

Evaluation des consommations énergétiques de la commune de Schiffflange et estimation de son potentiel en énergies renouvelables

Auteur : Georges, Coralie Tatiana

Promoteur(s) : 2539; Andre, Philippe

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/2268.2/4437>

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.

Évaluation des consommations énergétiques de la commune de Schiffflange et estimation de son potentiel en énergies renouvelables



Mémoire présenté par Coralie Georges en vue de l'obtention des diplômes de :
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement - finalité Energies Renouvelables (Ulg)
Master en développement durable – finalité Energie et Environnement (Uni.lu)

Année académique 2017/2018

Promoteur : M Greger Manfred (UL)

M André Philippe (Ulg)

Comité de Lecture : M Mass Stefan (UL), M Spanier Guy (Administration communale de Schifflange)

« Copyright »

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

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

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

« Auteur du présent document : Coralie Georges, georges.coralie@yahoo.fr »

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier M GREGER Manfred, professeur à l'université du Luxembourg, pour le temps qu'il a su me consacrer, ses nombreux conseils et ses encouragements tout au long de la rédaction de ce rapport.

Je tiens particulièrement à remercier M SPANIER Guy, conseiller écologique au département développement durable de la commune de Schiffflange pour toute son aide et les données fournies. D'une manière générale, je remercie tout le département pour leur accueil et la gentillesse dont ils ont fait preuve à mon égard.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à l'ensemble des personnes (personnel enseignant, famille et amis) qui a contribué à la réussite de ces deux années et demi de reprise d'études.

Table des matières

Évaluation de la réduction de la consommation énergétique de la commune de Schiffflange	11
I. Présentation	11
II. Composition actuelle de la commune.....	12
III. Consommations énergétiques de Schiffflange	14
1. Identification des relevés de la commune	14
1.1. Consommation de gaz	14
1.2. Consommation électrique	15
2. Identification des relevés des bâtiments publics	17
2.1. Consommation thermique des bâtiments publics	17
2.2. Consommation électrique des bâtiments publics	18
3. Tableau de données	18
4. Prévision de l'augmentation de la population	19
5. Les aides financières au Luxembourg.....	20
6. Mobilité	21
6.1. La mobilité au Luxembourg	21
6.2. La mobilité à Schiffflange.....	21
7. Modification des installations de la commune	22
7.1. Eclairage public.....	23
7.2. Comparaison avec d'autres villes européennes.....	23
7.3. Installation d'une nouvelle centrale de cogénération	25
7.4. Régulation des chaudières	26
IV. Bilan	27
1. Consommations thermiques	27
2. Consommations électriques.....	28
3. Conclusion	28
Le potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange.....	29
I. Bilan énergétique mondial	29
II. La production d'énergies renouvelables	30
III. Situation en Europe et au Luxembourg.....	31
IV. Le potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange.....	32

1.	Le potentiel en énergie solaire de Schifflange	32
1.1.	Les différentes technologies existantes	32
1.2.	Calcul du potentiel en énergie solaire de Schifflange	36
2.	Le potentiel géothermique à Schifflange	46
2.1.	Description générale	46
2.2.	La géothermie au Luxembourg.....	48
2.3.	Potentiel géothermique à Schifflange.....	49
3.	Le potentiel de la biomasse à Schifflange	53
3.1.	Combustion	53
3.2.	Méthanisation des déchets	56
4.	Le potentiel éolien de Schifflange	58
4.1.	Présentation générale	58
4.2.	Le potentiel du grand éolien à Schifflange	59
4.3.	L'éolien en milieu urbain	59
4.4.	Evaluation du potentiel de l'éolien urbain à Schifflange.....	61
V.	Bilan du potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schifflange	63
VI.	Potentiel en énergies renouvelables sur les zones constructibles à Schifflange	65
	Notion de stockage de l'énergie.....	67
I.	L'intermittence des énergies renouvelables	67
II.	Technologies disponibles	68
1.	Le stockage mécanique	68
2.	Le stockage électrochimique	69
3.	Le stockage thermique	70
4.	Maturité des diverses technologies existantes	70
	Projets en cours à la déchèterie de la commune d'Aumetz.....	73

Liste des figures

Figure 1 : Carte topographique de la ville de Schifflange 1 :15000, source : géoportail.lu	11
Figure 2: intermittence du chauffage dans un bâtiment tertiaire (Ministère de la région Wallonne, 1997).....	26
Figure 3 : Régulation du système de chauffage dans 3 bâtiments tertiaires (Energetic, 2008)	27
Figure 4 : Evolution du mix énergétique global en 21 ans (AIE).....	29
Figure 5 : Mix énergétique dans la production d'électricité mondiale en 2000 et 2016 (Enerdata, 2017).....	30
Figure 6 : Evolution du rendement des capteurs solaires (Ademe, 2015a)	33
Figure 7 : Principe d'une installation CESI (ERA-Sun, 2011)	33
Figure 8 : Représentation d'un système combiné par plancher solaire (source : Ademe)	34
Figure 9 : Installation de panneaux photovoltaïques ("Energies renouvelables : les panneaux photovoltaïques," 2014).....	34
Figure 10 : Irradiation solaire au Luxembourg (Solargis, 2011)	36
Figure 11 : Estimation de la longueur de la pente des toits.....	37
Figure 12 : Production des panneaux solaires en fonction de leur orientation (Dualsun, 2014)	43
Figure 13 : Utilisation de la chaleur récupérée en fonction de sa température (Lindal, 1973)	46
Figure 14 : Les différents types de capteurs lors de la mise en place d'une pompe à chaleur géothermique (Système D, 2017)	47
Figure 15 : Géologie des sous-sols au Luxembourg (Maquil & Bintz, 1992)	48
Figure 16: Gazéificateur à co-courant (Connaissance des énergies, 2011b)	54
Figure 17 : Distribution de la fréquence de la direction du vent (Luxcontrol, 2000)	59
Figure 18 : Eoliennes à axe horizontal (Bruxelles environnement, 2017).....	60
Figure 19 : Eoliennes à axe vertical (Bruxelles environnement, 2017)	60
Figure 20 : Puissance maximale en W récupérée par une éolienne (Durable.com, n.d.)	61
Figure 21: Vue aérienne de la ZAE Um-Monkeler de Schifflange et sites potentiels pour l'éolien urbain (google map, n.d.)	62
Figure 22 : Maturité des différentes technologies de stockage d'énergie (Commission de régulation de l'énergie, n.d.)	70
Figure 23: Installation de panneaux solaires thermiques à Crailsheim et stockage saisonnier (BINE Information service, 2013)	72
Figure 24 : Projets de récupération d'énergie au sein de la commune d'Aumetz en France (Lévy, 2017).....	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des bâtiments communaux disposant de panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques	13
Tableau 2: Données des consommations électriques et thermiques de Schifflange	18

Tableau 3 : Evolution de la consommation électrique des ménages en fonction de la mobilité	22
Tableau 4 : Economies d'énergies en remplaçant les lumières à vapeur de mercure et de sodium par des LED	23
Tableau 5 : Comparaison de la consommation de l'éclairage public entre Schiffflange et Libramont..	24
Tableau 6 : Comparaison de la consommation de l'éclairage public entre Schiffflange et Villerupt.....	25
Tableau 7 : Liste des toitures disposant des panneaux solaires à Schiffflange	37
Tableau 8 : Nombre de bâtiments dont la surface des toitures a été calculée	41
Tableau 9 : Comparaison énergétique entre ST et PV	41
Tableau 10 : Coût des installations de PV en 2015 en France (photovoltaïque.info, 2017)	42
Tableau 11 : Surface solarisable et potentiel de production électrique à l'aide de PV à Schiffflange ...	44
Tableau 12: Potentiel de production électrique à l'aide de panneaux PV et ST (la surface solarisable répartie entre PV et ST).....	45
Tableau 13 : Nombre d'habitations disposant d'une surface suffisante pour l'installation d'une pompe à chaleur géothermique.....	51
Tableau 14 : Production annuelle de bois de la commune	54
Tableau 15 : Potentiel thermique et électrique à partir de la biomasse disponible à Schiffflange	55
Tableau 16: Répartition de la consommation (en %) de gaz au Luxembourg en 2013 et application à la consommation de Schiffflange (Sudgaz, 2015)	56
Tableau 17: Récapitulatif de la production et du potentiel en ER de la commune de Schiffflange.....	64
Tableau 18 : surface constructible à Schiffflange	65
Tableau 19: Les rendements de conversions des technologies de stockage de l'énergie	71

Liste des graphiques

Graphique 1 : Evolution de la consommation de gaz de Schiffflange de 2006 à 2013 des clients Sudgaz (colonnes bleues) et courbe des degrés-jours (rouge).....	14
Graphique 2 : Evolution de la consommation de gaz à Schiffflange en fonction du nombre de ménages et de la surface moyenne des logements au Luxembourg	15
Graphique 3 : Evolution de la consommation électrique à Schiffflange par secteur de consommation	15
Graphique 4 : Evolution de la consommation électrique totale par habitant de la commune de Schiffflange de 2006 à 2014	16
Graphique 5 : Evolution de la production d'électricité des centrales de cogénérations installées à Schiffflange	16
Graphique 6 : Evolution de la consommation thermique des bâtiments communaux	17
Graphique 7 : Evolution de la consommation électrique des bâtiments communaux.....	18
Graphique 8: Potentiel de production thermique à partir des énergies renouvelables à Schiffflange .	63
Graphique 9: Potentiel de production électrique à partir des énergies renouvelables à Schiffflange ..	63

Abréviations

AEV : Administration de l'environnement

CAES : Compressed air energy storage

COP : Coefficient of performance

ECS : Eau chaude sanitaire

ER : Energies renouvelables

Mtep : Million tonne équivalent pétrole

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PV : Panneaux photovoltaïque

ST : Solaire thermique

STEP : Station de transfert d'énergie par pompage

TT : Toit terrasse

UE : Union européenne

ZI : Zone industrielle

Introduction

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre du cursus du master en sciences et gestion de l'environnement option Energies renouvelables entre l'université des Sciences de Liège et l'Université des Sciences et Technologies du Luxembourg. Le sujet choisi pour la rédaction de ce mémoire a été proposé par la commune luxembourgeoise de Schifflange.

Les consommations énergétiques mondiales dépendent encore des énergies fossiles dont les ressources s'épuisent et dont l'utilisation engage des conséquences néfastes à l'environnement et aux Hommes. Les besoins énergétiques mondiaux ne vont cesser d'augmenter et l'utilisation croissante d'énergies renouvelables dans le mix énergétique est primordiale. L'Europe légifère sur les questions de transitions énergétiques et impose aux Etats membres des mesures afin d'augmenter leur part d'énergies renouvelables dans leurs consommations énergétiques totales et d'établir un plan d'action national permettant la validation de ses objectifs.

Au Luxembourg, chaque commune s'implique dans la transition énergétique de par sa participation au pacte climat d'une part et par la recherche des différentes possibilités s'offrant à elles.

Ce travail se scinde en 4 parties, bien que les deux premières soient les plus développées. La première partie évalue les différentes consommations thermiques et électriques de la commune de Schifflange et propose plusieurs axes afin de les limiter. Une comparaison avec deux autres villes a été réalisée concernant la consommation de l'éclairage public de la ville. Dans la seconde partie, l'évaluation du potentiel de différentes énergies renouvelables au sein de la commune de Schifflange a été effectuée. La plupart des énergies renouvelables étant intermittentes au cours de l'année, une revue bibliographique des différentes solutions de stockages de l'énergie existante est présentée dans la troisième partie. Enfin, le quatrième chapitre repose sur la présentation de deux projets qui seront réalisés au cours de l'année 2018 et 2019 dans la commune d'Aumetz en France, se situant à une dizaine de kilomètres de Schifflange.

Le mémoire réalisé n'a pas la prétention d'être un rapport complet et final concernant le potentiel en énergies renouvelables de toute la commune de Schifflange. Il a pour objectif de proposer certaines pistes d'économies d'énergies possibles pour la ville dans un premier temps, et, de balayer l'ensemble des différentes possibilités en matière d'énergies renouvelables qui s'offrent à Schifflange compte tenu de leurs développements ainsi que de la situation géographique de la ville.

Partie 1

Évaluation de la réduction de la consommation énergétique de la commune de Schifflange

I. Présentation

La ville de Schifflange se situe dans le canton d'Esch-sur-Alzette, dans le district de Luxembourg et s'étend sur 7,7 km² (Annuaire-mairie, n.d.). La population de la commune est de **10379** habitants en 2017 (Statec, 2017a) et compte environ **4152** ménages (en moyenne 2,5 personnes/ménage). Le développement durable tient une place importante au sein de Schifflange qui envisage à long terme une autarcie énergétique. Pour l'instant, son souhait est de développer les énergies renouvelables et de sensibiliser les habitants à la transition énergétique. Ces différents objectifs à échelle locale vont permettre de garantir une diminution des gaz à effet de serre et de la diminution de la consommation des énergies fossiles.



Figure 1 : Carte topographique de la ville de Schifflange 1 :15000, source : géoportail.lu

En 2012, le Luxembourg créé un pacte climat avec les communes du pays. L'Etat s'engage ainsi à subventionner les communes mettant en œuvre des mesures de réduction des gaz à effet de serre (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2012a). Il s'inspire de l'EEA (European Energy Award) basé sur un système de certification développé par les communes pour les communes. Un catalogue de mesures est destiné à chaque ville participante divisé en 6 catégories différentes (Ministère du développement durable et des infrastructures, n.d.) :

- Planification du développement territorial
- Bâtiments communaux et équipements
- Approvisionnement, assainissement
- Mobilité
- Organisation interne
- Communication, coopération

La commune de Schifflange a souscrit au pacte climat le 27/08/2013 et est actuellement certifiée au plus haut niveau, c'est-à-dire, plus de 75% du nombre maximum de points sont acquis (myenergy, n.d.).

Dans ce contexte, la ville souhaite réaliser un bilan sur le potentiel de réduction de ses consommations d'électricité et de gaz en mettant en lumière les différentes possibilités s'offrant à elle.

Dans un deuxième temps, la commune veut développer les énergies renouvelables sur son territoire, ce qui implique la détermination de son potentiel.

II. Composition actuelle de la commune

La commune est un exemple dans le sud du Luxembourg, elle est en effet la première à avoir été certifiée au plus haut niveau du pacte climat. Elle est actuellement composée de 2 centrales de cogénérations permettant l'alimentation thermique de 11 bâtiments publics sur les 26 composants la commune.(Ministère du développement durable et des infrastructures, 2015).

La consommation énergétique thermique a diminué grâce à la rénovation de 13 bâtiments publics depuis 2013, principalement en isolant la toiture et en changeant les fenêtres. (Living Green, 2017). Des modules de régulation sur les chaudières ont été installés mais ils ne sont pour l'instant pas ou peu exploités, faute de personnel disponible.

Des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques sont installés sur 7 bâtiments publics et l'électricité produite est réinjectée sur le réseau comme le montre le tableau 1 :

Tableau 1 : Liste des bâtiments communaux disposant de panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques

	Centre sportif	Sudd	Hôtel de ville	Stade Jean Jacoby	Ecole L. Schmit	Terrain 1	Gare
Date de mise en service	12.10.2010	09.10.2009	10.10.2007	10.10.2007	09.10.2007	11.10.2013	11.10.2013
Installation	ST	PV	PV	PV	PV	ST	PV
Puissance et surface installée	233 m ²	2 kWc 8 m ²	2 kWc 9 m ²	29 kWc 152 m ²	2 kWc 27 m ²	5 m ²	6 kWc 39 m ²
Energie produite en un an (kWh)	2305	1960	1739	1700	1399	1559	5142

La différence de production électrique entre les panneaux de même puissance crête est due aux différentes technologies utilisées. En effet, il s’agit de panneaux amorphes disposés sur l’école L. Schmit et la gare tandis que des panneaux en polycristallin sont utilisés sur le bâtiment Sudd, l’hôtel de ville et le stade Jean Jacoby. La technologie amorphe, bien que moins coûteuse dispose d’un rendement deux fois moins performant par rapport aux autres technologies, de par leur faible teneur en silicium (“Le panneau amorphe,” n.d.)

10 bâtiments communaux sont alimentés en chaleur à l’aide des deux centrales de cogénération. L’électricité qui est créée est pour le moment injectée totalement sur le réseau. La première centrale mise en service au début de l’année 1999 a une puissance de 720 kW_{th}. Deux chaudières la composent d’une puissance totale de 2800 kW. La deuxième centrale de cogénération a quant à elle été mise en service le 01/10/2011. Sa puissance thermique totale est de 294 kW_{th} et sa puissance électrique est de 195 kW_{élec}. Une chaudière de 540 kW complète la seconde centrale.

La piscine scolaire est aussi un bâtiment énergivore et consommatrice d’un volume important d’eau (Living Green, 2017). C’est pour cela que la municipalité a mis en place la récupération et l’utilisation de l’eau de pluie pour la piscine scolaire économisant près de 450 m³ d’eau/an ainsi que de l’énergie pour chauffer la piscine, car l’eau de pluie est naturellement plus chaude.

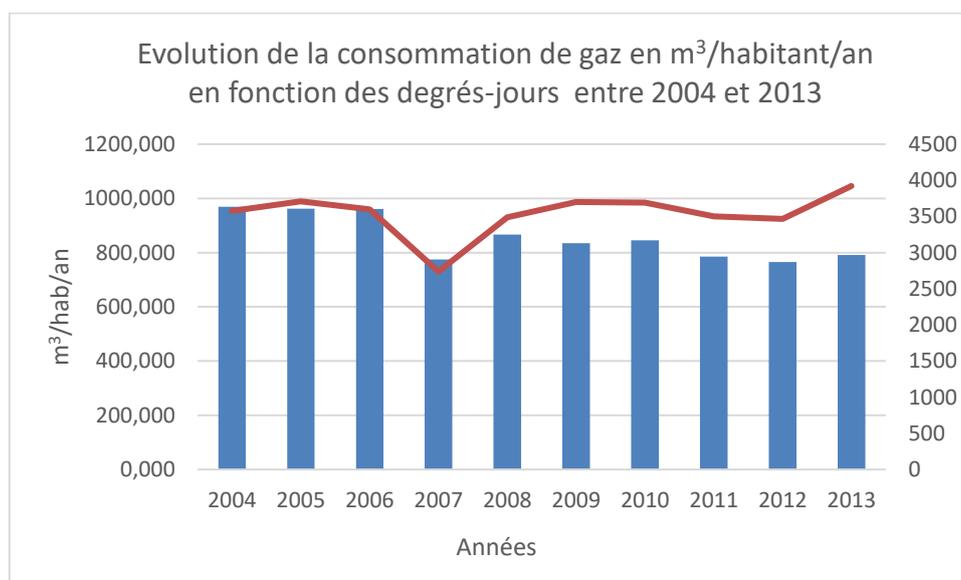
La ville de Schiffange souhaite encourager ses habitants à se détourner des moyens de locomotions polluant et pour cela, après des travaux actuellement en cours, une piste cyclable de 3 km traversant la ville d’ouest en est sera reliée au réseau national (Living Green, 2017). A la fin de l’année 2016, 3 stations de rechargement de véhicules électriques sont venues compléter les 3 déjà installées en ville.

III. Consommations énergétiques de Schifflange

Les consommations de gaz et d'électricité fournies par la commune se retrouvent en annexe 1.

1. Identification des relevés de la commune

1.1. Consommation de gaz



Graphique 1 : Evolution de la consommation de gaz de Schifflange de 2006 à 2013 des clients Sudgaz (colonnes bleues) et courbe des degrés-jours (rouge)

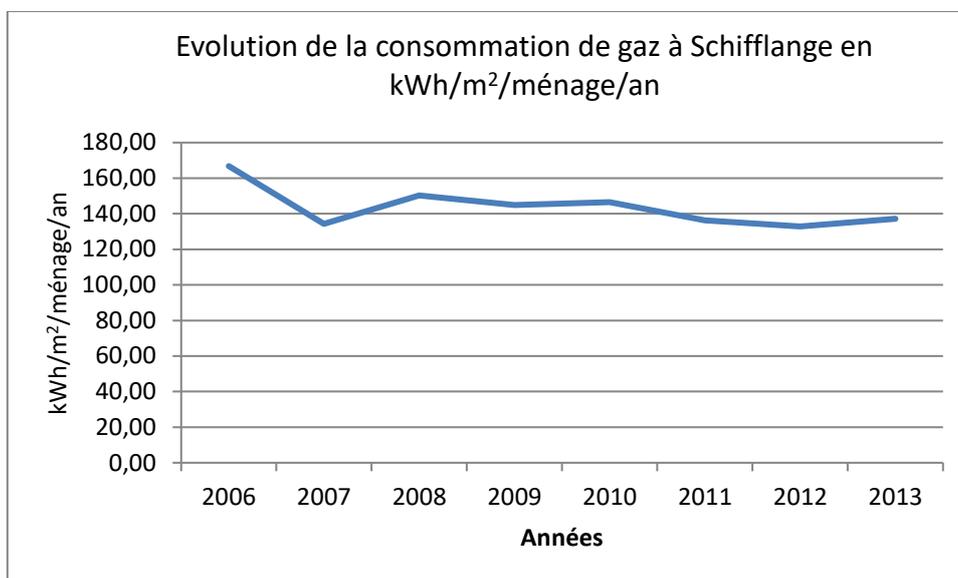
Le fournisseur Sudgaz alimente les riverains, petites entreprises et bâtiments communaux de la ville de Schifflange en gaz. Sur le graphique 1, la consommation par habitant à Schifflange entre 2004 et 2013 est représentée en supposant que cette consommation représente tous les ménages de Schifflange et qu'ils se chauffent tous au gaz.

On y retrouve également les degrés-jours. Il s'agit d'un moyen de « quantifier le froid » en multipliant le nombre de jour de chauffe d'un lieu par la différence entre la température intérieure et extérieure. Le résultat est proportionnel au besoin en chaleur du lieu en question (Energieplus, n.d.).

La variation de la consommation est fonction des températures extérieures, elle suit rigoureusement la courbe des degrés-jour jusqu'en 2008. Depuis 2011, la consommation en gaz tend à rester sous la barre des 800 m³/hab/an. Bien que les degrés-jours augmentent.

Au Luxembourg, la surface moyenne d'une habitation pour un ménage est d'environ 144,1 m², soit 57,64 m² par personne en tenant compte d'une moyenne de 2,5 personnes par ménage (Statec, 2014). De grandes disparités se retrouvent dans le pays en fonction de l'âge de la population et de leur revenu.

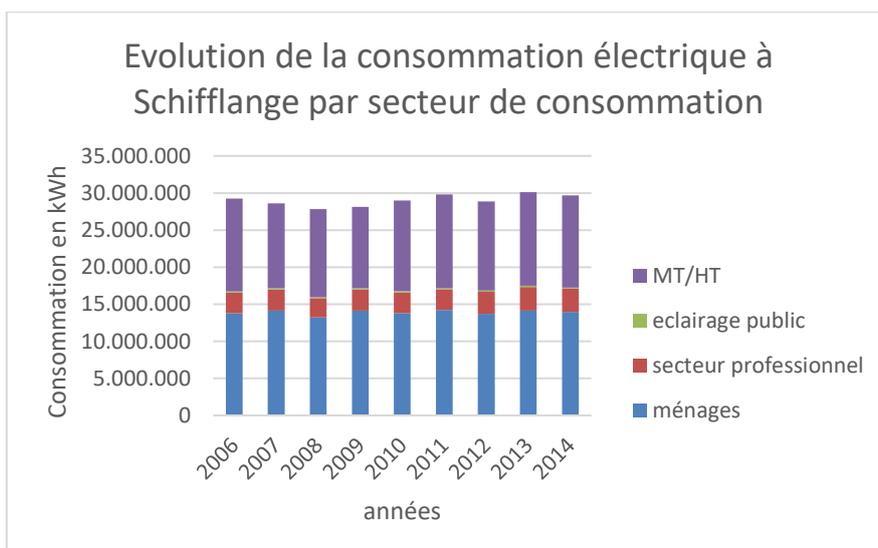
En tenant compte également du pouvoir calorifique du méthane d'environ 10 kWh/m³ (RMT biomasse, 2009), on représente la consommation de gaz en kWh/m²/ménage/an dans le graphique 2 ci-dessous :



Graphique 2 : Evolution de la consommation de gaz à Schifflange en fonction du nombre de ménages et de la surface moyenne des logements au Luxembourg

On retrouve la même tendance par rapport au graphique 1. La consommation moyenne d'un ménage depuis 2011 se situe en dessous de 140 kWh/m²/an.

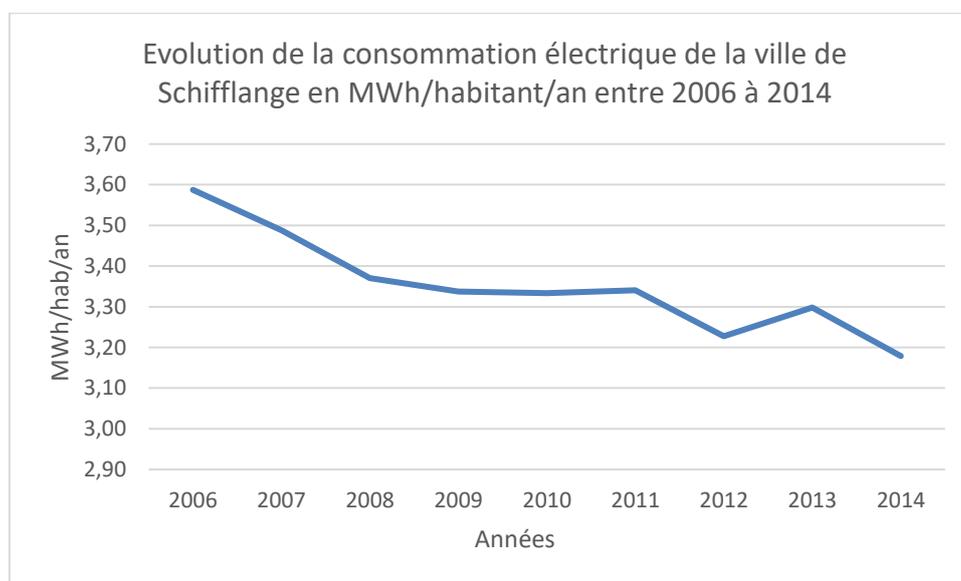
1.2. Consommation électrique



Graphique 3 : Evolution de la consommation électrique à Schifflange par secteur de consommation

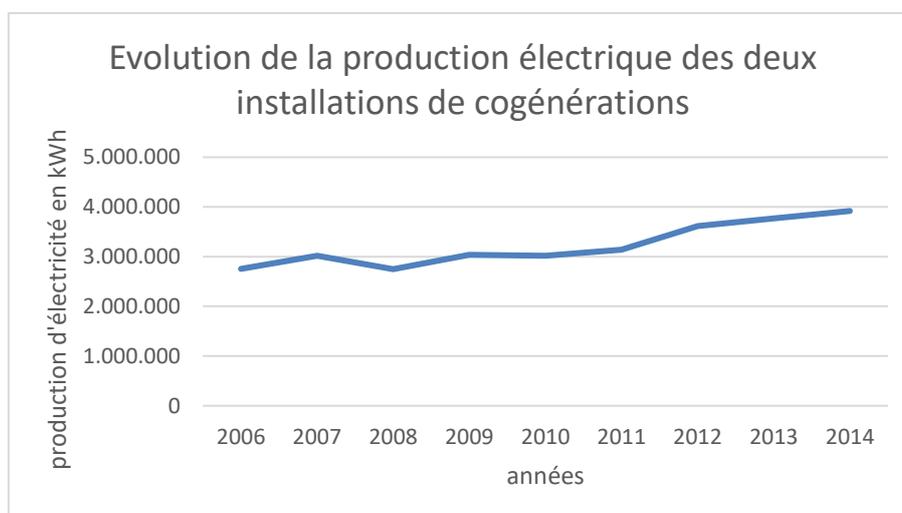
Les données de CREOS ont été récupérées auprès de la commune pour les relevés des consommations électriques. On y retrouve les valeurs entre 2006 et 2014 des ménages, du secteur professionnel et de

l'éclairage public pour ce qui concerne la localité. Les valeurs pour les moyennes et hautes tensions sont aussi mentionnées. En évaluant minutieusement les différents chiffres, la consommation des ménages a progressé ainsi que le secteur professionnel. En prenant en compte l'évolution de la population au sein de la commune, la consommation électrique spécifique par habitant diminue comme visualisé sur le graphique 5 ci-dessous :



Graphique 4 : Evolution de la consommation électrique totale par habitant de la commune de Schiffflange de 2006 à 2014

On remarque depuis 2006, une diminution, puis une stagnation de la consommation électrique. Depuis 2011, les consommations d'une année à l'autre sont irrégulières, mais diminuent par rapport à 2011 et semble en bonne voie dans cette direction. La production électrique des deux installations de cogénérations est actuellement injectée sur le réseau pour des raisons de coûts.

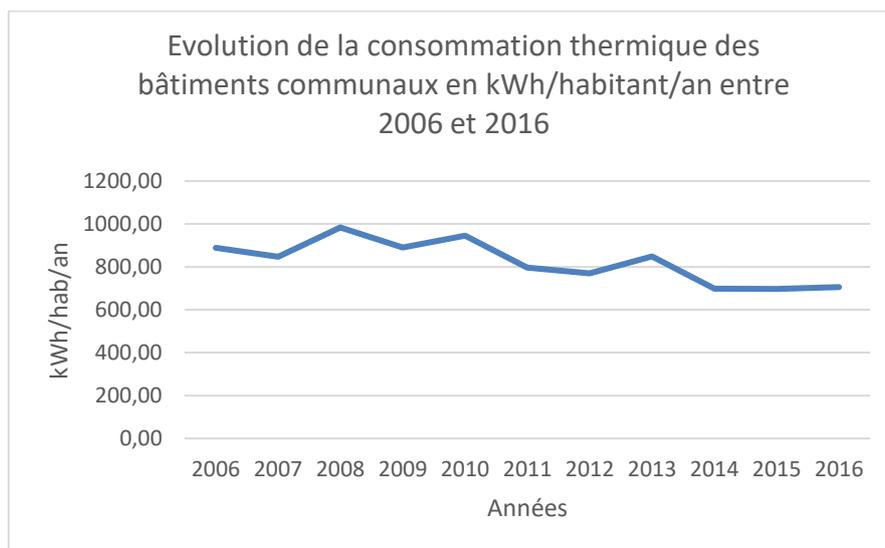


Graphique 5 : Evolution de la production d'électricité des centrales de cogénérations installées à Schiffflange

La production des centrales de cogénérations croît significativement depuis 2011, date de la mise en place de la 2^{ème} centrale : on remarque une augmentation de plus d'1 000 000 de kWh en 10 ans comme on peut le voir sur le graphique 6.

2. Identification des relevés des bâtiments publics

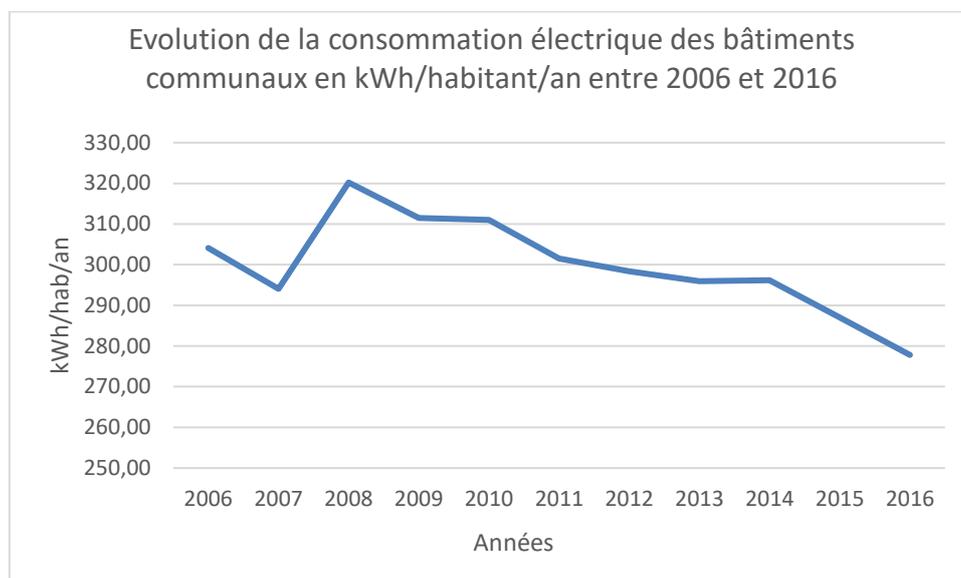
2.1. Consommation thermique des bâtiments publics



Graphique 6 : Evolution de la consommation thermique des bâtiments communaux

Le chauffage des bâtiments communaux varie entre 800 et 1000 kWh/habitant/an. En 2013, des travaux de rénovations ont été menés sur certains bâtiments communaux. On remarque alors une nette diminution de la consommation thermique en 2014. Depuis, cette consommation stagne autour de 700 kWh/hab/an.

2.2. Consommation électrique des bâtiments publics



Graphique 7 : Evolution de la consommation électrique des bâtiments communaux

Les données des 26 bâtiments publics ont été obtenues entre 2006 et 2016. Depuis 2008, la consommation électrique des bâtiments publics par rapport au nombre d'habitant de la commune diminue drastiquement. Une baisse de 42 kWh/hab en 8 ans a été réalisée (soit 13.1%). Plusieurs efforts ont été entrepris comme la mise en place de système de détection de mouvements permettant l'arrêt de l'éclairage des pièces automatiquement lorsque personne ne s'y trouve, des ampoules moins énergivores, le remplacement des lampadaires et une sensibilisation auprès du personnel communal.

3. Tableau de données

Le tableau 2 indique les consommations qui seront utilisées dans la partie 2. Le potentiel de chaque énergie renouvelable sera comparé par rapport à la consommation électrique et/ou thermique de la commune ou des ménages. Ces données ont été obtenues à partir des relevés de consommations fournis par la commune de Schiffflange.

Tableau 2: Données des consommations électriques et thermiques de Schiffflange

	Consommation électrique en 2014	Consommation de gaz en 2013
Commune (MWh)	29 665	72 251
Commune (m ³)	/	7 225 146
Ménages (MWh)	13 958	
Conso kWh/ménage	3739	19775
Conso en m ³ /hab	/	791

4. Prévision de l'augmentation de la population

La croissance démographique est un facteur important à prendre en compte dans la demande énergétique (Schneider electric, 2013). L'ensemble du sud du Luxembourg va connaître une augmentation significative de sa population ces prochaines décennies. Ces cinq dernières années le pays a connu une augmentation du nombre de résidents de plus de 12% d'après la Statec (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2016). Le pays abrite un dynamisme incontestable avec des perspectives intéressantes ("Les défis de la croissance démographique," 2015). Sa croissance économique se démarque de ses voisins européens avec un PIB de +3,3% au premier trimestre 2017 (Statec, 2017b). Une forte immigration au sein du pays explique cette croissance démographique qui ne va cesser de croître. Des hypothèses de croissances jusqu'à 2030 ont été effectuées dans le cadre du projet de reconversion de l'ancien site sidérurgique d'Esch-Schifflange. Ils prévoient un boum démographique allant de 23 à 59 % pour le sud du pays (AGORA, 2017). Eurostat, chargée des statistiques à l'échelle européenne indique une prévision de la population de plus de 938.000 habitants à l'horizon 2050 au Luxembourg (Eurostat, 2015). Le développement pose alors des questions sur la mise en place d'un nouveau modèle économique et social. A l'échelle locale et nationale, des réformes doivent être entreprises privilégiant la nouvelle organisation des logements, l'activité des communes et la mobilité tout en respectant les objectifs de la transition énergétique en marche ("Les défis de la croissance démographique," 2015).

L'augmentation de la population va de pair avec la construction de nouveaux logements. D'autant plus qu'il s'agit d'un secteur énergivore. En Europe, 40% de la consommation d'énergie est attribué au bâtiment (Service public de Wallonie, 2011). Au Luxembourg, les communes perçoivent une subvention de 6750 euros/habitant si elles augmentent d'1,5% le nombre de nouvelles constructions sur leurs territoires.

Depuis le 01/01/2017 au Luxembourg, la construction d'une nouvelle habitation doit répondre aux exigences énergétiques d'un NZEB (near zero energy building) correspondant à une catégorie de performance énergétique A (myenergy, 2017). Un bâtiment NZEB détient un niveau de performance énergétique de son enveloppe proche ou équivalent à celui du standard du passif et une part de production d'énergies renouvelables pour les consommations de chaleur/froid et d'électricité (Service public de Wallonie, 2012). On retrouve entre autre un besoin en chauffage annuel ne devant pas dépasser 22 kWh/m²/an, la mise en place d'une ventilation mécanique contrôlée avec récupérateur de chaleur...(Administration communale de Koerich, n.d.). Les nouvelles constructions réalisées chaque année permettront des économies en chauffage et en eau chaude sanitaires importantes par rapport aux constructions actuelles. En moyenne, entre 2000 et 2010, 25 nouveaux logements ont été

construits par an à Schifflange (Statec, 2011). En 2017, on comptabilise 4350 logements totaux représentés par 2710 bâtiments.

Une étude a été menée en 2001 sur la consommation thermique de plusieurs maisons passives en Europe (Autriche, Allemagne, France...) pendant la saison hivernale. Les résultats ont démontré une économie d'environ 84 % par rapport à une consommation d'une habitation normale (Guerriat, 2004).

5. Les aides financières au Luxembourg

Il est assez difficile d'évaluer le comportement des habitants face à la réduction de leur consommation d'énergie. La sensibilisation de la population est donc primordiale et passe par une communication claire auprès des citoyens. Des aides financières sont accordées par l'Administration de l'environnement au Luxembourg appelées PRIME HOUSE, mises en place dès 2001, soutenant l'assainissement énergétique des habitations de plus de 10 ans ainsi que le passage vers un approvisionnement énergétique s'appuyant sur des sources d'énergies renouvelables. Cette action du gouvernement permet d'inciter ses habitants à se détourner des énergies fossiles et de limiter leur consommation énergétique grâce à des travaux d'assainissements. Un dossier doit être introduit à l'AEV dans les 4 années suivant les travaux. Depuis 2013, les subsides sont octroyés en fonction du type d'assainissement entrepris et du standard de performance. Elles varient de 13 euros/m² jusqu'à 52 euros/m² et fixent le maximum accordé à 6000 euros pour une maison unifamiliale et 30 000 euros pour les résidences, l'aide couvre 50% des coûts engendrés. (Gouvernement du grand-duché de Luxembourg, 2017a). Ces politiques mises en place permettent une amélioration des bâtiments existants et une augmentation d'utilisation d'énergies de sources renouvelables qui ont pour but d'aider la commune et le pays dans ses objectifs globaux en matière de développement durable. D'après les données fournies par l'Administration de l'environnement datant de juin 2017, que l'on retrouve en annexe 2, depuis l'instauration de PRIME HOUSE en 2001, **83 ménages** à Schifflange ont bénéficié de ces subsides en réalisant des assainissements énergétiques de leur foyer (isolation des murs extérieurs, de la toiture ou le changement des fenêtres par exemple). Ce document ne recense pas tous les changements, seulement ceux ayant fait l'objet d'un dépôt de dossier à l'AEV. Cette démarche s'avère souvent longue et compliquée, beaucoup de personnes n'y ont donc pas recours. Cela étant, il s'agit du seul moyen de se rendre compte de l'implication des habitants de la commune concernant la réduction des consommations énergétiques. D'après le nombre peu important de ménages ayant contacté l'AEV, la commune souhaiterait mettre en place elle-même des subsides afin d'y faciliter l'obtention aux habitants en allégeant le dossier d'introduction. Même si l'impact réel ne peut pas être évalué à l'avance, une augmentation du nombre des travaux est à prévoir.

6. Mobilité

6.1. La mobilité au Luxembourg

La mobilité future des habitants est une donnée importante à prendre en considération, impactant directement la consommation énergétique des habitants. Le parc automobile du Luxembourg comptait fin 2016 plus de 380.000 voitures. Il y a en effet, près de 700 voitures pour 1000 habitants ce qui en fait le premier pays européen en cette matière (Antzorn, 2017). Bien que ralenti par la crise économique en 2008, le nombre de voitures n'a cessé de croître depuis les années 1950. La mobilité est très portée sur les véhicules personnels et le transport reste aujourd'hui la principale source de consommation d'énergie au Luxembourg (61%) (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2017b). Bien que le marché de la voiture électrique peine encore à démarrer, il est fondamental de prendre en considération à moyen terme, cette nouvelle source de consommation pour la commune. En effet, seulement 350 nouvelles immatriculations concernaient un véhicule électrique en 2016 au Grand-duché (Parrain, 2017). La mise en place de près de 1000 bornes de recharge à l'horizon 2020 marque la volonté du gouvernement luxembourgeois de se lancer dans sa « Troisième révolution Industrielle » afin de mettre en place une stratégie économique plus durable. La prévision à l'horizon 2050 est l'électrification totale pour les voitures particulières et les transports publics (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2017b) (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2012b).

6.2. La mobilité à Schifflange

L'estimation du nombre de véhicules personnels à Schifflange est de 7265 véhicules actuellement soit 1,7 voiture/ménage, en partant du nombre de résidents de la commune et en tenant compte des 700 voitures/1000 habitants. Pour évaluer la consommation des voitures électriques, on parle de kilowattheure par kilomètre (kWh/km). L'estimation de la consommation d'un véhicule électrique est assez difficile, il dépend du type de voiture et du nombre de kilomètres parcourus dans l'année par le particulier. En Allemagne, en 2010, le nombre de kilomètres parcourus en moyenne par un particulier sur une année est de l'ordre de 14.100 km (Direction générale Politique de mobilité durable et ferroviaire, 2014). Quant au type de véhicule, la marque Volkswagen reste le leader sur le marché automobile luxembourgeois (Antzorn, 2017).

Afin d'avoir une estimation de la consommation en sus de l'électrification du parc automobile pour la commune de Schifflange, le nombre moyen de kilomètres parcourus en Allemagne par an a été utilisé car la valeur au Luxembourg n'est pour l'instant, pas connue. En effet, en 2017, un sondage national a été lancé dans le pays afin de mieux connaître la mobilité de la population en prenant en compte le nombre important de frontaliers, les résultats n'étant pas encore disponibles (Luxmobil, 2017). Pour la consommation d'une voiture électrique, la nouvelle Volkswagen e-golf 2017 a été pris comme

modèle de référence. Sa consommation est de 12.7 kWh/100 km qui la classe dans les moyennes de consommation des véhicules électriques (10 kWh/100 km pour les plus petites jusqu'à 20kWh/100 km pour les berlines) (Desjardins, 2017). La consommation électrique moyenne supplémentaire par ménage serait alors de plus de **3000 kWh** par ménage (tableau 3). Evidemment, il ne s'agit pas d'un chiffre exact. Les caractéristiques des véhicules vont évoluer ces 20 prochaines années ainsi que le mode de consommation des habitants.

Tableau 3 : Evolution de la consommation électrique des ménages en fonction de la mobilité

	Un ménage moyen en 2014 à Schiffflange	Electrification de tout le parc automobile au Luxembourg
Consommation électrique en kWh/ménage/an	3739	6783

En 2014, la consommation électrique des ménages à Schiffflange était de 13 958 509 kWh. En tenant compte de la population cette année-là (9332 (Statec, 2017a)) et en gardant en moyenne 2.5 personnes par ménage, soit 3733 ménages environ, la consommation électrique était de 3739 kWh/ménage/an. L'électrification du parc automobile doublerait donc presque la consommation des ménages. Bien que 3000 kWh soit largement surestimés, les infrastructures du pays ne supporteraient pas un doublement de la consommation d'électricité des ménages. Si la commune souhaite réaliser une diminution de ses consommations énergétiques, des efforts importants doivent être effectués dans d'autres domaines par la commune mais également par les particuliers eux-mêmes. La couverture d'une part de la consommation électrique par des énergies renouvelables est aussi un moyen efficace de diminuer l'utilisation de la consommation de sources non renouvelables.

L'objectif de la commune est de sensibiliser au maximum les habitants vers les transports en commun et les économies d'énergies. Elle souhaite aussi développer le car sharing. Il s'agit d'un concept récent permettant de mettre à disposition des véhicules aux habitants afin de diminuer le flux de véhicules aux heures de pointes sur le réseau routier du pays et également de diminuer le nombre de véhicules par ménage à une moyenne inférieure à 1 contre 1.7 actuellement. En effet, afin de pouvoir se tourner vers des véhicules électriques il faudrait donc diminuer le nombre moyen de véhicules/ménage.

7. Modification des installations de la commune

Plusieurs changements permettraient aujourd'hui une diminution de la consommation énergétique de Schiffflange. Des travaux de réhabilitation peuvent améliorer l'enveloppe thermique des bâtiments communaux mais également des particuliers. Néanmoins, comme vu précédemment, même si la consommation des ménages représente une part importante de la consommation

énergétique de la commune, il est difficile de prévoir les actions des citoyens. La sensibilisation de la population reste le seul moyen de les informer sur cette thématique.

Les secteurs sur lesquels une commune peut avoir une incidence est l'amélioration des bâtiments communaux et de l'éclairage public.

7.1. Eclairage public

L'éclairage public des municipalités est régi par la norme européenne EN 13201 (AFE, 2007). Elle comprend 4 documents qui expliquent les différentes classes d'éclairage, les exigences, le calcul et la méthode de mesure des performances photométriques. D'après un tableau recensant tous les points lumineux constituant la ville de Schifflange, on remarque deux classes d'éclairage. La classe S3 est la plus répandue : elle représente les zones piétonnières et cyclistes, puis la classe ME correspondant aux voies des véhicules motorisés. En 2016, une puissance totale de **85054 W** était installée pour 1054 lumières différentes. Depuis 4 ans, la commune tente de diminuer sa consommation énergétique correspondant à l'éclairage public en remplaçant les lampes à vapeur de mercure par des LED et en diminuant la puissance d'éclairage de 70% à partir de 20h et de 50% supplémentaire entre minuit et 05h. Il restait encore 429 lampes à mercures en 2016 et la mise en place de LED d'une moyenne de 34W permettrait une économie annuelle de **35 782 W** (puissance installée) **et 150 285 kWh/an**. Une autre piste future serait de remplacer également les lampes à vapeur de sodium. A l'aide de lampe LED d'une puissance moyenne de 34W, la municipalité économiserait encore en théorie **13 383 W/an** (puissance installée) **et 56 208 kWh/an** par rapport au scénario 1. Ces données sont résumées dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Economies d'énergies en remplaçant les lumières à vapeur de mercure et de sodium par des LED

	SITUATION ACTUELLE (2016)			SCENARIO 1 (COURT TERME)			SCENARIO 2 (MOYEN TERME)		
	HQL	LED	HPS	HQL	LED	HPS	HQL	LED	LPS
Nombre de lampes	429	397	228	0	826	228	0	1054	0
Puissance installée (W)	50368	13551	21135	0	28137	21135	0	35889	0
Puissance totale installée (W)	85 054			49 272			35 889		
Consommation/an (kWh)	211 546	56 914	88 767		118 175	88 767		150 734	
Consommation totale/an (kWh)	357 227			206 942			150 734		

7.2. Comparaison avec d'autres villes européennes

La comparaison des consommations de l'éclairage public avec d'autres villes semble pertinente afin de situer la ville par rapport à diverses communes européennes ayant le même climat et un nombre d'habitants se rapprochant de celui de Schifflange.

7.2.1. Comparaison de l'éclairage public avec la commune de Libramont Chevigny

La première ville ayant accepté de communiquer certaines données est une commune Belge se situant en région wallonne dans la province du Luxembourg. Le nombre d'habitants de Libramont-Chevigny au 1/01/2017 est de 11 154 (Wikipedia, 2017a), soit 7.47% de plus que Schiffflange (tableau 5). La commune a fourni les relevés électriques concernant l'éclairage public de 2006 à 2016.

Tableau 5 : Comparaison de la consommation de l'éclairage public entre Schiffflange et Libramont

	Schiffflange	Libramont-Chevigny
Nombre d'habitants	10 379	11 154
Etendue de la commune en km ²	7,7	178
Occupation du sol en km ²	+/- 4	6.2
Consommation en kWh en 2016	357 227	700 983
Consommation en kWh/hab	34.42	62.85
Consommation en kWh/hab/ km ² bâti	8,61	10.13

Dans un premier temps, on s'aperçoit de la différence de la surface des deux villes ayant pourtant un nombre d'habitants sensiblement égal. Un rapport établi par la commune de Libramont indique que 92.3 % de la surface de la commune sont des parcelles non-bâties, donc disponible (DG SIE, 2011). Les bâtiments s'étendent sur seulement 3.5% de la surface de la commune, soit 6.2 km². Ce même chiffre n'a pas été retrouvé dans la littérature pour la commune de Schiffflange, mais il est aisé de s'apercevoir du peu de surface disponible d'après une vue aérienne de la ville. La surface bâtie représente au moins la moitié de la surface totale de la ville. D'après les résultats obtenus, on remarque que la consommation spécifique rapportée au nombre d'habitants est alors près de 2 fois moins énergivore à Schiffflange. Par contre, l'analyse n'a pas pu être portée entièrement du fait du manque de détails concernant les différents types de lampes utilisées actuellement à Libramont. Des efforts sont entrepris au sein de la ville de Schiffflange concernant l'éclairage public depuis 2012.

7.2.2. Comparaison de l'éclairage public avec la commune de Villerupt

La seconde commune ayant fourni la consommation de l'éclairage public de 2016 est la commune française de Villerupt, se situant près de la frontière Luxembourgeoise en Meurthe-et-Moselle. Son nombre d'habitants est de 9578 en 2017 (Insee, 2016), soit 7,72 % de moins par rapport à Schiffflange (tableau 6). Cette fois, la surface des communes et leurs occupations du sol sont plus ou moins identique d'après une vue aérienne des deux communes. On ne note pas de grande différence comme précédemment.

La consommation électrique concernant l'éclairage public atteint en 2016 : 786 494 kWh, soit 2,2 fois plus par rapport à celle de la commune de Schiffflange la même année.

Tableau 6 : Comparaison de la consommation de l'éclairage public entre Schiffflange et Villerupt

	Schiffflange	Villerupt
Nombre d'habitants	10 379	9578
Etendue de la commune en km ²	7,7	6.56
Occupation du sol en km ²	+/- 4	+/- 3.5
Consommation en kWh en 2016	357 227	786 494
Consommation en kWh/hab	34.42	82.11
Consommation en kWh/hab/ km ² bâti	8.61	23.46

La consommation de l'éclairage public à Villerupt rapportée au nombre d'habitants est 2.4 fois supérieure à celle de Schiffflange. Lorsque l'on compare également à la surface totale de la commune la consommation de la commune française est alors 2.8 fois plus importante. Comme dans l'exemple précédent, le détail des points lumineux n'a pas pu être fourni par la commune de Villerupt et la comparaison avec ceux mis en place à Schiffflange ne peut être effectuée.

7.2.3. Conclusion

Les données de deux villes ont pu être obtenues. Ces deux communes se trouvent dans des pays voisins au Luxembourg, la Belgique et la France. Leur nombre d'habitants, le climat et la luminosité par jour sont sensiblement les mêmes pour les 3 communes. Nous avons alors pu comparer les résultats des consommations électriques concernant l'éclairage public. Ces trois pays dépendent tous des mêmes objectifs d'économies d'énergies fixés par l'union européenne.

On retrouve une différence dans les tableaux ci-dessus lorsque l'on compare la consommation/hab entre les 3 villes. Schiffflange apparaît comme la moins énergivore des communes. La politique de la ville entrepris depuis quelques années vise à réduire cette consommation et semble donc efficace.

7.3. Installation d'une nouvelle centrale de cogénération

A Schiffflange, la ville prévoit d'installer une 3^{ème} centrale de cogénération début 2021, qui permettrait l'alimentation en chauffage de l'église, de l'hôtel de ville ainsi que du bâtiment de la gare. La consommation thermique de ces 3 bâtiments en 2016 était de : 611 MWh. Ce qui correspond à 9.17 % de la consommation thermique de l'ensemble des bâtiments publics en 2016.

Les subventions de la première centrale pour l'injection sur le réseau de l'électricité produite vont être stoppées fin 2018. En effet, elle a été mise en place au début de l'année 1999 et les subventions de

l'Etat ont une durée de 20 ans. Une étude du coût doit être réalisée entre deux scénarios possibles qui s'offrent à la commune :

1. Garder la centrale de cogénération en fonctionnement telle qu'elle est aujourd'hui
2. Remplacer la centrale de cogénération par une chaudière pour alimenter les bâtiments publics en chaleur

7.4. Régulation des chaudières

Le potentiel de régulation du chauffage dans les bâtiments communaux est également une piste d'économie d'énergie pour la commune de Schiffange. Neuf bâtiments publics en sont pourvus :

- la maison des générations, le centre des séniors, 2 stades (stade FCS terrain 2, stade Jean Jacoby), les 3 écoles allant du cycle 1 à 4, c'est-à-dire de 4 à 12 ans (école Lydie Schmitt, école Nelly Stein et l'école Albert Wingert), le centre culturel et enfin l'hôtel de ville

Parmi eux, on retrouve cinq des bâtiments les plus énergivores de la commune (les 3 écoles, la maison des générations et l'hôtel de ville). Mis à part la maison des générations, toutes ces bâtisses ont le point commun d'être occupées à des intervalles réguliers dans une journée ainsi que de longues périodes d'inoccupation.

A l'heure actuelle, la commune ne régule pas de façon optimale les différentes bâtisses. Il est difficile de chiffrer exactement l'économie réalisée. Dans la littérature, nous retrouvons ces données qui peuvent être une piste d'estimation grossière. Les objectifs de la régulation sont de chauffer au bon endroit, au bon moment et à une température de confort des occupants. On peut alors réguler les bâtisses en réduisant dans un premier temps la surface de chauffe (zones inoccupées...), en diminuant la température de chauffe d'un degré de certaines zones (couloirs, sanitaires...) permettant jusqu'à 8% d'économies et enfin en réalisant un programme en fonction des heures d'occupation des locaux comme démontré sur la figure 2 ci-dessous (Ministère de la région Wallonne, 1997).

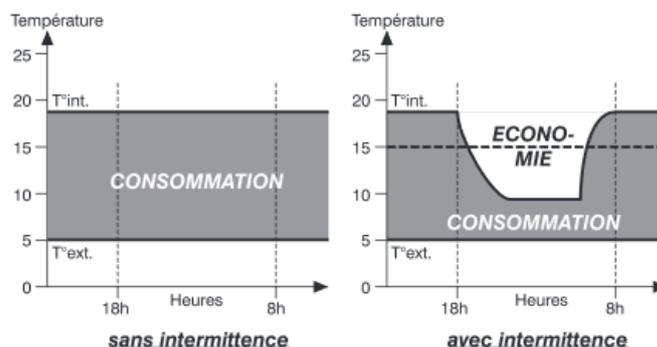


Figure 2: intermittence du chauffage dans un bâtiment tertiaire (Ministère de la région Wallonne, 1997)

Les économies reliées à cette intermittence dépendent également d'autres facteurs propres au bâtiment comme : l'isolation du bâtiment, l'inertie du bâtiment, le dimensionnement du système de chauffage et la durée de coupure du chauffage (nuit, week-end, vacances scolaires...)

Une étude sur la simulation de trois bâtiments a été réalisée en 1989. Les économies de chauffage selon trois modes de coupures par rapport à un mode de fonctionnement continu sont répertoriées dans la figure 3 ci-dessous (Energetic, 2008) :

Economie par rapport au fonctionnement continu				
Mode de ralenti	Isolation	500 m ²	2 000 m ²	4 000 m ²
Abaissement de température d'eau				
	peu isolé	12,5 %	11,4 %	10,8 %
	bien isolé	11,7 %	10,9 %	10,3 %
	très isolé	10,2 %	9,5 %	8,3 %
Coupure (horloge)				
faible inertie (150 kg/m ²)	peu isolé	37,7 %	31,9 %	29,5 %
	bien isolé	33,8 %	29,6 %	26,6 %
	très isolé	26,5 %	22,6 %	17,0 %
forte inertie (400 kg/m ²)	peu isolé	37,5 %	28,0 %	25,0 %
	bien isolé	30,6 %	25,2 %	22,0 %
	très isolé	21,9 %	18,2 %	13,7 %
Optimiseur				
faible inertie (150 kg/m ²)	peu isolé	38,5 %	33,4 %	31,2 %
	bien isolé	35,0 %	31,4 %	28,7 %
	très isolé	28,6 %	25,1 %	20,1 %
forte inertie (400 kg/m ²)	peu isolé	38,2 %	31,2 %	28,6 %
	bien isolé	33,4 %	28,7 %	25,8 %
	très isolé	25,6 %	22,2 %	17,6 %

Figure 3 : Régulation du système de chauffage dans 3 bâtiments tertiaires (Energetic, 2008)

De manière générale, la mise en place d'une régulation adéquate sur une installation non régulée (sans ralenti nocturne et sans contrôle précis de la température intérieure) permet environ **30 %** d'économie sur la facture annuelle du combustible (Energieplus, n.d.).

IV. Bilan

D'après les informations obtenues et calculées jusqu'à présent, il y a encore plusieurs domaines sur lesquels la ville de Schifflange peut se concentrer pour arriver à ses objectifs de diminution de consommation d'énergies.

1. Consommations thermiques

Comme vu dans le graphique 1 (chap III, paragraphe 1.1), la consommation thermique de la ville de Schifflange se situe en dessous de la valeur de 800 m³/habitant/an depuis 2011 jusqu'à 2013. Par contre, on remarque que la consommation des bâtiments communaux a subi une forte diminution en 2013 et est actuellement aux alentours de 700 kWh/hab/an (graphique 7, chap III, paragraphe 2.1).

Divers points sont à prendre en compte pour évaluer les consommations thermiques futures de la ville, la forte augmentation de la population dans un premier temps, envisage donc une augmentation de la consommation de gaz, mais celle-ci ne sera pas proportionnelle au vu de la loi concernant les nouvelles constructions au Luxembourg. Les bâtiments seront peu énergivores concernant le chauffage ne devant dépasser 22 kWh/m²/an (Administration communale de Koerich, n.d.). Dans un deuxième temps, une baisse non négligeable est également possible allant jusqu'à une trentaine de pourcent pour les 9 bâtiments publics disposant d'un système de régulation de chauffage. Une mise en place de système de régulateurs pourra également être envisagée sur les autres édifices publics de la ville.

2. Consommations électriques

De la même manière, les paragraphes précédents ont mis en lumière les différentes consommations électriques de la commune. Les profils des consommations électriques des bâtiments communaux et de l'ensemble de la ville tendent à diminuer.

Néanmoins, l'électrification du parc automobile augmenterait donc fortement la consommation électrique des ménages. L'augmentation de la population va également de pair avec une augmentation de la consommation électrique, les nouvelles constructions ne règlementent pas ce paramètre contrairement au chauffage. Afin de nuancer ces perspectives, la commune dispose d'un potentiel d'économie concernant l'éclairage public intéressant (jusqu'à plus de 200 000 kWh/an).

3. Conclusion

La sensibilisation des habitants de la commune concernant la mobilité et les gestes d'économies d'énergies est essentielle afin de ne pas inverser les courbes de consommations notamment électriques dans les années à venir.

L'utilisation des énergies renouvelables va permettre de couvrir une partie des consommations identifiées de la commune. La détermination du potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange va donc être analysée dans la partie suivante.

Partie 2

Le potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schifflange

I. Bilan énergétique mondial

La consommation d'énergie mondiale repose essentiellement sur les énergies fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz. Ce sont des combustibles riches en carbone et hydrogène que l'on retrouve dans nos sous-sols. Leur combustion engendre la production de dioxyde de carbone (CO₂), un gaz favorisant l'effet de serre mais également des oxydes d'azotes et de soufres impliqués dans la pollution atmosphérique et l'apparition de pluies acides (Landrieu, 1994). En 1990, la consommation des combustibles fossiles a entraîné la production de 22 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère, 50 % de plus que dans les années 70.

La figure ci-dessous montre l'importance des énergies fossiles dans le mix énergétique mondiale et son évolution entre 1990 et 2011 :

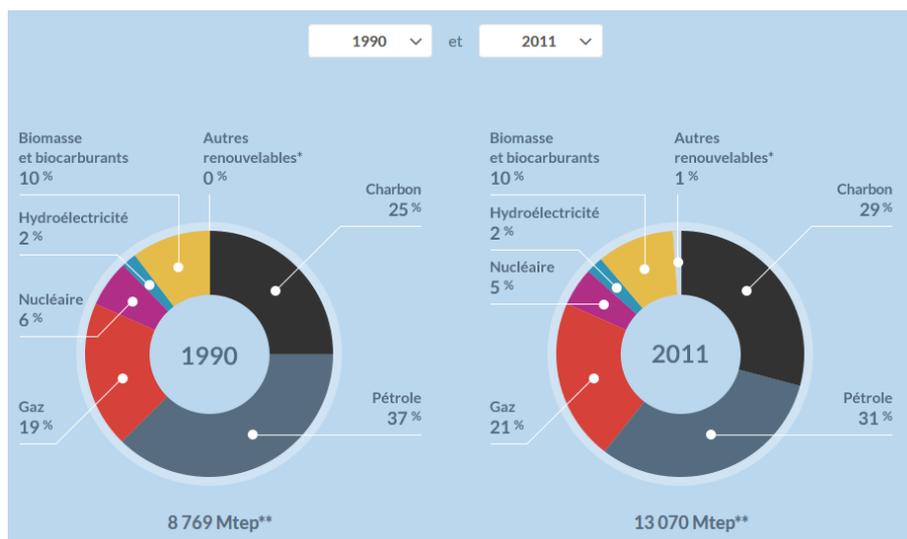


Figure 4 : Evolution du mix énergétique global en 21 ans (AIE)

La consommation d'énergie a augmenté de plus de 49 % en 20 ans, la part des énergies fossiles est restée constante couvrant 81 % de la consommation énergétique totale.

En 2016, au sein des pays du G20, qui représentent 80 % de la consommation d'énergie mondiale, la production de CO₂ liée à la consommation d'énergie s'est stabilisée par rapport à 2015 avec l'émission de 26 Gt dans l'atmosphère. La consommation d'énergie connaît quant à elle, une augmentation de 0,9% soit une consommation de 10,9 Gtep (Enerdata, 2017).

Les prévisions de l'évolution du mix énergétique d'ici 2035, prévoient encore une utilisation principale des énergies fossiles (plus de 80% de la demande énergétique) mais aucune des 3 énergies fossiles ne devraient se démarquer des autres contrairement à l'heure actuelle. La consommation de gaz devrait augmenter tandis que celle du charbon et du pétrole vont diminuer. Par contre, les énergies renouvelables hors énergie hydraulique devraient se développer pour couvrir jusqu'à 8% du mix énergétique (Connaissance des énergies, 2015).

II. La production d'énergies renouvelables

Contrairement aux énergies fossiles, dont les ressources sont définitivement épuisées une fois consommées, les énergies renouvelables sont considérées comme inépuisables car elles sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur des sols, la biomasse...(Observ'ER, 2007) (Planete energies, 2015).

Elles ne rejettent pas ou peu d'émissions polluantes et contribuent donc à la diminution de la production entre autre de gaz à effet de serre. Bien que l'utilisation des moulins à eau au Moyen âge soit l'ancêtre de l'utilisation de l'énergie hydraulique, les énergies renouvelables connaissent un réel essor depuis le début du XXI^{ème} siècle.

En effet, la figure ci-dessous évoque la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité mondiale en 2000 et 2016. L'utilisation du soleil et du vent comme ressource grâce notamment au développement des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes a fortement augmenté, passant de nul en 2000 à 1,8 et 0,2 % respectivement en 2016. La consommation électrique évolue de façon croissante (+58% en 16 ans).

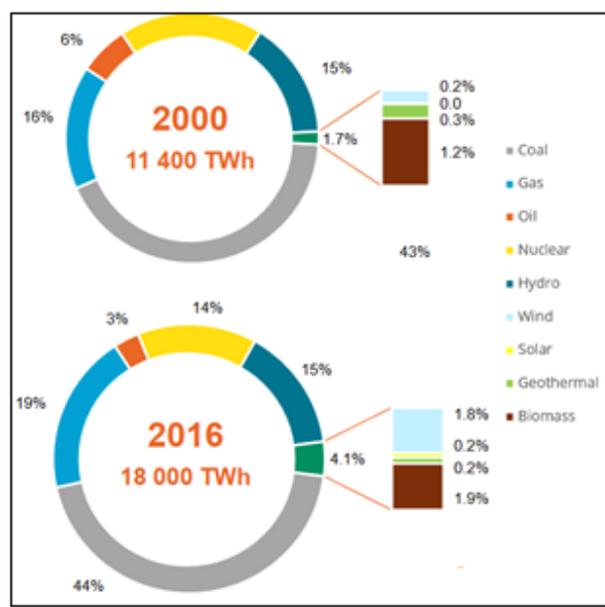


Figure 5 : Mix énergétique dans la production d'électricité mondiale en 2000 et 2016 (Enerdata, 2017)

III. Situation en Europe et au Luxembourg

La directive européenne 2009/28/CE du 23 avril 2009 fixe les objectifs nationaux pour tous les Etats membres concernant la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation final brute d'énergie et également dans la consommation d'énergie dans les transports d'ici à 2020 (Parlement européen, 2009). Ces mesures contraignantes sont cohérentes avec les trois grands objectifs en matière d'énergie et de lutte contre le réchauffement climatique à l'horizon 2020 de l'Union européenne qui sont (EDF, 2013) :

1. La réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % (par rapport aux niveaux de 1990) ;
2. D'augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie de l'UE à 20 % ;
3. Et d'améliorer l'efficacité énergétique de 20%.

La directive impose de plus, à chaque Etat membre, la rédaction d'un plan national en matière d'énergies renouvelables pour le 30 juin 2010. Ce plan doit contenir les objectifs nationaux de chaque Etat et décrire les mesures à adopter pour satisfaire ces objectifs (Parlement européen, 2009). En juillet 2010, le gouvernement Luxembourgeois a ainsi présenté son plan d'action. La directive prévoit en effet, un but de 11 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergies finale en 2020 du Luxembourg et 10 % dans le domaine du transport. Pour pouvoir atteindre ces prévisions trois mesures ont été décrites (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2010) :

- Le développement des énergies renouvelables sur le territoire national par le biais de la production d'électricité et de chaleur/froid à partir de sources renouvelables ;
- Le mélange de biocarburants dans les carburants mis à la consommation au niveau national, ainsi que le développement de la mobilité électrique (publique et privée) ;
- Le recours à des mécanismes de coopération, principalement par des transferts statistiques et projets communs entre États membres de l'UE et le cas échéant avec des pays tiers.

En 2014, la part d'énergies renouvelables dans sa consommation finale était de 4,54 % (près de 6% pour l'énergie électrique et 7,37% pour l'énergie thermique). Dans le domaine des transports, les énergies renouvelables atteignent 5,25 %. Des efforts sont à poursuivre et chaque commune prend part au développement durable du pays. D'autres mesures ont depuis été prises pour augmenter la part des énergies renouvelables au Luxembourg, comme l'introduction d'un tarif d'injection pour la chaleur provenant des installations de combustion qui valorisent la biomasse (Ministère de l'économie, 2016).

IV. Le potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange

Dans cette partie sera abordée les différentes sources d'énergies renouvelables envisagées à être développées dans la commune (solaire, biomasse, géothermie). Le potentiel de développement de cette filière sera décrit ainsi que les différentes technologies existantes et le meilleur choix pour la ville. Enfin, la part des consommations thermiques et électriques de la ville grâce aux énergies renouvelables sera déterminée.

1. Le potentiel en énergie solaire de Schiffflange

1.1. Les différentes technologies existantes

L'énergie solaire est, comme son nom l'indique, une source d'énergie qui dépend du soleil (EDF, 2017a). Grâce à cette énergie, la production d'électricité ou d'eau chaude sanitaire à l'aide de panneaux solaires est possible. Il s'agit d'une énergie propre car elle n'émet aucun gaz à effet de serre, en dehors de la production et de l'élimination des panneaux utilisés. Elle est également la source des autres énergies renouvelables de manière indirecte car elle est responsable des mouvements des masses d'eau, d'air et de la photosynthèse (Futura Planète, n.d.). Les technologies sont :

- **Les panneaux solaires thermiques** : L'énergie solaire thermique valorise le rayonnement solaire sous forme de chaleur. Les installations solaires thermiques permettent la production d'eau chaude sanitaire et/ou de chaleur. Elles sont performantes sur des régimes de températures d'eau à chauffer entre 5 et 60°C. Les capteurs, installés le plus souvent sur la toiture de la bâtisse, absorbent le rayonnement solaire et le transmet à un ballon de stockage.

Plusieurs types de capteurs existe : Absorbent nu ou capteur plan standard, capteur vitré ou capteur plan double couverture et enfin le capteur sous vide. En fonction de la température moyenne du capteur solaire, le rendement évolue de manière différente pour chaque type de capteur comme le montre la figure 6 ci-dessous :

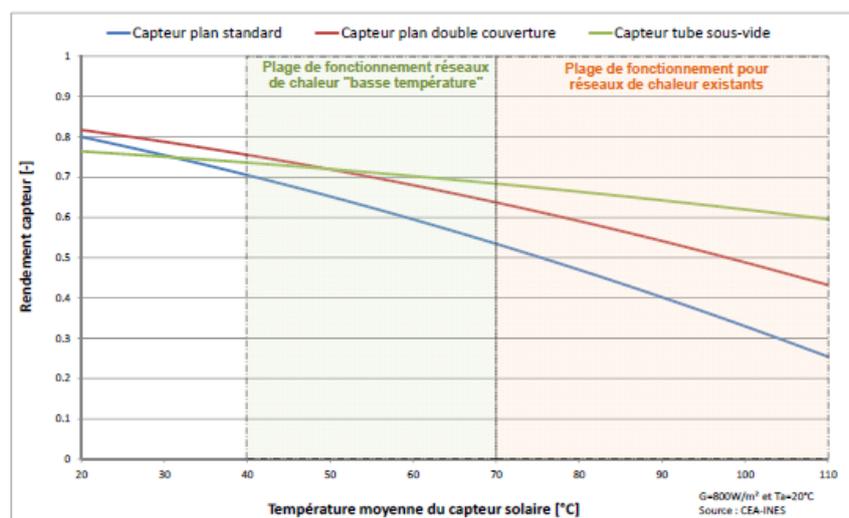


Figure 6 : Evolution du rendement des capteurs solaires (Ademe, 2015a)

Pour la production et l'utilisation d'eau chaude sanitaire, la température adéquate se situe entre 40 et 80 degrés Celsius. Les meilleurs capteurs sont donc les capteurs plans et sous vides.

Les systèmes les plus régulièrement utilisés dans nos régions pour les particuliers sont les chauffe-eaux solaires individuels (CESI) couvrant 40 à 70% des besoins en ECS pour un ménage (Fédération française du bâtiment, n.d.). Le principe repose sur l'ajout d'un appoint en plus du ballon de stockage relié aux panneaux. Le mode de montage est représenté par la figure 7 ci-dessous :

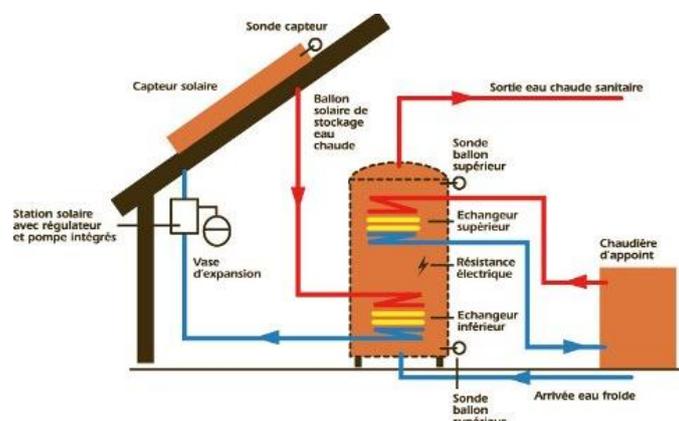


Figure 7 : Principe d'une installation CESI (ERA-Sun, 2011)

Les chauffe-eaux solaires collectifs, permettent quant à eux la production d'eau chaude sanitaire des bâtiments de plus grandes surfaces (immeubles, gymnase...) qui ont donc des consommations supérieures. Le principe est identique à celui des CESI.

Il existe également des systèmes combinés permettant la production d'ECS et de chaleur. Ils couvrent environ 60% des besoins en ECS et en moyenne 40% des besoins en chaleur en fonction

des régions d'un ménage. Il existe deux systèmes : à hydroaccumulation ou par plancher solaire direct (Fédération française du bâtiment, n.d.).

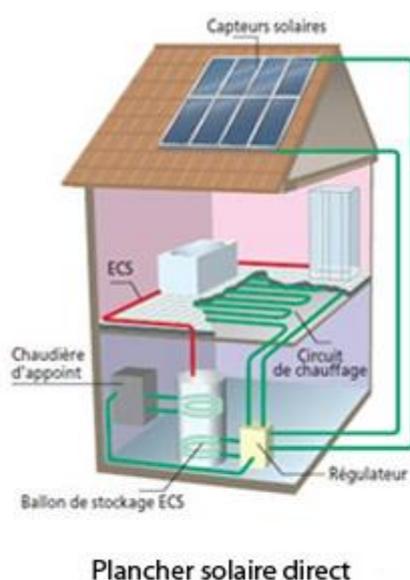


Figure 8 : Représentation d'un système combiné par plancher solaire (source : Ademe)

- **Les panneaux photovoltaïques** : L'énergie solaire photovoltaïque valorise le rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de panneaux disposés ou directement intégrés à la toiture de l'habitation. Dans un matériau semi-conducteur, comme la silice, sont produites et transportées des charges positives et négatives grâce à l'effet de la lumière (photovoltaïque.info, 2016). Le rendement n'est pas très élevé, il est de l'ordre de 28% en théorie pour la silice comme matériau semi-conducteur et plus faible dans la pratique. L'électricité produite peut être soit injecté sur le réseau, soit autoconsommé. L'énergie photovoltaïque contribue à hauteur de 22% à la production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables au Luxembourg (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2017c).

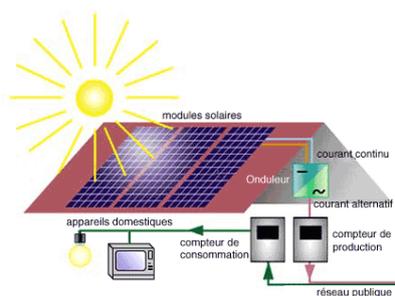


Figure 9 : Installation de panneaux photovoltaïques ("Énergies renouvelables : les panneaux photovoltaïques," 2014)

D'après le règlement grand-ducal du 08 août 2014 relatif à la production d'électricité basée sur des sources d'énergies renouvelables, « la revente d'électricité produite à partir de l'énergie solaire et

injectée dans le réseau d'un gestionnaire de réseau moyennant une centrale installée sur une surface imperméable dont la première injection d'électricité dans le réseau du gestionnaire de réseau a lieu après le 1er janvier 2014 et dont la puissance électrique de crête est inférieure ou égale à 30 kW est rémunérée suivant la formule suivante (Ministère de l'économie Luxembourgeois, 2014):

$$264 \cdot X \cdot \left(1 - (n - 2013) \cdot \frac{9}{100}\right) \text{ € par MWh}$$

Avec X : $1 \geq X \geq 0,7$; facteur de réduction qui peut être fixé par le ministre.

A défaut de fixation, X = 1.

n : année civile de début de l'injection d'électricité.

Le règlement grand-ducal du 29 juillet 2016 ajoute une nouvelle tarification de la revente de l'électricité en fonction de la puissance de l'installation. Ainsi, une installation dont la puissance électrique crête est supérieure à 30 kW et inférieure ou égale à 100 kW est rémunérée suivant la formule suivante (Ministère de l'économie Luxembourgeois, 2016):

$$160 \cdot X \cdot \left(1 - (n - 2016) \cdot \frac{6}{100}\right) \text{ € par MWh}$$

Avec X : $1 \geq X \geq 0,7$; facteur de réduction qui peut être fixé par le ministre.

A défaut de fixation, X = 1.

n : année civile de début de l'injection d'électricité.

Pour les installations d'une puissance crête supérieure à 100 kW et inférieure ou égale à 200 kW la rémunération est la suivante :

$$153 \cdot X \cdot \left(1 - (n - 2016) \cdot \frac{6}{100}\right) \text{ € par MWh}$$

Avec X : $1 \geq X \geq 0,7$; facteur de réduction qui peut être fixé par le ministre.

A défaut de fixation, X = 1.

n : année civile de début de l'injection d'électricité ».

Il existe également **des panneaux hybrides** permettant la production simultanée de chaleur et d'électricité. Deux entreprises dont les projets ont bénéficié du soutien de l'ADEME ont développé en 2015 et 2016 respectivement des panneaux solaires hybrides. Il s'agit encore de matériaux innovants et ne sont pas encore rependus chez les particuliers. Seul 1000 panneaux de la société Dualsun ont été vendus en 2014, et le retour des performances in situ du produit de l'entreprise Cogen'air est attendu au cours du mois de décembre 2017 (Ademe, 2016) (Ademe, 2015b).

1.2. Calcul du potentiel en énergie solaire de Schifflange

Comme vu précédemment, les nouvelles habitations au Luxembourg et en Europe à partir de 2020, auront des consommations thermiques et en ECS très peu élevées. Actuellement, les standards des habitations n'incluent pas de restrictions concernant la consommation électrique des ménages. Pour calculer le potentiel en énergie solaire de la commune de Schifflange, la technologie des panneaux photovoltaïques a été choisie par rapport à celle des panneaux solaires thermiques permettant de couvrir une partie des consommations électriques des habitants à partir de sources renouvelables.

1.2.1. Irradiation du site

Afin d'évaluer le potentiel photovoltaïque de la commune de Schifflange, il faut tenir compte de l'irradiation moyenne par an de la ville. La carte suivante représente l'irradiation annuelle moyenne du Luxembourg réalisée par Solargis.

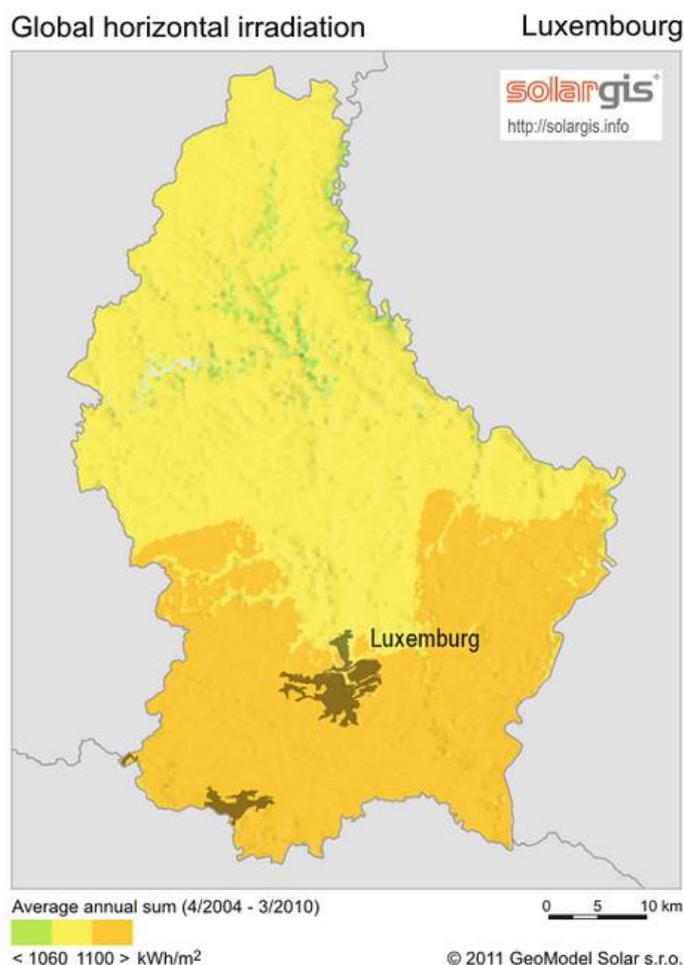


Figure 10 : Irradiation solaire au Luxembourg (Solargis, 2011)

D'après le site Solargis, la production d'électricité par panneau photovoltaïque au sein de la commune de Schifflange est en moyenne de 1050 kWh/kWc/an en les disposant selon la meilleure orientation

possible. L'irradiation globale horizontale est de 1116 kWh/m²/an et l'irradiation globale inclinée est de 1279 kWh/m²/an. L' angle optimal pour la mise en place de PV serait une inclinaison de 35° plein sud (180°) (Solargis, 2017).

1.2.2. Etat des lieux à Schifflange

A l'aide du logiciel SIGCOM la surface de tous les toits de Schifflange a été mesurée afin d'estimer la surface totale disponible de la ville pour l'installation de panneaux solaires. La vue aérienne de la commune de 2015 a été utilisée. Le logiciel ne permettait pas de prendre en compte l'inclinaison des toitures en pente. Afin d'estimer une valeur cohérente de la surface des toitures, une inclinaison moyenne des toitures de 30 degrés a été prise en compte. Pour cela, la longueur de la pente mesurée à l'aide du logiciel a été divisée par la valeur du COS 30 selon les règles de trigonométrie :

$$\text{Cos } 30^\circ = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}} \text{ dans un triangle rectangle.}$$

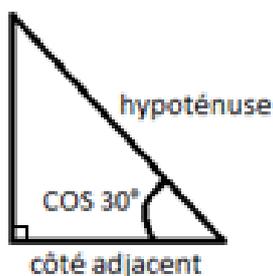


Figure 11 : Estimation de la longueur de la pente des toits

Chaque toiture a été étudiée et les toitures disposants déjà de panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques ont été répertoriées dans les tableaux 7 :

Tableau 7 : Liste des toitures disposant des panneaux solaires à Schifflange

Nom et N° de rue	Nombre de panneaux	Surface m ²	Orientation
Rue Matthias Koener			
26 rue Matthias Koener	3 panneaux ST	10	Sud
Rue d'Esch			
1, rue d'Esch	5 panneaux PV	14	Sud
Friedrich hydraulique Sarl	71 panneaux PV	127	TT
Rue de la gare			
38 rue de la gare	2 panneaux ST	4	Ouest
Chemin de Bergem			
8 Chemin de Bergem	2 panneaux ST + 28 PV	67	Sud
24 Chemin de Bergem	4 panneaux ST	12	Sud

Nom et N° de rue	Nombre de panneaux	Surface m ²	Orientation
Cité Op hudelen			
42 à 55 cité Op Hudelen	14 Panneaux ST	42	Sud
Rue Schefflengerbiere			
17 rue Schefflengerbiere	6 panneaux ST	14	Sud
15 rue Schefflengerbiere	26 panneaux PV	46	Sud
42 rue Schefflengerbiere	12 panneaux PV	9	Sud
40 rue Schefflengerbiere	3 panneaux ST	7	Sud
50 rue Schefflengerbiere	48 panneaux PV	29	TT
Rue du Moulin			
2 rue du moulin	PV	18	Sud
Rue de Kayl			
33 rue de Kayl	2 panneaux ST	5	Sud
17 rue de Kayl	4 panneaux ST	9	Sud
62 rue de Kayl	4 panneaux ST	10	Sud Est
54 rue de Kayl	3 panneaux ST	1	Sud
Rue Op Kraeizheck			
3 rue Op Kraeizheck	2 panneaux ST	5	Sud
Avenue de la résistance			
4, av de la résistance	2 panneaux ST	5	Sud Est
Cité Emile Mayrisch			
40 A cité Emile Mayrisch	2 panneaux ST	6	Ouest
123 cité Emile Mayrisch	19 panneaux PV	23	Sud
88 cité Emile Mayrisch	22 panneaux PV	40	Sud +Est
Rue Denis Netgen			
41 rue Denis Netgen	32 PV	44	
Cité Paerchen			
130 Cité Paerchen	PV	29	Ouest
142 Cité Paerchen	ST	10	Sud
87 Cité Paerchen	ST	8	Sud
54 Cité Paerchen	18 panneaux PV	26	Sud
4 Cité Paerchen	PV	10	Ouest
76 Cité Paerchen	PV	14	Ouest
Rue Hevelwee			
1 rue de Hevelwee	2 panneaux ST	5	

Nom et N° de rue	Nombre de panneaux	Surface m ²	Orientation
Cité Op Soltgen			
96 cité Op Soltgen	3 panneaux ST	8	Sud
99 cité Op Soltgen	10 panneaux PV	16	Sud
92 cité Op Soltgen	12 panneaux PV	37	Sud
93 cité Op Soltgen	3 panneaux ST	7	Sud
87 cité Op Soltgen	7 panneaux PV	19	Ouest
89 cité Op Soltgen	4 panneaux ST	10	Ouest
76 cité Op Soltgen	22 panneaux PV	32	Ouest
74 cité Op Soltgen	2 panneaux ST	6	Sud
64 cité Op Soltgen	12 panneaux PV	37	Sud
56 cité Op Soltgen	3 panneaux ST	8	Ouest
45 cité Op Soltgen	5 panneaux PV	14	Sud
68 cité Op Soltgen	4 panneaux ST	11	Ouest
42 cité Op Soltgen	6 panneaux PV	18	Ouest
36 cité Op Soltgen	3 panneaux ST	8	Ouest
35 cité Op Soltgen	3 panneaux ST	9	Ouest
12a cité Op Soltgen	PV	52	Sud
Rue Noertzange			
217 rue Noertzange	4 Panneaux ST	13	Ouest
187 rue Noertzange	15 panneaux PV	23	Sud
133 rue Noertzange	2 panneaux ST	4	Sud
80 rue Noertzange	2 panneaux ST	5	Sud
10 rue Noertzange	12 panneaux PV	16	Sud
8 rue Noertzange	12 panneaux PV	19	Sud
Rue Pierre Frieden			
17 rue Pierre Frieden	2 panneaux ST	4	Sud
9 rue Pierre Frieden	2 panneaux ST	3	Sud
Chemin vert			
Salon de coiffure	97 panneaux PV	172	TT
24 chemin Vert	2 panneaux ST	10	Ouest
18 chemin Vert	5 panneaux PV	12	Sud
12 chemin Vert	4 panneaux PV	9	Sud
Rue Jean Wilhelm			
20 rue Jean Wilhelm	2 panneaux ST	6	Sud
38-40 rue Jean Wilhelm	4 panneaux ST	12	Sud
Rue Dr Welter			
40 rue Dr Welter	2 panneaux ST	5	Ouest
35 rue Dr Welter	2 panneaux ST	6	Ouest
Rue des fleurs			
114 rue des Fleurs	2 panneaux ST	6	Ouest

Nom et N° de rue	Nombre de panneaux	Surface m ²	Orientation
Rue Albert Wingert			
24A Rue Albert Wingert	6 panneaux PV	9	Sud
24 B Rue Albert Wingert	2 panneaux ST	5	Sud
48 Rue Albert Wingert	PV	37	Sud
Rue du Pont			
11 Rue du Pont	2 panneaux ST	5	Sud
Rue Pierre Dupong			
12 rue Pierre Dupong	PV	283	Sud
26 rue Pierre Dupong	2 panneaux ST	5	Sud
25 rue Pierre Dupong	22 panneaux PV	28	Sud
Avenue de la libération			
14 av de la libération	10 panneaux PV	10	Sud
145 av de la libération	5 panneaux PV	13	Sud
143 av de la libération	3 panneaux ST	9	Sud
87 av de la libération	15 panneaux PV	27	Sud
57 av de la libération	2 panneaux ST	6	Sud
Rue de la paix			
2 rue de la paix	4 panneaux PV	12	Sud
25 rue de la paix	12 panneaux PV	30	Sud Est
Rue val des Aulnes			
Garage	2 panneaux ST	5	Sud
Rue Bel Air			
83 rue Bel Air	4 panneaux PV	11	Sud
70 rue Bel Air	11 panneaux PV	33	Ouest
Rue de l'église			
31 rue de l'église	4 panneaux PV	13	Sud
Rue Caspar-Matthias Spoo			
30 Rue Caspar-Matthias Spoo	2 panneaux ST	5	Sud
	Total	1812	

Il y a donc 80 particuliers qui ont installé des panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques sur le toit de leur maison pour une surface totale de **1513 m²** à Schiffflange. Un salon de coiffure situé chemin vert composé de 97 panneaux photovoltaïques ainsi qu'une entreprise de réparation hydraulique rue d'Esch complète la liste pour une surface totale de **1812 m²**.

Le tableau 8 ci-dessous renseigne le nombre total des bâtiments dont la surface des toitures orientées est, ouest, et sud a été évalué permettant la mise en place de panneaux solaires.

Tableau 8 : Nombre de bâtiments dont la surface des toitures a été calculée

	Nombre de bâtiments
0 à 50 m²	1414
50 à 100 m²	533
100 à 500 m²	167
Plus de 500 m²	22

La plupart des bâtiments mentionnés ci-dessous sont des habitations privées et c'est donc pour cela que les surfaces inférieures à 50 m² représentent plus de 66% des bâtiments totaux. On retrouve quelques grands bâtiments industriels dont les toitures disponibles disposent d'une surface intéressante de plus de 500 m². La base du fichier Excel se trouve sur le CD fourni en complément du rapport.

1.2.3. Comparaison des deux systèmes

Les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques ne permettent pas la même utilisation énergétique finale. Les uns produisent de l'électricité tandis que les autres servent essentiellement à la production d'eau chaude sanitaire. Ces deux systèmes peuvent être comparés sur leur rendement : la proportion d'énergie solaire récupérée par l'installation, leur coût d'installation et le besoin énergétique prioritaire final de l'installateur.

En pratique le rendement d'une installation solaire thermique est de 30 à 40 % (Service public de Wallonie, n.d.). Quant aux panneaux solaires photovoltaïques, le rendement n'est de 10 à 15 % environ. Même si nous revenons à l'énergie primaire en multipliant les kWh produit par le PV par 2,5 (2,5 kWh gaz → 1kWh élec), le solaire thermique reste tout de même plus de 10% énergétiquement meilleur comme le montre le tableau 9. Il convient de mentionner que les pertes énergétiques dues au rendement d'une chaudière concernant le solaire thermique ont été ici négligées.

Tableau 9 : Comparaison énergétique entre ST et PV

	Solaire thermique	Solaire photovoltaïque
Energie récupérée au Luxembourg	448 kWh/m ² /an	160 kWh/m ² /an
Energie primaire	448 kWh/m ² /an	400 kWh/m ² /an

Concernant le prix d'une installation solaire : Le coût d'une installation solaire photovoltaïque dépend de la puissance installée ainsi que de l'intégration simplifiée ou non au bâtiment. On retrouve les différentes tarifications dans le tableau 10 ci-dessous pour des constatations datant de 2015 :

Tableau 10 : Coût des installations de PV en 2015 en France (photovoltaïque.info, 2017)

Puissance	Intégration simplifiée au bâti (ISB)	Intégration au bâti (IAB)
< 3kWc		3,5 €TTC/Wc
3 à 9 kWc		2,2 à 3 €HT/Wc
9 à 36 kWc	1,8 à 2,5 €HT/Wc	
36 à 100 kWc	1,5 à 2 € HT/Wc	
100 à 250 kWc	1,2 à 1,5 €HT/Wc	

Il faudra donc compter environ 15600 €HT pour une installation de 6 kWc sans compter le prix de la revente d'électricité par la suite au fournisseur d'énergie.

Concernant le coût de la mise en place d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI), le tarif peut varier du simple au double en fonction de l'intégration au bâtiment, de la technologie des capteurs choisis et le type de ballon de stockage (Eco infos énergies renouvelables, 2017). Selon l'ADEME, le prix moyen est d'environ 4300 € HT pour une famille de 3 à 4 personnes nécessitant un ballon de 200 à 300 litres et 4 m² de capteurs. Il faut néanmoins relativiser le besoin en fonction des régions, en effet, la moyenne de la surface des capteurs installés à Schifflange est de 8 m². Un système combiné a un coût relativement plus élevé également.

En plus de ces aspects, les besoins des ménages et de la commune doivent être pris en compte. La diminution des consommations de la commune passe par une baisse de la consommation électrique et thermique. Si le ménage opte pour un système solaire thermique combiné, cela permettrait de diminuer leur consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Néanmoins le PV reste le plus intéressant. L'augmentation du parc automobile électrique est à prendre en compte, même si un parc automobile à 100% électrique n'est pas envisageable à court ou moyen terme. L'augmentation de la population va également de pair avec une consommation électrique supérieure mais pas forcément une augmentation aussi nette de la consommation thermique. Les nouvelles normes de construction au Luxembourg vont permettre une utilisation bien plus faible de la chaleur dans les bâtiments.

Enfin, le 13 septembre 2017, une campagne de promotion de l'énergie photovoltaïque a été présentée au Luxembourg. Elle vise à encourager les particuliers d'utiliser le photovoltaïque comme source d'énergie renouvelable (Gouvernement du grand-duché du Luxembourg, 2017c).

1.2.4. Orientation des panneaux solaires

La surface totale des toits de la commune de Schiffflange disponibles a été comptabilisée. Comme nous le voyons sur la figure 12, les panneaux orientés vers l'ouest ou l'est ne permettent pas une production électrique optimale. Celle-ci est en moyenne diminuée de 10 % au moins.

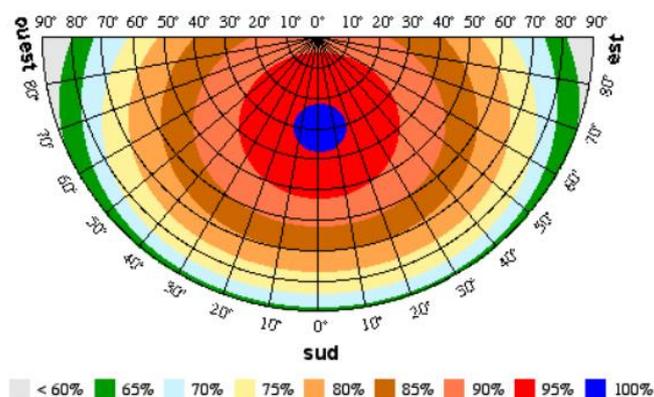


Figure 12 : Production des panneaux solaires en fonction de leur orientation (Dualsun, 2014)

1.2.5. Estimation du potentiel de production électrique à partir de panneaux PV à Schiffflange

La surface totale brute des toits calculés ici, tient déjà compte des divers encombrements retrouvés sur les toits. La surface des fenêtres vélux, cheminées a été déduite de chaque toit dans le tableau Excel. La surface totale des toitures inclinées peut donc être totalement recouverte de panneaux solaires. Par contre, des supports techniques sont nécessaires pour la disposition des panneaux en toitures terrasses. A partir de celles déjà équipées de panneaux, nous avons estimé un abattement de 40% de la surface disponible.

Pour le calcul de la production en MWh/an, la surface calculée à l'aide du logiciel à la commune de Schiffflange a été utilisée en ajoutant l'abattement mentionné ci-dessus pour les toitures terrasses. Cette nouvelle surface a ensuite été multipliée par l'irradiation obtenue par Solargis à Schiffflange et le rendement d'un panneau solaire moyen de 12,5%. Pour les surfaces orientées à l'est et à l'ouest une production diminuée de 10% a été également retenue. Dans le tableau 11, on retrouve le potentiel de production électrique à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques pour la commune de Schiffflange :

Tableau 11 : Surface solarisable et potentiel de production électrique à l'aide de PV à Schiffflange

	Surface des toitures terrasse (m ²)	Surface des toitures inclinées orientées sud, sud-est et sud-ouest (m ²)	Surface des toitures inclinées orientées ouest et est (m ²)
Surface totale	11968	82309	34785
Surface solarisable	7181	82309	34785
Potentiel de la production électrique MWh/an	1148	13159	5005
Total MWh/an	19312		
Production électrique déjà réalisée MWh/an	341		

La production électrique potentielle totale à l'aide de PV sur l'ensemble des toitures disponibles à Schiffflange est de 19312 MWh/an. Il s'agit d'une estimation car, aucun coefficient de perte n'a été appliqué correspondant aux pertes de températures, de l'onduleur, des éventuels ombrages sur la toiture. En effet, il s'agit d'un coefficient s'appliquant au cas par cas et difficile à évaluer pour l'ensemble de la commune (Photovoltaïque energie, n.d.).

La consommation électrique de l'ensemble des ménages de la commune en 2014 était de 13 958 MWh et de 29 655 MWh pour l'ensemble de la commune. Si l'ensemble des surfaces était recouvert de PV, cela permettrait donc une couverture de **138 %** des besoins électriques des ménages et de **65 %** des besoins électriques de l'ensemble de la commune pour l'année 2014.

1.2.6. Estimation du potentiel à partir de panneaux ST à Schiffflange

Comme mentionné dans le paragraphe 1.2.3, l'installation de panneaux solaires thermiques va permettre de couvrir la consommation d'eau chaude sanitaire et/ou des besoins de chauffage pour les ménages. Pour rappel, en 2013, la commune était composée de 3654 ménages comprenant environ 2.5 personnes/ménages. La consommation de gaz était de **19.77 MWh/ménage**. D'après une étude allemande sur le dimensionnement des systèmes solaires combinés, la surface nécessaire pour une famille de 1 à 3 personnes (correspondant à la moyenne des ménages à Schiffflange) est de 0.5 à 1 m²/MWh/an (Office fédéral de l'énergie, 2001). La surface nécessaire pour un ménage est donc de 14.83 m² soit **61 699 m²** pour les 4152 ménages vivants à Schiffflange. Le nombre exact de maisons individuelles et le nombre de personnes vivant en moyenne dans un immeuble ne sont pas connus, l'estimation de la surface pour l'ensemble des ménages a donc été réalisée. Le volume du réservoir d'eau chaude serait de 80 l/m² de panneaux installés soit 1186 l/ménage.

D'après l'étude des toitures réalisée dans le paragraphe précédent, une surface de 124 275 m² est disponible et bien orientée à Schifflange dont 82 309 m² orientés plein sud. Il est donc possible de couvrir les besoins en ECS et en chauffage à l'aide de panneaux solaires thermiques pour les habitants de Schifflange. L'énergie produite en moyenne à l'aide des panneaux solaires thermiques est de 1279 kWh/m²/an selon Solargis, en tenant compte d'un rendement moyen de 35 %. Le potentiel énergétique est donc de **27882 MWh/an**. La consommation thermique de Schifflange en 2013 était de **72251 MWh**.

L'installation de système solaire combiné à Schifflange permet en moyenne de couvrir 39 % des besoins thermiques de la commune. Cette donnée est compatible avec le pourcentage annoncé par les fabricants (Viessmann, n.d.).

1.2.7. Estimation du potentiel à partir de panneaux ST et PV à Schifflange

Il est intéressant de connaître le nouveau potentiel de la production électrique des panneaux photovoltaïques, en couplant l'installation des deux technologies. La surface requise pour les panneaux solaires thermiques a été déduite de la surface restante orientée plein sud et nous pouvons réaliser une nouvelle estimation (tableau 12) :

Tableau 12: Potentiel de production électrique à l'aide de panneaux PV et ST (la surface solarisable répartie entre PV et ST)

	Surface des toitures terrasse (m ²)	Surface des toitures inclinés orientées sud, sud-est et sud-ouest (m ²)	Surface des toitures inclinés orientées ouest et est (m ²)
Surface totale	11968	20610	34785
Surface solarisable	7181	20610	34785
Potentiel de la production électrique MWh/an	1148	3295	5005
Potentiel électrique Total en MWh/an	9448		
Potentiel thermique total en MWh/an	27 882		

Si les deux technologies sont associées, la production électrique totale serait alors de **9448 MWh/an**. Par rapport à la consommation électrique de la commune en 2014, on obtient une couverture de **68 %** de la consommation des ménages et de **31.86 %** de la consommation totale de Schifflange.

2. Le potentiel géothermique à Schifflange

2.1. Description générale

D'un point de vue général, la géothermie est l'exploitation de la chaleur des sous-sols. Cette chaleur provient de deux sources principales : la dégradation des éléments radioactifs (uranium...) présents dans la croûte terrestre ainsi que de la chaleur originelle remontant à la formation de la Terre. La température augmente en profondeur selon le gradient géothermique. Dans les premiers 150 km de profondeur (lithosphère), la température augmente de 3° C tous les 100 m environ (ESG, n.d.) (CSTC, 2013).

Les utilisations de la chaleur terrestre peuvent être diverses en fonction de la température récupérée. La figure 13 ci-dessous propose un éventail assez large d'applications possibles :

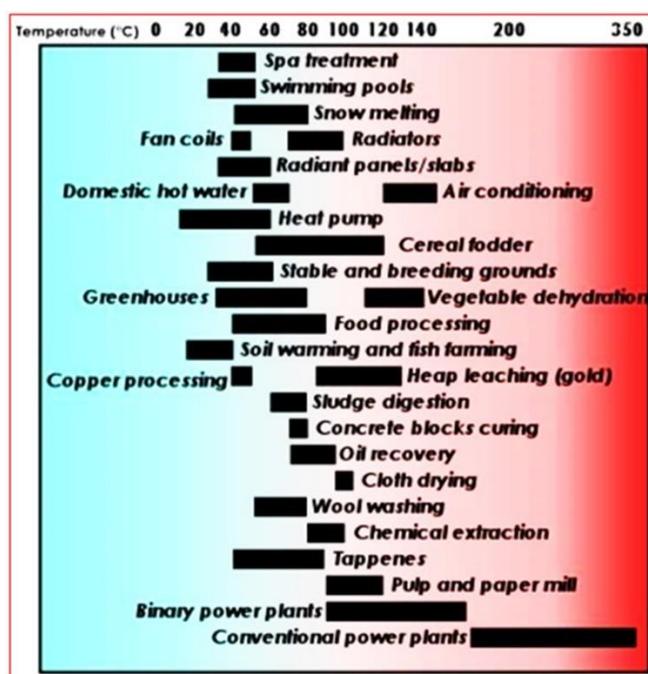


Figure 13 : Utilisation de la chaleur récupérée en fonction de sa température (Lindal, 1973)

A très basse température (<30°C), les pompes à chaleur puisent l'énergie dans le sol ou dans une nappe phréatique pour chauffer ou refroidir une installation. On retrouve une température du sol d'environ 10 à 12 °C jusqu'à 18 m de profondeur (CSTC, 2013). Les pompes à chaleur sont caractérisées par leur COP (rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie utilisée par le compresseur) compris généralement entre 2 et 7 (Climamaison, 2017). Un fluide caloporteur restitue les calories récupérées en profondeur au circuit de chauffage de l'habitation. Les pompes à chaleur fonctionnent avec différents types de capteurs (Observ'er, n.d.) (Total, 2013).

Les capteurs horizontaux tubulaires sont enterrés dans le sol à de faibles profondeurs (entre 0,6 et 1,2 m) mais nécessite une grande surface (1,5 fois la surface à chauffer). Les capteurs verticaux captent la chaleur en profondeur (de quelques dizaines de mètres à une centaine de mètres) et sont reliés entre eux par une boucle. La surface requise est donc bien plus petite que pour des capteurs horizontaux. La figure suivante représente ces capteurs (Système D, 2017):

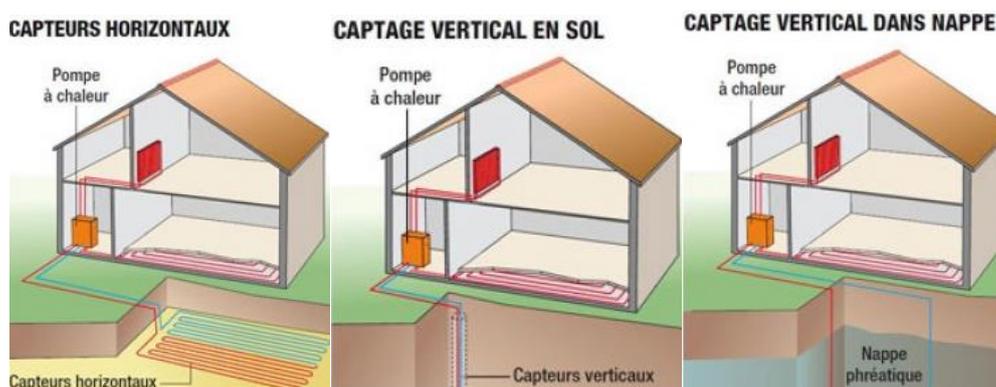


Figure 14 : Les différents types de capteurs lors de la mise en place d'une pompe à chaleur géothermique (Système D, 2017)

A basses et moyennes températures (30 à 90 °C) et (90 à 150°C), d'autres applications agricoles ou industrielles sont possibles comme le chauffage des bâtiments (radiateurs ou planchers chauffants). La température plus élevée permet une utilisation directe de la chaleur en agricultures et autres applications liées aux loisirs balnéaires par exemple (Observer, n.d.).

Enfin, les applications à haute température (> 150 °C) servent essentiellement à la production d'électricité. Les centrales géothermiques sont construites à proximité de zone au gradient géothermal très élevé (jusqu'à 30°C/100m). En général, à l'extrémité des plaques lithosphériques (Connaissance des énergies, 2011a) . L'eau circule dans des échangeurs de chaleur afin d'être captée sous forme de vapeur et injectée ensuite dans une turbine.

La géothermie présente de nombreux avantages. Il s'agit avant tout d'une énergie renouvelable ne dépendant pas des conditions météorologiques contrairement aux ressources solaires, c'est une source énergétique inépuisable et son utilisation ne génère que très peu de CO₂. On retrouve également quelques inconvénients comme une utilisation sur place de la chaleur, des investissements importants pour les particuliers ou pour des projets de géothermie profonde et il peut y avoir des risques géologiques comme les risques de pollutions des eaux sous terraines entre autres (Université de Mons, 2015) (Ademe & BRGM, n.d.).

2.2. La géothermie au Luxembourg

A peu près tous les pays européens exploitent la chaleur des sous-sols. L'utilisation la plus répandue reste le chauffage urbain. La carte ci-dessous présente la géologie des sols au Luxembourg.

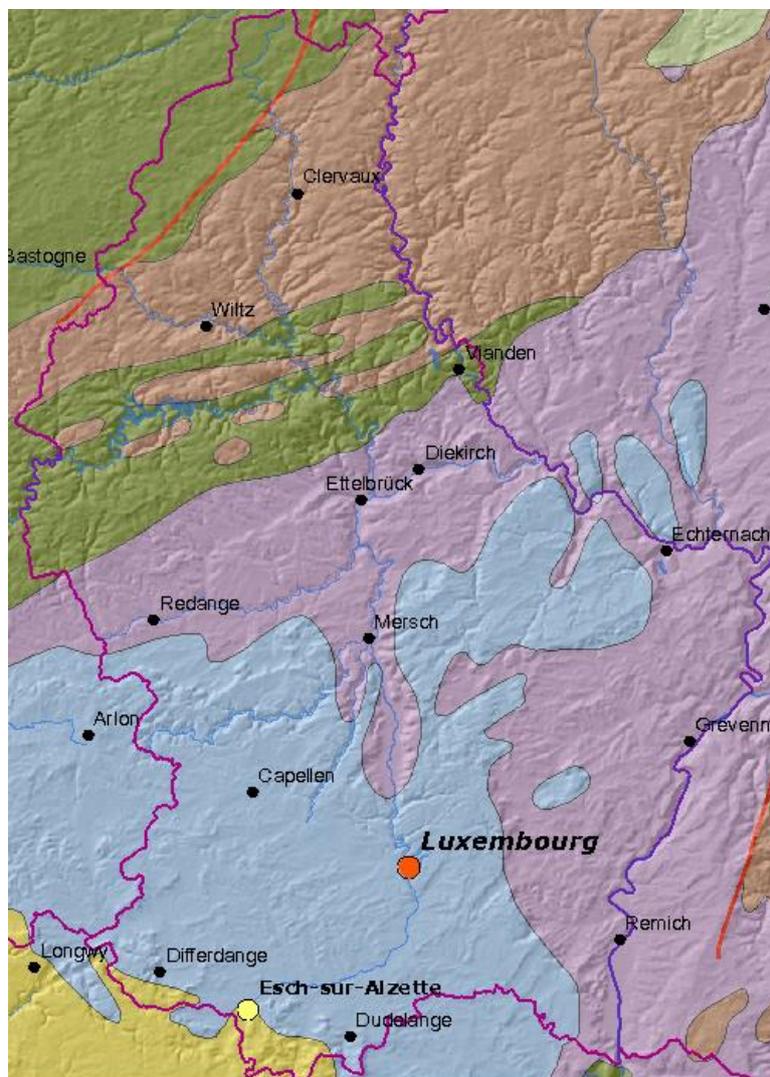


Figure 15 : Géologie des sous-sols au Luxembourg (Maquil & Bintz, 1992)

La légende de la carte se retrouve en annexe 3. La géologie du pays peut se résumer simplement en divisant le pays en deux : le Nord (l'Oesling) et le Sud (le Gutland). On retrouve au Nord des roches anciennes, composées principalement de schiste et de grès. Au sud, les couches anciennes ont la même composition que celles du Nord mais elles sont surmontées par des couches plus récentes de grès, marnes, schistes... Le projet européen Thermomap identifie le potentiel géothermique très peu profond de l'ensemble du continent. Il apparaît une conductivité thermique entre **1 et 1.1 W/mK** pour le sud du pays (ThermoMap, 2017). Seulement, on retrouve une seule localisation au Luxembourg qui a été étudiée lors de ce projet : Limpertsberg, à Luxembourg ville (ThermoMap, 2017). Les conclusions

de cette étude ne révèlent « aucune restriction pour l'installation et l'utilisation durable et efficace d'un système géothermique ».

Une autre étude a été réalisée en 2015 sur le potentiel en géothermie profonde au Luxembourg menée par l'université de Mons et Polytech Mons en collaboration avec les entreprises Luxembourgeoises Schuler et Luxénergie et co-financé par le ministère de l'économie Luxembourgeoise (Université de Mons, 2015). Le sud du Luxembourg détient un potentiel intéressant pour des projets d'exploitation géothermiques de 300 m de profondeur au moins. Trois projets d'études fictifs ont été analysés dont un se situant sur la commune de Dudelange, à 9 km environ de la commune de Schifflange. Les deux autres projets se situent à Differdange et à Welfrange. La puissance géothermique que l'on pourrait atteindre sur le site de Dudelange serait d'**1 MW** grâce au réservoir des grès du Luxembourg (profondeur 300 m environ) et entre **2.6 et 2.7 MW** en exploitant les grés infratriasiques dont la profondeur avoisine les 850 m (Université de Mons, 2015).

2.3. Potentiel géothermique à Schifflange

2.3.1. Utilisation du sol de la commune

Au Luxembourg, près de 2/3 de la consommation d'eau potable vient des eaux souterraines. Il est donc nécessaire de préserver ces réserves et une carte illustrant la possibilité de réaliser des forages a été effectuée par le ministère de l'intérieur et de l'aménagement du territoire que l'on retrouve en annexe 4 (Alliance du climat Luxembourg, n.d.). Le sud de la ville de Schifflange couverte par des forêts est la seule zone inexploitable pour la géothermie. D'après la carte géologique de la commune, on retrouve sous l'ensemble des habitations des marnes sableuses, grises avec intercalations de minces bancs de grès jaunâtres, discontinus dans le sud de la commune et des marnes sableuses, grises, fossilifères ; concrétions d'argilites ferrugineuses ; phosphorites ; bélemnites dans le nord de la commune (Administration des ponts et des chaussés, n.d.).

2.3.2. Couverture de la consommation thermique grâce à une pompe à chaleur géothermique

Le bon dimensionnement d'une pompe à chaleur dans une habitation sera celle permettant de remplir le maximum des exigences, définies au préalable, à moindre coûts. Le dimensionnement est toujours un compromis entre plusieurs contraintes différentes (Roulet, 2010). Une pompe à chaleur sol/sol ou sol/eau ne nécessite pas d'un appoint pour un logement bien isolé grâce à une température stable en sous-sol (Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement, n.d.). Si ce n'est pas le cas, un appoint pourra alors se révéler nécessaire. Le coût de ces installations est de 70 à 1400 euros/m² chauffé (asder, 2017). Elles permettent la diffusion de la chaleur à l'aide de ventilo-convecteurs, radiateurs ou encore par plancher chauffant (QuelleEnergie, n.d.).

La consommation électrique d'une pompe à chaleur pour fonctionner n'est pas négligeable et son coefficient de performance au-dessus d'une certaine valeur permet la rentabilité énergétique de l'appareil. Les PACS géothermiques sol/sol, sol/eau ou eau/eau disposent d'un COP supérieur à 3 (asder, 2017). Ce qui veut dire que pour 3kWh de chaleur produite, une consommation d'1 kWh d'électricité est requis. D'un point de vue énergétique, comme mentionné dans le comparatif des deux systèmes de panneaux solaires (tableau 8) pour 1 kWh_{élec} est l'équivalent de 2.5 kWh_{th} en énergie primaire. Nous pouvons en déduire qu'une pompe à chaleur dont le COP est inférieur à 3 n'est pas rentable énergétiquement.

En 2013, on retrouve une consommation de gaz de 791 m³/hab. En utilisant la donnée moyenne de 2,5 personnes/ménage on retrouve une consommation de gaz de **19775 kWh/ménage** (tableau 2). Afin de couvrir cette consommation à l'aide d'une pompe à chaleur géothermique dont le COP est de 3 en moyenne, une consommation électrique supplémentaire par ménage de **6592 kWh** doit être prise en compte, soit une consommation électrique par ménage totale de **10 332 kWh/an**. Afin d'épargner le coût de cette surconsommation électrique, il est intéressant de coupler cette solution à d'autres énergies renouvelables tels que les panneaux solaires.

2.3.3. Potentiel de la production de chaleur par géothermie à Schiffflange

Afin d'identifier le potentiel géothermique de la commune, le nombre d'habitations disposant d'un terrain permettant l'installation d'une pompe à chaleur géothermique a été comptabilisé. Pour cela, le même logiciel que précédemment a été utilisé. On retrouve les résultats dans le tableau 13 :

Tableau 13 : Nombre d'habitations disposant d'une surface suffisante pour l'installation d'une pompe à chaleur géothermique

RUES	Nombre de maison
Rue de l'industrie	20
Rue Michel Noël	17
Rue Mathias Koener	25
Rue d'Esch	2
Cité de l'europe	26
Rue de la gare	10
Rue du Stade	45
Chemin de Bergem	14
Cité OP Hudelen	28
Rue Schefflengerberg	39
Avenue de la résistance	12
Rue du Moulin	7
Rue de Hédange	22
Rue de Kayl	52
Rue Op Kraeizheck	11
Cité um Benn	42
Rue Denis Netgen	12
Quartier Wendel	19
Cité PAERCHEN	127
Cité Emile Mayrisch	100
Cité OP SOLTGEN	105
Rue de la Gare	10
Rue Noertzange	145
Rue Pierre Frieden	23
Rue Jean Claus	22
Chemin Vert	21
Rue Jean Wilhelm	20
Rue Dr Welter	47
Rue Michel Rodange	14
Rue des Fleurs	98
Rue Aloyse Kayser	3
Rue Albert Wingert	29
Rue Basse	44

RUES	Nombre de maison
Avenue de la Libération	66
Rue Bellevue	39
Rue des mines	3
Rue de la Paix	19
Rue du Canal	3
Rue du Fossé	8
Rue du Pont	7
Rue de la Montagne	20
Rue de la Croix	6
Rue Pierre Dupong	33
Rue de Dicks	6
Rue Pierre Krier	55
Rue de l'église	24
Rue Eugène Heynen	9
Rue du Parc	7
Rue de la forêt	55
Rue des Aulnes	80
Rue Michel Rosquin	50
Rue Val des Aulnes	82
Cité Dominique Baum	49
Rue Bel Air	80
Place GD Charlotte	2
Rue Caspard-Mathias Spoo	32
TOTAL	<u>1946</u>

Au total, 1946 habitations ont la possibilité d'aménager une pompe à chaleur géothermique au sein de leur maison et d'avoir la possibilité de se chauffer grâce à ce système. Soit 45% des logements (4350 logements en 2017). La commune n'a pas la possibilité de connaître les habitants ayant déjà intégré ce système. Les personnes ayant eu recours à des aides financières peuvent faire l'objet d'une première liste mais comme vu pour la mise en place de panneaux solaires, cette liste est très réduite par rapport à la réalité.

2.3.4. Bilan

Afin de réaliser une estimation sur ce que l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques permettrait de couvrir comme consommation thermique, l'utilisation de la consommation moyenne de gaz par habitant a été utilisée (graphique 1). Si les 1946 habitations étaient isolées de manière adéquate, l'utilisation de pompes à chaleur géothermique couvrirait la consommation de **3,8 millions de m³ de gaz, soit 38 482 MWh**. Cette consommation représente **53%** de la consommation de gaz de

la commune en 2013. Néanmoins, la consommation d'énergie électrique de la commune augmenterait de 12 825 MWh.

3. Le potentiel de la biomasse à Schiffflange

3.1. Combustion

La forêt de Schiffflange produit annuellement un volume de bois pouvant être valorisé. Les données mentionnées ici sont les données de la forêt communale de Schiffflange, les données des particuliers n'ont pas été estimées. D'après les résultats obtenus par le garde forestier de la ville, on retrouve un volume total de 400 m³ de bois qui se divise ainsi :

- 75 m³ de grumes
- 75 m³ de bois de chauffage
- 250 m³ de bois de trituration

La biomasse est composée majoritairement de lignine et de carbohydrate. Trois grands procédés existent pour la conversion de la biomasse : la conversion biochimique (création de biogaz), chimique et thermochimique comprenant la combustion, gazéification...(Gicquel, n.d.);

La valorisation du bois disponible peut servir à la production de chaleur seule ou il peut être la source pour la production simultanée de chaleur et d'électricité. Il est intéressant dans le cas des besoins énergétiques de la commune de Schiffflange d'alimenter une centrale de cogénération. Il s'agit alors de la production d'énergie mécanique et thermique à partir d'un cycle combiné. Le rendement global est donc meilleur, il peut atteindre jusqu'à 85 % alors que celui des centrales destinées à produire de l'électricité à partir de bois varient de 20 % pour les moins performantes jusqu'à à 60 % pour les cycles combinés (Marchal, 2004). 2 centrales de cogénération sont déjà en place à Schiffflange et une troisième va être installée en 2021. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser le bois disponible afin de réaliser une nouvelle unité de cogénération, cette démarche s'inscrit tout à fait dans les objectifs en matière d'énergies renouvelables de la commune.

La technologie la plus employée pour produire de l'électricité à partir de biomasse est la turbine à vapeur fonctionnant selon le cycle de Rankine (Ecoren, n.d.). Cela implique aussi l'utilisation de chaudières qui produisent de la vapeur à haute pression. Le rendement électrique dépendra de la taille de l'installation et peut varier de 12 à 25 %. Cette technologie est employée pour de grandes installations dépassant les 500 kW_{élec.} Les quantités de bois disponibles à Schiffflange ne permettent pas de réaliser un projet de cette envergure (Ecoren, n.d.).

La quantité de bois va être valorisée à l'aide d'un gazéificateur permettant la création d'un gaz de synthèse pour produire de l'électricité et de la chaleur. La gazéification est un procédé consistant, la

biomasse subit 4 étapes : le séchage, la pyrolyse, l'oxydation, et enfin, la réduction en syngas riche en monoxyde de carbone et en hydrogène (Connaissance des énergies, 2011b). A partir du gaz créé, plusieurs choix peuvent être envisagés : la production de chaleur et d'électricité comme envisagée mais aussi la production de carburant à partir de syngas et de la réaction de Fischer-Tropsch (Connaissance des énergies, 2011b). Plusieurs technologies de gazéification existent et celle employée pour les installations de quelques dizaines de kilowatt est le procédé à co-courant. La figure 16 présente le principe de son utilisation :

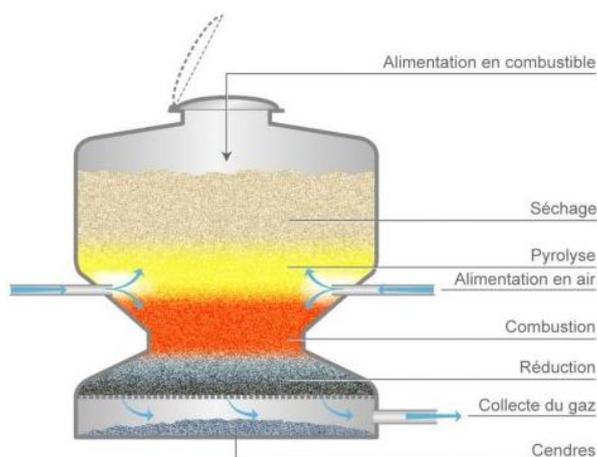


Figure 16: Gazéificateur à co-courant (Connaissance des énergies, 2011b)

Le tableau 14 permet le calcul de la quantité de bois en kg/an en fonction de ses caractéristiques. Les 400 m³ équivalent à 95% de hêtre, 1% de pins, 1% de chêne, 1% de douglas, 1% d'épicéa et 1% de peupliers.

Tableau 14 : Production annuelle de bois de la commune

Caractéristiques du bois		
Type de bois	Masse volumique kg/m ³	Quantité totale/an en tonne
Epicéa	450	1.8
Hêtre	750	285
Chêne	750	3
Douglas	550	2.2
Peupliers	500	2
Sapin	550	2.2
TOTAL		296.2

Les masses volumiques des différentes sortes de bois ont été retrouvées à l'aide du site : (Energieplus, n.d.) à l'exception du peuplier identifié sur le site : (Houtinbois, 2017). Ces masses volumiques comprennent un taux d'humidité entre 25 et 30% et 12% pour le peuplier.

Grâce à la quantité de bois totale par an (296.2 t), l'installation de gazéification peut être dimensionnée ainsi que de l'évaluation de la production des quantités de chaleur et d'électricité possibles.

Tableau 15 : Potentiel thermique et électrique à partir de la biomasse disponible à Schiffflange

Cogénération à partir de biomasse		
Combustible	Bois	
Forme	Copeaux de bois	
Société	Spanner	Fröling
Puissance en kW _{élec}	45	50
Puissance en kW _{th}	180	107
Heure de fonctionnement/an	7000	6000
Combustible en kg/h	45	45
Combustible en t/an	270	300
Potentiel électrique en MWh/an	315	300
Potentiel thermique en MWh/an	1260	642

Les données du tableau 15 ont été obtenues à partir de l'unité de gazéification de biomasse proposée par la firme allemande Spanner (Spanner, 2017) ainsi que la firme allemande Fröling (Fröling, n.d.). Les fiches techniques des produits se retrouvent en annexe 5. Afin de savoir si cette unité est utile tout au long de l'année, nous avons évalué les besoins thermiques de la ville en fonction des différents mois de l'année. Le pourcentage des besoins mensuels a été repris de l'estimation faite par Sudgaz sur son bilan annuel 2014. La répartition se fait dans le tableau 16 :

Tableau 16: Répartition de la consommation (en %) de gaz au Luxembourg en 2013 et application à la consommation de Schiffflange (Sudgaz, 2015)

Mois	2013 %	2013 MWh
Janvier	14,6	10548
Février	14,15	10223
Mars	13,64	9855
Avril	8,36	6040
Mai	6,29	4544
Juin	3,56	2572
Juillet	2,6	1878
Août	2,61	1885
Septembre	4,15	2998
Octobre	6,36	4595
Novembre	10,97	7925
Décembre	12,72	9190
TOTAL	100	72251

L'électricité et la chaleur produites grâce à ce système de cogénération permettent de couvrir : **1%** des besoins électriques de la commune de 2014 et **1.74 %** des besoins de gaz de la commune en 2013. Néanmoins, l'électricité peut être revendue en étant injectée sur le réseau comme pour les 2 unités de cogénérations à Schiffflange actuellement. Cela sera plus rentable d'un point de vue économique pour la ville. La consommation de gaz des bâtiments communaux peut également être couverte grâce à ce système de cogénération biomasse. Ces bâtiments ont consommé **7008 MWh** (graphique 6) en 2016, la centrale produit donc près de **18%** des besoins.

Il existe un autre potentiel afin de permettre d'augmenter la capacité de la centrale de cogénération. Il s'agit du bois provenant de la coupe des hais/arbres... des particuliers et aussi des entreprises. La quantité des déchets verts était de 1117,4 t en 2013 (Kompost, 2014). Pour l'instant, ces déchets partent vers Minett-kompost mais il est tout à fait envisageable que la commune récupère ces débris de bois. La part du bois de ces déchets ne peut pas être pour le moment estimée.

3.2. Méthanisation des déchets

La méthanisation est une digestion anaérobie permettant la dégradation de la matière organique par des micro-organismes. Cette dégradation crée un produit sous forme humide appelé digestat composé de lignine, d'azote, de phosphore et d'eau (Naskeo Environnement, 2009). Il y a également production d'un gaz nommé biogaz composé principalement (entre 50 et 70%) de méthane mais aussi de CO₂, et des traces de NH₃, de H₂S. La valorisation du biogaz permet la production de chaleur, d'électricité, ou la combinaison des deux par le moyen de la cogénération comme vu pour le

combustible bois dans le paragraphe précédent, et après purification de carburant pour véhicules ou encore son injection dans le réseau de gaz naturel (Ademe, 2017).

3.2.1. Les déchets organiques à Schiffflange

Les déchets organiques comprennent les biodéchets qui sont acheminés vers une unité de méthanisation appartenant à Minett-kompost pour la production de biogaz mais également les déchets verts municipaux, commerciaux et d'acheminements privés acheminés vers le centre de compostage de Minett-kompost. A partir de ces déchets, la production d'un compost est revendue aux particuliers. (editus, n.d.). Le détail des différentes quantités n'est pas connu pour l'année 2016, mais on retrouve en 2013, une quantité totale de 1882.3 t de déchets organiques (annexe 1) dont **755 t** de biodéchets (Minett Kompost, 2014a). La production de biométhane résultante était de 1 013 550 Nm³ avec une teneur en énergie de **11 462 MWh** (Minett Kompost, 2014b). Il existe encore un potentiel à Schiffflange qui ne peut pour l'instant pas être chiffré. Il s'agit des habitations qui ne disposent pas de poubelles vertes permettant le tri des déchets biodégradables. Une production supplémentaire de biogaz pourrait être réalisée.

3.2.2. Les déchets ménagers

Les déchets ménagers du syndicat SIDOR sont dirigés vers le centre d'incinération à Leudelange. L'incinération des déchets est caractérisée en quatre grandes étapes : dans un premier temps, les déchets sont apportés via des camions à la fosse à déchets. Ensuite a lieu la combustion des déchets à haute température dans des fours. L'énergie produite peut ensuite être récupérée par des chaudières et valorisée soit sous forme d'électricité soit en permettant l'alimentation d'un réseau de chaleur. Les produits de la combustion sont aussi valorisés et recyclés. Enfin, les fumées sont traitées avant d'être rejetées dans l'atmosphère (SITOM, 2017). Les combustibles sont caractérisés par leur pouvoir calorifique inférieur exprimé en J/kg. Le PCI des déchets qui est la quantité de chaleur dégagée au cours d'une réaction de combustion à volume constant. La composition hétérogène des déchets rend leur PCI difficile à estimer. On en déduit alors la chaleur dégagée au cours de la combustion, au moyen du bilan thermique du groupe four/chaudière pendant le fonctionnement prolongé du four (Damien, 2013). On retrouve le PCI moyen des ordures ménagères qui est de 7829 kJ/kg (Moletta, 2003).

La quantité de déchets incinérés à Leudelange est de 160 000 t/an comprenant les déchets ménagers, les déchets encombrants ainsi que des déchets assimilés (Sidor, n.d.) D'après des données obtenues par M Greger, le PCI moyen s'élevait à 10.5 GJ/t et la répartition entre les déchets ménagers et les déchets encombrants est de 112/10. La valorisation énergétique des déchets à l'usine d'incinération permet de couvrir les besoins électriques de 28 000 ménages et les besoins thermiques de 3000

ménages (Sidor, n.d.). D'après la consommation électrique des ménages obtenues pour la commune de Schiffflange, il s'agit alors d'une production totale de $3739 \times 28\,000 = \mathbf{104\,692\,MWh/an}$.

D'après la commune de Schiffflange, 1747,4 tonnes de déchets ménagers et déchets encombrants (annexe 1) ont été acheminées vers Sidor en 2016, soit 1,09 % des déchets acheminés à Leudelage. On peut en déduire la part de Schiffflange dans cette production électrique. La production électrique réalisée grâce aux déchets de Schiffflange est donc de **1141 MWh/an**.

D'après les besoins thermiques des ménages à Schiffflange, on retrouve une production thermique de l'usine d'incinération de **59 325 MWh/an**. A l'aide du même raisonnement, la production thermique réalisée grâce aux déchets de Schiffflange est de **647 MWh/an**.

A partir de 1.9 fois moins de déchets, la production énergétique est 8 fois supérieure grâce à la production de biogaz par rapport à la production énergétique à partir des déchets ménagers et encombrants.

3.2.3. Station d'épuration

Les boues des stations d'épuration peuvent également servir à la production de biogaz au sein d'une unité de méthanisation. A Schiffflange, la station d'épuration se situe dans le nord de la commune rue de Hédange (TR-engineering, 2000). D'après les caractéristiques techniques de la station, deux unités anaérobiques de 2500 m³ chacune produisent du biogaz dans 2 unités de cogénération d'une puissance électrique de : 2x 230 kW et thermique de 430 kW (SIVEC, n.d.). La part de Schiffflange ne peut pas être estimé pour le moment par la commune.

3.2.4. Centre de tri

Il y a encore un potentiel au niveau des déchets déposés au centre de recyclage SIVEC. Les habitants des communes de Esch/Alzette, Mondercange, Schiffflange, Sanem et Reckange y ont accès (SIVEC, 2011). La quantité de déchets valorisables venant de la commune de Schiffflange ne peut être connue. Il existe désormais (depuis septembre 2017), un système de badge garantissant l'accès au site. Ceci permettra donc de connaître la part de Schiffflange et de pouvoir évaluer le potentiel dans un court terme.

4. Le potentiel éolien de Schiffflange

4.1. Présentation générale

Les éoliennes sont des installations permettant de transformer l'énergie cinétique du vent en électricité. Le rotor constitué de pales (le plus souvent au nombre de trois) actionne un générateur électrique (ADEME, 2016). On distingue le grand éolien dont la puissance est supérieure à 250 kW, les éoliennes moyennes d'une puissance comprise entre 36 et 250 kW et enfin le petit éolien dont la

puissance est inférieure à 36 kW. Les éoliennes off-shore ont des puissances comprises entre 5 et 8 MW.

Au Luxembourg, 56 éoliennes étaient exploitées à la fin de l'année 2016 pour une puissance totale de 85 MW et représentent donc le grand éolien installé au Luxembourg. Le dernier parc a été mis en service fin 12/2016 et il est le plus performant du pays en accueillant 7 éoliennes de 21 MW dans la commune de Wincrange (L'essentiel, 2015) (Oekostroum, 2016)

4.2. Le potentiel du grand éolien à Schifflange

D'après la commune de Schifflange, une étude a été établie à la fin des années 1990 afin de déterminer l'endroit le plus propice à l'installation d'un parc éolien. Il apparaît que le plateau dispose de vents suffisants mais il s'agit d'un lieu classé Natura 2000 (Ministère du développement durable et des infrastructures, 2012). En plaine, les vents sont insuffisants pour l'installation d'éoliennes. Il n'existe donc pas de potentiel de grand éolien à Schifflange.

Un rapport a été établi par la société Luxcontrol sur le potentiel éolien de la commune de Schifflange en octobre 2000. La rose des vents de la commune a été déterminée :

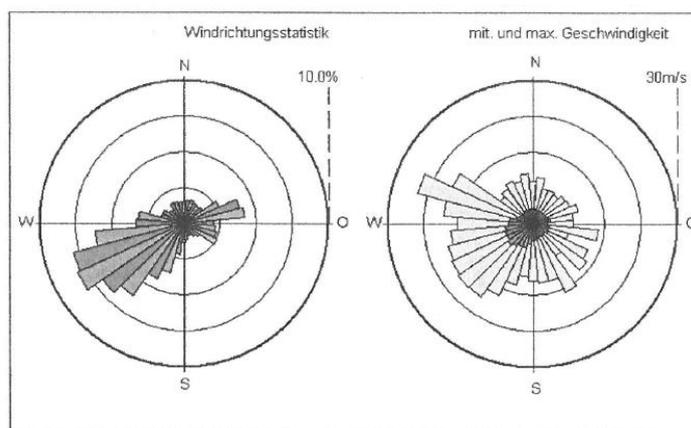


Figure 17 : Distribution de la fréquence de la direction du vent (Luxcontrol, 2000)

Les mesures ont été effectuées à l'aide de deux anémomètres à coupelles calibrées, d'une girouette et d'un enregistreur de données alimenté par batterie. Les hauteurs mesurées étaient de 30,5 m et 20,5 m. La vitesse moyenne du vent mesurée est de 4,83 m/s à une hauteur de 30,5 m et de 4,33 m/s à une hauteur de 20,5 m. Les résultats montrent la dominance des directions du vent du sud-ouest et du nord-est (Luxcontrol, 2000).

4.3. L'éolien en milieu urbain

Le but de ce paragraphe est de s'inspirer de la littérature afin de se rendre compte du développement de l'éolien en milieu urbain. Comme vu dans le paragraphe 1, tableau 10 sur le

potentiel en énergie solaire de la commune, la surface disponible des toitures terrasses est intéressant (plus de 16 000 m² en surface brute). Si la production électrique d'une éolienne installée en toiture d'un bâtiment peut être supérieure à celle des panneaux solaires, la commune pourrait se tourner vers cette solution.

La caractéristique du petit éolien est la hauteur du mât entre 10 et 30 m en général, qui au contraire du grand éolien n'est pas proportionnelle à la puissance de l'appareil. Mais cette caractéristique dépend des sites d'installations et une étude des vents au préalable est nécessaire (EDF, 2017b).

Concernant les différents dispositifs existants, on distingue les éoliennes à axe horizontal qui dominent le marché actuellement. L'axe du rotor est parallèle au sens des vents et tourne perpendiculairement à cette direction. La figure ci-dessous représente les différentes installations que l'on peut retrouver (Bruxelles environnement, 2017) :



Figure 18 : Eoliennes à axe horizontal (Bruxelles environnement, 2017)

Il existe également les éoliennes à axe vertical. Leurs rotors est cette fois perpendiculaire au sens du vent tandis que les pales tournent dans la même direction du vent (Bruxelles environnement, 2017)

On retrouve quelques exemples ci-dessous des modèles existants :



Figure 19 : Eoliennes à axe vertical (Bruxelles environnement, 2017)

Tandis que les éoliennes à axe horizontal ont des rendements supérieurs, les éoliennes à axe vertical sont, elles, plus silencieuses et conçues pour des plages de vents plus forts. Le model choisi dépend de l'endroit exact de son emplacement.

Néanmoins, elles représentent plusieurs nuisances lorsqu'elles sont intégrées au bâtiment. En effet, elles sont source de vibrations en causant des problèmes de fissures par exemple et peuvent également être sources de nuisances sonores (Bruxelles environnement, 2017). Le coût d'une installation varie entre 5 000 et 10 000 euros par kW implémenté. Le petit éolien ne connaît pas un

réel essor et une bonne presse, notamment en France (Conseil général des Landes, 2008). La puissance mondiale installée du petit éolien représente fin 2011 : 576 MW. La majeure partie (85%) des installations est répartie sur 3 pays (Chine, Royaume Unis et Etats Unis) (Rapin & Noël, 2014). La puissance maximale récupérée par une éolienne peut être calculée comme suit :

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * U^3 * Cp$$

ρ : masse volumique de l'air kg/m^3 ;

A : surface balayée par les pales en m^2 ;

U : vitesse de l'air en m/s ;

Cp : coefficient de performance

Figure 20 : Puissance maximale en W récupérée par une éolienne (Durable.com, n.d.)

En règle générale, le rendement moyen pour une petite éolienne est de 20 % (Energieplus, n.d.). La surface balayée par les pâles dépend du système choisi qui dépend lui-même de l'emplacement du bâtiment. Pour le petit éolien on retrouve une surface inférieure à 200 m^2 (Info-énergie en Bourgogne, 2013). La première éolienne urbaine a été installée en 2006 en France, d'une puissance de 6kW, elle permettrait de couvrir la consommation électrique des communs d'un immeuble de 20 habitations (Actu-Environnement, 2009).

En conclusion, il semble que cette technologie ne soit pas encore très développée et concurrencée par les panneaux solaires pour l'utilisation des toitures. Les nuisances sonores, visuels, environnementales semblent nombreuses. Le dispositif serait plus adapté à des bâtiments hors des zones d'habitations de Schifflange, comme sur les toits des bâtiments situés en zones d'activités. La vitesse des vents mesurée dans la commune en 2000 est d'une moyenne de 4.78 m/s à une trentaine de mètre du sol, ce qui rend cette installation possible (Info-énergie en Bourgogne, 2013). Néanmoins, d'autres énergies renouvelables semblent à l'heure actuelle plus accessible en milieu urbain par rapport au petit éolien.

4.4. Evaluation du potentiel de l'éolien urbain à Schifflange

Pour estimer la production électrique grâce à l'éolien urbain, la surface des toitures terrasses des immeubles situés sur la zone industrielle Um Monkeler, se situant à distance des habitations a été prise en compte. La surface totale disponible des toitures terrasses de 4446 m^2 regroupe plusieurs immeubles. Certains, trop proches des habitations de la commune d'Esch/Alzette et de la rue de Hédange à Schifflange ont été éliminés. Au total, 8 immeubles semblent convenir à l'installation d'une éolienne urbaine comme le montre la photo de la vue aérienne de la ZI suivante :

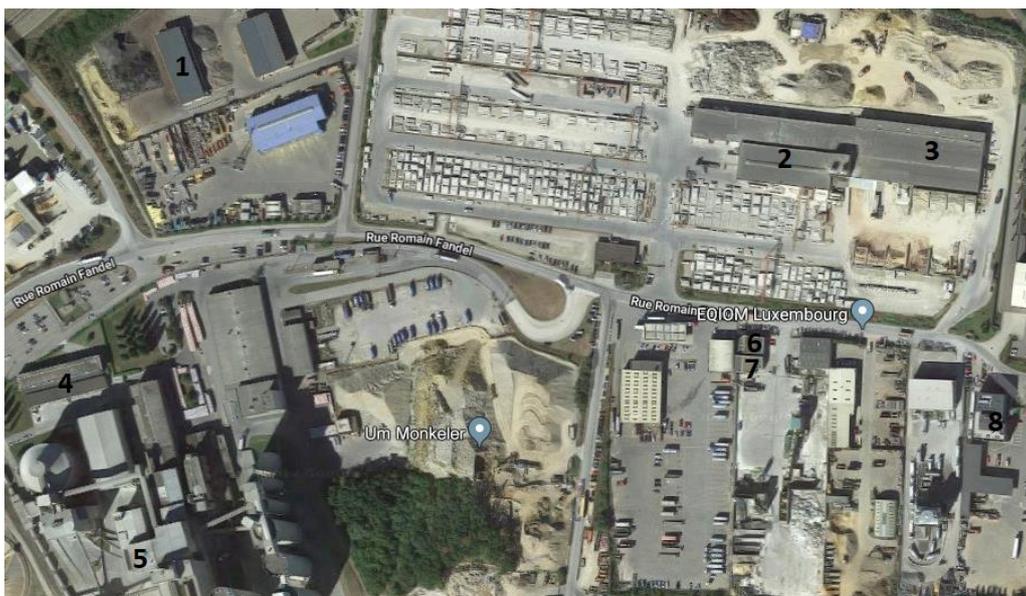


Figure 21: Vue aérienne de la ZAE Um-Monkeler de Schifflange et sites potentiels pour l'éolien urbain (google map, n.d.)

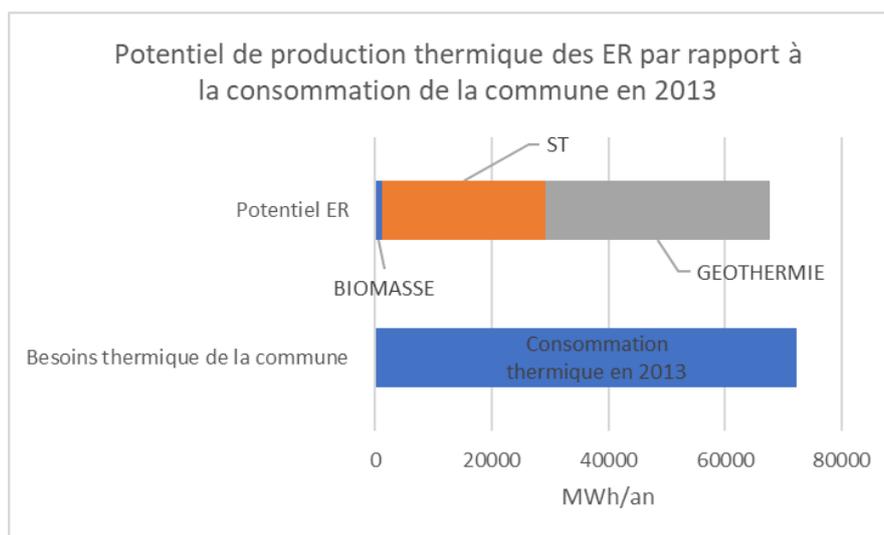
Il est bien évidemment nécessaire de réaliser une étude précise de ces zones concernant les diverses turbulences qui peuvent être rencontrées. En milieu urbain, les éoliennes à axe verticale sont davantage conseillées. Le taux de charge du petit éolien peut varier entre 900 et 2500 heures par an (Arene, 2004). En prenant un taux de charge moyen de 14% (soit 1226 h en fonctionnement nominale), une production électrique d'environ 12.3 MWh peut être envisagé par éolienne de 10 kW sur une année, soit **98 MWh** pour les 8 sites sélectionnés. Ce potentiel de production électrique représente **0.70 %** de la consommation électrique des ménages de la commune en 2014 et **0.33%** de la consommation électrique totale de la ville en 2014.

4.5. « L'arbre à vent »

En 2011, la start-up française Newwind crée un système de production électrique urbain en forme d'arbre. D'une hauteur de 10 m et d'un diamètre de 08 m, les 63 feuilles qui composent l'arbre sont en fait des petites éoliennes (La Tribune, 2016). Cette technologie permettrait de produire de l'électricité à partir de vent très faible (2m/s) sur 360° et serait également très silencieuse, réduisant les nuisances connues de l'éolien urbain déjà citées. L'invention a également pour but de sensibiliser les habitants à la production d'électricité verte et aux énergies renouvelables d'une manière générale. « L'arbre à vent » a été installé en 2015 durant la COP 21 à Paris et l'est également en région parisienne. La production électrique annoncé est de l'ordre de **2500 kWh/an** (Newwind, 2015). Néanmoins il ne semble pas aussi efficace d'après certains articles de presse. L'investissement est conséquent, près de 70 000 euros déboursés par la commune française de Vélizy-Villacoublay en 2016 pour l'implantation de ce nouveau système (Le Parisien, 2016).

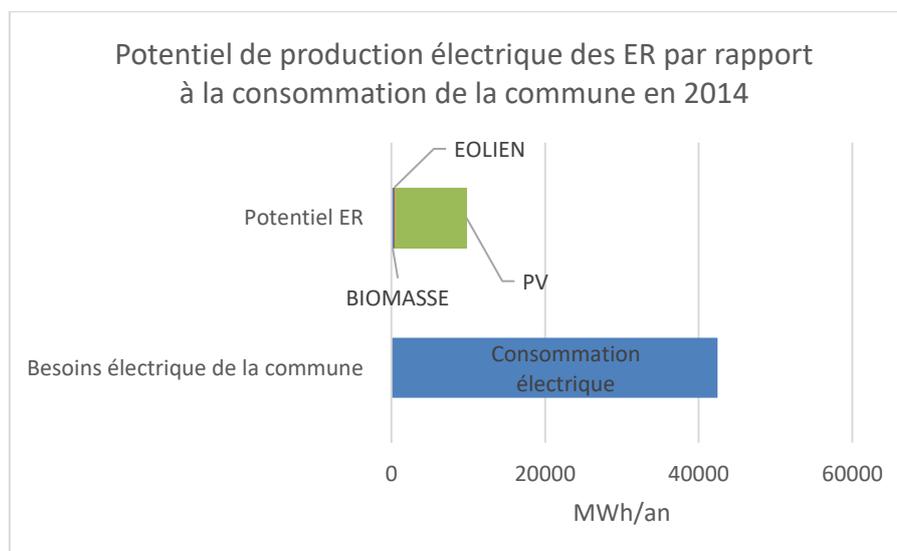
V. Bilan du potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange

Les graphiques 8 et 9 permettent de rassembler l'ensemble des informations obtenues jusqu'à présent sur le potentiel en énergies renouvelables de la commune de Schiffflange. Toutes les technologies évoquées sont reprises permettant de s'apercevoir de la capacité de production électrique et/ou thermique des diverses options renouvelables :



Graphique 8: Potentiel de production thermique à partir des énergies renouvelables à Schiffflange

En conclusion, **94 %** des besoins thermiques de la commune en 2013 peuvent être couverts à l'aide d'énergies renouvelables à Schiffflange (graphique 8). La géothermie présente la plus grande partie du potentiel thermique de la commune. Sa réalisation augmenterait les besoins électriques de 12 825 MWh/an passant de 29665 à 42 490 MWh. Cette augmentation est alors reprise dans le graphique 9 :



Graphique 9: Potentiel de production électrique à partir des énergies renouvelables à Schiffflange

En tenant compte de la consommation électrique supplémentaire de l'utilisation de pompes à chaleur géothermique, seulement 23% des besoins électriques de la commune peuvent être couverts à l'aide d'énergie renouvelables.

Enfin, le tableau 17 reprend toutes les données obtenues jusqu'à présent et permet de se rendre compte de la production actuelle en ER à Schiffflange et du potentiel de la commune par rapport aux consommations thermiques et électriques représentées dans la partie 1.

Tableau 17: Récapitulatif de la production et du potentiel en ER de la commune de Schiffflange

	Consommation de la commune	Production					Potentiel					
		Minett-kompost	SIDOR	Co-génération	PV	ST	PV	ST	PV + ST	Géothermie	Eolien	Biomasse
Électrique MWh/an	29665 (2014)		1141	3906	12		19312		9448		98	315
Chaleur-chauffage MWh/an	72251 (2013)		647	6943		3.86		27882	27882	38491		1260
Bio-Gaz naturel MWh/an		11462										

La production de chaleur à l'aide de l'incinération des déchets et des centrales de cogénérations de Schiffflange apparaît sur ce tableau ainsi que la production de biométhane à partir des biodéchets réalisé par Minett Kompost. Si l'on regroupe ce qui est actuellement produit avec le potentiel réalisable à partir d'énergies renouvelables, notamment la géothermie et le solaire thermique, les besoins thermiques de la commune peuvent être entièrement couverts en se référant aux relevés Sudgaz de l'année 2013. Cette consommation a été généralisée à l'ensemble de la commune, ne pouvant avoir accès aux données des habitants se tournant vers d'autres sources énergétiques comme le fioul pour se chauffer.

Concernant les besoins électriques, seulement 23 % de la consommation électrique peut être couverte en tenant compte de l'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique pour la production de chaleur. Sans cette surconsommation, 33 % de la consommation électrique de 2014 peut être réalisée à l'aide

d'énergies renouvelables (essentiellement par la couverture en PV de la totalité de la surface disponible et bien orientée des toits de Schifflange). En tenant compte en plus de la production électrique à partir de sources renouvelables déjà existantes, la moitié (50%) de la consommation de 2014 est atteinte. Une grande différence apparaît tout de même avec le potentiel des consommations thermiques.

VI. Potentiel en énergies renouvelables sur les zones constructibles à Schifflange

La surface totale constructible à Schifflange a été comptabilisée de la même façon que la surface totale des toitures disponibles pour l'installation de panneaux solaires. La mise en place d'énergies renouvelables dans le cadre de la construction de nouveaux logements basse consommation d'énergie est tout à fait adaptée (Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement, n.d.). On retrouve les terrains disponibles dans le tableau 17 ci-dessous :

Tableau 18 : surface constructible à Schifflange

Surface disponible à la construction	Surface (m ²)
Entre rue Basse et rue du Fossé	386
Entre entrée cité OP Hudelen et les maisons rue de Noertzange	670
Cité OP Soltgen	812
Rue des fleurs	1847
Rue d'Esch	714
Entre Avenue de la libération et rue des mines	420
Rue de Hédange	1014
ZAE OP Herbett	1622
ZBEP rue de Noertzange	1000
Site industriel ArcelorMittal	59286
Burwiss	62630
TOTAL	<u>130401</u>

Une surface de 130401 m² est encore disponible à la construction soit 13 hectares environ d'après le PAG de la commune de 2017. Nous distinguons des petites zones, qui serviront pour la plupart à la construction de maisons individuelles ou de petits immeubles. En termes d'énergies renouvelables, les panneaux solaires PV et ST peuvent être envisagés. Une estimation d'environ 15 nouvelles maisons individuelles sur les 9 premiers sites soit une surface de toit de 750 m² (une moyenne de 50 m² par maison a été prise en compte). Cette surface donne lieu à une production électrique d'environ **120 MWh/an**. Une partie des besoins thermique pourra être couverte à l'aide de panneaux ST ou d'une pompe à chaleur géothermique si la surface du terrain le permet.

Concernant les deux espaces à aménager d'une surface de 6 hectares chacune, les infrastructures indispensables pour la construction de nouveaux logements (routes, raccordements...) nécessitent, d'après une rapide estimation, environ 25% de la surface totale disponible. Il reste donc 4.5 hectares environ sur chaque zone permettant la construction de logements/commerces etc... Afin d'évaluer les différentes constructions sur ces espaces, nous nous sommes basés sur le plan d'aménagement de 45 hectares de Dudelange (IfaS, 2014). La répartition se fait comme suit : 51% de la surface est dédiée au résidentiel, 27% est réservée aux bureaux, et 23% pour des bâtiments commerciaux/loisirs/cultures.

La création de zones énergétiquement indépendantes peut être envisagée basée sur des constructions basses énergies et la mise en place de stockage d'énergie permettant de résoudre le problème de l'intermittence de l'énergie solaire par exemple. La géothermie, les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pourront être installés. Une étude spécifique des besoins énergétiques en fonction du développement de ces deux zones pourra être entreprise afin d'évaluer les différentes possibilités techniques et financières.

Partie 3

Notion de stockage de l'énergie

I. L'intermittence des énergies renouvelables

Dans la partie précédente, le potentiel de l'instauration de plusieurs énergies renouvelables a été estimé. Parmi ces quatre sources d'énergies, certaines peuvent être définies comme intermittentes. En effet, l'éolien et les panneaux photovoltaïques dépendent respectivement du vent et du soleil pour la production d'électricité qui ne sont présents de manière continue tout au long d'une journée et leur intensité est aussi différente en fonction de la région concernée.

La puissance de l'éolienne dépend de la vitesse du vent, un vent trop faible ne permettra pas de faire fonctionner l'installation mais ne lui est pas proportionnelle. Pour des raisons techniques, à partir d'un vent d'environ 15 m/s, la puissance de l'éolienne a atteint son maximum et stagne. En Allemagne, le facteur de charge a été estimé du parc éolien entre 1994 et 2003 en tenant compte du parc éolien installé dans le pays en 2003. Les résultats montrent un fonctionnement annuel de moins de 20% en moyenne. On remarque tout de même un facteur de charge plus élevé pour l'éolien offshore (Livet, 2011).

Concernant la production d'électricité grâce à des panneaux solaires photovoltaïques, elle est liée aux jours et aux saisons contrairement à l'éolien qui peut produire de l'électricité même la nuit. En fonction de la durée et de l'intensité d'ensoleillement d'une journée, la production peut se révéler plus ou moins haute. Une estimation de la production en kWh/kWc installée a été réalisée : 1394 kWh/kWc en Espagne contre 862 kWh/kWc en moyenne au Luxembourg (Appropedia, 2016). La production électrique est donc très différente d'un pays à l'autre. En plus de cela, la production n'est pas en corrélation avec les besoins des ménages. La production électrique est optimale en été, lorsque les besoins sont moindres (concernant principalement les habitations chauffées électriquement et l'éclairage moins utilisé du fait de l'ensoleillement plus long au cours d'une journée dans nos régions). Inversement, la production électrique est moindre en hiver lorsque les besoins sont les plus élevés.

L'intermittence des nouvelles sources d'énergies fragilise le réseau de distribution par la fluctuation de la production. La gestion de la surproduction d'électricité en période de faible consommation et inversement doit donc être anticipée (enea consulting, 2012).

A noter que la géothermie et la biomasse ne sont pas concernées par ces problèmes d'intermittence au cours de l'année, la chaleur du sol et le volume du bois et des déchets ne dépendant évidemment pas des conditions climatiques.

Le stockage de l'énergie apparaît donc comme une solution nécessaire dans le but de l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Il peut également s'avérer lucratif pour les différents acteurs (particuliers, de mettre au point un système de stockage de l'énergie en réinjectant l'électricité sur le réseau au meilleur moment (enea consulting, 2012). L'installation de système de stockage d'énergie est intéressante dans l'aménagement de nouveaux quartiers permettant de les rendre indépendant énergétiquement. A Schifflange, comme mentionné dans le chapitre 6 de la partie précédente, deux zones (site ArcelorMittal et Burwiss) vont être aménagés, dans un moyen à long terme, de près de 60 000 mètres carrés chacune. Les différentes technologies disponibles seront énumérées dans les paragraphes suivants ainsi que leur niveau de maturité et les réalisations dans certaines villes actuellement.

II. Technologies disponibles

Cette partie présente les différentes technologies existantes aujourd'hui concernant le stockage d'énergie ainsi que de leur maturité sur le marché afin de permettre à la commune de Schifflange de connaître les installations et d'envisager l'une d'elles dans un futur proche. Dans la littérature, on s'aperçoit que le stockage de l'énergie se divise en plusieurs catégories. On retrouve les techniques de stockage mécanique, le stockage électrochimique, électromagnétique ou encore thermique. En effet, au contraire d'autres formes d'énergies (gaz, pétrole ou charbon), l'électricité ne permet pas un stockage aisé et doit en premier lieu être converti sous une autre forme énergétique (Commission de régulation de l'énergie, n.d.).

1. Le stockage mécanique

La technologie mécanique la plus répandue est la station de pompage. Il s'agit également de la solution de stockage énergétique la plus utilisée dans le monde. Le principe repose sur la différence de hauteur de deux bassins d'eau. Les stations d'énergies par pompage (STEP) sont munies de turbines-pompes réversibles. L'eau du bassin supérieur est une source d'énergie potentielle lorsque l'eau y est pompée depuis le bassin inférieur. Comme il s'agit d'un système réversible, l'eau du bassin supérieur peut être récupérée et traverse une turbine produisant ainsi de l'électricité. Les STEP sont en essor dans les régions montagneuses du monde et également au bord de mer (Commission de régulation de l'énergie, n.d.) (IFPEN, 2012).

Une autre technologie est le stockage d'énergie par air comprimé (CAES). Le rendement de ce système est de l'ordre de 50%. De l'air comprimé entre 100 et 300 bars est stocké dans une cavité souterraine.

Afin de produire de l'électricité, l'air est détendu dans une turbine permettant la production électrique souhaitée. Deux centrales existent en Allemagne. L'air est stocké dans des cavités salines (Commission de régulation de l'énergie, n.d.) (IFPEN, 2012).

Ces deux installations d'envergures ne sont pas envisageables au sein de la commune de Schiffange dont le site n'est pas compatible à leur l'implantation.

2. Le stockage électrochimique

En dehors des stations de pompages, la solution la plus connue est le stockage électrochimique, convertissant de l'énergie électrique en énergie chimique.

Dans un premier temps, les batteries offrent des avantages non négligeables comme la mobilité et la possibilité de conserver et de décharger l'énergie plusieurs centaines de fois. De nombreuses recherches sont en cours pour l'amélioration des technologies existantes comme l'augmentation des performances de la batterie et le développement de nouveaux matériaux. Leurs utilisations peuvent permettre le stockage d'énergie d'un bâtiment ou d'un petit réseau urbain. Actuellement, on retrouve sur le marché les batteries Lithium-ion. L'association du sodium et du lithium est également prometteuse pour la génération suivante des batteries. Les batteries au plomb, étant les premières à être commercialisées sont aujourd'hui de plus en plus remplacées par les batteries sodium-soufre fonctionnant à des températures plus élevées (IFPEN, 2012) (Simon, 2015).

Il existe également des supers condensateurs, modèle intermédiaire entre les condensateurs classiques et les batteries. On ne parle plus de potentiel rédox avec ce système puisqu'il s'agit d'un stockage électrostatique (Simon, 2015).

Le vecteur hydrogène est aussi un moyen de stocker de l'énergie. L'électricité est convertie en hydrogène via un électrolyseur. Il peut être injecté dans le réseau de gaz naturel en l'état (dans une limite d'un volume de 20%) servant donc de stockage d'énergie. En fonction des besoins du réseau électrique, l'hydrogène peut aussi être reconverti en électricité via une pile à combustible (Connaissance des énergies, 2016). Le problème de cette filière est le stockage en grande quantité d'hydrogène qui est un gaz léger et inflammable. Une start-up française a mis au point un système de conversion du surplus d'électricité produit par un immeuble équipé de panneaux solaires sous forme d'hydrogène dans des bonbonnes. L'entreprise espère une commercialisation de ce projet courant 2018 (Olivennes, 2017). Des recherches sont également en cours pour stocker l'hydrogène sous forme solide (De Rango et al., 2012).

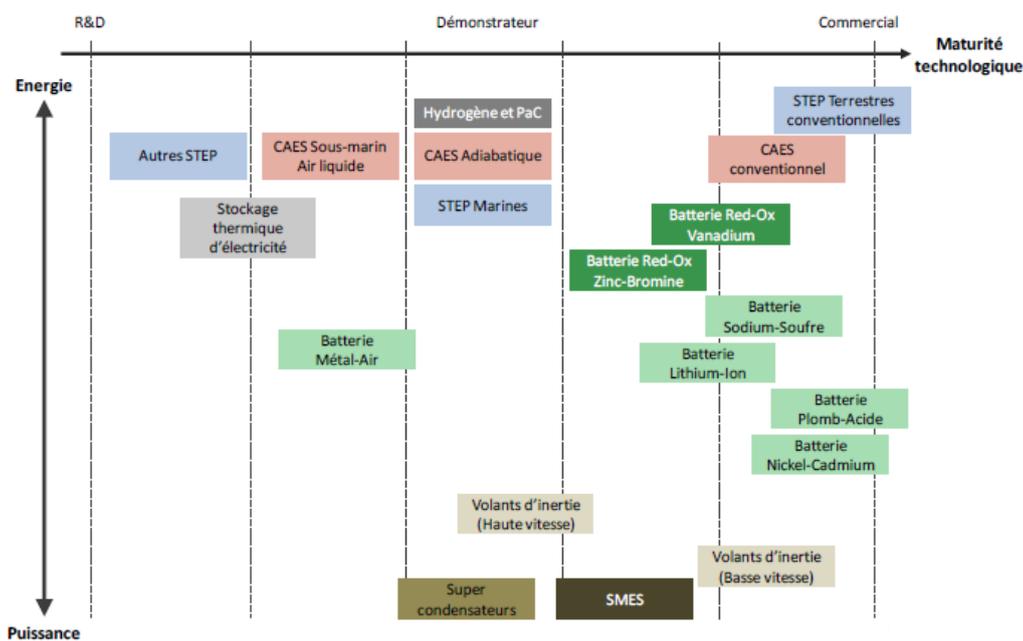
Le « power to gas » est un procédé chimique en plusieurs étapes permettant de convertir l'électricité sous forme de méthane en passant par le vecteur hydrogène. Lors de la première étape, l'hydrogène

est produit grâce à l'électrolyse de l'eau à l'aide d'un électrolyseur. La méthanisation a ensuite lieu en faisant réagir l'hydrogène avec du dioxyde de carbone. La valorisation du CO₂, principal gaz à effet de serre est un avantage de cette technique. Un exemple concret de cette conversion est mentionné dans la partie 4 (Partners, 2013).

3. Le stockage thermique

On peut également citer le stockage thermique comme moyen de stocker de l'énergie. Il peut répondre aux besoins des industriels, du tertiaire et des particuliers. Un stockage saisonnier de chaleur et de froid peut être réalisé par différents matériaux. Des cuves, des réservoirs sous terrain ou des roches peuvent servir au stockage de chaleur dû à la surproduction d'électricité des panneaux solaires. A Okotoks, une ville de la province de l'Alberta au Canada, des quartiers de près de 50 maisons sont alimentées en chaleur grâce à cette méthode depuis 2008 (inhabitat, 2008). Les ballons d'eau chaude sanitaire représentent par ailleurs un moyen de stockage énergétique intéressant (Commission de régulation de l'énergie, n.d.) (IFPEN, 2012).

4. Maturité des diverses technologies existantes



Typologie des moyens de stockage d'électricité

Stockage gravitaire	Stockage chimique	Stockage inertielle
Stockage à air comprimé	Stockage électrochimique	Stockage électrostatique
Stockage thermique	Stockage électrochimique à circulation	Stockage électromagnétique

Figure 22 : Maturité des différentes technologies de stockage d'énergie (Commission de régulation de l'énergie, n.d.)

L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique à l'échelle d'une commune rend la gestion de l'offre et de la demande électrique complexe. Le dimensionnement des besoins en stockage doit être déterminé afin de se tourner vers la meilleure technologie disponible. Le stockage de l'énergie apparaît comme une solution afin de pouvoir réguler les difficultés rencontrées par l'intermittence des énergies renouvelables mais aussi de maintenir la qualité de l'alimentation du réseau (Commission de régulation de l'énergie, n.d.). Si plusieurs technologies existent aujourd'hui, la configuration de Schiffange ne lui permet pas d'envisager deux des technologies les plus matures (STEP et CAES). Les batteries apparaissent comme une solution viable (d'après la figure 22). De nombreuses recherches sont actuellement effectuées par tous les pays européens dans ce domaine afin de pouvoir atteindre les objectifs fixés par l'UE en matière de transition énergétique. Le tableau 19 informe sur les divers rendements de conversion de l'énergie. Il est essentiel d'en être informé lorsque l'on se tourne vers une technologie de stockage.

Tableau 19: Les rendements de conversions des technologies de stockage de l'énergie

Technologies	Rendement de conversion de l'énergie électrique
STEP	75 à 85 % (Tournery, 2015)
CAES	Environ 50 % (Connaissance des énergies, 2013)
Batterie lithium	Proche de 100% (Connaissance des énergies, 2017)
Batterie Sodium-souffre	89 à 92 % (Le Jeune, 2017)
Hydrogène	54 à 77 % (Wikipedia, 2017b)
P2G (power to gas)	49 à 65 % (Wikipedia, 2017b)

A l'instar de la commune canadienne, des projets de stockage d'énergie au sein de différentes villes se sont développés ces dernières années. En 2013, la commune allemande de Crailsheim se situant au nord de Stuttgart a installé 7410 m² de panneaux solaires thermiques en exploitant un ancien site militaire de 32 hectares. Des commerces, des appartements et des résidences individuelles ont été bâtis. Les panneaux ont été installés sur la toiture des bâtisses et également sur une zone protégée au niveau du sol. 2 chauffe-eaux solaires ont été mis en place dont le volume est respectivement de 480 et 100 m³. Un stockage saisonnier permettra le chauffage des bâtiments en hiver grâce à la chaleur emmagasinée l'été. Une prévision de 50% de la couverture des besoins en chauffage est envisagée. Le stockage géothermique a été choisi à l'aide d'échangeurs thermiques répartis dans un volume total de 37 500 m³. Les forages pourront s'accroître en fonction du développement de la cité (BINE Information service, 2013). La figure 23 présente schématiquement le projet :

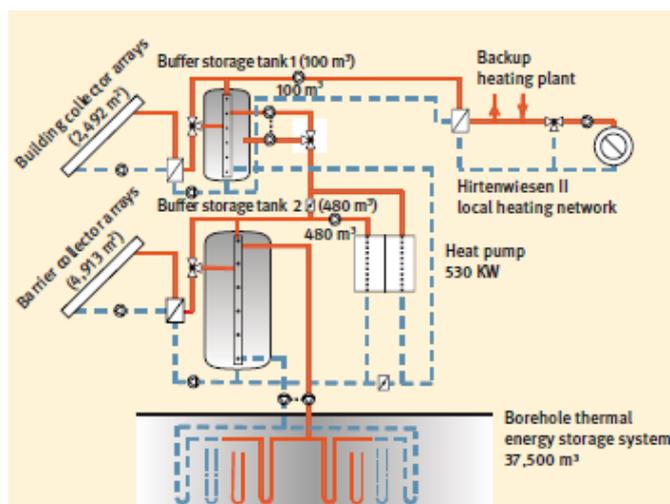


Figure 23: Installation de panneaux solaires thermiques à Crailsheim et stockage saisonnier (BINE Information service, 2013)

La ville française d'Aumetz, située non loin de Schifflange développe depuis peu un projet à la déchetterie communale. Le stockage de l'énergie électrique produite grâce à la future éolienne et l'installation d'une centrale de cogénération vont être réalisés. Le surplus d'électricité va être converti sous forme d'hydrogène permettant ensuite la production de méthane. Les informations obtenues sur ce projet sont décrites dans la partie suivante.

Partie 4

Projets en cours à la déchèterie de la commune d'Aumetz

Avant de terminer ce rapport, il semblait intéressant de mentionner deux projets se déroulant dans la commune française d'Aumetz située à une dizaine kilomètres de Schifflange.

A la déchèterie de la ville, un projet de récupération d'énergie thermique et électrique nommé Prélude va être mis en place à la fin de l'année 2018. Le but de ce projet d'envergure initié en 2016 est de « gagner en autonomie, réduire les coûts et diminuer l'impact environnemental ». Plusieurs nouvelles installations vont donc s'implémenter autour de la déchèterie. Dans un premier temps, les déchets verts vont alimenter un système de cogénération d'une puissance de 90 kW_{élec} donnant lieu à la production d'électricité et de chaleur. Ensuite, la mise en place d'une éolienne d'une puissance de 55 kW_{élec} à axe verticale permettra l'autonomie électrique de la déchetterie. L'estimation de sa production annuelle est de 100 000 kWh. Enfin, une installation valorisera les excédents électriques. En effet, les besoins sont estimés à 86 kW_{élec} pour une puissance installée de 145 kW_{élec}. La communauté des communes réalisera des économies importantes d'après ses estimations grâce à ce projet. Environ 20 à 25 000 euros concernant l'énergie de la déchetterie elle-même et de 10 à 15 000 euros se rapportant au coût des traitements des déchets verts (Lévy, 2017).

Au cours de l'année 2019, un second projet verra le jour appelé Metha2. Il s'agit d'un projet de méthanisation pour valoriser le surplus électrique via le vecteur hydrogène (Lévy, 2017).

Un schéma simplifié illustrant les projets se retrouve à la figure 24 :

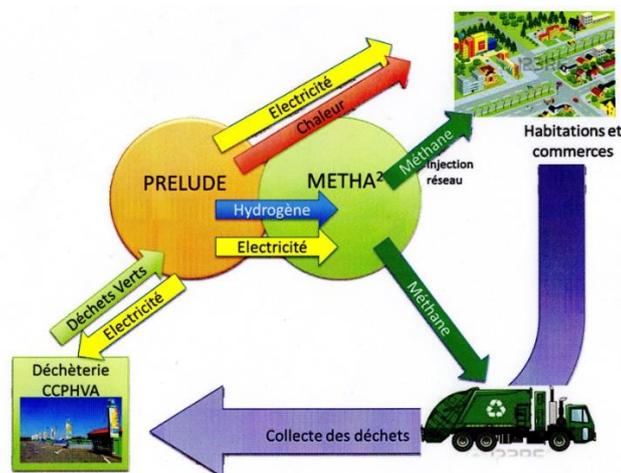


Figure 24 : Projets de récupération d'énergie au sein de la commune d'Aumetz en France (Lévy, 2017)

Conclusion

Le but principal de ce mémoire a été d'évaluer le potentiel de développement des énergies renouvelables de la commune Luxembourgeoise de Schifflange. Dans un premier temps, l'évolution des consommations thermiques et électriques de ces dernières années a été établie. La consommation par ménage ou par habitant a ainsi pu être identifiée. Les premiers graphiques ont permis de se rendre compte de l'état actuel dans lequel se trouve la commune. Ensuite, avant de déterminer les énergies renouvelables à mettre en place, quelques pistes d'économies d'énergies ont été décrites :

- Des réductions sont possibles en matière d'éclairage public (jusqu'à plus de 206 MWh/an)
- Une régulation efficace des chaudières des bâtiments publics est à mettre en place (économies possibles jusqu'à une trentaine de pourcent dans certains cas).

Cette première partie met en avant le besoin réduire les consommations énergétiques avant la mise en place de système permettant de couvrir ces consommations.

Dans un second temps, le potentiel en matière d'énergies renouvelables de la commune a été calculé. Pour cela, différentes options ont été envisagées. La surface de chaque toiture de la commune permettant la mise en place de panneaux PV et ST a été calculée. L'ensemble des résultats qui se trouve dans le CD-ROM fourni a donné lieu à l'obtention du potentiel de production électrique seul et du potentiel de production électrique et thermique en combinant des panneaux ST. Les autres sources renouvelables ont aussi été revues tels que la mise en place d'éoliennes urbaines ou de pompes à chaleur géothermique pour les habitations disposant d'un terrain suffisamment grand ainsi que de la possibilité d'alimenter une centrale de cogénération bois à partir de la disponibilité de la forêt de Schifflange. Le potentiel de la commune en matière d'énergies renouvelables couplé à la production déjà existante et aux consommations a permis de mettre en lumière deux points :

- Les consommations thermiques peuvent être entièrement couvertes grâce aux énergies renouvelables (notamment par la géothermie et le solaire thermique)
- Le potentiel de production électrique est faible. Seul 23 % des besoins électriques pourraient être couvert par des énergies renouvelables.

Dans les années à venir, la population de Schifflange va croître, les consommations énergétiques vont donc augmenter. Néanmoins, les consommations thermiques due aux nouvelles normes de construction vont progresser plus lentement que les consommations électriques. En effet, celles-ci vont augmenter de par les modes de vie des habitants (appareils ménagers, voitures

électriques, téléphones...). La mise en place d'énergies renouvelables productrices d'électricité est donc à privilégier. Il serait intéressant de poursuivre ce travail en se concentrant sur les nouvelles zones à aménager et la mise en place d'énergies renouvelables permettant de créer des zones énergétiquement indépendantes.

Concernant l'autarcie énergétique de toute la commune, cette idée semble très ambitieuse dans un délai court. Cet objectif final passe par des économies d'énergies drastiques, une sensibilisation de la population, une politique énergétique ciblée de la part de la commune et une augmentation croissante des différentes énergies renouvelables évoquées jusqu'ici.

Bibliographie

- Actu-Environnement. (2009). La première éolienne urbaine Française. Retrieved December 6, 2017, from https://www.actu-environnement.com/ae/news/eolienne_urbaine-1493.php4
- Ademe. (2015a). *Guide de conception des reseaux de chaleur solaire adaptés aux éco-quartiers*. Retrieved from <https://www.solaire-collectif.fr/photo/img/reussir-projet/2015-ADEME-Guide-conception-SmartGrid-ST.pdf>
- Ademe. (2015b). *Le panneau solaire Dualsun*. Retrieved from <https://www.solaire-collectif.fr/photo/img/reussir-projet/2015-ADEME-Guide-conception-SmartGrid-ST.pdf>
- Ademe. (2016). *Le panneau solaire Cogen'air*. Retrieved from <http://www.ecoren.fr/cogeneration-biomasse.php>
- Ademe. (2017). La méthanisation. Retrieved December 24, 2017, from <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-organique/methanisation>
- ADEME. (2016). *L'énergie éolienne*. Retrieved from <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-eolien-201604.pdf>
- Ademe, & BRGM. (n.d.). Les enjeux du sous-sol. *Geothermie perspective*. Retrieved November 29, 2017, from <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/enjeuxGMI>
- Administration communale de Koerich. (n.d.). *La maison passive au Luxembourg*.
- Administration des ponts et des chaussés. (n.d.). Carte géologique de Schifflange. Retrieved November 29, 2017, from <http://www.geologie.lu/index.php/guide-geologique/communes>
- AFE. (2007). *Guide d'application de la norme européenne Eclairage public EN 13201*.
- AGORA. (2017). *Projet de reconversion de l'ancien site siderurgique d'Esch-Schifflange*.
- Alliance du climat Luxembourg. (n.d.). Geothermie : Utiliser la chaleur du sol.
- Annuaire-mairie. (n.d.). Ville de Schifflange. Retrieved from <http://www.annuaire-mairie.fr/ville-schifflange.html>
- Antzorn, F. (2017). Evolution du parc automobile luxembourgeois. *paperjam*. Retrieved from <http://paperjam.lu/news/toujours-davantage-de-voitures-au-luxembourg>
- Appropedia. (2016). LCA of silicon PV panels. Retrieved December 9, 2017, from http://www.appropedia.org/LCA_of_silicon_PV_panels#cite_note-Ito2007-5
- Arene. (2004). *Eoliennes en milieu urbain*.
- Asder. (2017). Geothermie- Pompes à chaleur. Retrieved December 17, 2017, from <http://www.asder.asso.fr/info-energie/choix-energies/chauffage-eau-chaude/geothermie-pompe-a-chaleur>

- BINE Information service. (2013). Storing solar energy in the ground. Retrieved December 19, 2017, from http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2013/PM_01_2013/ProjektInfo_0113_engl_internetx.pdf
- Bruxelles environnement. (2017). Eolienne en milieu urbain. Retrieved December 5, 2017, from <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/eolienne-en-milieu-urbain.html?IDC=10183>
- Climamaison. (2017). COP. Retrieved November 28, 2017, from <https://www.climamaison.com/lexique/cop.htm>
- Commission de régulation de l'énergie. (n.d.). Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité. Retrieved December 9, 2017, from Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité
- Connaissance des énergies. (2011a). Géothermie haute température. Retrieved November 29, 2017, from <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-haute-temperature>
- Connaissance des énergies. (2011b). Gazéification. Retrieved December 11, 2017, from <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>
- Connaissance des énergies. (2013). CAES, stockage par air comprimé. Retrieved December 19, 2017, from <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime>
- Connaissance des énergies. (2015). L'énergie dans le monde en 2035, à quoi s'attendre ? Retrieved from <https://www.connaissancedesenergies.org/lenergie-dans-le-monde-en-2035-quoi-faut-il-sattendre-150225>
- Connaissance des énergies. (2016). Stockage d'électricité. Retrieved December 19, 2017, from <https://www.connaissancedesenergies.org/stockage-delectricite-quappelle-t-le-power-gas-170908#notes>
- Connaissance des énergies. (2017). Les batteries lithium-ion. Retrieved December 19, 2017, from <https://www.connaissancedesenergies.org/les-batteries-lithium-ion-en-4-questions-170308>
- Conseil général des Landes. (2008). *Le petit éolien*. Retrieved from <https://www.landes.fr/files/cg40/environnement/Guide-petit-eolien.pdf>
- CSTC. (2013). Geothermie peu profonde. Retrieved November 28, 2017, from <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact39&art=591>
- Damien, A. (2013). *Guide du traitement des déchets* (6ème.).
- Desjardins, P. (2017). Volkswagen e-Golf 2017. Retrieved from <http://www.caradisiac.com/essai-volkswagen-e-golf-2017-des-muscles-et-du-souffle-en-p>
- DG SIE. (2011). *Libramont-Chevigny*. Retrieved from http://ng3.economie.fgov.be/ni/municipalkeyfigures/FR/slide/slide_84077.pdf
- Direction générale Politique de mobilité durable et ferroviaire. (2014). *Kilomètre parcouru par les véhicules belges*.

- Dualsun. (2014). Quelle orientation et quelle inclinaison du panneau solaire choisir ? Retrieved November 8, 2017, from <https://dualsun.fr/2014/12/quelle-inclinaison-et-quelle-orientation-du-panneau-solaire-choisir/>
- Durable.com. (n.d.). Puissance et rendement d'une éolienne pour particulier. Retrieved December 6, 2017, from <http://eoliennes-particuliers.durable.com/a-puissance-et-rendement-d-une-eolienne-eolienne-pour-particulier-durable>
- Eco infos énergies renouvelables. (2017). Quel est le prix d'un chauffe eau solaire en 2017 ? Retrieved November 7, 2017, from <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/prix-chauffe-eau-solaire/>
- Ecoren. (n.d.). Cogénération biomasse. Retrieved December 15, 2017, from <http://www.ecoren.fr/cogeneration-biomasse.php>
- EDF. (2013). Les objectifs environnementaux du plan climat de l'UE. Retrieved from <https://www.lenergieenquestions.fr/les-3x20-les-objectifs-environnementaux-du-plan-climat-de-lue/>
- EDF. (2017a). Qu'est ce que l'énergie solaire ? Retrieved October 30, 2017, from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire>
- EDF. (2017b). Le petit éolien. Retrieved December 5, 2017, from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-petit-eolien>
- Editus. (n.d.). Syndicat de communes Minnett-Kompost. Retrieved December 24, 2017, from <https://www.editus.lu/fr/syndicat-de-communes-minnett-kompost-esch-sur-alzette-21378>
- Enea consulting. (2012). *Le stockage d'énergie*.
- Enerdata. (2017). *Bilan énergétique mondiale*.
- Energetic. (2008). L'enregistreur de température. Retrieved from http://www.labo-energetic.eu/fr/labo/a_telecharger/Guide_d%27utilisation/enregtemp.html
- Energieplus. (n.d.). Les degrés-jours. Retrieved from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15567#c9705+c9706+c9707>
- Energieplus. (n.d.). Améliorer la régulation. Retrieved from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10926#>
- Energieplus. (n.d.). La combustion du bois. Retrieved December 11, 2017c, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16667#c20380>
- Energieplus. (n.d.). Le rendement des éoliennes. Retrieved December 6, 2017d, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>
- Energies renouvelables : les panneaux photovoltaïques. (2014). . Retrieved from <http://www.france-panneaux-solaires.fr/panneaux-photovoltaïques/nergies-renouvelables-les-panneaux-photovoltaïques.html>
- ERA-Sun. (2011). Solaire thermique. Retrieved November 2, 2017, from <http://www.era-sun.fr/francais/nos-produits/solaire-thermique/>

ESG. (n.d.). D'où vient la chaleur de la terre ? Retrieved November 27, 2017, from <http://www.es-geothermie.fr/documentation/geothermies/d-ou-vient-la-chaleur-de-la-terre>

Eurostat. (2015). Les projections de population 2015 au niveau national. Retrieved from http://ec.europa.eu/eurostat/data/database?node_code=proj

Fédération française du bâtiment. (n.d.). Energie solaire thermique. Retrieved from <http://www.energie-solaire-thermique.fr/index.html>

Fröling. (n.d.). *CHP 50*.

Futura Planète. (n.d.). Energie solaire. Retrieved October 30, 2017, from <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>

Gicquel, G. (n.d.). La combustion de la biomasse. Retrieved December 11, 2017, from <http://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/combustion-biomasse.html>;

Google map. (n.d.). vue aérienne de schiffange. Retrieved December 25, 2017, from <https://www.google.fr/maps/@49.51419,6.0054281,957m/data=!3m1!1e3>

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2010). Plan d'action national en matière d'énergies renouvelables. Retrieved from <http://www.gouvernement.lu/4301638/energie-renouvelable>

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2012a). *Pacte climat*.

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2012b). *Stratégie globale pour une mobilité durable*.

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2016). La population du Luxembourg ne cesse de croître. Retrieved from <http://www.luxembourg.public.lu/fr/actualites/2016/07/11-population-luxembourg/index.html>

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2017a). PRIME HOUSE. Retrieved October 3, 2017, from <http://www.guichet.public.lu/citoyens/fr/logement/renovation-transformation/performances-energie/aide-financiere-assainissement-energetique/index.html>

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2017b). *The 3rd industrial revolution*.

Gouvernement du grand-duché du Luxembourg. (2017c). Des nouvelles mesures en faveur du photovoltaïque présentées. Retrieved November 7, 2017, from <http://www.luxembourg.public.lu/fr/actualites/2017/09/13-photovoltaique/index.htm>

Guerriat, A. (2004). Besoin en énergie. Retrieved November 16, 2017, from <http://www.lamaisonpassive.be/besoin-en-energie>

Houtinfobois. (2017). Peuplier. Retrieved December 22, 2017, from <http://www.houtinfobois.be/essences/peuplier/>

IfaS. (2014). *Le concept énergétique*. Retrieved from http://www.dudelange.lu/fr/Documents/2014_IfaS-Prasentation.pdf

IFPEN. (2012). Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité. Retrieved December 9, 2017, from <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite#2>

- Info-énergie en Bourgogne. (2013). *L'éolien domestique*. Retrieved from http://www.ale-nievre.org/wp-content/uploads/2015/02/DT_EIE_n5-eolien.pdf
- Inhabitat. (2008). A unique solar powered community in canada. Retrieved December 11, 2017, from
- Insee. (2016). *Recensement de la population*.
- Le Jeune, F. (2017). Stockage de l'électricité par batterie. *Les-smatgrid.fr*. Retrieved December 19, 2017, from <http://les-smartgrids.fr/stockage-electricite-batterie-technologies-2/>
- Kompost, M. (2014). *Dechets acheminés de Schifflange*. Retrieved from [http://www.minett-kompost.lu/fr-FR/statistiques/Livraisons de la commune de Schifflange.pdf?FileID=publications%2Flivraisons%2520de%2520la%2520commune%2520de%2520schifflange.pdf](http://www.minett-kompost.lu/fr-FR/statistiques/Livraisons%20de%20la%20commune%20de%20schifflange.pdf?FileID=publications%2Flivraisons%2520de%2520la%2520commune%2520de%2520schifflange.pdf)
- L'essentiel. (2015). Wincrange aura le parc éolien le plus puissant. Retrieved December 5, 2017, from <http://www.lessentiel.lu/fr/news/luxembourg/story/Wincrange-aura-le-parc-eolien-le-plus-puissant-21631590>
- Landrieu, G. (1994). Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement. *INERIS*.
- Le panneau amorphe. (n.d.). Retrieved November 13, 2017, from <http://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/le-panneau-amorphe/>
- Les défis de la croissance démographique. (2015). *Banque de Luxembourg*. Retrieved from <https://www.banquedeluxembourgnews.com/fr/bank/blnews/-/vivre-a-700-000-les>
- Lévy, D. (2017). Aumetz : Prelude à une nouvelle gestion des déchets verts. Retrieved December 4, 2017, from <http://www.lasemaine.fr/2017/10/06/aumetz--prelude-a-une-nouvelle-gestion-des-dechets-verts>
- Lindal. (1973). What is geothermal energy ? Retrieved November 28, 2017, from https://www.geothermal-energy.org/print/what_is_geothermal_energy.html
- Livet, F. (2011). *Le problème de l'intermittence des renouvelables*.
- Living Green. (2017). La meilleure élève du sud. Retrieved October 3, 2017, from http://www.livinggreen.lu/article-268_la-meilleure-eleve-du-sud
- Luxcontrol. (2000). *Endbericht zur Windpotentialmessung in Schifflingen*.
- Luxmobil. (2017). Enquête sur la mobilité au Luxembourg. Retrieved from <http://luxmobil.lu/>
- Maquil, R., & Bintz, J. (1992). Carte géologique générale. Retrieved November 30, 2017, from <http://www.geologie.lu/index.php/guide-geologique/cartes-geologiques>
- Marchal, D. (2004). *La cogénération à partir du bois*. Retrieved from http://valbiom.be/files/gallery/dossier_silvab_4_boisenergie_20041200474218.pdf
- Minett Kompost. (2014a). *Biodéchets à Schifflange*.
- Minett Kompost. (2014b). *Quantité de biométhane*.
- Ministère de l'économie. (2016). *Luxembourg 2020*.

- Ministère de l'économie Luxembourgeois. (2014). *Production d'électricité basée sur les sources d'énergies renouvelables*.
- Ministère de l'économie Luxembourgeois. (2016). *Production d'électricité basée sur les sources d'énergies renouvelables*.
- Ministère de la région Wallonne. (1997). *La régulation du chauffage dans les établissements scolaires*.
- Ministère du développement durable et des infrastructures. (2012). *Natura 2000*. Retrieved from http://www.environnement.public.lu/conserv_nature/dossiers/Natura_2000/Liste_nationale_des_Zones_Habitats/sdf/Site_LU0002007.pdf
- Ministère du développement durable et des infrastructures. (2015). *Pacte Climat*.
- Ministère du développement durable et des infrastructures. (n.d.). PacteClimat. Retrieved from <http://www.pacteclimat.lu/fr/certification>
- Moletta, R. (2003). *La digestion anaérobie des déchets municipaux*.
- Myenergy. (2017). Le certificat de performance énergétique pour les bâtiments. Retrieved from <https://www.myenergy.lu/fr/particuliers/lois-et-reglements/passeport-energetique>
- Myenergy. (n.d.). Pacteclimat. Retrieved from <http://www.pacteclimat.lu/fr/communes/commune/red-rocks/schiffange>
- Naskeo Environnement. (2009). Valeur fertilisante des déchets. Retrieved from http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/digestats_valorisation.html
- Newwind. (2015). L'arbre à vent. Retrieved January 4, 2017, from <http://www.newwind.fr/innovations/#laeroleaf-slider>
- Observ'ER. (n.d.). La géothermie. Retrieved November 28, 2017, from http://www.energies-renouvelables.org/energie_geothermie.asp
- Observ'ER. (2007). Les 5 familles énergies renouvelables. Retrieved November 2, 2017, from http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp
- Oekostroum. (2016). Le parc éolien le plus performant du Luxembourg. Retrieved December 5, 2017, from <http://www.oekostroum.lu/>
- Office fédéral de l'énergie. (2001). *dimensionnement de systèmes de panneaux solaires*.
- Olivennes, B. (2017). Stockage des énergies renouvelables : des solutions à la française. Retrieved from <http://les-smartgrids.fr/stockage-energies-renouvelables-solutions-francaise/>
- Le Parisien. (2016, November). Velizy-Villacoublay : l'arbre à vent de Montebourg est-il une si bonne idée ? Retrieved from <http://www.leparisien.fr/velizy-villacoublay-78140/velizy-villacoublay-l-arbre-a-vent-est-il-une-si-bonne-idee-02-11-2016-6280056.php>
- Parlement européen. (2009). *Directive 2009/28/CE*.
- Parrain, M. (2017). Luxembourg : le Grand-duché se met à l'heure électrique. *Breezcar*. Retrieved September 20, 2017, from <https://www.breezcar.com/actualites/article/luxembourg-avantages-fiscaux-voitures-eletriques-0217>

- Partners, S. (2013). *Le power to gas peut-il résoudre les problèmes de l'intermittance des énergies renouvelables ?*
- Photovoltaïque.info. (2016). Les technologies de cellules solaires photovoltaïques. Retrieved November 21, 2017, from <http://www.photovoltaïque.info/Les-technologies-de-cellules.html>
- Photovoltaïque.info. (2017). Coûts d'investissement. Retrieved November 7, 2017, from <http://www.photovoltaïque.info/Couts-d-investissement.html>
- Photovoltaïque energie. (n.d.). Comment calculer la production photovoltaïque d'un panneau. Retrieved from <http://www.photovoltaïque-energie.fr/estimer-la-production-photovoltaïque.html>
- Planete energies. (2015). Qui produit et qui consomme des énergies renouvelables ? Retrieved November 2, 2017, from <http://www.planete-energies.com/fr/medias/dossiers/qui-produit-et-qui-consomme-des-energies-renou>
- QuelleEnergie. (n.d.). Pompes à chaleur géothermiques ou Aerothermique ? Retrieved December 17, 2017, from <https://www.quelleenergie.fr/magazine/economies-energie/comparatif-pompe-chaleur-geothermique-aerothermique-7528/>
- De Rango, P., Marty, P., Fruchart, D., Baccia, M., Chaise, A., Delhomme, B., Garrier, S., et al. (2012). *Le stockage solide de l'hydrogène au service des énergies renouvelables*. Retrieved from http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/13_De_Rango.pdf
- Rapin, M., & Noël, J.-M. (2014). *Energie éolienne*. (Dunod, Ed.) (2ème.). Retrieved from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=zji_AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=petit eolien&ots=BAgl99mbFv&sig=aWY1-QWhhmitSBskmG5aTIQGs_k#v=onepage&q=petit&f=false
- RMT biomasse. (2009). *La méthanisation*. Retrieved from <http://www.rmtbiomasse.org/index.php?id=2846>
- Roulet, C.-A. (2010). *santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments* (2ème.).
- Schneider electric. (2013). *Cinq tendances mondiales qui conditionnent l'avenir de l'énergie*.
- Service public de Wallonie. (2011). *Quelles informations dans le certificat énergétique d'un logement ?*
- Service public de Wallonie. (2012). *Plan d'action NZEB*.
- Service public de Wallonie. (n.d.). Le rendement d'une installation solaire thermique. Retrieved November 6, 2017, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16734#c20925+c20923>
- Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement. (n.d.). Généralités sur les PAC. Retrieved November 30, 2017, from <https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/installations/generalites-sur-les-pac>
- Sidor. (n.d.). Usine d'incinération. Retrieved January 2, 2017a, from <http://sidor.lu/fr/L'usine-d'incineration/Présentation>
- Sidor. (n.d.). *Communiqué de presse Sidor*.
- Simon, P. (2015). *Stockage électrochimique de l'énergie : principe, applications et futurs défis*.

- SITOM. (2017). Principe de fonctionnement d'une usine d'incinération. Retrieved from <http://www.sitomvalleesmontblanc.fr/-Principe-de-fonctionnement->
- SIVEC. (2011). Syndicat intercommunal à vocation écologique. Retrieved December 24, 2017, from <http://www.sivec.lu/presentation/>
- SIVEC. (n.d.). Données techniques. Retrieved January 4, 2017, from <http://www.sivec.lu/sample-page-2/technische-daten/>
- Solargis. (2011). solar ressource maps. Retrieved November 7, 2017, from <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview/>
- Solargis. (2017). Global atlas info. Retrieved November 7, 2017, from <http://globalsolaratlas.info/?c=54.41893,3.691406,3&s=49.50556,6.0125>
- Spanner. (2017). *Spanner wood cogeneration plants*. Retrieved from http://www.all-energy.co.uk/__novadocuments/217319?v=635913122076870000
- Statec. (2011). *Logements occupés par commune et année d'achèvement de l'immeuble au 01 février 2011*. Retrieved from <http://www.statistiques.public.lu/fr/population-emploi/rp2011/maisons/index.html>
- Statec. (2014). *Regards sur la surface des logements*.
- Statec. (2017a). Population par canton et commune. Retrieved from http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12861&IF_Language=fra&MainTheme=2&FldrName=1
- Statec. (2017b). *Publication mensuelle sur l'état de la conjoncture luxembourgeoise*.
- Sudgaz. (2015). *Rapport annuel 2014*. Retrieved from <http://sudgaz.lu/documents/>
- Système D. (2017). Energie : choisir la géothermie par forage pour se chauffer. Retrieved November 27, 2017, from <https://www.systemed.fr/conseils-bricolage/chauffage-geothermie-par-forage,2232.html#>
- ThermoMap. (2017). Fiche d'information pour le potentiel géothermique très peu profond. Retrieved November 9, 2017, from <http://geoweb2.ac.at/thermomap/printindex.html>
- Total. (2013). pompe à chaleur géothermique : comment ça marche ? Retrieved from <http://www.lenergiétoutcompris.fr/travaux-chauffage/pompe-a-chaleur-geothermique/comment-ca-marche>
- Tournery, J.-F. (2015). Les stations de pompage (STEP). Retrieved December 19, 2017, from http://encyclopedie-energie.org/sites/default/files/fichiers_joints/articles/art080_Tournery-JeanFrancois_Stations-pompage-STEP.pdf
- TR-engineering. (2000). *Station d'épuration de Schiffflange*. Retrieved from https://www.tr-engineering.lu/Uploads/Eau_environment/Doc/3_1_H431_STEP_SCHIFFFLANGE.pdf
- La Tribune. (2016). L'arbre à vent, la solution de l'éolien urbain ? Retrieved January 4, 2017, from <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/la-tribune-de-l-energie-avec-erdf/l-arbre-a-vent-la-solution-de-l-eolien-urbain-537458.html>
- Université de Mons. (2015). *Potentiel géothermique profond au grand-duché de Luxembourg*.

Viessmann. (n.d.). Solaire thermique et photovoltaïque. Retrieved December 26, 2017, from <https://www.viessmann.lu/fr/chauffage-batiments-residentiels/heizsysteme-neubau/solarthermie-und-photovoltaik.html>

Wikipedia. (2017a). Libramont-Chevigny. Retrieved from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Libramont-Chevigny>

Wikipedia. (2017b). Conversion d'électricité en gaz. Retrieved December 21, 2017, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Conversion_d%27électricité_en_gaz

Annexe 1 : Données de consommation de la commune de Schifflange

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2006-2007				2006-2007	2006-2007
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
13 786 104	2 813 577	134 594	16 734 275	12 509 698	2 755 561
13 786 104	2 813 577	134 594	16 734 275	12 509 698	2 755 561

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2007-2008				2007-2008	2007-2008
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
14 138 042	2 839 468	161 568	17 139 078	11 475 912	3 019 476
14 138 042	2 839 468	161 568	17 139 078	11 475 912	3 019 476

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2008-2009				2008-2009	2008-2009
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
13 249 205	2 547 001	163 341	15 959 547	11 850 794	2 747 798
13 249 205	2 547 001	163 341	15 959 547	11 850 794	2 747 798

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2009-2010				2009-2010	2009-2010
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
14 118 397	2 878 288	167 238	17 163 923	10 978 284	3 034 949
14 118 397	2 878 288	167 238	17 163 923	10 978 284	3 034 949

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2010-2011				2010-2011	2010-2011
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
13 796 378	2 802 209	159 692	16 758 279	12 212 397	3 017 628
13 796 378	2 802 209	159 692	16 758 279	12 212 397	3 017 628

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2011-2012				2011-2012	2011-2012
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
14 224 674	2 773 899	170 443	17 169 016	12 638 043	3 138 940
14 224 674	2 773 899	170 443	17 169 016	12 638 043	3 138 940

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2012-2013				2012-2013	2012-2013
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
13 705 858	2 987 306	163 740	16 856 904	12 024 403	3 616 593
13 705 858	2 987 306	163 740	16 856 904	12 024 403	3 616 593

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2013-2014				2013-2014	2013-2014
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
14 118 098	3 206 888	162 657	17 487 643	12 634 517	3 770 022
14 118 098	3 206 888	162 657	17 487 643	12 634 517	3 770 022

Électricité				MT/HT (kWh)	Production (kWh)
Consommation Basse Tension (kWh)				MT/HT	
2014-2015				2014-2015	2014-2015
Ménages	Secteur professionnel	Éclairage Public	Total localité	MT/HT	Installations de Production
13 958 509	3 134 430	157 912	17 250 851	12 414 304	3 918 523
13 958 509	3 134 430	157 912	17 250 851	12 414 304	3 918 523

SCHIFFLANGE						
Année gazière	Nombre clients *	Consomm./ m³/an	Consomm./ client/an m³	Degrés-jours		m3/DJ
				Effectifs	Moyenne 10 ans	
2004	2 384	7 731 229	3 243	3 576	3 620	0,91
2005	2 407	7 769 980	3 228	3 707	3 633	0,87
2006	2 400	7 836 237	3 265	3 598	3 595	0,91
2007	2 396	6 350 474	2 650	2 738	3 475	0,97
2008	2 361	7 146 850	3 027	3 487	3 480	0,87
2009	2 354	7 042 014	2 992	3 701	3 475	0,81
2010	2 399	7 214 400	3 007	3 689	3 500	0,82
2011	2 412	7 004 113	2 904	3 502	3 496	0,83
2012	2 444	6 852 549	2 804	3 466	3 489	0,81
2013	2 373	7 225 146	3 045	3 921	3 538	0,78

Déchets organiques en tonnes								
<u>2009</u>	<u>2010</u>	<u>2011</u>	<u>2012</u>	<u>2013</u>	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>	
1 666,80	1 560,65	1 548,74	1 730,44	1 882,28	2 031,89	1 528,02	1 941,51	Consommation totale en kg
0,19	0,17	0,17	0,19	0,20	0,21	0,15	0,19	Consommation /habitant

Déchets ménagers et déchets encombrants en tonnes									
<u>2009</u>	<u>2010</u>	<u>2011</u>	<u>2012</u>	<u>2013</u>	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>		
1 772,28	1 734,07	1 816,08	1 792,40	1 856,44	1 916,08	1 915,86	1 727,06	Consommation totale déchets ménagers	
28,22	22,16	19,46	9,70	12,36	5,38	9,22	20,36	Consommation totale déchets encombrant	
<u>1 800,50</u>	<u>1 756,23</u>	<u>1 835,54</u>	<u>1 802,10</u>	<u>1 868,80</u>	<u>1 921,46</u>	<u>1 925,08</u>	<u>1 747,42</u>	Consommation totale	

Annexe 2 : Données statistiques de l'AEV pour Schiffflange



MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DES INFRASTRUCTURES
Département de l'environnement

KlimaPakt
Meng Gemeng engagéiert sech



Données statistiques : Administration de l'Environnement

Date : 12 juin 2017

Mise à disposition des conseillers climat par myenergy

Année	Type d'installation	Paramètre technique	Valeur	Unité
2014	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	23,5	m ²
2015	Appartement individuel passif	Surface des pièces habitables chauffées	971	m ²
2004	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	19,94	kWcrête
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Assainissement intégral	1	oui/non
2014	Ventilation contrôlée avec récupération de chaleur	Nombre d'installations	1	#
2011	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	13,574	m ²
2010	Poêle à granulés de bois	Puissance de l'installation	25	kW
2016	Ventilation contrôlée avec récupération de chaleur	Nombre d'installations	1	#
2010	Assainissement isolation/fenêtres	Surface façade isolée à l'extérieur	149,76	m ²
2015	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	6,99	m ²
2016	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	7,194	kWcrête
2015	Maison à basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	190,8	m ²

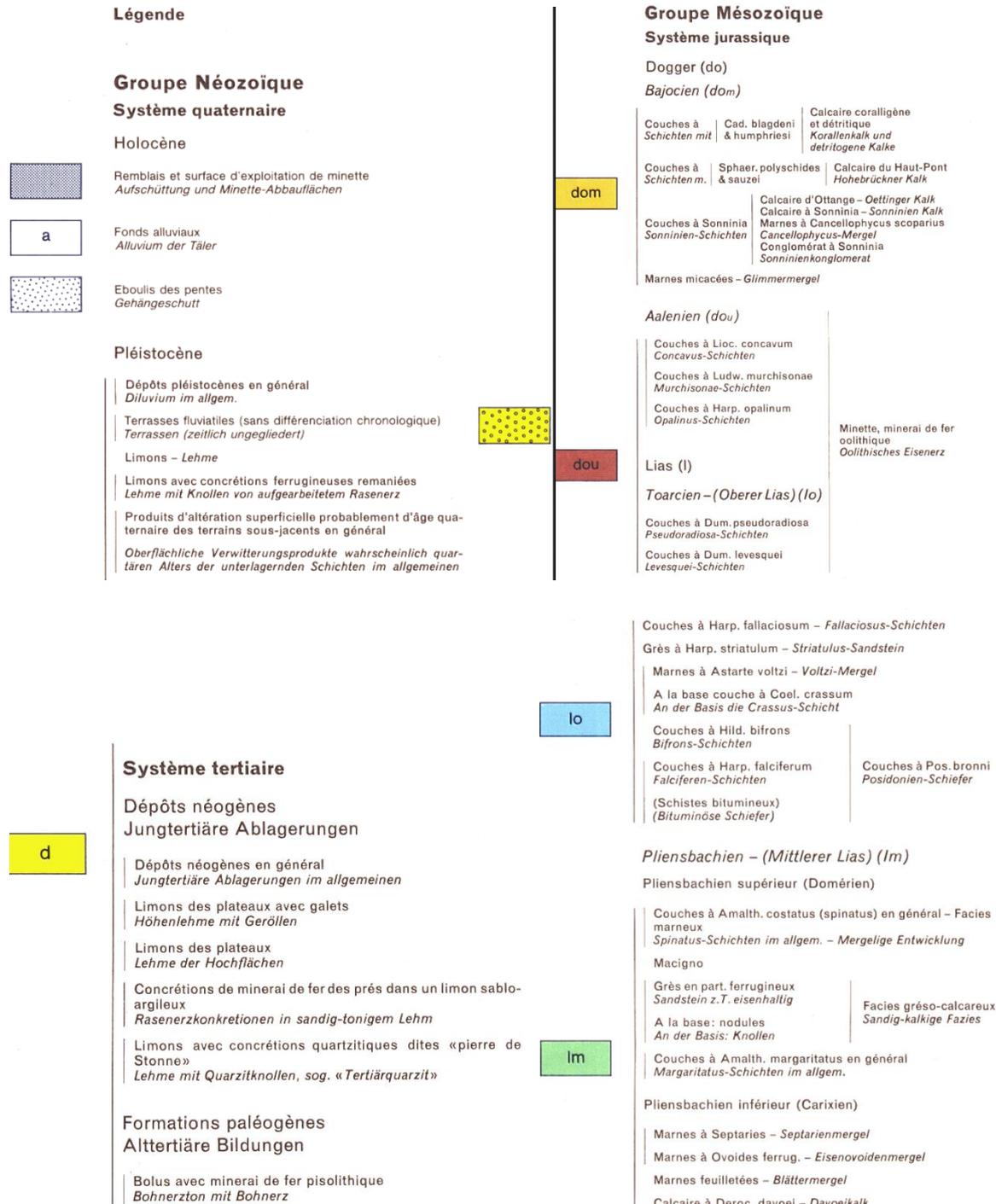
2016	Appartement individuel basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	4975,47	m ²
2014	Maison à basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	1049,8	m ²
2014	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	4,75	kWcrête
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface dalle cave isolée	196,18	m ²
2014	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	9,76	m ²
2004	Maison à basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	133	m ²
2007	Chauffage central à granulés de bois	Puissance de l'installation	25,9	kW
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture plate isolée	20	m ²
2004	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	10	m ²
2002	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	4,28	m ²
2013	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	85,135	kWcrête
2003	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	8,16	kWcrête
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface dalle cave isolée	261,46	m ²
2011	Maison à basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	295,3	m ²
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface fenêtres triples substituées	107,24	m ²
2005	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	4	kWcrête
2013	Equilibrage hydraulique	Nombre d'installations	1	#
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture inclinée isolée	83,76	m ²
2013	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	4,51	m ²
2013	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	13,66	m ²
2014	Appartement individuel basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	1666	m ²

2015	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	13,68	kWcrête
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface façade isolée à l'extérieur	837,98	m ²
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Surface fenêtres doubles substituées	25,88	m ²
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Surface dalle cave isolée	60	m ²
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface dalle grenier isolée	50	m ²
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface mur isolé	80,37	m ²
2013	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	29,52	kWcrête
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface fenêtres triples substituées	8,08	m ²
2013	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	7,11	m ²
2008	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	6,99	m ²
2015	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	19,35	m ²
2016	Appartement individuel basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	3326,3	m ²
2015	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	20,32	m ²
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Surface façade isolée à l'extérieur	214,65	m ²
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Assainissement intégral	1	oui/non
2007	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	16,61	m ²
2013	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	12,75	m ²
2010	Equilibrage hydraulique	Nombre d'installations	2	#
2006	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	7,17	m ²
2005	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	4,16	kWcrête

2012	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	54,978	m ²
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture incliné isolée	358,3	m ²
2015	Appartement individuel basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	7792,78	m ²
2013	Appartement individuel basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	1442,5	m ²
2010	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	16,543	m ²
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface fenêtres doubles substituées	25,43	m ²
2013	Maison à basse énergie	Surface des pièces habitables chauffées	907,2	m ²
2011	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	37,805	kWcrête
2010	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	43,672	m ²
2004	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	10,44	m ²
2014	Chauffage central à granulés de bois	Puissance de l'installation	14,5	kW
2012	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	7,83	kWcrête
2009	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	29,418	m ²
2006	Raccordement à un réseau de chaleur	Puissance du raccordement au réseau	103	kW
2008	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	45,988	m ²
2012	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture incliné isolée	408,7	m ²
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface façade isolée à l'extérieur	688,646	m ²

2002	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	9,78	m ²
2011	Equilibrage hydraulique	Nombre d'installations	1	#
2011	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	19,08	m ²
2013	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture plate isolée	10,64	m ²
2016	Collecteurs thermiques - eau chaude sanitaire	Surface du collecteur	8,46	m ²
2007	Collecteurs thermiques - chauffage et eau chaude	Surface du collecteur	18,84	m ²
2011	Assainissement isolation/fenêtres	Surface fenêtres doubles substituées	33,72	m ²
2014	Capteur solaire photovoltaïque	Puissance électrique	5,75	kWcrête
2009	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture incliné isolée	257,5	m ²
2014	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture incliné isolée	206	m ²
2010	Assainissement isolation/fenêtres	Surface toiture incliné isolée	59,5	m ²
2007	Raccordement à un réseau de chaleur	Puissance du raccordement au réseau	32	kW
2008	Raccordement à un réseau de chaleur	Puissance du raccordement au réseau	10	kW

Annexe 3 : Légende de la carte géologique du Luxembourg



Sinémurien et Hettangien – (Unterer Lias) (li)

Sinémurien

li	Sinémurien supérieur (Lotharingien)	
	Couches à Cal. raricostatum – <i>Raricostatus-Schichten</i> Couches à Aeg. dudressieri – <i>Dudressieri-Schichten</i> Marnes pauvre en fossiles – <i>Fossilarme Tone</i>	
	Sinémurien inférieur	
	Zone à Bel. brevis (acutus) – <i>Breviszone</i> Zone à Ariet. bucklandi – <i>Bucklandizone</i>	Marnes et calcaires de Strassen grès de Luxembourg Luxembourg Sandstein
	<i>Hettangien</i>	
	Zone à Schloth. angulata – <i>Angulatenzone</i> Zone à Psil. planorbe – <i>Psilonotenschichten</i>	

Système triasique

Keuper

ko	Argiles rouges – <i>Rote Tone</i> Grès et marnes feuilletées noires <i>Sandstein und schwarze Blättermergel</i>	Rhétien – Rhät
km	Keuper à marnolites compactes <i>Steinmergelkeuper</i> Marnes rouges gypsifères <i>Roter Gipskeuper</i> Grès à roseaux <i>Schilfsandstein</i>	Keuper gypsifère ou «Hauptkeuper» Gipskeuper oder Hauptkeuper
ku	Dolomie limite – <i>Grenzdolomit</i> Marnes bariolées – <i>Bunte Mergel</i> Couches de base – <i>Basisschichten</i>	Groupe de la Lettenkohle Lettenkohlen-Gruppe

Muschelkalk

mo	Couches à Ceratites nodosus <i>Nodosus-Schichten</i> Couches à Entroques <i>Trochiten-Schichten</i>	«Hauptmuschelkalk»
mm	Dolomie à Lingula tenuissima <i>Linguladolomit</i> Marnes gypsifères – <i>Gipsmergel</i>	Groupe de l'anhydrite Anhydritgruppe
mu	Couches à Myophoria orbicularis <i>Orbicularis-Schichten</i> Grès coquillier – <i>Muschelsandstein</i>	Muschelkalk inférieur Unterer Muschelkalk

Grès bigarré – Buntsandstein

so	Grès à voltzia – <i>Voltziensandstein</i> Couches de Transition – <i>Zwischenschichten</i>
----	---

Groupe Paléozoïque

Dévonien inférieur – Unteres Devon

Emsien (E) – Ems-Stufe (E)

Emsien supérieur (E₃) – Oberes Emsien (E₃)

E₃

Schiste de Wiltz: schiste bien feuilleté, bleu foncé avec des nodules argileux
Schiefer von Wiltz: Gut geblätterter, dunkelblauer Schiefer mit tonigen Knollen

A la base un niveau de quartzite blanc, le Quartzite de Berlé
An der Basis ein Horizont von weissem Quarzit, der Quarzit von Berlé

q

Quartzite de Berlé – *Quarzit von Berlé*

Emsien moyen (E₂) – Mittleres Emsien (E₂)

E₂

Couches bigarrées de Clervaux: schiste bigarré et grès
Bunte Schichten von Clerf: Bunte Schiefer und Sandstein

Emsien inférieur (E₁) – Unteres Emsien (E₁)

Division supérieure (E_{1b}) – Obere Abteilung (E_{1b})

E_{1b}

Grès quartzeux et quartzophyllades, appelés: Quartzophyllades de Schüttbourg
Quarzsandstein und Quarzophylladen, genannt: Quarzophylladen von Schüttburg

Division inférieure (E_{1a}) – Untere Abteilung (E_{1a})

E_{1a}

Schiste bien stratifié avec de rares bancs de grès quartzeux et quartzophyllades, appelé: Schiste de Stolzembourg
Schiefer mit guter Schichtung, Quarzophylladen und seltene Bänke von Quarzsandstein, bezeichnet als: Schiefer von Stolzembourg

Siegenien (Sg) – Siegen-Stufe (Sg)

Siegenien supérieur (Sg₃) – Oberes Siegenien (Sg₃)

Sg₃

Siegenien supérieur en général
Oberes Siegenien im allgemeinen

Schiste compact, grossier, mal stratifié, avec de rares bancs de grès argileux
Undeutlich geschichteter Grobschiefer mit seltenen Bänken von tonigem Sandstein

Sg_{3s}

Facies gréseux du Siegenien supérieur, appelé: Schiste de Bas-Bellain
Sandige Entwicklung des Oberen Siegenien, bezeichnet als: Schiefer von Niederbesslingen

Sg_{3a}

A la base, facies local de phyllades très fissiles (ardoises)
An der Basis, lokale Facies von Dachschiefer

Siegenien moyen (Sg₂) – Mittleres Siegenien (Sg₂)

Sg₂

Grès et schiste gréseux, compact
Sandstein und sandiger, kompakter Schiefer

Siegenien inférieur (Sg₁) – Unteres Siegenien (Sg₁)

Sg₁

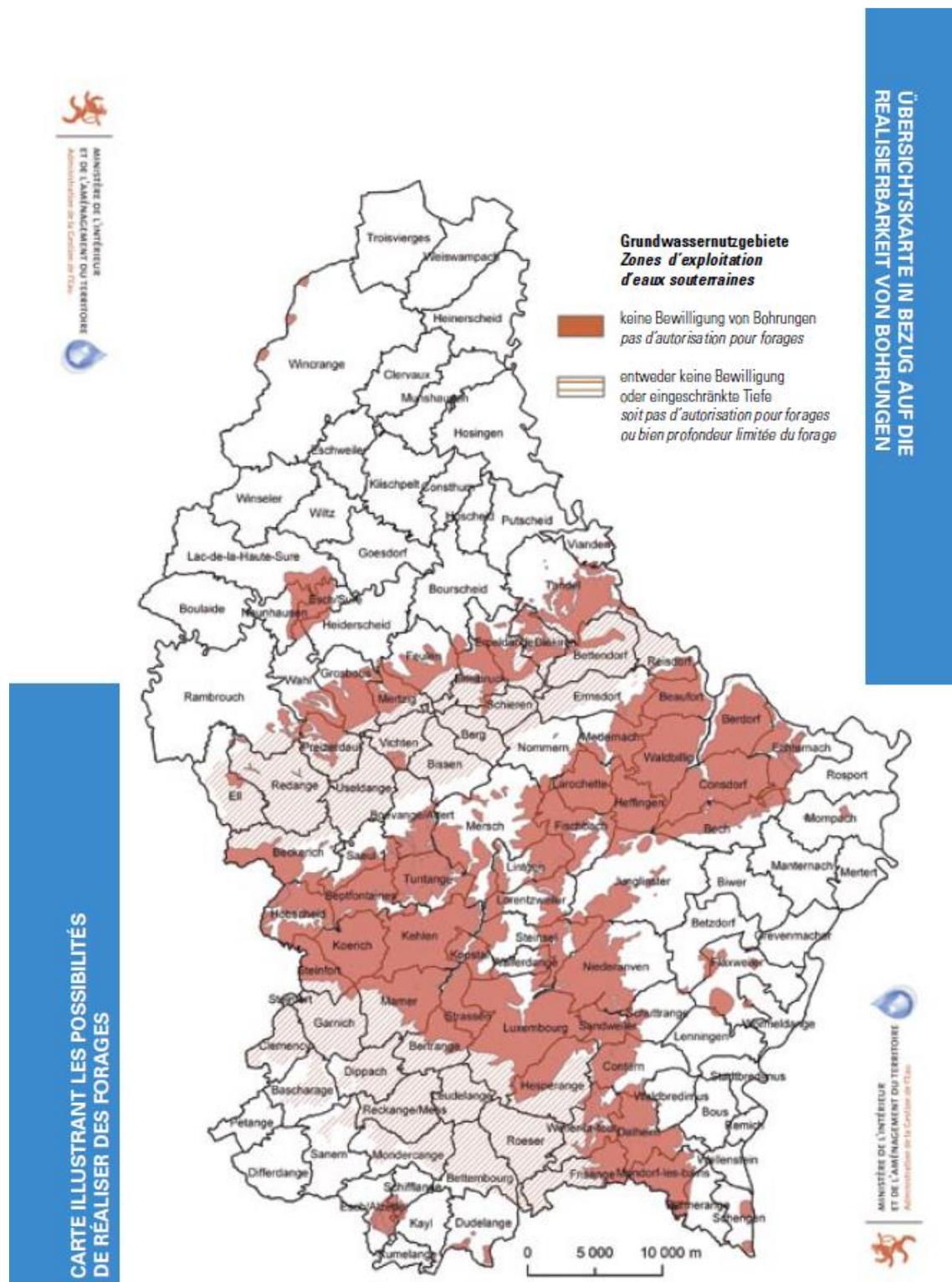
Phyllade bleu, noir et quartzophyllade gris
Schwarzblaue Phylladen und graue Quarzophylladen



Failles – *Verwerfungen*

Charriages – *Überschiebungen*

Annexe 4 : Carte illustrant les possibilités de réaliser des forages au Luxembourg



Annexe 5 : Fiches techniques pour la cogénération à partir de biomasse

Cogénération Biomasse de l'entreprise Fröling



Technische Daten		CHP50
Elektrische Leistung	[kW]	49/51*
Thermische Leistung	[kW]	ca. 107*
Hackschnitzel-Verbrauch	[kg/h]	ca. 40 - 45**
Hackschnitzel-Verbrauch bei 6.000 Betriebsstunden	[t]	ca. 300 t
Hackschnitzel-Qualität		P31S - P45S Klasse A1 - M10 (G30, W10); reduzierte Feinanteile
Abmessungen Container	[m]	8 x 3 x 3 (LxBxH)
Gewicht Container (betriebsbereit)	[t]	ca. 11
Gesamtwirkungsgrad (GWG)		ca. 83 %**
Elektrischer Wirkungsgrad		ca. 27 % (brutto)**

* Abhängig von Betriebsweise ** Abhängig von Brennstoffqualität

Ihr Fröling Partner:

Alle Abbildungen sind Symboldarstellungen!
Technische Änderungen sowie Druck- und Satzfehler vorbehalten!



**Heizkessel- und Behälterbau GesmbH
A-4710 Grieskirchen, Industriestr. 12**

AUT: Tel +43 (0) 7248 606 • Fax +43 (0) 7248 606-600
GER: Tel +49 (0) 89 927 926-0 • Fax +49 (0) 89 927 926-219
E-mail: info@froeling.com • Internet: www.froeling.com

Cogénération biomasse de l'entreprise Spanner

Spanner wood cogeneration plant

Technical data:

Model	HKA 30	HKA 45
Electrical power	30 kW	45 kW
Heat power	73 kW	108 kW
Wood chip consumption*	30 kg/h	45 kg/h
Wood chip consumption* for 7,000 operating hours/year	180 t <small>ATMO</small>	270 t <small>ATMO</small>
Wood chip quality:	Size G30 to G40 Max. moisture content: 13 % (ideal: < 8 %) Max. fines (< 4 mm grain size): 30 %	
Dimensions		
Wood gasifier (LxBxH)	5.272 x 1.540 x 2.300 mm	
CHP unit (LxBxH)	2.600 x 924 x 2.196 mm	

**Depending on the quality of the wood chips*

The number 1 worldwide:

Our customers require a secure energy supply of heat and electricity to allow for a smooth as well as an economical operation of their enterprise.

Wood cogeneration plants from Spanner Re² are built on the experience gained from almost 500 plants that operate on average 7000 to 8000 hours annually.

Résumé

Ce rapport a été réalisé en collaboration avec le département Développement durable de la commune de Schiffflange. La directive européenne du 23 avril 2009, prévoit en effet, un objectif de 11% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergies finale en 2020 du Luxembourg et 10 % dans le domaine du transport. La commune de Schiffflange est impliquée dans la thématique de la transition énergétique et met en œuvre plusieurs actions dans ce domaine.

Dans un premier temps, l'évaluation des consommations thermiques et électriques de la ville a été identifiée et certaines économies d'énergies ont été présentées notamment sur l'éclairage public et la régulation des chaudières des bâtiments de la commune.

Dans un second temps, le potentiel de plusieurs énergies renouvelables, dont la surface disponible de l'ensemble des toitures de la commune pour l'installation de panneaux solaires a été calculée.

Ce rapport est destiné à orienter la commune de Schiffflange sur les différentes options possibles en matière d'économies d'énergies et d'énergies renouvelables.

Mots clés : Schiffflange, consommations énergétiques, énergies renouvelables

Abstract

This report has been established in collaboration with the Sustainable Development Department of the municipality of Schiffflange. The European directive of April 23, 2009 predict an aim of 11% of renewable energy in the final energy consumption in 2020 of Luxembourg and 10% in the field of transport. The municipality of Schiffflange is involved in energy transition and is implementing several actions in this area.

At first, the assessment of thermal and electrical consumption of the city was identified and some energy savings were presented including public lighting and boiler control of buildings in the municipality.

In a second step, the potential of several renewable energies, including the available area of all the roofs of the municipality for the installation of solar panels was calculated.

This report is intended to guide the municipality of Schiffflange on the different options for saving energy and using more renewable energies.

Key words: Schiffflange, energy consumption, renewable energies