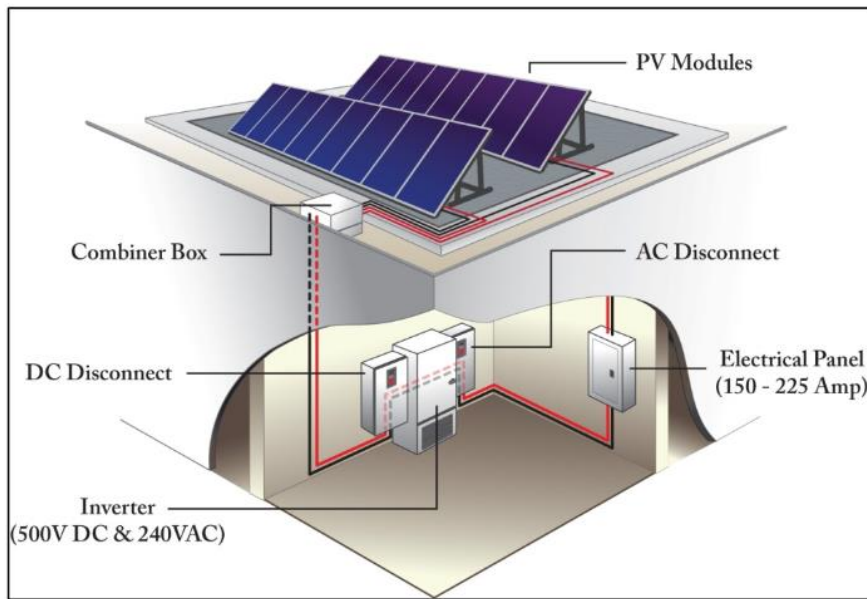


Figure 8 : composants d'un système photovoltaïque (Kandt et al., 2011)

Le principal défi que pose l'implantation de technologies solaires photovoltaïques consiste à assurer un emplacement approprié pour une production maximale d'électricité. Une installation solaire idéale serait située dans un endroit non ombragé, orienté au sud, avec un angle d'inclinaison optimal, à savoir : 35° en Belgique. Le tableau ci-dessous illustre l'importance qu'a l'orientation et l'inclinaison des panneaux PV sur la production d'électricité annuelle. Chaque pourcentage dans ce tableau correspond à un facteur de correction à apporter à l'estimation de la production annuelle d'électricité par rapport à une orientation et une inclinaison idéales (au sud et à 35°).

Tableau 1 : Facteur de correction de la production d'électricité annuelle en fonction de l'orientation et de l'inclinaison (EnergiePlus, n.d.-c)

		Inclinaison [°]						
		0	15	25	35	50	70	90
Orientation	Est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	Sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Sud	88%	96%	99%	100%	98%	87%	68%
	Sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

Cependant, tous les sites ne conviennent pas aux technologies solaires. Les quelques étapes suivantes peuvent être utiles afin de déterminer dans quelle mesure les technologies solaires sont appropriées pour un site (Hayter & Kandt, 2011) :

- Vérifier la disponibilité d'une zone non ombrée pour l'installation solaire PV, en particulier entre les heures de pointe du soleil, au milieu de la journée. L'ombre, généralement causée par des arbres, des bâtiments à proximité, des équipements de toit (tels que des cheminées) ou le relief, réduirait la production des panneaux solaires.
- Étudier la possibilité d'intégrer le système PV directement dans les matériaux, tels que le toit, les fenêtres ou les auvents.
- Obtenir des données de consommations d'électricité les plus complètes et précises que possible afin de dimensionner au mieux le système PV. Selon les désirs et les possibilités du projet, les systèmes PV peuvent être conçus pour :
 - Soit, fournir de l'électricité simultanément avec le réseau,
 - Soit, fournir de l'électricité indépendamment du réseau (système autonome avec batterie),
 - Soit, être à la fois connecté au réseau tout en ayant un système de stockage pour s'en passer au maximum.

Les systèmes de production photovoltaïque peuvent être conçus pour alimenter un pourcentage quelconque de charge électrique d'un bâtiment. D'un très faible pourcentage à plus de 100% de la charge. Les contraintes étant : la surface disponible pour les panneaux, les ressources solaires et la politique du réseau électrique concernant la réinjection de courant. Lorsque l'on considère un système qui sera connecté au réseau, il est essentiel de comprendre les règles applicables.

- Garder à l'esprit la différence d'efficacité des divers modules PV. Un nombre moins élevé de modules constitués de cellules à rendement plus élevé (telles que les cellules monocristallines) serait nécessaire pour obtenir approximativement la même puissance de sortie que d'autres modules constitués de cellules de moindre efficacité (telles que les couches minces). Par conséquent, si l'emplacement d'un projet dispose d'un espace assez limité, le choix de modules composés de cellules à haute efficacité et, potentiellement, plus cher, peut s'avérer le choix le plus logique. Par contre, si un projet dispose d'un d'espace

abondant, le choix de modules ayant un rendement plus faible et, potentiellement, moins coûteux peut s'avérer être judicieux.

3.2. Le solaire thermique

L'utilisation du solaire thermique peut être un moyen économiquement intéressant de générer de l'eau chaude sanitaire (ECS) ou même de préchauffer l'air destiné à être apporté au bâtiment par la ventilation. L'utilisation du solaire thermique permettrait ainsi d'éliminer à la fois le coût de l'électricité ou du combustible fossile qui aurait été nécessaire au chauffage de l'ECS ou de l'air entrant, ainsi que les impacts environnementaux associés.

3.2.1. Systèmes d'eau chaude solaire

Les systèmes d'eau chaude solaire utilisent un collecteur pour absorber et transférer l'énergie des rayons du soleil à l'eau, qui est ensuite stockée dans un réservoir isotherme jusqu'à son utilisation. La figure ci-dessous illustre le fonctionnement d'un système de chauffe-eau solaire.

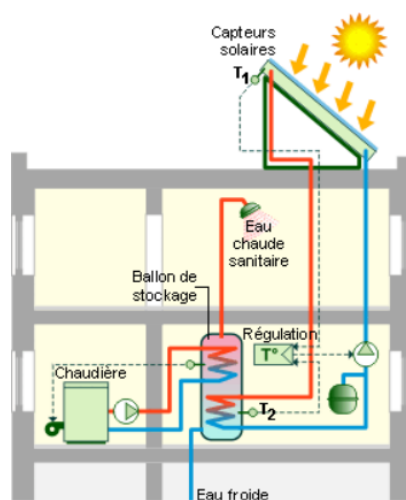


Figure 9 : fonctionnement d'un capteur solaire à eau chaude (EnergiePlus, n.d.-b)

Ces systèmes sont classés en fonction du type de collecteur. Il en existe de 3 types :

- Les capteurs non vitrés : bien adaptés pour des besoins d'eau légèrement chauffée (ex. : piscines)
- Les capteurs plats vitrés : bien adaptés pour les besoins en ECS

- Les collecteurs tubulaires sous vide : bien adaptés pour des applications nécessitant de hautes températures

Le graphique ci-dessous illustre les performances de chaque type de capteurs en fonction de la température d'eau désirée.

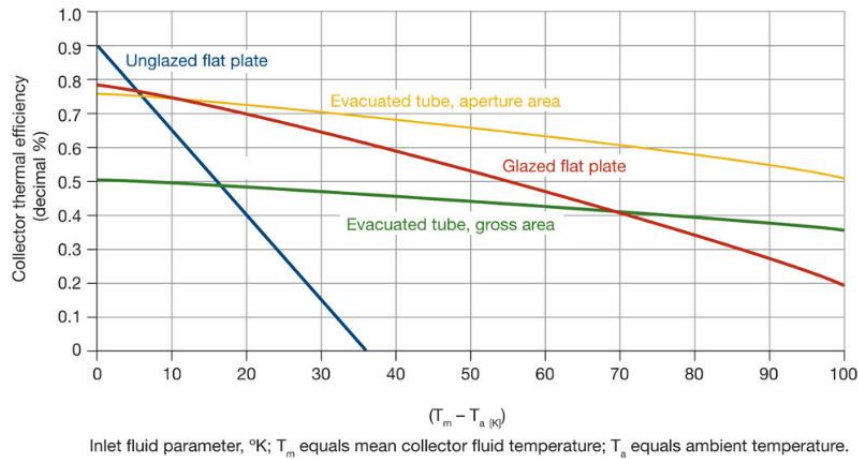


Figure 10 : efficacité des différents types de capteurs en fonction des températures ambiantes et d'eau à l'intérieur des capteurs. Les courbes représentées ici sont basées sur un rayonnement de 80 W/m^2 (ESTIF, 2006)

En général, les systèmes de chauffe-eau solaire sont fiables et nécessitent peu d'entretien, car ils comportent peu de pièces mobiles. Les principaux composants d'un système de chauffe-eau solaire sont (Hayter & Kandt, 2011) :

- Les collecteurs
- Un échangeur de chaleur
- Des pompes
- Un stockage d'eau chaude
- Des commandes de contrôle et de réglage

3.2.2. Systèmes de préchauffage solaire de l'air amené à la ventilation

Les systèmes de préchauffage de l'air de ventilation solaire chauffent l'air avant que celui-ci n'arrive au système de ventilation. Cette technologie est bien adaptée pour des bâtiments nécessitant un grand débit de ventilation.

En principe, le soleil réchauffe la surface du collecteur, la chaleur est ensuite transférée vers une couche d'air limite, adjacente au collecteur. Ces collecteurs étant percés, les ventilateurs, placés en aval à ce schéma, aspirent ainsi l'air préchauffé de cette couche limite. La figure ci-dessous illustre le fonctionnement de cette technologie. (EnergyTrend, 2011)

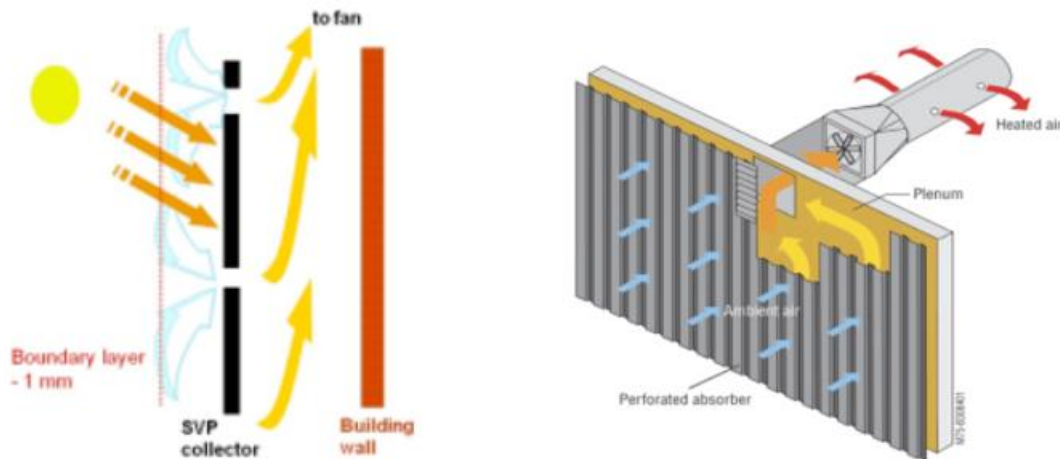


Figure 11 : Fonctionnement d'un système de préchauffage solaire de l'air de ventilation (WBDG, 2016c)

Ne nécessitant pas d'installation complexe, des collecteurs de préchauffage d'air de ventilation solaire peuvent être aisément ajoutés à un bâtiment existant dans un projet de rénovation. Les facteurs à prendre en compte pour déterminer si le préchauffage d'air de ventilation solaire est une bonne option pour un projet sont, entre autres (WBDG, 2016c):

- Une demande suffisante de débit de ventilation
- Un climat avec des besoins de chauffage suffisants (degrés-jours de chauffage) pour justifier l'investissement
- La disponibilité d'un grand mur non ombragé suffisamment bien orienté pour supporter le collecteur de préchauffage de l'air de ventilation solaire
- Les coûts des autres sources d'énergie qui auraient été nécessaires pour le chauffage, telles que l'électricité, le mazout ou le gaz
- Le collecteur de préchauffage de la ventilation solaire ne doit pas être placé à proximité de sources de pollution afin d'éviter la pollution de l'air intérieur.

Ces systèmes sont peu coûteux, fiables (car pas de pièces mobiles autres que le ventilateur), nécessitent peu d'entretien, sont très efficaces (jusqu'à 80% d'efficacité) et ne requièrent aucun stockage (Hayter & Kandt, 2011).

3.3. Les pompes à chaleur

Comme les réfrigérateurs, les pompes à chaleur fonctionnent avec le principe de base selon lequel un fluide caloporteur absorbe de la chaleur lorsqu'il s'évapore en gaz (à l'évaporateur) et dégage de la chaleur lorsqu'il se condense (au condenseur), retrouvant ainsi son état liquide. Pour qu'un tel système puisse fonctionner, un apport d'électricité est nécessaire pour alimenter un compresseur, servant à réchauffer la vapeur du fluide caloporteur dans le circuit. Le fonctionnement d'une pompe à chaleur est illustré dans la figure ci-dessous.

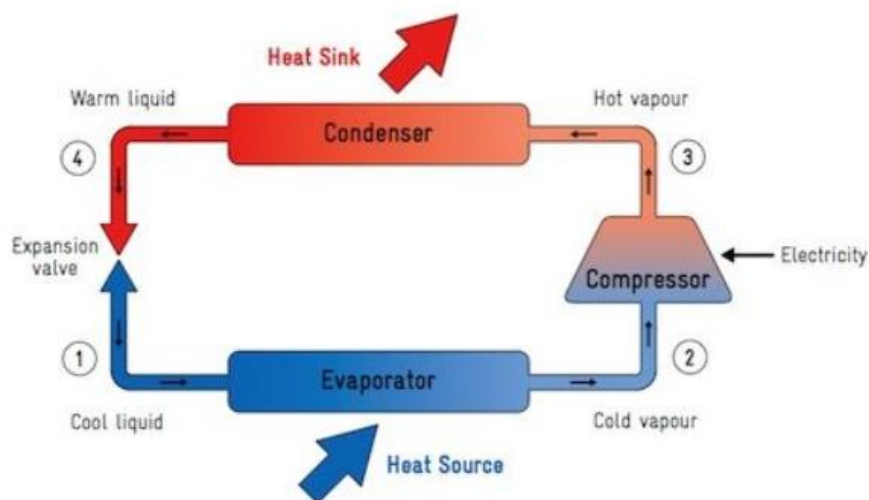


Figure 12 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur (TreeHugger, 2010)

Les technologies de pompe à chaleur (PAC) peuvent être utilisées pour répondre aux besoins de chauffage et de refroidissement (si PAC réversible) dans les nouvelles constructions ainsi que pour les projets de rénovation. Ces systèmes peuvent permettre de faire des économies de combustible et même d'électricité par rapport aux systèmes de chauffages ou de refroidissement conventionnels. Néanmoins, l'installation d'une PAC reste un investissement et la rentabilité de celui-ci va dépendre des prix des autres combustibles utilisables ainsi que du prix de l'électricité.

L'intégration de ces technologies dans les grands projets de rénovation entraînera généralement des coûts d'installation plus élevés que dans les nouveaux projets de construction, en particulier pour les types de pompes à chaleur dont l'installation est plus complexe, mais peut être plus efficace que les unités de chauffage et de refroidissement classiques. Dans les explications suivantes, nous ne considérerons que l'utilisation des pompes à chaleur dans des objectifs de chauffage.

Il existe 3 types majeurs de pompes à chaleur, classées selon le type d'environnement (air, sol ou eau) dans lequel sera placé l'évaporateur (source froide). Le condenseur quant à lui est raccordé au système de stockage (ballon, ...) ou directement au distributeur de chaleur choisi (ventilo-convecteur, chauffage au sol, ...) qui aura pour but de réchauffer l'air intérieur du bâtiment (source chaude).

3.3.1. Pompes à chaleur à aérothermie

Les pompes à chaleur aérothermiques désignent les systèmes qui utilisent l'air comme source de chaleur afin de garantir les besoins de chauffage. Dans le cas d'une pompe à chaleur aérothermique, l'évaporateur se situe donc dans l'air, constituant la source froide.

- Les **avantages** :

- Ne nécessite pas de gros travaux, ni d'autorisation administrative (Bouvard, n.d.)
- Utilisation simple
- Investissement peu important

- Les **inconvénients** :

- Grande variation de rendements. Étant donné qu'une PAC à air capte l'énergie de l'air ambiant, son rendement va être directement lié à la température extérieure.
- Rendement assez faible. Le coefficient de performance énergétique (COP) – déterminé par le quotient de la quantité de chaleur délivrée au condenseur divisée par la quantité d'énergie apportée au système (quantité d'électricité apportée au compresseur) – tourne autour de 2.5 (InfoEnergie, n.d.).
- Peuvent être bruyantes

Le fonctionnement d'une telle pompe à chaleur est illustré à la figure suivante.

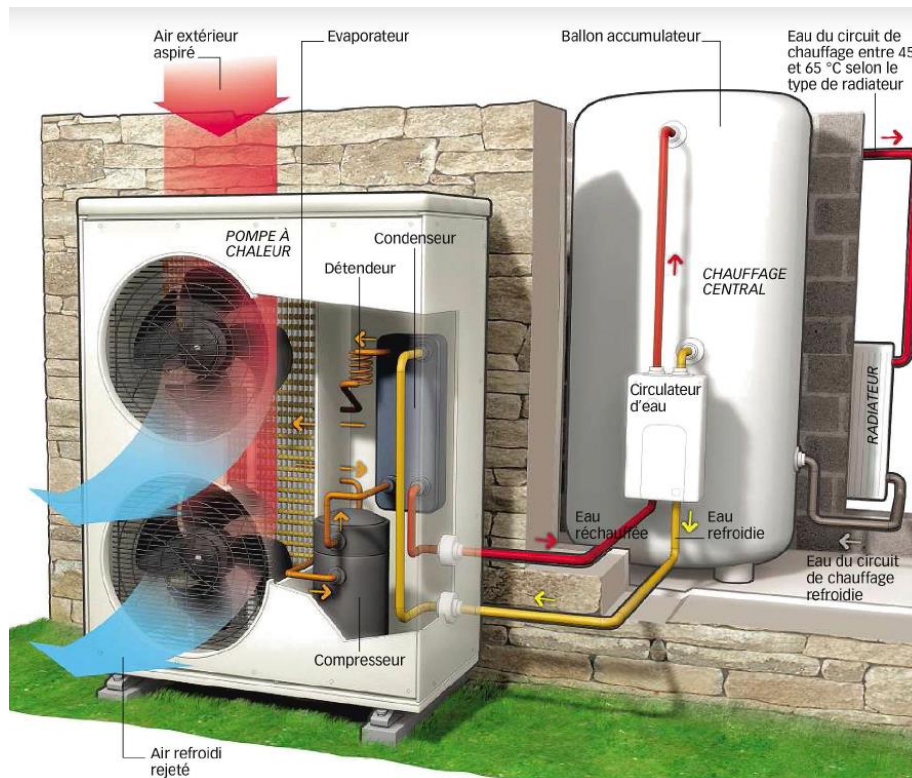


Figure 13 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur aérothermique (air-eau) (DepanService, n.d.)

3.3.2. Pompes à chaleur à géothermie

Les pompes à chaleur géothermiques désignent les systèmes qui utilisent le sol comme source de chaleur afin de garantir les besoins de chauffage. Dans le cas d'une pompe à chaleur géothermique, l'évaporateur se situe donc dans le sol, constituant la source froide.

- Les **avantages** (WBDG, 2016b) :
 - Très performant. Les systèmes de pompe à chaleur géothermique typiques ont un coefficient de performance de 3.5 à 4.0 (InfoEnergie, n.d.), ce qui signifie que, pour chaque unité d'électricité utilisée pour la compression, 3.5 à 4.0 unités de chauffage sont produites.
 - Peu bruyantes
 - Nécessitent peu d'entretien

- Rendement indépendant de la température extérieure, car la température du sol est relativement constante au fur et à mesure des saisons. En Belgique, cette température peut varier de 10 à 12 °C dans les sols peu profonds (jusque 18 mètres). Au-delà, elle augmente de 2 à 3°C tous les 100 mètres (CSTC, 2013).

- Les **inconvénients** :

- Investissements plus importants
- Installation complexe
- Permis nécessaire

Il existe plusieurs types de pompes à chaleur géothermiques selon le type d'installation des échangeurs de chaleur à l'évaporateur. Ceux-ci peuvent être placés soit horizontalement, soit verticalement. Ces 2 types de pompes à chaleur géothermiques sont illustrés à la figure suivante.

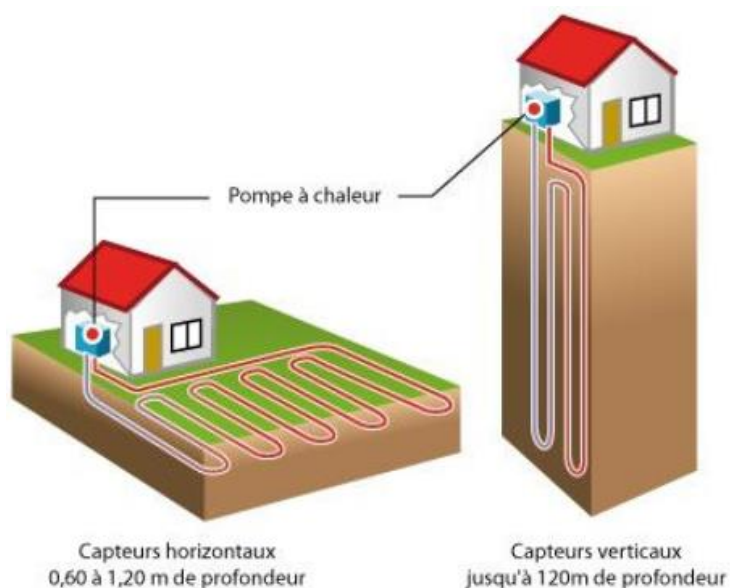


Figure 14 : PAC géothermiques à capteurs horizontaux et verticaux (ALCOR, n.d.)

- PAC géothermiques à échangeurs de chaleurs horizontaux :

Les échangeurs thermiques sont placés sous forme de boucle à une profondeur moyenne de 1.20 m. C'est le système de PAC géothermique le plus utilisé dans le secteur des bâtiments. L'avantage est qu'il est plus aisé à mettre en œuvre. L'inconvénient est qu'il nécessite une

grande surface de terrain pour avoir des longueurs d'échangeurs suffisamment grandes et que son efficacité dépend de la conductivité thermique du sol dans lequel il sera intégré. (CSTC, 2013)

- PAC géothermiques à échangeurs de chaleurs verticaux :

Les échangeurs thermiques sont placés sous forme de boucles enroulées dans des puits d'une profondeur moyenne de 100 m. L'avantage c'est que ce système peut être appliqué à n'importe quel endroit, indépendamment du sous-sol, et qu'il ne nécessite pas de grande surface de terrain. L'inconvénient c'est que l'installation est plus complexe étant donné les longueurs de forage nécessaires. (CSTC, 2013)

3.3.3. Pompes à chaleur à hydrothermie

Enfin, les pompes à chaleur hydrothermiques désignent les systèmes qui utilisent l'eau comme source de chaleur afin de garantir les besoins de chauffage. Dans le cas d'une pompe à chaleur hydrothermique, l'évaporateur se situe donc dans l'eau, constituant la source froide.

Dans la majorité des cas, l'eau, utilisée comme source de chaleur, provient d'une nappe phréatique située à proximité du bâtiment. L'avantage d'utiliser de l'eau en provenance d'une nappe phréatique plutôt que d'utiliser de l'eau de surface est, une fois encore, dû au fait que les températures des eaux enfouies dans les nappes phréatiques sont plus constantes – entre 7 et 12 °C (MonChauffagiste, n.d.) – que celles des eaux de surfaces, dépendant beaucoup plus de la température de l'air extérieur.

Dans ce type de PAC, de l'eau est pompée de la nappe phréatique et est acheminée vers la pompe à chaleur. L'eau y cède de la chaleur à l'évaporateur et est ensuite réacheminée en aval de la nappe phréatique. Le système est donc ouvert.

- Les **avantages** :
 - Très performant. Ces systèmes ont un COP pouvant atteindre 5 à 6 (InfoEnergie, n.d.)
 - Rendement indépendant de la température extérieure, car la température des eaux des nappes phréatiques est relativement constante au fur et à mesure des saisons.

- Les **inconvénients** (EnergiePlus, n.d.-a) :
 - Nécessite d'avoir une nappe phréatique dans laquelle il est possible de pomper de l'eau avec un débit suffisant à proximité
 - Nécessite des travaux importants dus aux forages à effectuer
 - Travaux doivent être réalisés par une entreprise agréée
 - Nécessite un permis et des démarches administratives

Le fonctionnement d'une telle pompe à chaleur est illustré à la figure suivante.

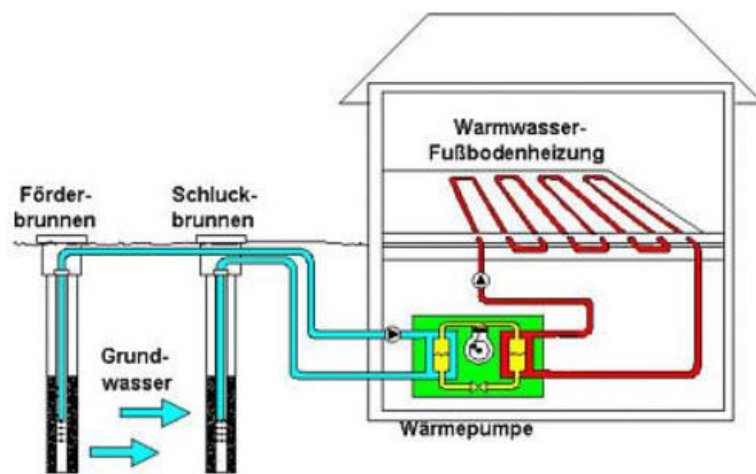


Figure 15 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur hydrothermique (eau-eau) (Durable, n.d.)

3.4. Le petit éolien

Une autre technologie bien connue pour générer de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables est l'éolien. Une éolienne utilise la force du vent pour faire tourner ses pales (rotor). Les pales entraînant la rotation d'un arbre, raccordé à un générateur qui produit l'électricité. Aujourd'hui, les éoliennes les plus connues sont les grandes éoliennes que l'on peut retrouver dans de grands espaces, sur terre ou en mer. Les éoliennes de ce type ont chacune une puissance nominale de l'ordre de plusieurs MW. Une grande éolienne de ce type en Wallonie permet de répondre à la demande annuelle en électricité d'à peu près 2200 ménages wallons (Portail de la Wallonie, 2017).

Néanmoins, il existe certains dispositifs, faisant partie de ce qu'on appelle le « petit éolien », qui utilisent les mêmes grands principes que les éoliennes classiques pour produire de

l'électricité, mais à une échelle beaucoup plus petite. Ces petites éoliennes peuvent être implantées sur ou à proximité d'un bâtiment afin de répondre directement à ses besoins énergétiques.

Les petites éoliennes peuvent être classées en 2 types différents en fonction de la direction de l'axe autour duquel tournent les pales. Ainsi, on peut retrouver des petites éoliennes à axe horizontal et des petites éoliennes à axe vertical (voir figure ci-dessous).

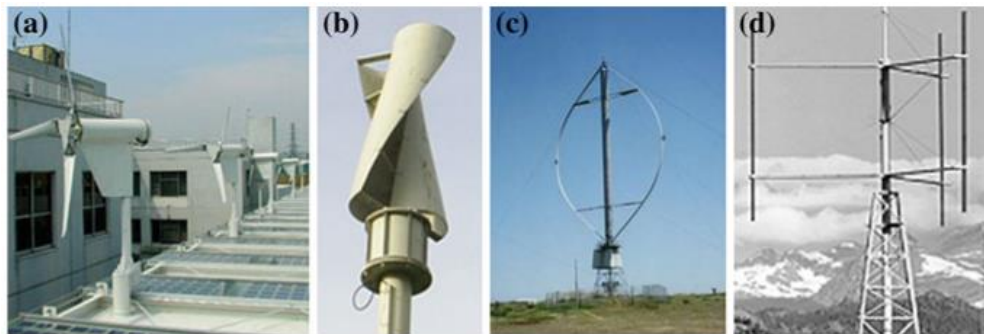


Figure 16 : Types de turbines - a. turbine à axe horizontal, b. turbine hélicoïdale, c. rotor Darrieus, d. rotor Darrieus H (Day, Lim, & Yao, 2013)

Les éoliennes à axe horizontal (a) sont plus courantes, mais les petites éoliennes à axe vertical (b), (c), (d) ont connu une bonne croissance ces dernières années. L'inconvénient des éoliennes à axe horizontal, c'est qu'elles doivent être constamment face au vent afin de pouvoir tourner et ainsi produire de l'électricité. Pour ce faire, la petite éolienne doit être dotée d'un mécanisme, ce qui peut affecter la réponse de la turbine. Les petites éoliennes à axe vertical n'en ont pas besoin, car la direction du vent n'influence pas sa rotation. Elles conviennent donc mieux aux zones urbaines et à faible altitude, où les directions du vent varient fortement. Cependant, leur couple de démarrage est tel que, souvent, elles nécessitent un petit moteur pour entamer la rotation de leurs pales. (Day et al., 2013)

Le tableau ci-dessous reprend les avantages et inconvénients spécifiques pour les petites éoliennes à axe horizontal et les petites éoliennes à axe vertical.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et vertical (Brussels, 2017)

	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Performances supérieures 	<ul style="list-style-type: none"> • Conçues pour des plages de vents plus restreintes (vents laminaires et constants) • Difficultés de mise en œuvre et alignement avec le vent • Plus bruyantes
Eoliennes à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Plus silencieuses (le rotor tourne plus lentement) • Conçues pour des plages de vents plus étendues, notamment pour des vents forts • Plus esthétiques, s'intègrent mieux à un environnement urbain 	<ul style="list-style-type: none"> • Performances moindres • Pas d'auto-démarrage (nécessite un mécanisme pour se lancer)

On observe donc que chaque type d'éolienne a ses propres avantages et inconvénients. Néanmoins, on retiendra que ce sont les éoliennes à axe vertical qui s'intègrent le mieux dans un milieu urbain.

L'avantage majeur de l'éolien, c'est que c'est un type de génération d'électricité qui produit toute l'année, contrairement aux technologies solaires dont la production est nettement moins élevée en hiver.

Concernant les contraintes de l'implantation d'éoliennes, quel que soit son type, dans le but de satisfaire les besoins d'un bâtiment, nous pouvons citer que l'évaluation du nombre et de la puissance nominale des éoliennes à installer afin de répondre aux besoins du bâtiment n'est pas une tâche aisée. En effet, pour faire cette évaluation de manière la plus précise possible, il est nécessaire, d'une part, de connaître les besoins d'électricité du bâtiment et, d'autre part, d'évaluer la production annuelle que pourraient avoir notre/nos éolienne(s). Or, pour connaître cette production théorique, il ne suffit pas de se baser uniquement sur la puissance nominale du modèle d'éolienne choisi. Il faut plutôt se baser sur sa courbe de puissance, qui, pour chaque vitesse de vent, indique la puissance de production théorique de l'éolienne. Avec cette courbe de puissance, il sera donc nécessaire de disposer de données relatives à la vitesse et à la qualité du vent à l'endroit où l'on désire placer les éoliennes. Or, pour que ces données soient pertinentes, il est généralement recommandé de les collecter de manière très régulière pendant au moins 1 an, ce qui constitue une grande contrainte.

De plus, l'implantation d'une ou de plusieurs petite(s) éolienne(s) sera toujours soumise à une demande de permis, ce qui peut également être un frein à l'intégration de cette technologie dans des bâtiments (SOLEN, 2014).

En outre, la plupart du temps, la seule surface disponible d'une parcelle utilisée par un bâtiment où le vent y est suffisamment stable et fort n'est autre que le toit du bâtiment en question (SOLEN, 2014). Or, en subissant les vents, les éoliennes génèrent des vibrations. Si les éoliennes sont directement intégrées aux bâtiments, ces vibrations seront donc transmises à ces bâtiments et peuvent être la cause de fissures ou de problèmes de stabilité (Brussels, 2017). Il faut donc s'assurer que le bâtiment est suffisamment résistant pour pouvoir accueillir ce type de technologie.

Enfin, il est important de souligner que le marché des petites éoliennes est encore jeune, donc peu fiable, et que des contrôles et entretiens réguliers de ces éoliennes sont à réaliser (Brussels, 2017).

3.5. La biomasse

Le terme biomasse englobe une grande variété de matériaux, y compris le bois de diverses sources, les résidus agricoles et les déchets animaux et humains. À l'échelle d'un bâtiment, la biomasse est le plus souvent utilisée sous la forme de bois et de ses dérivés, tels les bûches, les copeaux ou les pellets (WBDG, 2016a).

La plupart du temps, l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie dans les bâtiments se fait uniquement dans des buts de chauffage via des chaudières à biomasse, et ce sont les pellets, granulés de bois compressés, qui sont les combustibles les plus utilisés pour le chauffage central par la biomasse (Livios, n.d.). Néanmoins, bien que cela soit moins courant à l'échelle d'un bâtiment, il existe également des chaudières dites à micro-cogénération, capables de convertir l'énergie de la biomasse à la fois en chaleur et en électricité. Cependant, étant donné que, à l'échelle d'un bâtiment, cette technologie n'est pas encore mature et très peu utilisée, nous n'allons pas la détailler ici.

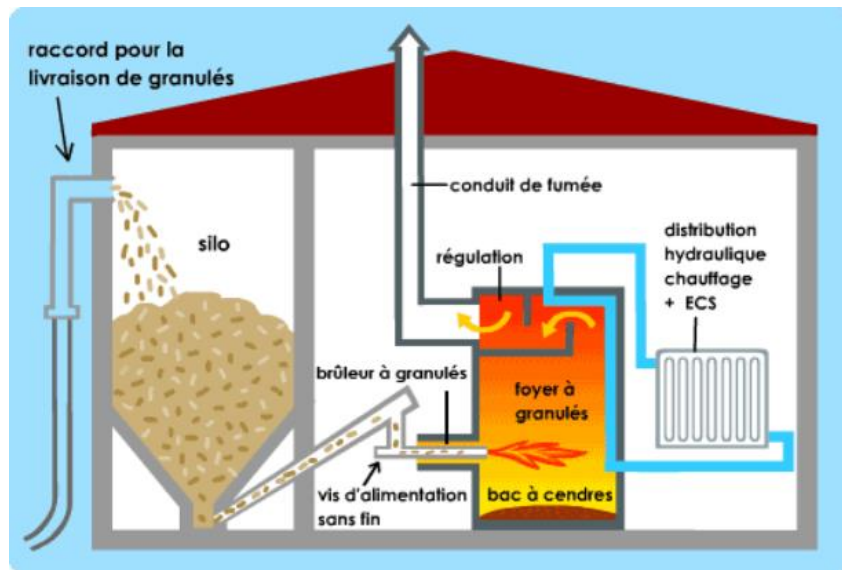


Figure 17 : Fonctionnement d'une chaudière à pellets (Économie d'énergie, n.d.)

La figure ci-dessus représente le fonctionnement d'une chaudière automatique à biomasse. Nous pouvons observer que, comme pour une chaudière au mazout, une chaudière automatique à biomasse nécessite un espace de stockage (silo) pour le combustible (ex : pellets) non loin de la chaudière, et facilement accessible pour son remplissage. Le combustible va ainsi être acheminé du silo vers le brûleur de la chaudière pour subir une combustion. La chaleur dégagée par la combustion va ensuite être transférée au fluide caloporteur (tel que de l'eau) dont le circuit passe par la chaudière avant d'être amené au système de distribution de chaleur et/ou vers un système de stockage (tel un ballon) pour fournir de l'ECS. Notons cependant que, si le type de biomasse choisie est sous la forme d'un autre combustible que des pellets (ex. : des bûches), un stockage intermédiaire d'eau entre la chaudière et le système de distribution de chaleur est nécessaire.

Quels sont dès lors les avantages et les inconvénients du système de chauffage à partir de biomasse par rapport aux autres systèmes disponibles ?

- **Les avantages :**

- Combustible peu cher. Les prix au kilowattheure des combustibles à base de bois sont un peu moins élevés que ceux du mazout ou du gaz naturel (APERe, 2014). Cependant, nous nous trouvons dans un marché de l'énergie, ce qui implique que la fluctuation du prix des pellets suit les fluctuations du prix des autres vecteurs énergétiques

- Technologie contrôlable. Comparée à la plupart des autres options d'énergie renouvelable actuellement disponibles, la biomasse présente l'avantage d'être contrôlable et disponible en cas de besoin, à l'instar des systèmes de chauffage à combustible fossile et de production électrique (WBDG, 2016a)
- Adaptable au système de distribution de chaleur déjà présent. Dans le cadre d'une rénovation, il est possible de conserver le système de distribution de chaleur lorsque l'on intègre le système de chauffage à biomasse. Néanmoins, comme vu précédemment, il conviendra d'ajouter un réservoir tampon si le type de biomasse choisi est sous la forme de bûches ou de plaquettes. Cela permet également d'éviter que la chaudière ne doive s'enclencher et se déclencher trop régulièrement (Livios, n.d.)

- **Les inconvénients :**

- Chaudières chères → investissement conséquent (Chaudieregaz, n.d.)
- Nécessite une certaine occupation. Les systèmes à biomasse nécessitent davantage d'interaction de la part de l'opérateur que d'autres systèmes d'énergie renouvelable tels que l'énergie solaire et l'éolien. Cela comprend la commande et la livraison de combustible, le retrait des cendres et l'entretien des pièces en mouvement (WBDG, 2016a). Cela comprend aussi l'approvisionnement de la chaudière si celui-ci ne peut être automatique (par ex. avec des bûches)
- Nécessite un espace de stockage (silo) suffisamment grand et aisément accessible, y compris aux camions de livraison
- Nécessite une surveillance et des entretiens. La combustion de la biomasse produit également des émissions qui doivent être surveillées et contrôlées pour être conformes aux réglementations (WBDG, 2016a)

4. Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation des systèmes de production

Dans ce chapitre, nous allons établir une synthèse des facteurs techniques et économiques encourageant ou freinant l'implantation des systèmes de production d'énergies renouvelables que nous avons vus au chapitre précédent. Cette synthèse n'a pas la prétention de reprendre l'entièreté des différents facteurs en question, mais se veut la plus complète possible dans une mesure raisonnable et pertinente.

Dans un premier temps, nous allons observer, pour chaque type de système de production d'énergie renouvelable, quels sont les facteurs encourageant ou freinant son implantation au sein d'un bâtiment. Ces observations sont reprises dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 3 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation du photovoltaïque au sein d'un bâtiment

	Facteurs encourageant l'implantation	Facteurs freinant l'implantation
Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature • Pas de permis nécessaire • Installation simple • Demande peu d'entretien • Pourcentage de la charge modulable : possibilité de combler les manques avec le réseau et de revendre le surplus • Possibilité de stockage (batteries) • Technologie intégrable aux éléments structurels • Coûts modulables en fonction de la surface disponible (choix de technologies moins performantes, mais moins chères au kWh) 	<ul style="list-style-type: none"> • Surface importante nécessaire • Emplacement dans une position particulière nécessaire (orientation et inclinaison) • Environnement propice nécessaire (éviter l'ombrage) • Production fortement variable : forte dépendance aux conditions climatiques

Tableau 4 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation du solaire thermique au sein d'un bâtiment

		Facteurs encourageant l'implantation	Facteurs freinant l'implantation
Solaire thermique	Eau chaude solaire	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature • Pas de permis nécessaire • Installation simple • Demande peu d'entretien • Possibilité de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Emplacement dans une position particulière nécessaire (orientation et inclinaison) • Environnement propice nécessaire (éviter l'ombrage) • Production fortement variable : forte dépendance aux conditions climatiques
	Préchauffage de la ventilation	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature • Pas de permis nécessaire • Installation simple • Demande peu d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> • Emplacement dans une position particulière nécessaire (orientation et inclinaison) • Environnement propice nécessaire (ombrage) • Production fortement variable : forte dépendance aux conditions climatiques • Surface importante nécessaire • Nécessite de grands besoins de ventilation • Pas de stockage possible

Tableau 5 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation de pompes à chaleur au sein d'un bâtiment

		Facteurs encourageant l'implantation	Facteurs freinant l'implantation
Pompes à chaleur	PAC aérothermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Installation simple • Pas de permis nécessaire • Investissement faible • Possibilité de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement assez faible • Rendement fortement variable : forte dépendance à la température extérieure • Bruyantes
	PAC géothermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement • Rendement stable • Peu bruyant • Demande peu d'entretien • Possibilité de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation complexe • Permis nécessaire • Investissement important • Environnement propice nécessaire : nécessite une certaine surface extérieure
	PAC hydrothermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement • Rendement stable • Peu bruyantes • Demande peu d'entretien • Possibilité de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation complexe • Permis nécessaire • Investissement important • Environnement propice nécessaire : nécessite une nappe phréatique de qualité à proximité

Tableau 6 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation d'éoliennes au sein d'un bâtiment

		Facteurs encourageant l'implantation	Facteurs freinant l'implantation
Éoliennes	Éoliennes à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature • Bon rendement • Possibilité de stockage sur des batteries • Productions moyennes relativement constantes tout au long de l'année : peu de variation de vent entre les saisons 	<ul style="list-style-type: none"> • Permis nécessaire • Environnement propice nécessaire : endroits où le vent est laminaire et constant → pas adapté aux zones urbaines • Production peu fréquente • Bruyantes • Difficulté d'obtenir des données relatives au vent dans des lieux précis → dimensionnement difficile • Structure stable nécessaire
	Éoliennes à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature • Possibilité de stockage sur des batteries • Production plus fréquente • Productions moyennes relativement constantes tout au long de l'année : peu de variation de vent entre les saisons • Esthétique : généralement bien accepté 	<ul style="list-style-type: none"> • Permis nécessaire • Rendement assez faible • Nécessite un mécanisme supplémentaire pour le démarrage • Difficulté d'obtenir des données relatives au vent dans des lieux précis → dimensionnement difficile • Structure stable nécessaire (vibrations transmises, par l'éolienne, au bâtiment)

Tableau 7 : Synthèse des facteurs encourageant ou freinant l'implantation de la biomasse au sein d'un bâtiment

	Facteurs encourageant l'implantation	Facteurs freinant l'implantation
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement, mais moindre que les chaudières à combustible fossile • Production contrôlable (stockage de la ressource) • Pas de permis nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie payante (le vecteur énergétique de la biomasse doit être acheté, contrairement à d'autres vecteurs énergétiques tels que le solaire ou l'éolien) • Demande des interventions humaines fréquentes (retrait des cendres, surveillance, entretiens, approvisionnement de la chaudière en combustible si non automatique, ...) • Espace de stockage de la ressource nécessaire : assez volumineux et accessible aisément

À partir de ces tableaux, il est possible de réorganiser les données y figurant afin de mieux se rendre compte de l'impact de ces différents facteurs sur l'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables en général. Pour ce faire, une des premières étapes est de regrouper tous ces facteurs en plusieurs catégories de facteurs, moins nombreuses, mais englobant des facteurs ayant des caractéristiques similaires. Ensuite, il peut être pertinent de s'intéresser à quel type d'énergie produite s'appliquent ces facteurs. À savoir : l'électricité ou le chauffage (et/ou l'ECS).

On peut ainsi relever le nombre de fois qu'un facteur apparaît dans les tableaux ci-dessus et attribuer ce nombre à une catégorie de facteurs ainsi qu'à un type d'énergie produit. Une fois qu'un tel comptage et qu'une telle attribution sont effectués, nous obtenons les tableaux suivants.

Tableau 8 : Comptage des facteurs encourageant l'implantation d'énergies renouvelables en fonction du type d'énergie généré et répartition de ces facteurs selon leur catégorie

	Facteurs encourageant l'implantation d'énergies renouvelables	Production d'électricité	Production d'électricité par catégorie	Production de chauffage et/ou ECS	Production de chauffage et/ou ECS par catégorie	Total	Total par catégorie
Contrainte d'utilisation	Peu d'entretien	1	1	4	4	5	5
Efficacité technologique	Technologie mature	3	7	2	7	5	14
	Bon rendement	1		3		4	
	rendement stable	0		2		2	
	production moyenne constante tout au long de l'année	2		0		2	
	production fréquente	1		0		1	
Etape d'installation	Pas de permis	1	2	4	7	5	9
	Installation simple	1		3		4	
Facteurs économiques	coûts modulables	1	1	0	1	1	2
	Investissement faible	0		1		1	
Flexibilité technologique	Pourcentage charge modulable	1	5	0	5	1	10
	stockage	3		5		8	
	intégrable aux éléments struct.	1		0		1	
Impacts extérieurs	peu bruyant	0	1	2	2	2	3
	esthétique	1		0		1	
						Total	43

Tableau 9 : Comptage des facteurs freinant l'implantation d'énergies renouvelables en fonction du type d'énergie généré et répartition de ces facteurs selon leur catégorie

	Facteurs freinant l'implantation d'énergies renouvelables	Production d'électricité	Production d'électricité par catégorie	Production de chauffage et/ou ECS	Production de chauffage et/ou ECS par catégorie	Total	Total par catégorie
Contrainte d'utilisation	occupation nécessaire	0	0	1	1	1	1
Disponibilité de l'espace adéquat	espace de stockage de la ressource nécessaire	0	1	1	2	1	3
	surface importante	1		1		2	
Efficacité technologique	production variable	1	3	2	4	3	7
	rendement faible	1		1		2	
	rendement variable	0		1		1	
	production peu fréquente	1		0		1	
Etape d'études	obtention des données complexe	2	2	0	0	2	2
Etape d'installation	installation complexe	0	2	2	4	2	6
	permis nécessaire	2		2		4	
Facteurs économiques	investissement important	0	0	2	3	2	3
	énergie payante	0		1		1	
Flexibilité technologique	position particulière	1	6	2	8	3	14
	environnement propice	2		4		6	
	nécessite de grands besoins de ventilation	0		1		1	
	pas de stockage	0		1		1	
	structure stable nécessaire	2		0		2	
	nécessite mécanisme supplémentaire	1		0		1	
Impacts extérieurs	bruyant	1	1	1	1	2	2
						Total	38

Enfin, à partir de ces derniers tableaux, nous pouvons établir les graphiques ci-après, repris dans les sous-sections suivantes, illustrant l'importance de chaque catégorie de facteurs encourageant ou freinant l'implantation des différents systèmes de production d'énergies renouvelables vus précédemment concernant :

- La production d'électricité
- La production de chauffage et/ou d'ECS
- La production d'énergie à partir de sources renouvelables en général (électricité + chauffage + ECS)

4.1. La production d'électricité

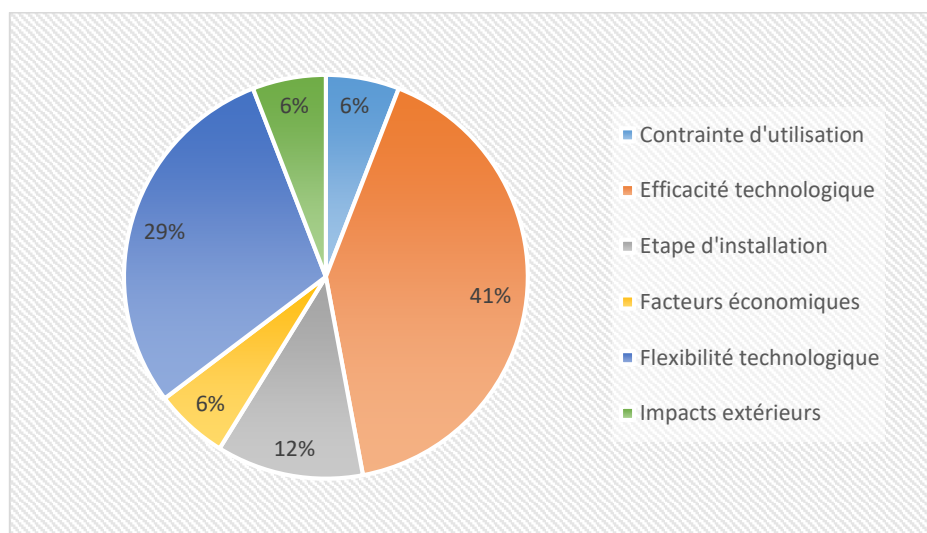


Figure 18 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production d'électricité

De ce graphique ci-dessus, nous pouvons observer que la majorité des facteurs encourageant l'implantation de système de production électrique sont relatifs à l'efficacité des technologies implantables (41%). Ces facteurs concernent la maturité des technologies, leur rendement et la régularité de leur production. La 2^e catégorie de facteurs la plus incitante à l'implantation de tels systèmes concerne la flexibilité de ces technologies (29%). Les facteurs relatifs à cette catégorie concernent ici principalement la possibilité de stockage, mais également la modularité des technologies ainsi que l'intégration possible de celles-ci dans les éléments structurels du bâtiment.

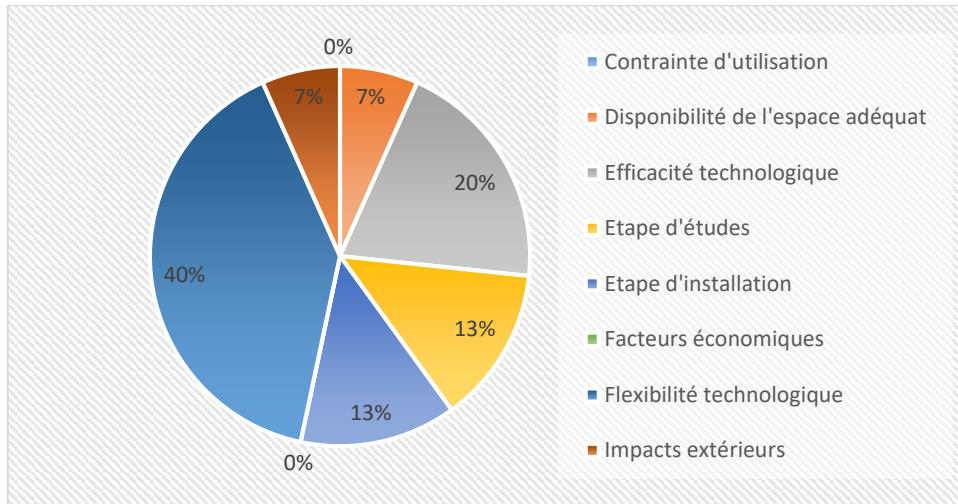


Figure 19 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production d'électricité

À première vue, le graphique ci-dessus nous apparaît comme étant en contradiction par rapport au graphique précédent. En effet, ce graphique nous indique ici que la grande majorité des facteurs freinant l'implantation de systèmes de production d'électricité concernent la flexibilité des technologies de production (40%), catégorie de facteurs qui se trouve justement en 2^e position en tant qu'incitant à l'implantation de telles technologies. Afin de comprendre cette contradiction, il faut se pencher sur le Tableau 9 qui nous indique que, dans le cadre des facteurs freinant l'implantation de systèmes de production d'électricité, cette catégorie reprend des facteurs bien différents. Tels que la nécessité de certaines technologies d'être implantées dans un environnement propice à une bonne production, d'être installées sur une structure suffisamment stable, d'être disposées dans une position particulière, ou d'être munies d'un mécanisme supplémentaire.

Il est donc important de se rendre compte dès à présent qu'une seule et même catégorie de facteurs peut faire référence à des facteurs très variés, certains étant favorables à l'installation de divers systèmes de production, certains étant, au contraire, préjudiciables à ces implantations.

4.2. La production de chauffage et/ou d'ECS

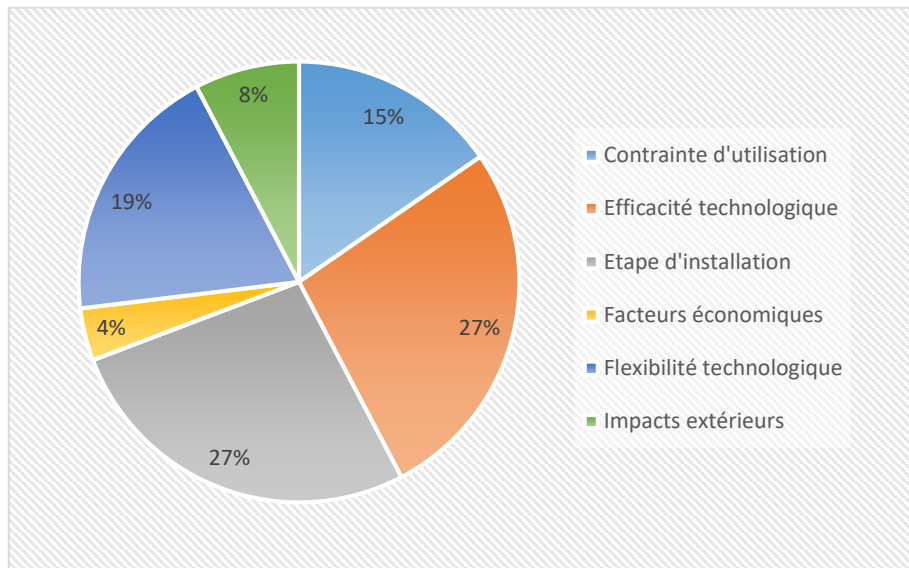


Figure 20 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production de chauffage et/ou d'ECS

Ici, nous observons dans ce graphique ci-dessus que, dans le cadre des facteurs encourageant l'implantation de systèmes de production de chauffage et/ou d'ECS, nous retrouvons en première position, à égalité, 2 catégories de facteurs. À savoir : les facteurs relatifs à l'efficacité des technologies et les facteurs relatifs aux étapes d'installation de ces systèmes. La catégorie « efficacité technologique » fait référence ici aux facteurs étant liés aux rendements et à la maturité des technologies. La catégorie « étape d'installation » fait référence ici au fait qu'aucun permis n'est nécessaire ou que l'installation est relativement simple pour certaines de ces technologies.

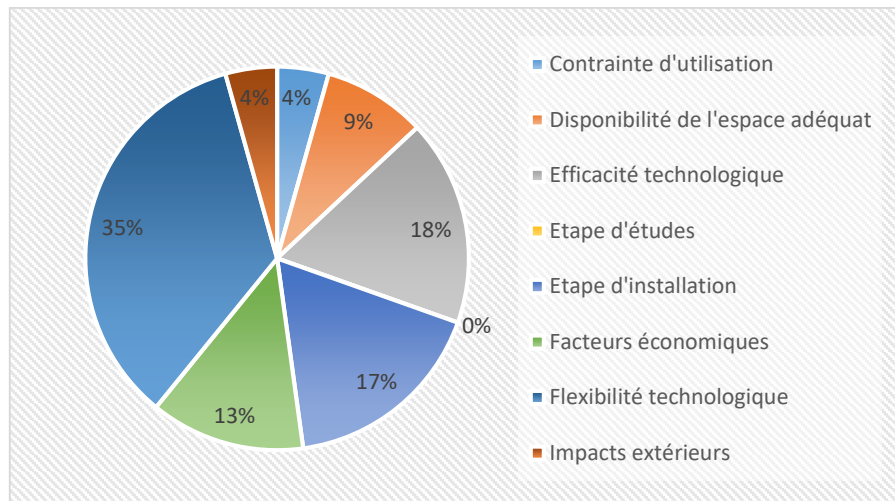


Figure 21 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production de chauffage et/ou d'ECS

Concernant les facteurs freinant l'implantation de système de production de chauffage et/ou d'ECS, nous observons dans le graphique ci-dessus que la majorité de ces facteurs sont relatifs à la flexibilité des technologies implantables (35%). Cette catégorie fait principalement référence ici à la nécessité, pour certaines technologies, d'être implantées dans un environnement propice (à une bonne production ou même à leur installation). Dans une moindre mesure, cette catégorie fait également référence aux besoins de certaines technologies d'être placées dans une position particulière, à la nécessité de besoins de ventilation suffisamment élevés, ou à une incapacité de stockage de l'énergie produite.

4.3. La production d'énergie renouvelable en général

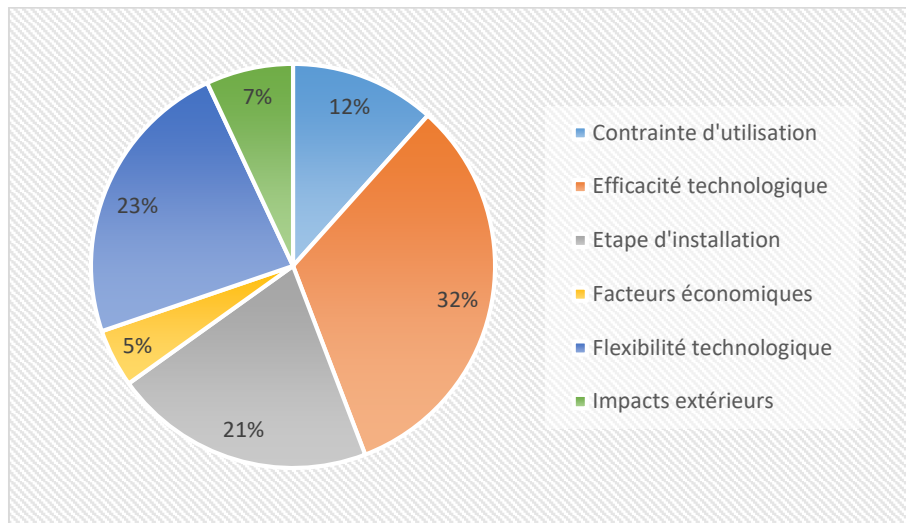


Figure 22 : Importance des catégories de facteurs encourageant l'implantation de système de production d'énergie renouvelable en général

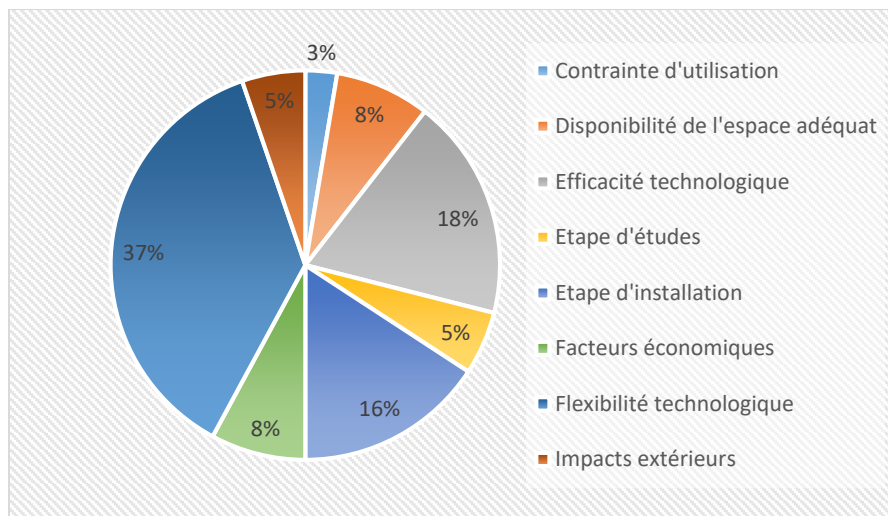


Figure 23 : Importance des catégories de facteurs freinant l'implantation de système de production d'énergie renouvelable en général

Globalement, tous types d'énergie produite confondus, nous pouvons observer, dans ces 2 derniers graphiques, que la catégorie de facteurs concernant l'efficacité technologique reste, malgré une majorité assez légère, la catégorie de facteurs ayant la plus grande incidence positive quant à l'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables au sein d'un bâtiment.

À l'opposé, c'est la catégorie « flexibilité technologique » qui, avec une majorité beaucoup plus marquée, consiste en la catégorie ayant le plus d'incidence négative concernant l'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables au sein d'un bâtiment.

Néanmoins, il est important de souligner qu'il faut garder un certain regard critique par rapport à ces résultats, car, bien que la méthode utilisée se veuille la plus objective possible, il réside une certaine part de subjectivité dans le choix :

- Des systèmes de production d'énergie pris en compte,
- De la prise en compte de certains facteurs encourageant ou limitant les systèmes de production,
- De la répartition de ces facteurs en catégorie,
- Ainsi que de la pondération concernant l'importance relative des différents facteurs entre eux. Ici, il a été choisi de pondérer chaque facteur d'une manière équivalente. Une pondération différente aurait pu être envisagée.

5. Autres facteurs à prendre en compte

Il existe également d'autres facteurs à prendre en compte dans la décision d'intégrer des systèmes de production d'énergies renouvelables dans un bâtiment. Nous pouvons citer notamment des facteurs économiques, tels que des incitants sous la forme de primes, aides financières, ainsi que des concours avec récompenses à la clé. Mais nous pouvons citer également des facteurs socioculturels tels que le désir de conservation d'un certain aspect du bâtiment dont il question lors d'un projet de rénovation d'un bâtiment existant. Par exemple dans le cas d'un bâtiment historique. En outre, l'implantation – visible – de systèmes d'énergie renouvelable peut également jouer sur l'image de marque de l'entreprise logée dans le bâtiment en question. Ce chapitre a pour but de décrire une partie de ces autres facteurs.

5.1. Bâtiments historiques

Le maintien des aspects architecturaux des bâtiments existants, en particulier des bâtiments historiques, est souvent une priorité des projets de rénovation de bâtiments existants. De plus, la réutilisation de bâtiments existants est considérée par beaucoup comme une stratégie de conception durable, en particulier lorsque des technologies d'énergie renouvelable sont incluses dans le projet. En effet, l'énergie intrinsèque d'un bâtiment – c'est-à-dire l'énergie consommée par tous les processus associés à la production de ses matériaux de construction et de ses composants – équivaut à environ 20% de l'énergie consommée par ce bâtiment sur la totalité de son cycle de vie (UNEP, 2007). D'où l'importance de maximiser la réutilisation de bâtiments existants et donc d'investir dans des projets de rénovation.

De plus, des subventions, des crédits d'impôt ou d'autres mesures d'incitation sont disponibles pour encourager la préservation historique dans de nombreux domaines, ce qui encourage donc les investissements dans des projets de rénovation de bâtiments existants (Hayter & Kandt, 2011). Cependant, sans une planification adéquate, l'installation de systèmes de production d'énergies renouvelables sur le bâtiment ou à proximité peut compromettre à la fois l'esthétique architecturale et l'intégrité structurelle du bâtiment.

En Belgique, la compétence relative au patrimoine appartient aux régions (Aillagon, 2003). Elles ont donc notamment pour mission de désigner les propriétés historiques, de fournir des orientations et des ressources pour les projets de préservation historique et d'imposer des restrictions réglementaires auxquelles les projets historiques doivent se conformer (Aillagon,

2003). Il est donc important de comprendre quelles réglementations s'appliquent aux projets de bâtiments historiques avant d'étudier les options d'installation d'énergies renouvelables.

En général, lors d'un projet concernant un bâtiment historique, il est conseillé de déterminer quelles caractéristiques d'efficacité énergétique incluses dans la conception originale du bâtiment peuvent être réhabilitées, telles que l'éclairage naturel, la ventilation naturelle et les dispositifs de stockage thermique. L'étape suivante consiste à examiner comment incorporer des installations d'énergie renouvelable sur site. (Hayter & Kandt, 2011)

Certaines technologies d'énergie renouvelable peuvent être masquées. C'est par exemple le cas pour l'installation d'une pompe à chaleur géothermique. En outre, comme vu précédemment dans cet ouvrage, des systèmes de technologie solaire peuvent être intégrés dans les éléments structurels du bâtiment, tels que le matériel de toiture ou les dispositifs d'ombrage. De plus, des panneaux solaires thermiques et/ou photovoltaïques peuvent également être installés sur le toit, placés de manière non visible par les visiteurs, par exemple derrière des parapets, si le toit en dispose, tel qu'à la figure ci-dessous.



Figure 24 : Panneaux solaires photovoltaïques placés sur un toit de manière non visible, dissimulés par des parapets (Solar Voltaics, 2012)

À titre informatif, soulignons que la question de l'implantation de système de production d'énergie renouvelable au sein de bâtiments historiques est d'autant plus pertinente que, depuis le 10^e siècle (à l'époque des croisades), les églises catholiques sont orientées de telle façon que le chœur se tourne vers l'est (Westerman, n.d.). La nef principale d'une église est ainsi orientée sur un axe est-ouest, les versants de sa toiture étant donc dirigés vers le nord et vers le sud. On pourrait dès lors envisager de recouvrir tous les versants sud des toitures des églises au moyen de panneaux photovoltaïques.

5.2. Primes et aides financières

5.2.1. Les certificats verts

En Région wallonne, le système d'aide financière le plus répandu concernant la production d'énergies renouvelables est celui des certificats verts (CV). Ce système a été instauré par la Région wallonne afin de promouvoir la production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables.

En effet, étant donné que la génération d'électricité « verte » n'émet que très peu de GES par rapport aux centrales électriques conventionnelles – telles des centrales au gaz – et que la production d'électricité à partir de sources renouvelables coûte généralement plus cher que via des procédés conventionnels, souvent émetteurs de GES, il paraît cohérent que les autorités compétentes introduisent un système d'aide financière destiné aux producteurs d'électricité utilisant des sources d'énergies renouvelables (EF4, n.d.). Ainsi, la CWaPE (Commission wallonne pour l'Energie) octroie régulièrement un certain nombre de CV aux producteurs d'électricité verte (particuliers ou non) en fonction de leur production d'électricité. Ces CV peuvent ensuite être revendus au gestionnaire du réseau. La revente de ces CV est actuellement garantie à 65 euros par CV pour les petites installations (inférieures à 10 kW) (SPW, n.d.-b).

Grâce à ce système, les initiatives d'investissements dans des systèmes de production d'électricité verte (y compris dans les installations de cogénération) – dont ceux implantés au sein de bâtiments – sont donc récompensées régulièrement par l'octroi de certificats verts, ayant une valeur monétaire garantie, ce qui constitue une plus-value financière réelle pour les détenteurs de ce type de système de production d'électricité.

5.2.2. Les primes

De plus, il existe en Région wallonne un système de distribution de primes, appelées « Primes Energie », destinées aux particuliers, dont l'objectif est d'apporter un soutien financier lors d'investissements ayant pour but l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment. Les Primes Energie peuvent ainsi être octroyées lors des investissements suivants (SPW, 2018a) :

- Isolation du toit
- Isolation des murs
- Isolation du sol
- Réalisation d'un audit énergétique
- Installation d'un des systèmes de production de chaleur et/ou d'ECS performant suivants :
 - Chaudière au gaz à condensation
 - **PAC pour l'ECS**
 - **PAC pour l'ECS et le chauffage**
 - **Chaudière à biomasse automatique**
 - **Chauffe-eau solaire**

Ainsi, en ce qui concerne l'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables au sein de bâtiments résidentiels, les Primes Energie constituent donc des incitants supplémentaires notables pour l'installation de pompes à chaleur, de chaudières à biomasse et de chauffe-eaux solaires.

En outre, jusqu'au 30 juin 2018, il existait, en Région wallonne, une prime nommée « Quali watt » qui avait pour objectif de soutenir financièrement les investissements réalisés dans des petites installations (inférieures à 10kW) de production d'électricité via les technologies relatives au photovoltaïque. Aujourd'hui, les coûts de ces technologies ayant significativement baissé par rapport à leurs débuts, la prime Quali watt fût ainsi supprimée. Les technologies relatives au photovoltaïque sont dorénavant considérées comme suffisamment rentables. (SPW, 2018b)

5.2.3. Easy'Green

Parallèlement à cela, le Gouvernement wallon a demandé à Novallia, filiale du groupe Sowalfin, d'instaurer un dispositif de financement des projets ayant pour objectif la transition énergétique des très petites entreprises (TPE) et des petites et moyennes entreprises (PME) basées en Wallonie. Le dispositif qui a ainsi été mis en place est appelé Easy'Green. (Novallia, n.d.)

Proposant la réalisation d'un audit énergétique, l'élaboration d'un plan d'action, la mise en place d'un montage financier et l'octroi d'un financement, Easy'Green offre la possibilité aux TPE et PME wallonnes d'obtenir de Novallia un prêt rapide accompagné d'une expertise technique. La décision d'octroyer ou non un prêt est prise par un jury de sélection après qu'une TPE ou une PME ait introduit une candidature. (SPW, n.d.-c)

Afin que des prêts soient accordés, les projets d'une TPE ou d'une PME candidate doivent poursuivre au minimum 1 des 3 objectifs suivants (SPW, n.d.-c) :

- L'optimisation de l'efficacité énergétique des processus de l'entreprise
- L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments de l'entreprise
- La production d'énergie d'origine renouvelable

Nous retrouvons donc ici un incitant financier supplémentaire, cette fois-ci uniquement réservé aux entreprises, concernant l'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables au sein de bâtiments.

5.2.4. Les déductions fiscales

En outre, en Région wallonne, il est également possible pour des entreprises, des indépendants, ou des personnes ayant une profession libérale, de déduire fiscalement des investissements ayant pour effet des économies d'énergie au sein de leur lieu de travail. Douze catégories d'investissements ayant ces objectifs sont candidats à cette déduction fiscale. L'implantation de systèmes de production d'énergies renouvelables fait partie de ces catégories. Le montant actuel de cette déduction fiscale s'élève à 13.5%. (SPW, n.d.-a)

5.3. Concours

Il existe également plusieurs concours, organisés par différents organismes, dont le but est de promouvoir la construction et la rénovation de bâtiments durables. Soutenant donc l'implantation de systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables au sein de ces bâtiments. Dans cette section, nous allons décrire 2 concours ayant ce même objectif. À savoir :

- Le concours « Batex »
- Le concours « Green Solutions Awards – Bâtiments »

5.3.1. Batex

Batex, pour « Bâtiments Exemplaires », est le nom que portent 2 actions en Belgique – l’une lancée par la Région wallonne et l’autre lancée par la Région de Bruxelles-Capitale – dont le but commun est de promouvoir les projets de constructions et de rénovations de bâtiments durables et exemplaires, dans la Région wallonne pour l’une, dans la Région de Bruxelles-Capitale pour l’autre (SPW, n.d.-d) (Brussels, 2018). Ces actions étant sensiblement similaires, nous allons ici ne développer que l’action Batex de la Wallonie.

Cette action fonctionne selon un système d’appel à projets. Lorsque l’appel à projets a été effectué, les candidats désirant participer doivent soumettre leurs projets avant une date de clôture. Les projets sont alors analysés d’un point de vue technique par des experts qui vont ensuite soumettre ces projets à un jury dont les membres sont des spécialistes dans les diverses thématiques dans lesquelles s’inscrivent les critères d’évaluation des projets. Le jury décide alors quels sont les meilleurs projets, qui seront ensuite proclamés lauréats. Les lauréats bénéficient ainsi d’une subvention de 100 €/m². (SPW, n.d.-d)

Durant la phase de chantier, les responsables de projets sont alors accompagnés par d’autres experts techniques qui sont notamment chargés de vérifier que les candidats respectent bien ce qu’ils avaient annoncé lors de la phase de réponses à l’appel à projets. Une fois les engagements des candidats respectés, ceux-ci reçoivent un document du ministre de l’Énergie attestant que les projets sont officiellement qualifiés d’exemplaires. Des plaques pouvant être placées devant les bâtiments exemplaires en question sont également distribuées. (SPW, n.d.-d)

Jusqu’à présent, il y a eu 2 appels à projets dans le cadre de l’action Batex en Wallonie. La première en 2012, concernant des projets de bâtiments résidentiels ; et la seconde en 2013, concernant des bâtiments tertiaires (SPW, n.d.-d). Pour ces 2 appels à projets, les critères d’évaluation de l’exemplarité des bâtiments étaient divisés en 4 thématiques. À savoir (SPW, n.d.-d) :

- La performance énergétique (et de confort ; uniquement pour l’appel à projets de 2013)
- La qualité environnementale
- La qualité architecturale
- La reproductibilité (et l’innovation ; uniquement pour l’appel à projets de 2013)

Que ce soit pour l'appel à projets de 2012 destiné aux bâtiments résidentiels ou pour celui de 2013 destinés aux bâtiments tertiaires, un des critères d'évaluation de la thématique « performance énergétique » concernait le recours aux énergies renouvelables (DGO4, 2012). Il était donc important pour les candidats ayant désiré participer à ce concours – et donc d'emporter une subvention à hauteur de 100 €/m² pour le projet en question – de considérer sérieusement les différentes possibilités qui leur étaient offertes concernant l'intégration de systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables au sein de leur projet.

5.3.2. Green Solutions Awards

Le concours « Green Solutions Awards » fût créé en 2013 par « Construction 21 », média social, spécialisé dans les sujets du bâtiment et de la ville durable, créé en 2012 et destiné aux professionnels du secteur (Construction 21, 2018c).

Depuis sa création, le Green Solutions Awards a chaque année pris plus d'ampleur, comptant 150 projets candidats à travers le monde pour l'édition de 2017. Au fil des années, le concours fût subdivisé en 3 catégories, dépendant des types de projets candidats. Ces 3 catégories étant (Construction 21, 2018b) :

- Les bâtiments
- Les quartiers
- Les infrastructures.

Ainsi, les projets de bâtiments concurrents peuvent s'inscrire dans une ou plusieurs des 5 branches du concours destinées aux bâtiments. À savoir (Construction 21, 2018b) :

- Énergie et climat tempéré
- Énergie et climat chaud
- Faible émission de carbone
- Santé et confort
- Bâtiments intelligents

En outre, 2 grands prix peuvent également être gagnés pour les bâtiments exceptionnels. L'un étant destiné aux projets de rénovation, l'autre étant destiné aux projets de construction (Construction 21, 2018b).

Enfin, à cela s'ajoute un grand prix pour les quartiers durables et un grand prix pour les infrastructures durables (Construction 21, 2018b).

Le concours se déroule en 2 phases. Une première phase à l'échelle nationale, dont les lauréats peuvent ensuite prétendre participer à la seconde phase, à l'échelle internationale (Médiaterre, 2018).

À l'origine, le concours visait uniquement des projets européens. Cependant, depuis 2015 et la COP21, d'autres pays ont rejoint la compétition. Ainsi, en 2017, les candidats du concours (toutes catégories confondues) provenaient de 19 pays différents répartis à travers le monde (voir figure ci-dessous), ce qui démontre que la tendance à vouloir construire de manière durable s'étend à tous les continents, indépendamment du climat ou des cultures locales. (Construction 21, 2018b)



Figure 25 : Localisation des 19 pays ayant participé à l'édition 2017 du Green Solutions Awards (Construction 21, 2018a)

L'intérêt pour les professionnels du milieu de participer au concours Green Solutions Awards réside dans le fait que les lauréats bénéficient d'une grande visibilité auprès du public. En effet, le concours génère plus d'un million de vues chaque année depuis 2015 (Construction 21, 2018a), ce qui permet aux acteurs de ces projets de se faire connaître au niveau international et de décrocher d'éventuels nouveaux marchés.

L'intégration de systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables étant un des thèmes allant dans le sens de la durabilité d'un projet, le Green Solutions Awards et la visibilité qu'il permet d'obtenir peuvent dès lors être considérés comme des facteurs

incitant à l'implantation de tels systèmes dans des projets de construction ou de rénovation de bâtiments.

Dès lors, nous pourrions nous poser les questions suivantes :

- Est-ce que tous les bâtiments considérés comme durables – ne consommant donc que très peu d'énergie – sont forcément munis de tels systèmes de production ?
- Pour ceux n'étant pas munis, quelles en sont les raisons ?
- Pour ceux en étant munis, dans quelle mesure les systèmes de production d'énergie renouvelable sont-ils suffisants par rapport aux besoins du bâtiment dont il est question ?
- Et quels ont été les facteurs ayant facilité et/ou limité l'implantation de tels systèmes ?

Afin d'essayer de répondre à ces questions, nous allons nous pencher sur quelques projets de bâtiments à très basse consommation dans l'objectif de comprendre leur histoire ainsi que les choix qui ont été opérés concernant le recours aux énergies renouvelables. Les détails de ces projets dont nous allons discuter plus loin proviennent pour la plupart d'échanges et de discussions avec les bureaux d'architectes responsables de la conception de ces projets.

6. Cas des bâtiments à très basse consommation

Tout d'abord, afin de répondre à la première question, nous pouvons, par exemple, observer le détail des projets ayant participé au Green Solutions Awards. Le détail de ces projets est en libre accès sur le site internet de Construction 21 (<https://www.construction21.org/>).

Ainsi, si l'on étudie les différents projets de bâtiments belges ayant participé au concours pour l'édition de 2015, 2016 et 2017 (18 projets belges au total), nous pouvons remarquer que 13 d'entre eux sont munis de systèmes de production d'énergie renouvelable alors que 5 d'entre eux n'en comportent pas. Cela signifie que « seulement » 72% de ces projets à très basse consommation sont pourvus de systèmes ayant recours aux énergies renouvelables, ce qui représente tout de même une bonne majorité.

Dès lors, pourquoi certains de ces projets sont-ils dépourvus de telles technologies ? Les échanges et discussions auxquels j'ai pu participer avec plusieurs architectes (du bureau d'architecture « Activ'Architecture », « Hélium 3 » et « A2M ») nous indiquent que, dans la majorité des cas, si de tels bâtiments ne sont pas munis de telles technologies, cela est principalement dû à 2 raisons : un manque d'espace pour implanter ces technologies et/ou un manque de budget.

Enfin, pour tenter de répondre aux autres questions, observons les quelques projets décrits ci-dessous, dont les conceptions furent réalisées par les bureaux d'architectes précédemment cités. Ces bureaux d'architectes ayant été choisis comme source d'information de ce travail pour leur expérience dans le bâti durable, chacun d'eux ayant été responsable de la conception d'au minimum un projet de bâtiment ayant été lauréat du Green Solutions Awards.

6.1. Maison à Hondelange (Hugé)

À Hondelange, dans la province de Luxembourg, une maison semi-mitoyenne de taille moyenne, construite, via le bureau d'architecte « Activ'Architecture SPRL », avec un budget relativement court (350 000 €) mais des attentes très grandes, dissimule ses propriétés écologiques et thermiques, ne laissant apparaître de l'extérieur qu'un aspect presque banal. Les propriétaires ayant préféré se concentrer sur les performances thermiques ainsi que sur la qualité

des matériaux utilisés plutôt que sur l'aspect du bâtiment. Nous pouvons observer ce bâtiment à la figure ci-dessous.



Figure 26 : Maison à Hondelange (Activ' Architecture, n.d.)

La maison, se voulant être capable d'être totalement autonome, fût construite de manière à dépasser les critères du standard passif. La maison se passant complètement de système de chauffage. L'optimisation bioclimatique permet ainsi d'atteindre une température de confort suffisante principalement grâce au rayonnement solaire. Les besoins de chaleurs, s'élevant à 800 W en hiver, sont comblés par l'occupation des habitants eux-mêmes ainsi que par la chaleur dégagée par l'utilisation des auxiliaires. Des panneaux solaires photovoltaïques, installés quasiment plein sud sur l'arrière du bâtiment, produisent la totalité des besoins en électricité nécessaires pour la maison, notamment pour les auxiliaires et l'ECS, dont le ballon de stockage a une capacité de 300 l.

De plus, les matériaux utilisés ont été choisis de manière à limiter au maximum l'impact environnemental du projet. En effet, la structure est en bois et fût construite à proximité par un artisan local, l'isolation est à base de laine de bois, les peintures sont écologiques, le parquet est en bois massif, ... En outre, on peut retrouver, à certains endroits de l'habitation, des murs en terre crue afin de profiter de leurs performances thermiques, mais également acoustiques et hygrométriques. Ces murs sont ainsi notamment utilisés dans le but d'absorber l'humidité

excédentaire présente dans l'air afin de la restituer plus tard, quand l'humidité de l'air est trop faible.

Enfin, la structure du bâtiment étant en bois, il a été ajouté une grosse dalle en béton située dans le volume protégé afin de profiter d'une inertie thermique suffisante permettant d'éviter la surchauffe d'une part, et de stocker de la chaleur avant de la libérer durant les périodes les moins chaudes de la journée d'autre part.

Ce projet a ainsi été lauréat de plusieurs concours. À savoir :

- Le concours Batex en Wallonie, en 2012
- Le concours Green Solutions Awards au niveau national, pour la catégorie « santé et confort », en 2017
- Le prix d'architecture durable en province de Luxembourg, en 2017

En résumé, nous retrouvons donc ici un projet de construction dont la totalité des besoins énergétiques sont fournis par des panneaux photovoltaïques grâce à :

- Des **besoins de chaleurs quasi nuls**, ce qui implique **l'absence de système de chauffage**. Conséquence d'une volonté initiale d'avoir une performance énergétique très élevée.
- Des **besoins en ECS** garantis grâce aux panneaux PV et d'un ballon suffisamment grand, ce qui permet de profiter d'un **stockage** énergétique suffisant, attestant de la **flexibilité de la technologie**.
- Une **orientation plein sud** sans ombrage ainsi qu'un **angle d'inclinaison du toit idéal**, ce qui permet de contourner les problèmes de **flexibilité de la technologie** photovoltaïque.
- Un **toit suffisamment grand** pour placer assez de panneaux PV, ce qui permet de contourner les problèmes liés à la **disponibilité d'un espace adéquat**.
- La **maturité de la technologie**, ce qui permet de profiter de son **efficacité**.

6.2. Le Coating Research Institute (CoRI)

Le CoRI est une ASBL dont l'objectif est de stimuler la recherche et l'innovation concernant les peintures, les vernis et autres revêtements. Ses laboratoires ainsi que ses bureaux sont situés à Limelette, dans la province du Brabant wallon.

Le projet du CoRI, dont la conception fût réalisée par le bureau d'architecte « Hélium 3 », s'inscrit dans la volonté de la société de moderniser son image, de respecter les exigences des standards énergétiques actuels ainsi que d'agrandir leur espace de travail afin de continuer à se développer. Ce projet consiste en une rénovation du bâtiment de bureau existant (datant des années 60) ainsi qu'en un ajout d'une extension. La figure ci-dessous illustre l'évolution du CoRI, avant et après travaux.



Figure 27 : Évolution du CoRI, avant et après travaux (EnergiePlus, n.d.-d)

Le bâtiment existant, de type lourd et initialement non isolé, a été isolé de l'extérieur afin de pouvoir utiliser l'inertie du bâtiment ainsi que d'éviter les ponts thermiques. Des protections solaires fixes ont également été ajoutées afin de préserver le bâtiment de la surchauffe. Les fenêtres du bâtiment existant ayant été remplacées peu avant le projet et présentant des performances thermiques satisfaisantes (double vitrage), celles-ci ont été conservées. De plus, le bâtiment existant se trouvant en partie au-dessus d'un vide sanitaire, le plancher au-dessus de celui-ci fût isolé par-dessous. Le plancher en contact avec le sol ne fût quant à lui pas isolé pour des raisons budgétaires.

Concernant l'extension, celle-ci fût réalisée en ossature bois, ce qui est tout d'abord un choix idéologique, le but étant de construire un bâtiment durable et écologique. Mais également, un choix pratique. Une ossature bois étant plus simple à installer qu'une ossature lourde, le CoRI ayant décidé de continuer ses occupations durant les travaux. Afin de combler le manque

d'inertie thermique lié à une ossature bois, une dalle de béton lisse fût installée au rez-de-chaussée et une chape lourde à l'étage. Les nouvelles fenêtres installées dans le nouveau bâtiment sont munies d'un double vitrage. Le triple vitrage n'ayant pas été retenu pour ce projet pour des raisons budgétaires.

Le nouveau bâtiment fût placé dans une orientation nord-sud, permettant ainsi de mieux gérer les apports solaires grâce à de grandes fenêtres placées sur la façade sud, entourées par un long bardage en bois en forme de serpentín servant de protection solaire fixe. Le choix des protections solaires fixes, que ce soit pour l'extension ou pour le bâtiment existant, a été fait d'une part par contrainte budgétaire, les protections mobiles étant plus chères, et d'autre part par souci de durabilité, celles mobiles pouvant s'abimer plus rapidement.

Les besoins énergétiques du CoRI après travaux sont exclusivement sous la forme d'électricité. En effet, le chauffage et le refroidissement éventuel sont assurés par une pompe à chaleur aérothermique réversible, l'ECS est assurée par des chauffe-eaux électriques, et l'entièreté des auxiliaires supplémentaires fonctionne également à l'électricité. 48% de l'électricité nécessaire au CoRI est ainsi alimentée par 198 panneaux photovoltaïques placés dans le jardin à l'arrière du bâtiment existant. Ces panneaux permettent une production annuelle moyenne de 43 000 kWh.

Il a été choisi de ne pas installer plus de panneaux PV, d'une part, à cause des contraintes budgétaires, mais également, d'autre part, parce que les nombreux auxiliaires très énergivores présents dans les laboratoires du CoRI vont probablement être remplacés dans peu de temps par des auxiliaires plus performants et donc moins énergivores. La demande d'électricité du CoRI allant sans doute diminuer dans les années à venir.

Ce projet a ainsi été lauréat de plusieurs concours. À savoir :

- Le concours Batex en Wallonie, en 2013
- Le concours Green Solutions Awards au niveau national, pour la catégorie « énergie et climat tempérés », en 2016

En résumé, nous retrouvons donc ici un projet de rénovation et de construction dont près de la moitié des besoins énergétiques sont fournis par des panneaux photovoltaïques grâce à :

- De **faibles besoins de chaleur** assurés par une **PAC aérothermique**. L'**impact extérieur** lié au bruit n'étant ici que peu pertinent étant donné qu'une ventilation

à grand débit (et donc bruyante) est de toute façon nécessaire pour les activités des laboratoires du CoRI.

- Des **besoins en ECS quasi nuls** garantis grâce aux panneaux PV et de chauffe-eaux électriques individuels.
- Une **orientation vers le sud** sans ombrage ainsi qu'un **angle d'inclinaison idéal** des panneaux PV ont pu être obtenus, ce qui permet de contourner les problèmes de **flexibilité de la technologie** photovoltaïque.
- Un **espace suffisamment grand** pour placer de nombreux panneaux PV, ce qui permet de contourner les problèmes liés à la **disponibilité d'un espace adéquat**.
- La **maturité de la technologie**, ce qui permet de profiter de son **efficacité**.

Néanmoins, la totalité des besoins énergétiques n'ont pas pu être comblés par les panneaux photovoltaïques, car :

- Le **budget** – relatif aux **facteurs économiques** – du projet était fortement limité.
- L'**avenir des consommations** énergétiques du CoRI est incertain, étant donnés les investissements futurs prévus dans les auxiliaires utilisés.

6.3. Logements sociaux à Jette

À Jette, en Région de Bruxelles-Capitale, un bâtiment appartenant au Foyer Jettois comprenant 2 unités de logements sociaux zéro énergie fût construit en 2011. La conception de ce projet de construction fût réalisée par le bureau d'architecture « A2M », spécialisé dans les constructions passives.

Le coût de l'énergie étant globalement toujours en augmentation, ce projet vient s'inscrire dans un contexte où les personnes démunies, vivant dans des logements sociaux, voient leurs factures d'énergies augmenter année après année, contribuant à leur appauvrissement. C'est de cette situation que l'idée d'un projet de construction de logements sociaux zéro énergie vu le jour. Ce projet est illustré à la figure ci-dessous.



Figure 28 : Logements sociaux zéro énergie de Jette (A2M, 2011)

Pour atteindre cet objectif de logements zéro énergie, il a donc en premier lieu fallu atteindre une performance énergétique très élevée. Pour ce faire, l'isolation et l'étanchéité ont été poussées à tel point que le bâtiment peut se passer d'un système de chauffage conventionnel. Néanmoins, pour répondre aux très faibles besoins en chauffage (2026 kWh par an pour l'ensemble des 2 logements), un système de ventilation double flux avec échangeur de chaleur et couplé à une petite batterie de chauffe a été installé. De plus, ce système de ventilation permet également de garantir une excellente qualité d'air dans le bâtiment par un renouvellement d'air frais, régulé par une sonde CO₂, permettant ainsi d'optimiser la gestion et la consommation de la ventilation.

L'ECS, dont les besoins énergétiques atteignent 8552 kWh par an pour l'ensemble des 2 logements, est couverte à 60% par des panneaux solaires thermiques.

Des panneaux solaires photovoltaïques permettent d'assurer le reste de la production d'ECS, les besoins de chauffages discutés plus haut via une batterie de chauffe, ainsi que les besoins d'électricité (5226 kWh par an pour l'ensemble des 2 logements).

La totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est ainsi produite par des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques directement sur place... ou presque.

En effet, étant en milieu urbain, la surface du toit du bâtiment en question est assez petite. Si bien qu'à elle seule, elle n'est pas suffisante pour permettre l'implantation de tous les

panneaux solaires (thermiques et PV) nécessaires au besoin des 2 logements sociaux. Ainsi, les panneaux excédentaires ont été placés sur le toit du bâtiment voisin, dont le Foyer Jettois est également propriétaire.

C'est donc grâce à cette mutualisation d'espaces – illustrée à la figure suivante – peu courante que ce projet de logements zéro énergie a donc pu être concrétisé.

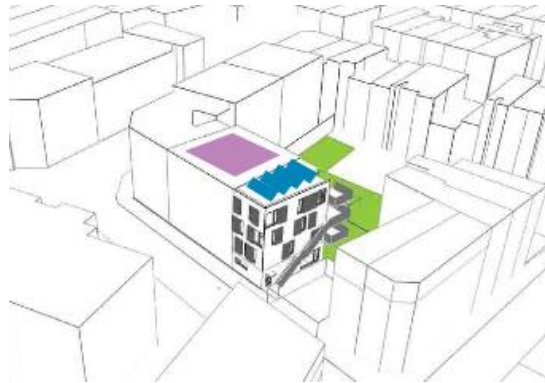


Figure 29 : Mutualisation d'espaces entre 2 bâtiments voisins permettant l'implantation d'un plus grand nombre de panneaux solaires (A2M, 2014)

En résumé, nous retrouvons donc ici un projet de construction dont la totalité des besoins énergétiques sont fournis par des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques grâce à :

- De **faibles besoins de chaleurs** assurés par une petite batterie chaude dans le système de **ventilation**. Conséquence d'une volonté initiale d'avoir une performance énergétique très élevée.
- Des **besoins en ECS** assurés à 60% par les panneaux **solaires thermiques** et à 40% par les panneaux **solaires PV**
- Une **orientation vers le sud** sans ombrage, ce qui permet de contourner les problèmes de **flexibilité des technologies** solaires.
- La **maturité des technologies** solaire, ce qui permet de profiter de leur **efficacité**.
- Et surtout, une **mutualisation d'espaces** permettant une surface de **toit suffisamment grande** pour placer assez de panneaux solaires thermiques et PV, ce qui permet de contourner les problèmes liés à la **disponibilité d'un espace adéquat**.

7. Discussion

Suite à la description de ces projets, nous pouvons observer qu'un certain nombre de facteurs ayant encouragé ou limité l'implantation de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein des bâtiments en question appartiennent à des catégories de facteurs étudiées dans le chapitre 4 de ce travail. À savoir, les catégories de facteurs concernant :

- La flexibilité des technologies
- La disponibilité d'un espace adéquat
- L'efficacité des technologies
- Les impacts extérieurs
- Les facteurs économiques

Néanmoins, une série d'autres facteurs observés dans ces projets ne faisait pas partie des catégories de facteurs discutées au chapitre 4. Tels que :

- Des besoins de chauffage ou d'ECS quasi nuls, ne nécessitant donc pas de systèmes de production d'énergie renouvelable, limitant ainsi l'importance de tels systèmes de production.
- L'incertitude relative aux consommations futures, ce qui implique une certaine prudence dans le dimensionnement des systèmes de production.

Afin d'analyser plus en détail les incitants et les contraintes de l'implantation d'énergies renouvelables rencontrés dans des projets de bâtiments – et plus particulièrement dans des projets de bâtiments à très faible consommation – il aurait été intéressant d'obtenir un plus grand nombre de témoignages de bureaux d'architecture. En effet, un nombre élevé de témoignages aurait permis de quantifier les fréquences des différents facteurs rencontrés et ainsi de comparer ces résultats à ceux obtenus au chapitre 4 de ce travail sur base des données extraites de la littérature.

Cependant, suite à des contraintes académiques, ce mémoire a été réalisé sur une période relativement limitée. Il n'a donc pas été possible dans ce contexte d'obtenir davantage de témoignages de bureaux d'architectures (surcharge de travail, emploi du temps non adapté, congé des gestionnaires, ...).

8. Conclusion

Ce travail avait pour objectif l'analyse des facteurs facilitant ou contraignant l'utilisation d'énergies renouvelables dans des bâtiments, et en particulier dans des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle.

Pour ce faire, il a fallu dans un premier temps analyser les différents systèmes de production d'énergie renouvelable régulièrement rencontrés au sein de bâtiments. Cette analyse a mis en évidence les facteurs incitant ou freinant l'implantation des différents systèmes de production. La plupart des facteurs apparaissant dans plusieurs des technologies de production, un comptage de ces facteurs ainsi que leur répartition en diverses catégories furent ensuite réalisés, ce qui a permis d'observer l'importance relative des différentes catégories de facteurs quant à l'incitation ou au frein à l'intégration de systèmes de production d'énergie renouvelable, tous systèmes confondus. Les catégories de facteurs ainsi mises en évidence furent les suivantes : contraintes d'utilisation, disponibilité de l'espace adéquat, efficacité technologique, étape d'études, étape d'installation, facteurs économiques, flexibilité technologique et impacts extérieurs.

Ensuite, après une brève description d'autres facteurs pouvant jouer un rôle dans cette problématique, une analyse de différents bâtiments à très faible consommation fût effectuée. De cette analyse, nous avons relevé que la majorité des facteurs observés correspondent à ceux étudiés dans les chapitres précédents (flexibilité des technologies, disponibilité d'un espace adéquat, ...). Néanmoins, d'autres paramètres ont également été mis en évidence (besoins de chauffage quasi nuls, ...).

Les différentes analyses des informations obtenues de la littérature d'une part, et des bureaux d'architecture d'autre part, nous amènent ainsi à conclure que :

- Certains facteurs sont plus récurrents que d'autres quant à l'incitation ou au frein à l'intégration de systèmes de production d'énergie renouvelable au sein de bâtiments, tels que des facteurs relatifs à la flexibilité des technologies
- Les raisons pour lesquelles l'implantation de tels systèmes de production n'est parfois pas réalisée ou parfois réalisée de manière insuffisante par rapport aux besoins énergétiques peuvent varier fortement d'un projet à l'autre

En effet, chaque projet de bâtiment, qu'il soit de construction ou de rénovation, a des caractéristiques qui lui sont propres et peut tout aussi bien rencontrer des facteurs incitant à l'implantation de systèmes de production d'énergie renouvelable que des facteurs freinant ou limitant ces implantations. Les bâtiments à très faibles consommations n'échappent pas à la règle.

Certains facteurs pouvant être spécifiques à un projet en particulier, il est d'autant plus important pour les architectes d'analyser systématiquement, et de manière créative, le potentiel de chaque projet, ainsi que d'en repérer l'intégralité de ses contraintes.

Bibliographie

- A2M. (2011). Jette. Retrieved August 17, 2018, from <http://www.a2m.be/jette/>
- A2M. (2014). Dossier de presse JETTE. Retrieved August 17, 2018, from <https://a2m.egnyte.com/dl/Q138LIC4hX>
- Activ'Architecture. (n.d.). Maison à Hondelange. Retrieved August 16, 2018, from <http://www.activarch.be/maison-a-hondelange/>
- Aillagon, J.-J. (2003). La décentralisation dans le domaine du patrimoine.
- ALCOR. (n.d.). Economie d'énergie : géothermie, pompe à chaleur. Retrieved August 9, 2018, from <http://www.alcor-contrôles.fr/economie-energie-geothermie-pompe-a-chaleur/>
- APERe. (2014). Le prix de l'énergie. Retrieved August 10, 2018, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18953#c20971373+c20971233+c20971223>
- Bouvard, A. (n.d.). Pompe à Chaleur Aérothermique, Avantages et Inconvénients. Retrieved August 9, 2018, from <https://www.energies-nouvelles.net/pompe-chaleur-aerothermique/>
- Brussels. (2017). Dispositif - Éolienne en milieu urbain. Retrieved August 10, 2018, from <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/eolienne-en-milieu-urbain.html?IDC=10183#>
- Brussels. (2018). Qu'est-ce qu'un bâtiment exemplaire? Retrieved August 14, 2018, from <https://environnement.brussels/thematiques/batiment/sinspirer-des-batiments-exemplaires/quest-ce-quun-batiment-exemplaire>
- Chaudieregaz. (n.d.). La chaudière biomasse : les avantages et les inconvénients. Retrieved August 10, 2018, from <http://www.chaudieregaz.com/chaudiere-biomasse.htm>
- Conseils thermiques. (2012). Conversion Energie finale/Energie primaire electricité : facteur 2,58 - Conseils Thermiques. Retrieved August 3, 2018, from https://conseils-thermiques.org/contenu/conversion_energie_primaire_finale.php
- Construction 21. (2018a). Awards 2018 - Phase 2 (votes). Retrieved August 15, 2018, from <https://www.construction21.org/france/static/award.html>
- Construction 21. (2018b). Green Solutions Awards.
- Construction 21. (2018c). *Présentation des Green Solutions Awards 2018*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=Hl4gcQW0veM>
- CSTC. (2013). Géothermie peu profonde. Retrieved August 9, 2018, from <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact39&art=591>
- CSTC. (2016). Réglementation sur la Performance Energétique (RPE). Retrieved August 4, 2018, from https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards_regulations&pag=norm_energy&art=regulations&niv01=energy_performance
- Day, T., Lim, D., & Yao, R. (2013). Design and management of sustainable built environments. *Design and Management of Sustainable Built Environments*, 9781447147, 1–432.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4781-7>

- DepanService. (n.d.). pompe a chaleur (PAC AIR/EAU). Retrieved August 9, 2018, from <https://www.depanservices.com/particuliers/climatisation/pompe-à-chaleur-air-eau/>
- DGO4. (2012). Critères de sélection de l'appel à projets "Bâtiments exemplaires Wallonie" - Appel 2012.
- Durable. (n.d.). Fonctionnement pompe à chaleur eau-eau. Retrieved August 9, 2018, from <http://pompeachaleur.durable.com/a-fonctionnement-pompe-a-chaleur-eau-eau#142>
- Économie d'énergie. (n.d.). Le bois énergie. Retrieved August 10, 2018, from <http://www.economiedenergie.fr/le-bois-energie.html>
- EF4. (n.d.). Fonctionnement du mécanisme des certificats verts. Retrieved August 12, 2018, from <http://www.ef4.be/fr/marche-energie/certificats-verts>
- EnergiePlus. (n.d.-a). La géothermie. Retrieved August 9, 2018, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18283#c20965943+c20965883+c20965893+c20965903>
- EnergiePlus. (n.d.-b). Le capteur solaire à eau chaude. Retrieved August 6, 2018, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16760#c2042+c2044+c2045>
- EnergiePlus. (n.d.-c). Le photovoltaïque - Prédimensionner l'installation. Retrieved August 6, 2018, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16688>
- EnergiePlus. (n.d.-d). PAINT IT GREEN : Rénovation et extension du bâtiment existant du CoRI. Retrieved August 17, 2018, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=20713&L=0#c21019133+c21019123+c21019113+c21019103+c21019093+c21019173>
- Energreen. (n.d.). FAQ photovoltaïque. Retrieved August 9, 2018, from <https://www.energreen.be/question-et-documentation/questions-reponses-faq/photovoltaique/combien-de-panneaux-photovoltaiques-sont-necessaires-pour-couvrir-la-consommation-electrique-dun-menage-moyen-en-belgique>
- EnergyTrend. (2011). Reduce Building's Energy Costs with Solar Ventilation Preheat Solution. Retrieved August 7, 2018, from https://pv.energytrend.com/knowledge/Solar_Ventilation_Preheat_Solution_20111122.html
- ESTIF. (2006). Solar Thermal Hydronics. Retrieved August 6, 2018, from <http://solarprofessional.com/articles/products-equipment/solar-heating/solar-thermal-hydronics#.W2hykLg69Pb>
- European Environment Agency. (2017). Final energy consumption by sector and fuel. Retrieved August 3, 2018, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>
- European Parliament. (2018). Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic). Retrieved August 3, 2018, from <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic>
- Eurostat. (2014). 2014 energy consumption by sector in the EU. Retrieved August 3, 2018, from <https://epthinktank.eu/2016/07/08/energy-efficiency-in-buildings/energy-consumption-by-sector/>

- Eurostat. (2017). Net electricity generation, EU-28, 2015. Retrieved August 3, 2018, from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Net_electricity_generation,_EU-28,_2015_\(%25_of_total,_based_on_GWh\)_YB17-fr.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Net_electricity_generation,_EU-28,_2015_(%25_of_total,_based_on_GWh)_YB17-fr.png)
- Hauglustaine, J.-M., Delnoy, M., & Leviaux, J.-B. (2009). *La performance énergétique des bâtiments expliquée*. (Edi.pro, Ed.) (CCI SA). Liège.
- Hayter, S. J., & Kandt, A. (2011). Renewable Energy Applications for Existing Buildings - Preprint. *48th AiCARR International Conference*, (August), 1–15. Retrieved from <http://www.osti.gov/bridge/%5Cnhttp://www.ntis.gov/help/ordermethods.aspx>
- IEA. (n.d.). Balance definitions. Retrieved August 4, 2018, from <https://www.iea.org/statistics/resources/balancedefinitions/>
- IEA. (2018). Découvertes et production de pétrole brut dans le monde 1900-2017. Retrieved August 3, 2018, from <https://www.les-crisis.fr/video-va-t-on-manquer-de-petrole-dici-2-ans-par-olivier-berruyer/>
- IGBC. (2016). Nearly Zero Energy Building standard. Retrieved August 4, 2018, from <https://www.igbc.ie/nzeb/>
- InfoEnergie. (n.d.). Aérothermie, géothermie ou aquathermie - figures explicatives. Retrieved August 7, 2018, from https://www.infoenergie.eu/riv+ener/source-energie/Figures_explicatives.htm
- Kandt, A., Hotchkiss, E., Walker, A., Buddenborg, J., & Lindberg, J. (2011). Implementing Solar PV Projects on Historic Buildings and in Historic Districts, (September), 42. Retrieved from http://www.novoco.com/historic/resource_files/research/nrel_solar-pv-on-historic_101011.pdf
- Livos. (n.d.). Chaudières à biomasse. Retrieved August 10, 2018, from <https://www.livos.be/fr/info-construction/technique/chauffage-central/types-de-chaudieres/chaudieres-a-biomasse/>
- Médiaterre. (2018). Green Solutions Awards : c'est parti pour l'édition 2018 ! Retrieved August 15, 2018, from <https://www.mediaterra.org/actu,20180326115319,1.html>
- MonChauffagiste. (n.d.). Pompe à chaleur aquathermie (nappes et eau). Retrieved August 9, 2018, from <https://monchauffagiste.pro/pompe-a-chaleur-aquathermie/>
- NASA GISS. (n.d.). Surface Temperature Analysis: Analysis Graphs and Plots. Retrieved August 2, 2018, from <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>
- National Geographic. (n.d.). What Is Global Warming? Retrieved August 2, 2018, from <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/global-warming-overview/>
- Novallia. (n.d.). Développer mon projet éco-innovant. Retrieved August 13, 2018, from <http://www.novallia.be/reussir-ma-transition-energetique/developper-mon-projet-eco-innovant>
- Portail de la Wallonie. (2017). 10 nouvelles éoliennes sur les aires d'autoroute. Retrieved August 9, 2018, from <http://www.wallonie.be/fr/actualites/10-nouvelles-eoliennes-sur-les-aires-dautoroute>
- Solar Voltaics. (2012). Roof top installation in Old Portsmouth. Retrieved August 14, 2018,

- from https://www.solar-voltaics.com/roof-top-installation-in-old-portsmouth/?doing_wp_cron=1534239091.7435269355773925781250
- SOLEN. (2014). Les éoliennes.
- SPF Economie. (2016). *ENERGY - Key data 2016*.
- Spies, N. (2013). Evolution des réglementations thermiques, 15. Retrieved from http://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=agendapresentations&doc=doc_400_3_N_Spies_Evolution_des_reglementations_thermiques.pdf&lang=nl
- SPW. (n.d.-a). Déduction fiscale pour investissements économiseurs d'énergie dans les entreprises. Retrieved August 13, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/deduction-fiscale-pour-investissements.html?IDC=6952>
- SPW. (n.d.-b). Demande de garantie d'achat des certificats verts (installation supérieure à 10kW). Retrieved August 12, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/garantie-d-achat-des-certificats-verts.html?IDC=9210>
- SPW. (n.d.-c). Easy'Green, le financement de la transition énergétique. Retrieved August 13, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/financement-d-entreprises-innovantes.html?IDC=7625>
- SPW. (n.d.-d). L'action Bâtiments exemplaires Wallonie - BATEX. Retrieved August 14, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/batiments-exemplaires-wallonie.html?IDC=8614>
- SPW. (2017). Exigences PEB du 1er janvier 2018 au 31 décembre 2020. Retrieved August 4, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-du-1er-janvier-2018-au-31-decembre-2020.html?IDD=114085&IDC=7224>
- SPW. (2018a). Primes Energie (à partir du 1er mars 2018). Retrieved August 13, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/primes-energie-a-partir-du-1er-mars-2018.html?IDC=8793>
- SPW. (2018b). Tout savoir sur la prime QUALIWATT (fin: le 30 juin 2018!). Retrieved August 13, 2018, from <https://energie.wallonie.be/fr/installations-photovoltaiques-qualiwatt.html?IDC=8797>
- TIR Consulting Group LLC. (2016). *The 3rd industrial revolution for the Grand Duchy of Luxembourg*.
- TreeHugger. (2010). Lessons From The UK Heat Pump Study: Insulate First And Know What You Are Getting. Retrieved August 7, 2018, from <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/lessons-from-the-uk-heat-pump-study-insulate-first-and-know-what-you-are-getting.html>
- UNEP. (2007). *BUILDINGS AND CLIMATE CHANGE Status, Challenges and Opportunities*. Retrieved from www.unep.fr/pc
- WBDG. (2016a). Biomass for Heat. Retrieved August 10, 2018, from <https://www.wbdg.org/resources/biomass-heat>
- WBDG. (2016b). Geothermal Heat Pumps. Retrieved August 7, 2018, from <https://www.wbdg.org/resources/geothermal-heat-pumps>
- WBDG. (2016c). Solar Ventilation Air Preheating. Retrieved August 7, 2018, from <https://www.wbdg.org/resources/solar-ventilation-air-preheating>

Westerman, J. (n.d.). L'orientation d'une église. Retrieved August 19, 2018, from <http://www.guidecasa.com/se-documenter/bibliotheque/visiter-une-eglise/lorientation-dune-eglise/>