

Élaboration d'un masterplan pour un déploiement réaliste des énergies renouvelables sur le territoire de Welkenraedt

Auteur : De Smedt, Vincent

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

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9599>

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.

Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de
l'Environnement
Energy & Sustainable Development
(EnergySuD)

Faculté des Sciences,
de la Technologie et de la
Communication
Research Unit in Engineering Science
(RUES)



Elaboration d'un masterplan pour un déploiement réaliste des énergies renouvelables sur le territoire de Welkenraedt

Vincent DE SMEDT

Mémoire rédigé en vue de l'obtention des diplômes de :

**Master en Sciences et Gestion de l'Environnement –
finalité Énergies Renouvelables et Bâtiments Durables (ULiège)**

et

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

Promoteur : Prof. Jean-Marie HAUGLUSTAINE (ULiège)

Co-promoteur : Prof. Frank SCHOLZEN (Uni.lu)

Comité de lecture : Prof. Philippe ANDRE (ULiège)

Jonathan LERUTH (Administration Communale de Welkenraedt)

« Copyright »

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

« *L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg. »

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

« Auteur du présent document : DE SMEDT Vincent, vdesmedt01@gmail.com »

Je tiens tout d'abord à remercier Mr LERUTH, mon maître de stage, pour son encadrement et sa disponibilité durant la période de stage, ainsi que pour les riches échanges que nous avons pu avoir ensemble.

Je remercie particulièrement Mr HAUGLUSTAIN, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail, et surtout pour tout le temps qu'il a pu me consacrer au travers de nos réunions bi-hebdomadaires.

Enfin, je souhaiterais remercier mes parents ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ce stage et la réalisation de mon mémoire.

Table des matières

Liste des abréviations	3
Liste des tableaux	4
Liste des figures	5
Introduction	7
I. Enjeux globaux	8
1. Contexte actuel	8
2. Différents niveaux d'action	9
II. Masterplan	12
III. La Commune de Welkenraedt	13
1. Généralités	13
2. Bilan énergétique	13
IV. Acteurs	17
1. Citoyens	17
2. PME et grandes entreprises	18
3. La Commune.....	19
4. Coopérative & GAL	20
5. Communauté d'énergie renouvelable	20
6. Participation	21
V. Photovoltaïque	23
1. Etat des lieux	23
2. Cadre législatif	24
3. Potentiel	25
4. Solution.....	30
5. Rentabilité	32
6. Impacts sociaux et environnementaux	36
VI. Eolien	38
1. Grand éolien	38
2. Petit éolien	40
3. Propositions.....	46
4. Impacts sociaux et environnementaux	48

VII. Biomasse	49
1. Potentiel	49
2. Valorisation.....	53
3. Solution.....	58
VIII. Chaleur verte	67
1. Réseau de chaleur	67
2. Pompes à chaleur	72
3. Solaire thermique	76
4. Bois-énergie.....	80
5. Se chauffer de manière durable en 2030	81
IX. Roadmap	83
1. Le contexte énergétique à Welkenraedt en 2030	83
2. Scénarios	85
3. Evaluation multicritère	88
4. Roadmap	91
5. SWOT	94
Conclusion	97
Discussion	98
Bibliographie	99
Annexes	105
Abstract	106

Liste des abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AWAC	Agence Wallonne de l'Air & du Climat
CER	Communauté d'Énergie Renouvelable
CoDT	Code du Développement Territorial
COP	Coefficient de Performance (dans le cas d'une pompe à chaleur) Conférence des Parties (dans le cas de l'Accord de Paris)
CV	Certificats Verts
CWaPE	Commission Wallonne Pour l'Énergie
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EH	Equivalent Habitant
E.I	Etude d'Incidences
En.R	Énergie Renouvelable
ETP	Equivalent temps plein
GRD	Gestionnaire du Réseau de Distribution
GW	Gigawatt, unité de la puissance, 10^6 kW
GWh	Gigawatt heure, unité de l'énergie, 10^6 kWh
ha	Hectare, 10^4 m ²
IWEPS	Institut Wallon de l'Évaluation, de la Prospective et de la Statistique
kVA	Kilovoltampère, unité de la puissance électrique apparente
kW	Kilowatt, unité de la puissance
kW_c	Kilowatt crête, unité de la puissance électrique dans des conditions standard
kWh	Kilowatt heure, unité de l'énergie
LCOE	Coût actualisé de l'énergie
LCOH	Coût actualisé de la chaleur
MAP	Mètre cube Apparent de Plaquettes
MW	Mégawatt, unité de la puissance, 10^3 kW
MWh	Mégawatt heure, unité de l'énergie, 10^3 kWh
PAC	Pompe A Chaleur
PAEDC	Plan d'Action pour l'Énergie Durable et le Climat
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PNEC	Plan National Énergie-Climat
PV	Photovoltaïque
SPW	Service Public de Wallonie
SPF	Service Public Fédéral
TGV	Turbine Gaz-Vapeur
TRI	Taux de Rentabilité Interne
UDE	Utilisation Durable de l'Énergie
VAN	Valeur Actualisée Nette
ZACC	Zone d'Aménagement Communal Concerté

Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé des différents objectifs pour 2030.....	10
Tableau 2: Production photovoltaïque à Welkenraedt selon l'inclinaison et l'orientation (d'après [22])	26
Tableau 3: Potentiel photovoltaïque des toitures	27
Tableau 4: Barrières au déploiement du photovoltaïque (d'après [28])	31
Tableau 5: Paramètres de calcul – PV résidentiel (d'après [31])	32
Tableau 6: Paramètres de calcul – PV industriel (d'après [32])	32
Tableau 7: Aides disponibles pour le photovoltaïque	35
Tableau 8: Conditions sectorielles à l'implantation d'éoliennes (d'après [38])	38
Tableau 9: Paramètres de la distribution de Weibull (d'après [40])	42
Tableau 10: Paramètres de calcul – grand éolien (d'après [33]).....	44
Tableau 11: Paramètres de calcul – petit éolien (d'après [47])	44
Tableau 12: Rentabilité - éolien	45
Tableau 13: Aides disponibles pour l'éolien.....	45
Tableau 14: Barrières au déploiement des éoliennes (d'après [48])	47
Tableau 15: Documents nécessaires pour un projet éolien (d'après [38])	48
Tableau 16: Potentiel énergétique des résidus d'élevage (d'après [5]).....	49
Tableau 17: Potentiel énergétique des coproduits de culture (d'après [5], [52], [58])	51
Tableau 18: Valorisation énergétique du miscanthus (d'après [61], [62]).....	52
Tableau 19: Synthèse du potentiel biomasse valorisé par incinération	53
Tableau 20: Synthèse du potentiel biométhanisable.....	54
Tableau 21: Bâtiments communaux éligibles à une chaudière biomasse	59
Tableau 22: Paramètres de calcul - chaudière biomasse (d'après [72])	59
Tableau 23: Puissance nominale installable - site 2	65
Tableau 24: Paramètres de calcul – Cogénération (d'après [68], [80]).....	65
Tableau 25: Résultat – cogénération.....	66
Tableau 26: Paramètres de calcul du réseau de chaleur (d'après [89]).....	70
Tableau 27: Résultat du calcul réseau de chaleur	70
Tableau 28: Economie réalisée par un réseau de chaleur	71
Tableau 29: Consommation énergétique des PAC (d'après [93])	73
Tableau 30: Paramètres de calcul - PAC (d'après [78])	74
Tableau 31: Potentiel toiture - solaire thermique.....	77
Tableau 32: Paramètres de calcul - solaire thermique (d'après [78])	78
Tableau 33: Aides financières de la Région wallonne- chaleur verte.....	79
Tableau 34: Paramètres de calcul - bois-énergie (d'après [78]).....	80
Tableau 35: Résumé des caractéristiques des différents moyens de production de chaleur verte	82
Tableau 36: Détails des pondérations de l'évaluation	88
Tableau 37: Valeurs de l'évaluation des différentes solutions du scénario masterplan	90
Tableau 38: Résumé - roadmap	91
Tableau 39: Matrice SWOT du scénario proposé par le masterplan	96
Tableau 40: Table de conversion - biodigestion d'intrants d'élevage (d'après [51])	105
Tableau 41: Table de conversion - valorisation de la biomasse (d'après [5], [58])	105

Liste des figures

Figure 1: Projection de réchauffement à l'horizon 2100 [1]	8
Figure 2: Etapes de la Convention des Maires [5]	11
Figure 3: Trias Energetica (source : APERe).....	12
Figure 4: Localisation de la Commune de Welkenraedt en Wallonie (source : datawrapper)	13
Figure 5: Patrimoine communal - Evolution des consommations de 2006 à 2014 [5]	14
Figure 6: Territoire - Evolution des consommations de 2006 à 2017 (source: SPW).....	15
Figure 7: Comparaison SER par hab.: Welkenraedt/Wallonie (source: SPW).....	15
Figure 8: Pourcentage des citoyens prêts à investir dans un projet	17
Figure 9: Pourcentage des citoyens prêts à investir dans une installation domestique.....	17
Figure 10: Impact local d'un projet citoyen [14]	20
Figure 11: Organigramme de répartition des actions par porteur de projets (source : SPW AWAC)...	22
Figure 12: Evolution des puissances cumulées (d'après CWaPE et SPW)	23
Figure 13: Répartition en zones de production selon l'orientation	26
Figure 14: Répartition des installations selon leur puissance	27
Figure 15: Zone potentielle d'une installation PV au sol (QGis).....	28
Figure 16: Objectif par rapport au potentiel photovoltaïque disponible.....	30
Figure 17: Taux de rentabilité interne d'une installation photovoltaïque en fonction de la puissance installée	33
Figure 18: Courbe coût-expérience pour des modules solaires [31]	34
Figure 19: Résultat de la méthode Monte-Carlo sur la contribution nette du PV [35].....	36
Figure 20: Carte des contraintes locales – Eolienne de 150 m	39
Figure 21: Profil vertical de la vitesse du vent à Welkenraedt.....	42
Figure 22: Distribution de Weibull	42
Figure 23: Eolienne FairWind (Engie.be)	43
Figure 24: Distribution de la production pour la situation étudiée (d'après [46]).....	43
Figure 25: Schéma de compartimentation d'un arbre [56].....	50
Figure 26: Valorisation de la biométhanisation (entrepouse.com)	54
Figure 27: Répartition des substrats selon leur potentiel méthanogène	55
Figure 28: Répartition de la disponibilité des substrats en fonction de leur saisonnalité (d'après [64])	55
Figure 29: Principe de la cogénération [67]	56
Figure 30: Part des ménages pouvant être fournis en énergie par la cogénération	57
Figure 31: Cogénération - Site 1 (WalOnMap)	62
Figure 32: Profil type – site 1 (d'après [77])	63
Figure 33: Monotone de chaleur – site 1	63
Figure 34: Cogénération - site 2 (WalOnMap)	64
Figure 35: Monotone de chaleur- site 2	64
Figure 36: Réseau de chaleur schématique [83]	67
Figure 37: Densité de demande de chaleur [85]	68
Figure 38: Réseau de chaleur - quartier type de Welkenraedt [86].....	68
Figure 39: Réseau de chaleur - centre-ville de Welkenraedt [86].....	69
Figure 40: Monotone de chaleur - bâtiment résidentiel type de la province de Liège (d'après [78])..	74
Figure 41: Evolution de la production de chaleur à partir de solaire thermique à Welkenraedt (SPW – communication interne).....	76

Figure 42: Chauffage d'appoint solaire sans stockage saisonnier [98]	76
Figure 43: Répartition des sites – solaire thermique – selon leur surface	77
Figure 44: Impact d'une installation solaire thermique sur les dépenses.....	78
Figure 45: Evolution de la consommation énergétique à Welkenraedt (chiffres : [7]).....	83
Figure 46: Intensité carbone de l'énergie.....	84
Figure 47: Economie de CO ₂ - scénario "masterplan"	87
Figure 48: Résultats de l'évaluation multicritère	89
Figure 49: Mix électrique à l'horizon 2030	92
Figure 50: Sources de chaleur dans les habitations	92
Figure 51: Résultats 2030 des scénarios modélisés	92
Figure 52: Vision 2050	93

Introduction

Depuis le début de son existence, l'homme n'a cessé de consommer de plus en plus d'énergie. Cette énergie, essentiellement produite à partir de combustibles fossiles, pose de nombreux problèmes. En effet, deux facteurs majeurs limitent toujours davantage l'utilisation massive des ressources fossiles comme sources d'énergie. La diminution progressive au cours du temps des réserves disponibles et le réchauffement climatique dû aux émissions anthropiques de CO₂ orientent l'homme vers de nouvelles sources d'énergie. Ces sources alternatives sont essentiellement d'origine renouvelable.

La Commune de Welkenraedt possède de grandes ambitions à l'horizon 2030: diminuer de 40 % les émissions de gaz à effet de serre de son territoire. Pour arriver à ses fins, elle n'a pas d'autre choix que d'opérer une modification de ses habitudes de consommation. Comme pour toutes les autres communes de Belgique, une transition énergétique qui implique un passage par les énergies renouvelables est donc nécessaire.

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre d'un stage d'insertion professionnelle à la Commune de Welkenraedt. La Commune souhaite s'adapter au changement climatique en prenant de nombreuses dispositions, tout en étant exemplaire dans sa manière de fonctionner. C'est pourquoi un masterplan pour un déploiement réaliste des énergies renouvelables sur son territoire est un document crucial pour l'Administration communale.

Ce mémoire a pour objectif d'être un document qualitatif offrant des pistes de solutions réalistes et concrètes à la mise en place des énergies renouvelables sur la Commune de Welkenraedt. Sans prétendre posséder la réponse absolue, ce document a l'ambition de fournir une vision claire du potentiel disponible et exploitable à l'horizon 2030.

Découpé en neuf chapitres, ce travail aborde trois grands axes. La première partie, plus théorique, développée dans les quatre premiers chapitres, est destinée à définir le contexte général réglementaire et énergétique actuel dans lequel s'inscrit ce travail, à poser les bases du masterplan et à expliquer les objectifs de la Commune.

Dans un second temps, les énergies renouvelables proprement dites sont étudiées. Pour chaque filière, un état des lieux et une étude du potentiel sont réalisés. Au travers de ces points, une proposition de déploiement est effectuée pour chaque mode de production. Ces propositions font l'objet d'une étude technico-économique et permettent de chiffrer des économies de gaz à effet de serre pouvant être atteintes de manière réaliste.

Enfin, la dernière partie étudie différents scénarios, dont celui suivant les objectifs proposés dans ce document. Il permet de situer l'impact que peuvent avoir les énergies renouvelables à l'horizon 2030.

I. Enjeux globaux

1. Contexte actuel

Le changement climatique est une réalité contemporaine. Montée des eaux, acidification des océans, migration de populations, catastrophes écologiques, : les effets sont connus et très nombreux. Reconnu par presque tous les pays comme risque majeur pour l'homme et comme enjeu international vital, il convient de l'arrêter ou, tout du moins, de le restreindre. Depuis plusieurs décennies, des mesures sont prises afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Hélas, rien n'y fait. Les émissions continuent d'augmenter.

Le 12 décembre 2015 a eu lieu la COP 21, qui a donné lieu à l'Accord de Paris. Celle-ci portait sur le climat et, plus spécifiquement, le réchauffement climatique. Son enjeu principal, limiter l'élévation de la température globale, a réussi à rallier toutes les nations, au nombre de 196, à l'exception des Etats-Unis qui se sont retirés par la suite.

L'Accord de Paris définit la valeur de 2°C, et si possible 1,5 °C, comme objectif à ne pas dépasser. Pour y arriver, chaque pays doit diminuer ses émissions au travers d'engagements qu'il prend lui-même. Ce sont les INDC (Intended Nationally Determined Contributions). Malheureusement, les engagements actuels ne permettent de limiter le réchauffement qu'à 3°C [1]. Pour atteindre la cible de la COP 21, une décarbonation de tous les secteurs doit être entreprise en vue d'arriver à un système neutre en carbone d'ici les 30 prochaines années.

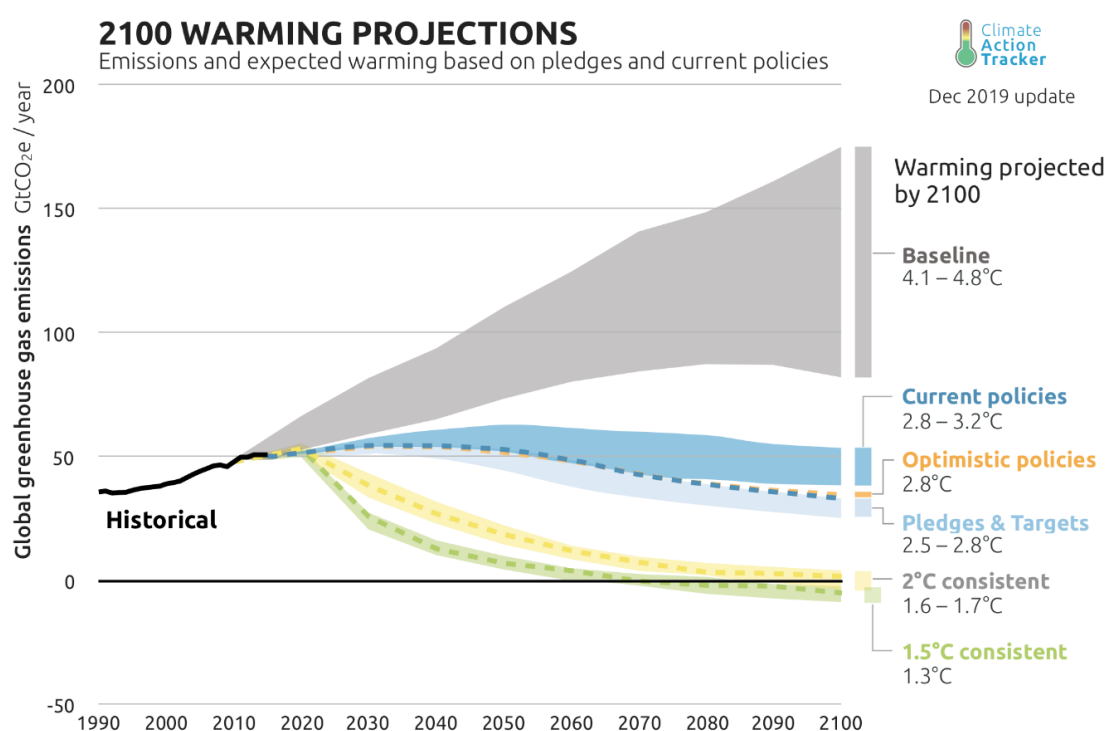
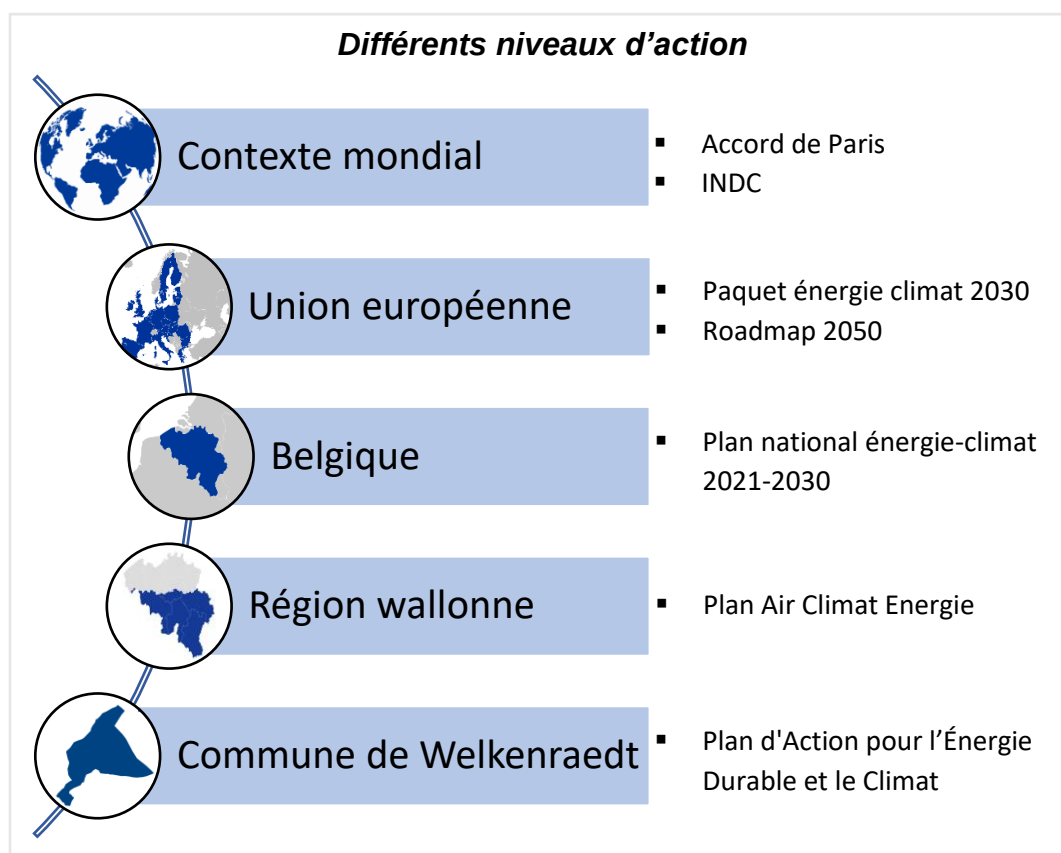


Figure 1: Projection de réchauffement à l'horizon 2100 [1]

A l'échelle mondiale, un grand écart existe entre les engagements pris par les différents pays et leurs concrétisations actuelles. Cependant, divers niveaux de décision existent. Même si, à l'échelle mondiale, les décisions prises ne sont pas suffisantes, ce n'est pas forcément le cas à l'échelle européenne ou locale.

2. Différents niveaux d'action

2.1 Des objectifs semblables



Plusieurs instances de pouvoir, chacune à son niveau, prennent des décisions et définissent des valeurs cibles climatiques à atteindre.

- *Accord de Paris* : L'UE a signé cet accord en bloc, comme elle l'a déjà fait par le passé pour le protocole de Kyoto. Elle a défini les objectifs pour tous ses membres. Ces objectifs ont ensuite été répartis de manière différente entre les pays afin de partager l'effort à fournir. Pour la Belgique, cela se traduit par une diminution de 26 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 [2].
- *Union européenne* : L'UE a défini, en 2013, un cadre précis relatif au climat et à l'énergie pour l'horizon 2030. Les valeurs cibles définies ont été revues à la hausse en 2018, et ce, pour permettre d'arriver à l'objectif à long terme de l'UE : une Europe neutre pour le climat à l'horizon 2050 [3].
- *Belgique* : Elle a établi un plan national énergie-climat (PNEC) pour la période 2021 – 2030. Il s'agit d'une compilation des efforts fournis par les différentes entités du pays et de mesures d'accompagnement de l'Etat fédéral [4]. Ses ambitions sont bien moins importantes que celles de l'Europe. La Belgique a d'ailleurs été pointée du doigt comme mauvais élève, et le plan doit faire l'objet d'une réévaluation plus ambitieuse.

- *Région wallonne* : En 2014, le Gouvernement wallon a approuvé le décret climat. Ce décret définit un objectif à long terme de participation à la lutte contre le changement climatique. Il prévoit, à l'horizon 2050, une diminution de 80 à 95 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990. Pour y arriver, un plan air climat énergie a été établi et est réévalué tous les 5 ans [4]. Le dernier en date est celui réalisé pour la contribution de la Région wallonne au PNEC.
- *La Commune de Welkenraedt* : En adhérant à la Convention des Maires le 18 février 2016, elle se doit d'honorer divers engagements, dont :
 - « Réduire les émissions de dioxyde de carbone sur son territoire d'au moins 40 % d'ici à 2030 grâce à une meilleure efficacité énergétique et à une plus grande utilisation de sources d'énergie renouvelable ;
 - Augmenter sa résilience au changement climatique ;
 - Mobiliser la société civile de son territoire afin qu'elle prenne part au développement du Plan d'action ainsi qu'à l'identification des politiques et des mesures nécessaires pour mettre en œuvre et réaliser les objectifs du Plan » [5].

Ces engagements sont repris et traduits au travers d'un plan d'action en faveur de l'énergie durable et du climat. Il convient de souligner, et de retenir de ce document, que la Commune doit diminuer ses émissions de CO₂ de 40% d'ici 2030.

Niveau	Diminution des émissions de GES par rapport à 2005 [%]	Part des énergies renouvelables dans le mix énergétique [%]	Augmentation de l'efficacité énergétique [%]
Accord de Paris	40	27	27
Union européenne	40	32	32,5
Belgique	35	18,3	27
Région wallonne	37	23,5	23
Commune de Welkenraedt	40	N.D.	N.D.

Tableau 1: Résumé des différents objectifs pour 2030

Il est intéressant de constater que l'objectif de la Commune de Welkenraedt n'est pas dénué de sens. En effet, il s'inscrit dans une vision plus large et poursuit des valeurs semblables à celles des autorités en amont, la différence étant que l'objectif est cette fois-ci défini à un niveau local. Il permet de mettre en œuvre des actions concrètes.

2.2 La Convention des Maires

La Convention des Maires est un mouvement initié par le plan énergie-climat 2020 de l'Union européenne. Créée en 2008, elle regroupe, sur base volontaire, des collectivités locales prêtes à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre, notamment en ayant recours à une politique énergétique durable.

Deux jalons ont été fixés. Le premier, pour 2020, consiste à au moins atteindre les objectifs de l'Europe, c'est-à-dire une réduction des émissions de CO₂ de 20%. Le deuxième, pour 2030, vise 40% de diminution. Les collectivités locales s'engagent alors au travers d'un Plan d'Action en faveur de l'Energie Durable et du Climat, PAEDC. Ce plan a pour but d'anticiper et de mitiger les changements liés au dérèglement climatique. Le PAEDC établit, pour une année donnée, les émissions de référence, les valeurs souhaitées à atteindre, ainsi que les actions à entreprendre pour y arriver [6]. Il constitue le document de référence pour l'autorité locale, document sur lequel elle se basera pour réaliser et planifier les actions futures. Un suivi des actions réalisées et des résultats obtenus doit être réalisé, et ces données doivent être rapportées à la Convention des maires.

En Wallonie, les communes sont invitées à s'engager à la Convention des Maires au travers des campagnes POLLEC (POLitique Locale Energie-Climat). POLLEC permet, aux communes signataires, de bénéficier d'une aide financière pour un accompagnement et un suivi du PAEDC. C'est au travers de la campagne POLLEC 2 que la Commune de Welkenraedt a pu s'engager à la Convention des Maires [5].

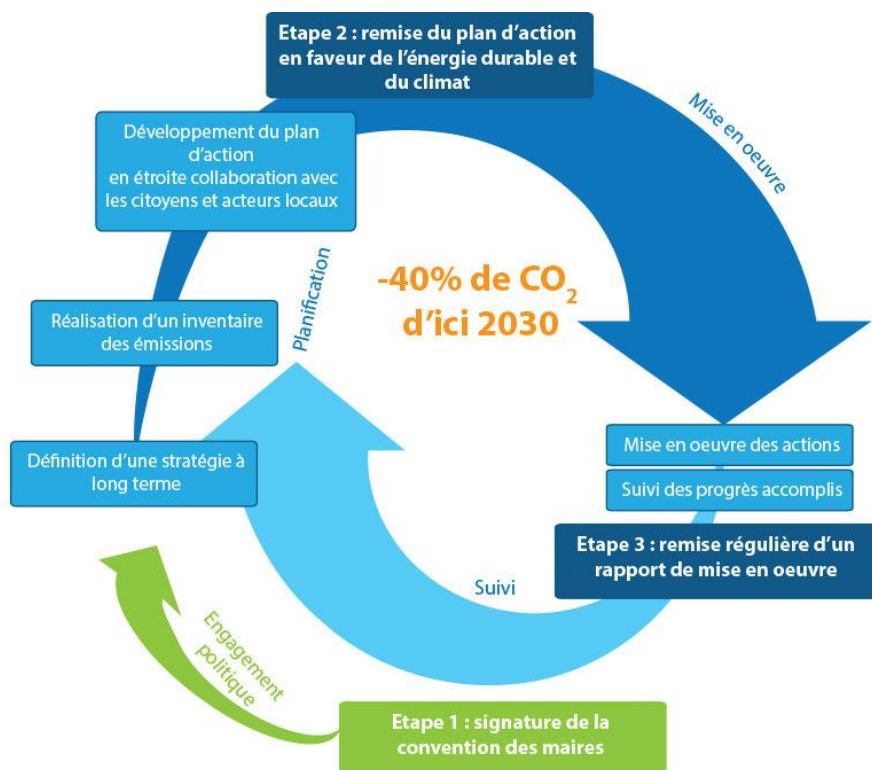


Figure 2: Etapes de la Convention des Maires [5]

II. Masterplan

Un masterplan est une feuille de route définissant une stratégie générale pour une perspective à moyen ou long terme. Ce document a pour objectif de guider le développement des énergies renouvelables afin de réaliser des objectifs à long terme, 2030, et très long terme, 2050.

Les enjeux induits par le dérèglement climatique poussent la Commune de Welkenraedt à développer une gestion innovante des moyens de production d'électricité et de chaleur. C'est dans ce sens que s'inscrit le masterplan.

En effet, pour la Commune, avoir une vision globale du potentiel de déploiement des énergies renouvelables sur son territoire est essentiel. Ce travail a pour objectif de poser les bases d'une vision de résilience de territoire, de relocalisation des outils de production d'énergie renouvelable et d'intégrer différents acteurs dans leur développement.

Un masterplan pour les énergies renouvelables ne constitue qu'une partie de la vision énergétique à l'horizon 2030. Comme l'illustre la figure suivante, le déploiement des énergies renouvelables est une des trois étapes du Trias Energetica. Pour obtenir un contexte énergétique durable, des efforts sont à fournir et seulement une section est destinée aux En.R. Les autres points du Trias Energetica doivent aussi être abordés en cherchant à minimiser la demande en énergie et à en faire une utilisation rationnelle. Ce masterplan cherche donc à s'inscrire dans une vision plus large de l'énergie. Il est dès lors essentiel de penser à l'appliquer en synergie avec d'autres plans.

Le document présent permet donc de :

- Identifier le potentiel disponible et directement déployable ;
- Proposer des solutions réalistes, mais ambitieuses, à la question des En.R à l'horizon 2030 ;
- Chiffrer, au travers de différents scénarios, les bénéfices obtenus en réalisant une transition énergétique ;
- Atteindre les objectifs du PAEDC ;
- Offrir une vision locale de l'énergie.

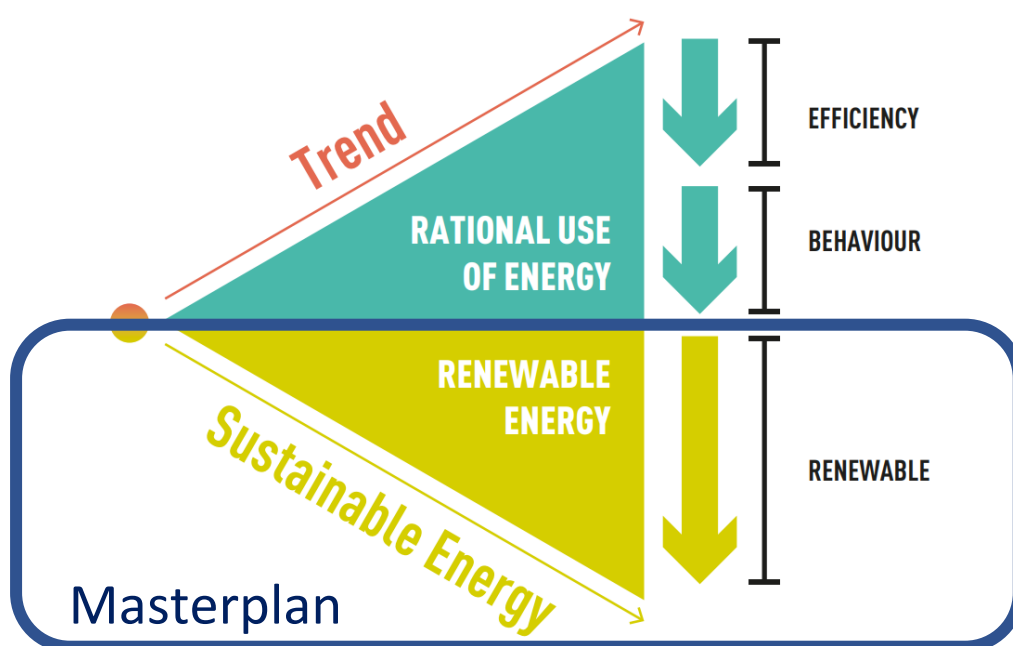


Figure 3: Trias Energetica (source : APERe)

III. La Commune de Welkenraedt

1. Généralités

La Commune de Welkenraedt est une entité administrative belge située en Région wallonne. Son territoire de 24,8 km² est très représentatif du Pays de Herve [7]. Le paysage vallonné se caractérise par de grandes étendues herbagères. L'occupation du sol est principalement réservée à l'agriculture et à l'élevage ; 72,5 % de la superficie disponible y sont dédiés.

Le secteur du travail à Welkenraedt affiche un taux d'activité et d'emploi légèrement supérieur à la moyenne wallonne, mais égal à celui des communes avoisinantes. Cela se traduit indirectement par un indice de richesse plus élevé ainsi qu'un salaire médian lui aussi plus élevé que les valeurs moyennes en Wallonie [5].

En 2019, la population de la Commune s'élève à 10.042 habitants répartis en 4.242 logements [8]. La majorité de ces logements sont d'anciennes constructions : on compte deux tiers des logements construits avant 1982 [7]. Le parc des bâtiments est donc âgé et, comme les premières réglementations thermiques ne sont apparues qu'en 1985, assez consommateur. Excepté dans le centre-ville, les habitations sont fort dispersées sur l'ensemble du territoire et se caractérisent par un développement en cordon le long des axes de communication.

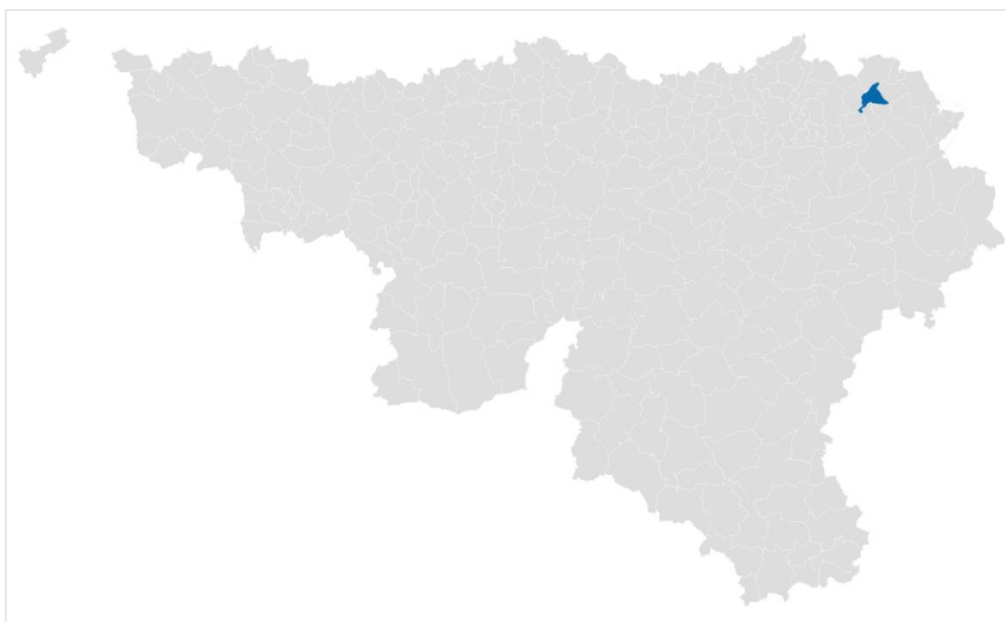


Figure 4: Localisation de la Commune de Welkenraedt en Wallonie (source : datawrapper)

2. Bilan énergétique

2.1 Consommation locale

En signant la Convention des Maires, la Commune de Welkenraedt s'est engagée à réaliser un inventaire de référence des émissions et des consommations. L'inventaire s'est réalisé sur deux axes : celui relatif au patrimoine de l'Administration communale et celui relatif au territoire de la Commune [5].

Bilan du patrimoine communal

Entre 2006 et 2014, l'Administration communale a pu voir ses émissions de CO₂ diminuer de 26 %, passant de 979 à 720 tCO₂/an. Ces émissions ont suivi exactement la même tendance que celle de la consommation en énergie : cette dernière a aussi diminué de 26 % durant la même période (Figure 5). En renouvelant son parc automobile, en passant au LED pour l'éclairage public et en prenant des mesures d'efficacité énergétique/rénovation, la Commune agit en bon élève.

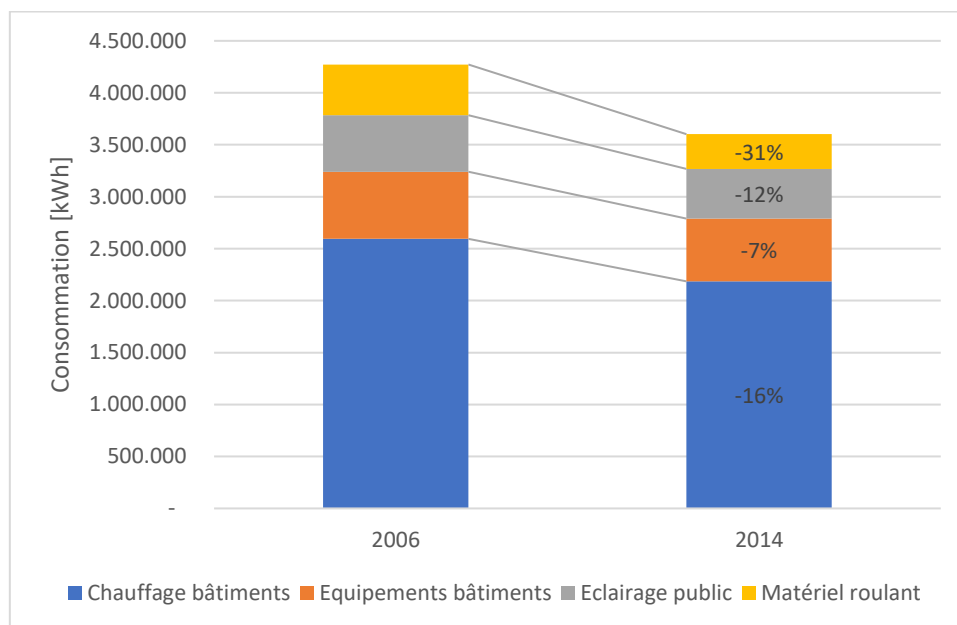


Figure 5: Patrimoine communal - Evolution des consommations de 2006 à 2014 [5]

Bilan du territoire

En 2006, la consommation du secteur de l'énergie s'élevait à 273,7 GWh et a émis 69.639 tCO₂. Cette consommation a suivi une légère diminution en 2017, de l'ordre de 2,5 %, pour atteindre la valeur de 267,2 GWh. Les émissions de dioxyde de carbone ont aussi eu l'opportunité de diminuer de 6 % durant la même période, pour atteindre la valeur de 65.511 tCO₂/an (source des valeurs : SPW – communication interne).

Pour chaque secteur, les valeurs suivantes étaient imputables en 2017 :

- Agriculture : 1 % de la consommation totale en énergie et 1% des émissions de CO₂ ;
- Industrie : 13 % de la consommation totale en énergie et 13% des émissions de CO₂ ;
- Tertiaire : 15 % de la consommation totale en énergie et 15 % des émissions de CO₂ ;
- Logement (résidentiel) : 35 % de la consommation totale en énergie et 34 % des émissions de CO₂ ;
- Transport : 36% de la consommation totale en énergie et 37 % des émissions de CO₂.

Il y a donc une corrélation forte entre consommation d'énergie et émission de dioxyde de carbone. Chaque secteur consomme un mix énergétique composé à plus de 98 % de trois vecteurs : l'électricité, le gaz et les produits pétroliers. Chaque vecteur présente des facteurs d'émission fort proches : 277

kgCO₂/MWh pour l'électricité, 203-239 kgCO₂/MWh pour le gaz et 251-268 kgCO₂/MWh pour les produits pétroliers (facteurs d'émission de l'AWAC, d'après les informations du SPW).

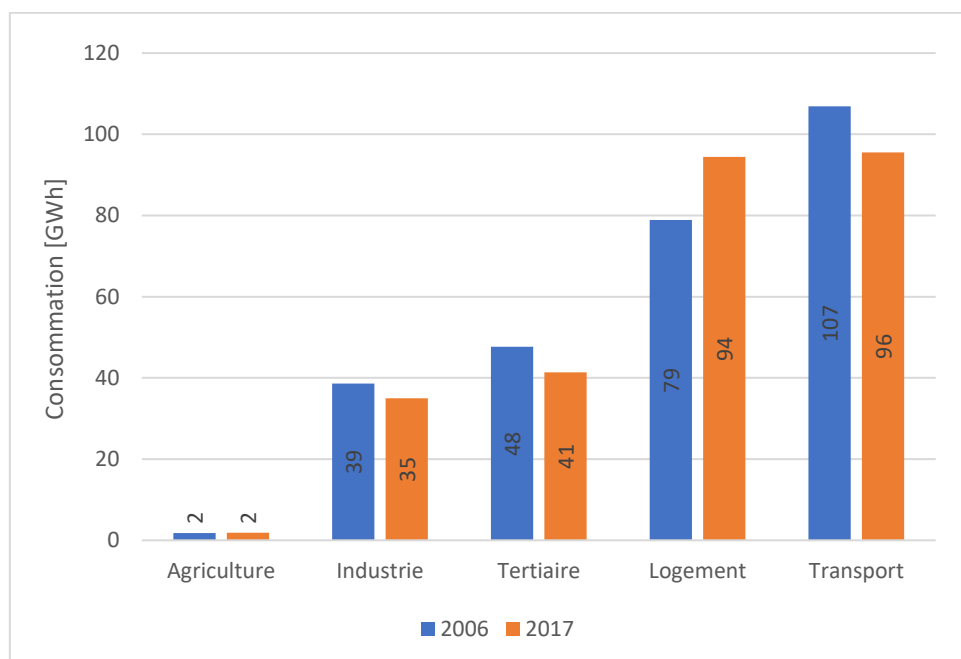


Figure 6: Territoire - Evolution des consommations de 2006 à 2017 (source: SPW)

2.2 Production locale

A Welkenraedt, en 2018, on comptait deux fois moins de production d'énergies renouvelables par habitant qu'en Wallonie. Au total, 6,4 GWh d'énergie, électricité et chaleur confondues, ont été produits.

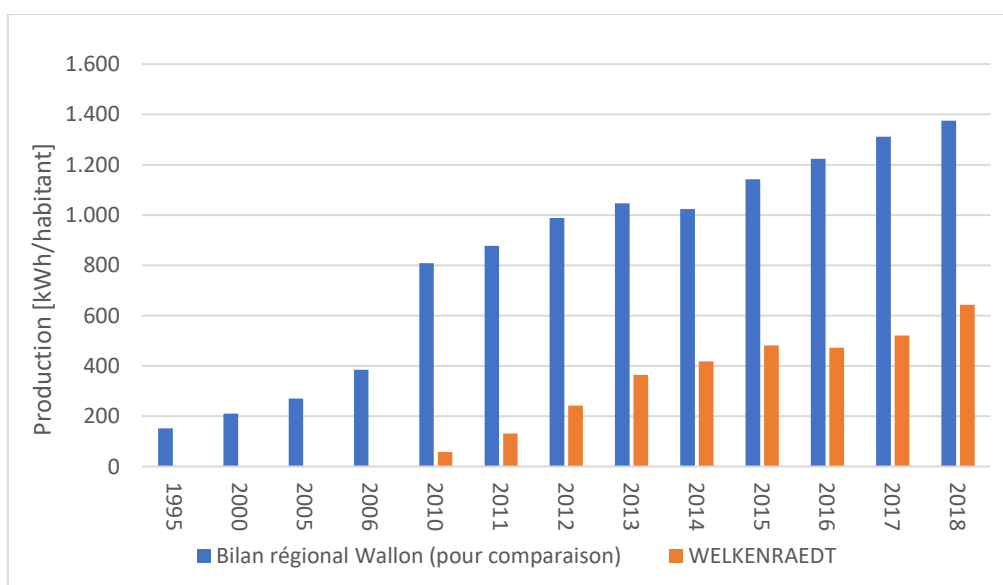


Figure 7: Comparaison SER par hab.: Welkenraedt/Wallonie (source: SPW)

La production d'origine renouvelable a été effectuée à partir des sources suivantes :

- Photovoltaïque : 6,4 GWh d'électricité ;
- Solaire thermique : 0,57 GWh de chaleur ;
- Bois – énergie : 0,2 GWh de chaleur (hors logement).

Il existe bien des unités de cogénération, mais ces dernières fonctionnent à partir de combustibles fossiles.

Il importe de constater qu'il n'existe aucune éolienne sur le territoire communal, ni aucune installation d'hydroélectricité. Bien qu'il soit possible d'y installer des éoliennes, ce n'est pas le cas pour des installations hydrauliques. En effet, on n'y décèle aucun potentiel hydraulique viable : seuls des ruisseaux de faible débit et sans aucune chute valorisable traversent ce territoire.

IV. Acteurs

Il est important d'identifier tous les acteurs qui sont impliqués, de près ou de loin, par ce masterplan et les propositions de projet qui y seront introduites.

Leur participation, qu'il s'agisse de parties privées ou publiques, est un élément décisif pour mettre en place, atteindre et réaliser les objectifs en matière d'énergie et de changement climatique. C'est en travaillant ensemble et au travers de leurs interactions, qu'une vision collective du futur peut se créer et ainsi permettre de mobiliser les ressources humaines et financières nécessaires.

1. Citoyens

Les citoyens constituent la pierre angulaire des acteurs. Leur implication se situera à divers niveaux : en tant qu'investisseurs directs ou indirects, gestionnaires d'un projet (à échelle domestique), implications autres (information, ...). Leur avis est donc important dans les différents projets, tant pour l'acceptabilité de ceux-ci que pour leur mise en place aisée.

Dans le cadre du PNEC, une enquête publique a été lancée en 2019 [9]. Cette enquête a eu pour objectif de recenser les avis concernant le futur énergétique et climatique de la Belgique. Il en ressort que 90 % des citoyens sont d'avis que le déploiement des énergies renouvelables est une priorité.

La possibilité des citoyens à investir dans un projet, domestique ou autre, concernant des énergies vertes a aussi été évaluée. Il en ressort qu'en moyenne trois quarts des Belges sont prêts à financer différents projets (Figure 9 et Figure 8). Il a aussi été mis en évidence que 68 % voudraient participer à la politique climatique, mais qu'un manque d'information, de communication et de sensibilisation les en empêche.

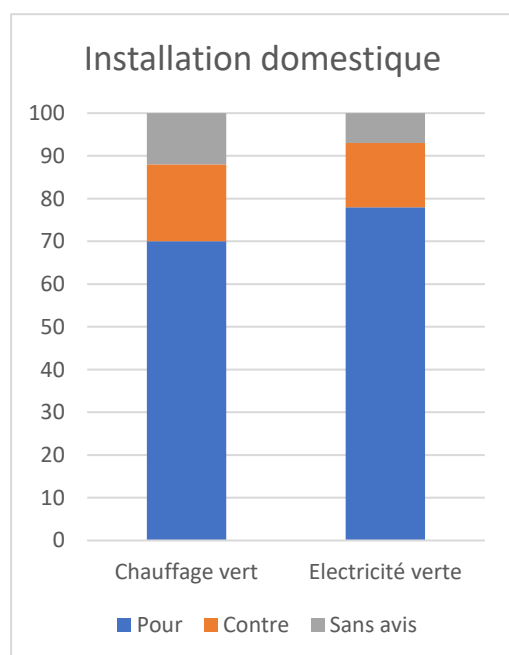


Figure 9: Pourcentage des citoyens prêts à investir dans une installation domestique

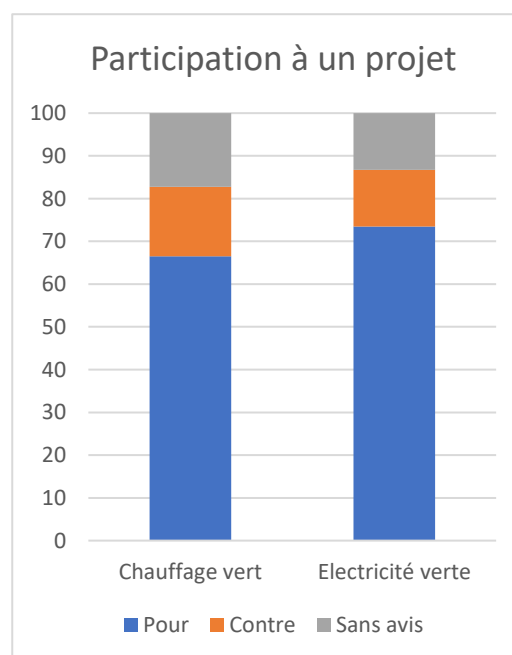


Figure 8: Pourcentage des citoyens prêts à investir dans un projet

Les citoyens sont donc des acteurs positifs pour différents projets. Il ne reste plus qu'à les impliquer !

En 2015, un projet lancé par l'Union européenne, Clear Project, corrobore les résultats obtenus précédemment [10]. Les citoyens sont prêts à investir dans les énergies renouvelables pour la production d'électricité et d'énergie.

Ces deux études vont dans le même sens : les citoyens ont besoin de plus d'informations. Les plus importantes, aux yeux des consommateurs, ont trait à l'argent. Ils demeurent fort sensibles aux informations d'économie sur la facture d'énergie, sous forme d'une économie annuelle, comme par exemple : « Vous allez économiser 2.000 kWh/an, soit 400 € sur la facture d'électricité ». Le coût et les économies engendrés par la mise en place d'installations d'énergie verte, ainsi que les primes éventuelles constituent l'outil décisionnel principal pour le citoyen.

Les personnes sensibles aux questions écologiques sont aussi plus susceptibles d'investir dans les énergies renouvelables. Il est donc primordial de communiquer, à la fois du point de vue économique, et du point de vue environnemental.

2. PME et grandes entreprises

Les entreprises constituent des acteurs très importants, car elles sont de gros consommateurs d'énergie. Ces dernières ont souvent la capacité d'accueillir de grosses installations de production d'énergies renouvelables en leur sein. Il est donc possible, au travers des entreprises, d'atteindre de grands objectifs de production. Leur participation est dès lors très intéressante.

Leur intérêt de participer activement à la transition énergétique est multiple :

- *Compétitivité* : Pour les entreprises, les énergies renouvelables permettent de garantir un prix d'achat de l'énergie à des valeurs compétitives vis-à-vis de leurs concurrentes étrangères [11].
- *Rentabilité* : La plupart des investissements effectués dans le secteur énergétique se traduisent par des bénéfices environnementaux et économiques importants.
- *Respect des législations* : Certains secteurs sont légalement tenus à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre et à investir dans des mesures d'efficacité énergétique.
- *Risques* : Le recours aux énergies vertes permet de limiter les risques que peuvent encourir les entreprises. Ces derniers sont liés à la sécurité d'approvisionnement, à la fluctuation du prix, aux dommages matériels, ainsi qu'à une mauvaise image ou à une transition précipitée [12].

Le secteur privé a donc un rôle crucial à jouer, car c'est sur lui que reposent en bonne partie les projets de grande envergure et les financements privés.

Afin de disposer d'une vision du potentiel des entreprises en tant qu'acteurs dans le déploiement des énergies renouvelables, un sondage a été réalisé dans le cadre de ce travail. Ce sondage a été adressé aux entreprises implantées dans les zonings industriels situés partiellement ou totalement dans la commune de Welkenraedt.

A partir des 26 réponses reçues, les points suivants ont pu être mis en évidence :

- 100% des entreprises sont favorables aux énergies renouvelables.
- 65,4 % des entreprises disposent déjà d'énergie renouvelable :
 - 58 % ont du PV ;
 - 35 % ont recours à de la chaleur verte.
- 65,4 % des entreprises pourraient soutenir un projet d'implantation d'énergie renouvelable hors de l'entreprise, mais au nom de l'entreprise.
- La rentabilité économique est l'aspect le plus important.
- Un manque d'information est clairement présent.

Il ressort donc que les entreprises sont des acteurs pouvant être mobilisés tant par le potentiel installable que par leur participation comme investisseurs.

3. La Commune

Le rôle de l'Administration communale est certainement le plus important de tous. Auparavant, elle avait traditionnellement le rôle de porteur de projets, responsable de l'intégralité des actions. Ce rôle évoluant, elle affiche aujourd'hui plutôt un rôle de promoteur et d'accompagnateur des projets. Les communes essaient d'impliquer davantage la population pour que l'ensemble des décisions soient prises dans une dynamique de participation locale [13].

En tant qu'acteur dans la transition énergétique, la Commune se doit d'adopter une politique de production d'énergie à l'échelle locale. Cette dernière doit suivre 4 points :

1. « Montrer le bon exemple et soutenir le développement de la production d'énergie locale ;
2. Informer et soutenir les parties prenantes ;
3. Mettre en place des réglementations et des actions pour promouvoir des projets de production d'énergie locale ;
4. Garantir la disponibilité de l'espace pour mener à bien les projets. » [6]

Le rôle de l'Administration est crucial, car elle permet d'établir la liaison entre les différents acteurs, de coordonner les actions et de promouvoir les initiatives tout en étant impartiale sur les intérêts et les implications des différents intervenants.

De par sa signature de la Convention des Maires, la Commune de Welkenraedt se doit d'être impliquée dans la mise en place de solutions pour lutter contre les changements climatiques. Elle doit soutenir sa population en mettant à disposition des ressources, que ce soit au travers d'un budget dédié à la communication, au support d'un ou plusieurs agents communaux, ... Un réel engagement politique est donc nécessaire pour atteindre les objectifs du PAEDC.

4. Coopérative & GAL

Une coopérative est une entreprise composée de plusieurs personnes qui se caractérise par une gestion démocratique où chaque personne a une voix et toutes les voix sont égales, indépendantes du capital investi. Les coopératives qui ont trait à l'énergie sont souvent à finalité sociale. Elles sont gouvernées par des principes non pas économiques, mais durables et équitables.

Un Groupe d'Action Locale, GAL, est un regroupement d'acteurs représentatifs du territoire sur lequel il est implanté. Le GAL à Welkenraedt est le GAL Pays de Herve. Ce dernier est composé des communes du territoire et d'organisations. Il a pour but de promouvoir des actions et des projets locaux.

Ces deux acteurs suivent le même principe : des individus se regroupent afin de disposer de plus de ressources pour agir à une plus grande échelle. Ils peuvent donc être porteurs de gros projets. De plus, ils offrent une plus-value économique et sociétale sur le territoire local. Entre un projet mené par une société externe privée et un projet mené par une coopérative locale et/ou un GAL, les retombées locales ne seront pas identiques. Pour un projet financé par des acteurs locaux, les retombées économiques sont 2,5 fois plus importantes [14].



Figure 10: Impact local d'un projet citoyen [14]

Pour que la transition énergétique ait une dimension sociale et des retombées locales, ces deux acteurs sont des partenaires indispensables des projets.

5. Communauté d'énergie renouvelable

Une Communauté d'Énergie Renouvelable (CER) est une « personne morale constituée d'un ensemble de participants en vue de partager, via le réseau public de distribution ou de transport local, de l'électricité exclusivement produite à partir de sources d'énergie renouvelable ou de cogénération de qualité, par des unités de production et, le cas échéant, de stockage, détenues par ladite personne morale, au sein du périmètre local où elle exerce ses activités et dont l'objectif premier est de fournir des avantages environnementaux, économiques ou sociaux à ses participants plutôt que de rechercher le profit » [15].

Les CER ont pour objectif de favoriser l’autoconsommation locale de l’énergie produite à partir de sources renouvelables au travers d’une consommation collective entre tous les participants de la CER. Cela induit les avantages suivants :

- Economies pour les participants ;
- Renforcement du réseau de distribution ;
- Autoconsommation collective de l’énergie renouvelable et donc une meilleure intégration de ces dernières sur le réseau ;
- Création d’un réseau intelligent au travers des compteurs télérelevés.

Les CER découlent d’une directive européenne retranscrite en Wallonie au travers du décret du 2 mai 2019. Cependant, ce décret doit être révisé d’ici fin 2020, puis complété par des arrêtés du Gouvernement wallon. Bien que les bases légales soient posées, il n’est pas encore possible de savoir comment elles vont pouvoir s’établir ni se développer.

Il n’en reste pas moins que les CER sont de futurs acteurs très importants pour une intégration harmonieuse des énergies renouvelables, ainsi que pour mettre en place un système énergétique plus résilient.

6. Participation

La participation des différents acteurs est essentielle, et ce, pour les raisons suivantes :

- « Élaborer une politique participative est plus transparent et démocratique ;
- Une décision prise avec le concours de plusieurs parties prenantes est basée sur un savoir-faire plus étendu ;
- Un large consensus améliore la qualité, l'acceptation, l'efficacité et la légitimité du plan (dans le pire des cas, il est nécessaire de s'assurer que les parties prenantes ne s'opposent pas à certains projets) ;
- Un grand sens de la participation dans la planification garantit l'acceptation, la viabilité et le soutien à long terme des stratégies et des mesures ;
- Il arrive que les PAED bénéficient d'un plus grand soutien des parties prenantes externes que de la direction interne ou du personnel de l'autorité locale » [6] ;
- De nouveaux modes de financement apparaissent : achat groupé, financement participatif, financement en tiers investisseurs, ...

Pour illustrer l’importance de cette participation, la Figure 11 montre des relations possibles entre différents acteurs. La Commune, au travers de son coordinateur énergie-climat, détient un rôle d’accompagnement des porteurs de projets. Les actions mises en place visent aussi bien les citoyens que les entreprises.

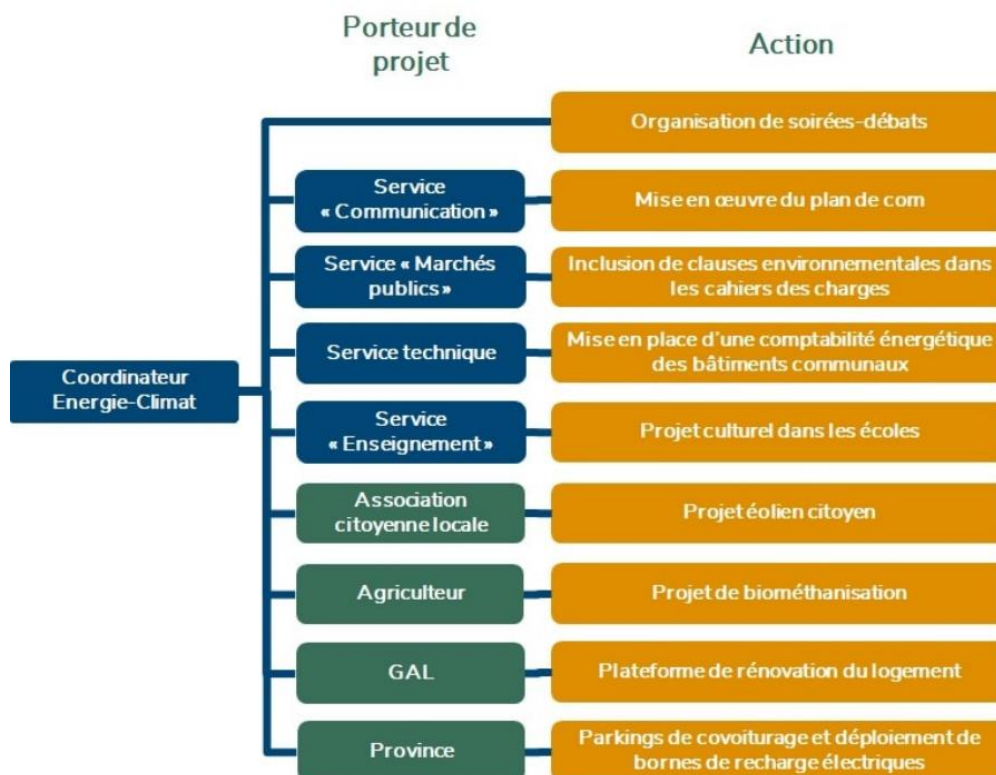


Figure 11: Organigramme de répartition des actions par porteur de projets (source : SPW AWAC)

La participation est obtenue grâce aux différents moyens de communication. Le choix de tel(s) moyen(s) déterminera l'implication de chaque acteur dans les projets. Cela peut aller de la simple information, par exemple au travers d'une brochure, à une implication étendue, au travers de comités consultatifs [6].

V. Photovoltaïque

1. Etat des lieux

Les installations solaires photovoltaïques à Welkenraedt ne sont que très récentes. En effet, en 2006, année de référence pour le PAEDC, on ne comptait pas d'installations sur le territoire. En 2014, année de signature de la Convention des Maires, 673 sites photovoltaïques de puissance inférieure à 10 kW_c et 9 sites photovoltaïques de puissance supérieure à 10 kW_c ont été comptabilisés. La puissance installée totale était donc de 3.924 kW_c. Les dernières années ont vu s'ajouter 197 nouvelles installations d'une puissance inférieure à 10 kW_c et 5 sites de grosse puissance, pour arriver, en 2020, à une puissance totale cumulée de 6.900 kW_c (SPW – communication interne).

La Commune est un bon acteur dans ce domaine. Elle dispose d'installations inférieures à 10 kW_c sur 8 de ses bâtiments, pour une puissance installée totale de 78 kW_c et 73 kVA. De plus, en 2018, un projet en tiers investissement a vu le jour. La Commune, en tant que client, a mis à disposition le toit de son centre sportif et culturel "les pyramides" à la coopérative BocagEN. Cela a permis la mise en place d'une installation de 120 kW_c, qui, en 2028, appartiendra à la Commune.

Actuellement, avec la puissance installée, Welkenraedt produit localement 10% de son électricité via le photovoltaïque.

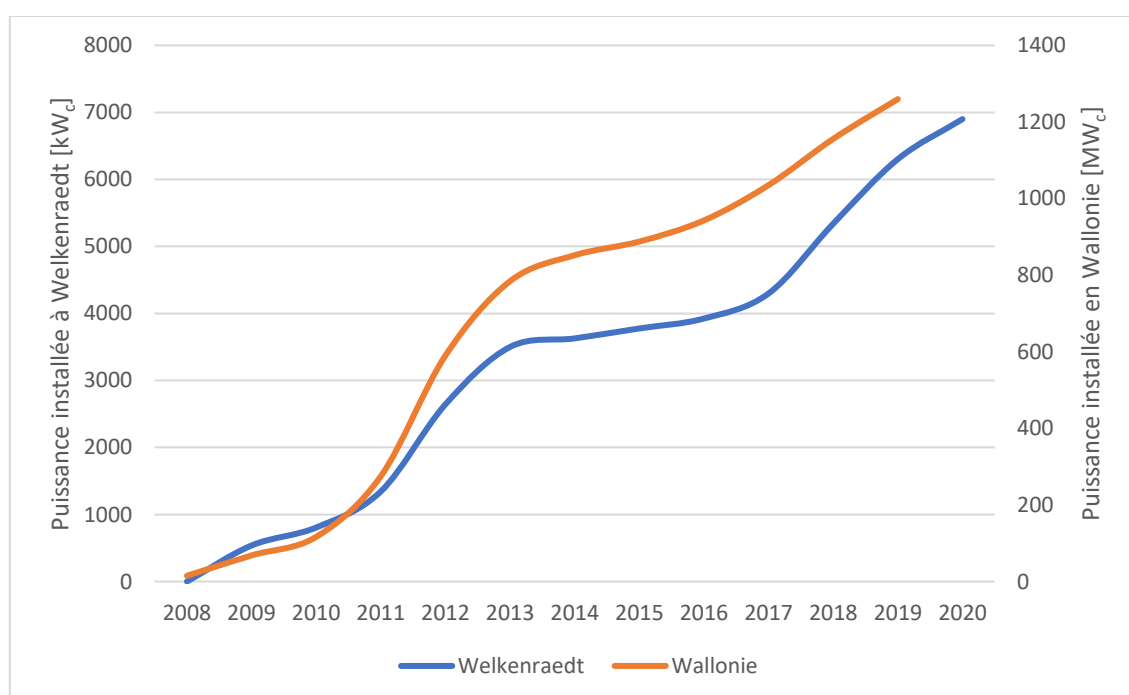


Figure 12: Evolution des puissances cumulées (d'après CWaPE et SPW)

Nous pouvons remarquer que la Figure 12 montre une évolution des puissances cumulées suivant la même tendance à Welkenraedt qu'en Wallonie. Les plans d'aide au développement photovoltaïque, Solwatt (2007 à 2013) et QualiWatt (jusqu'en 2018) sont bien mis en évidence sur les courbes. Ils ont permis un véritable boom du photovoltaïque. La tendance actuelle semble se diriger vers une augmentation plus lente, mais constante de la puissance installée, reflétant la maturité du marché photovoltaïque.

2. Cadre législatif

Dans le cadre d'une installation photovoltaïque, deux intervenants différents doivent être contactés afin de respecter la législation. Les démarches à entreprendre auprès de chaque interlocuteur dépendront néanmoins de la puissance choisie de l'installation.

- Autorité communale

- Permis d'urbanisme

Le CoDT est la référence en Région wallonne concernant les installations photovoltaïques. L'article R.IV.1-1, L1 permet de dispenser de permis: « *Le placement d'un ou de plusieurs modules de production d'électricité ou de chaleur dont la source d'énergie est renouvelable (...) c) lorsque le ou les modules sont fixés sur une élévation, la projection du débordement dans le plan horizontal est comprise entre 1,20 et 1,50 m et la pente du module est comprise entre 25 et 45 degrés* » [16].

Dans le cas où cette condition d'exemption de permis n'est pas rencontrée, il faut se référer à l'article R.IV.1-1, L2. Dans ce cas, un "permis d'impact limité sans le recours d'un architecte" est nécessaire.

- Permis d'environnement

Si la puissance de l'installation productrice est comprise entre 100 kVA et 1.500 kVA, l'installation est considérée comme étant de classe 3. Une simple déclaration d'environnement doit être effectuée à l'Administration communale.

Si la puissance est supérieure à 1.500 kVA, l'installation est alors considérée comme étant de classe 2. Il est alors possible de combiner le permis d'urbanisme et le permis d'environnement en un permis unique [17].

- GRD

- Demande de raccordement

Avant de pouvoir fonctionner, toute unité de production décentralisée raccordée au réseau doit recevoir l'approbation du gestionnaire du réseau de distribution concernant son raccordement au réseau électrique.

Si la puissance de l'installation PV est inférieure à 10 kVA, la demande consiste en une simple notification via un formulaire. Un organisme agréé doit contrôler l'installation avant sa mise en service, et le rapport de ce contrôle doit figurer dans la notification au GRD. La prise en charge de ce contrôle est souvent réalisée par les installateurs.

Si la puissance de l'installation est supérieure à 10 kVA, une étude de raccordement, effectuée par le GRD, est obligatoire. Cette étude aboutit à un accord de raccordement avec des mesures éventuelles supplémentaires à prendre. [18]

3. Potentiel

3.1 Méthodologie d'évaluation

Le potentiel a été évalué à l'aide de la base de données PICC [19]. Cette base de données est la référence cartographique numérique en Wallonie. Au travers de ces données, les surfaces d'occupation au sol de toutes les constructions ont pu être chiffrées. Les constructions ont été regroupées en deux catégories : les habitations et les bâtiments de types autres qui reprennent toutes les constructions restantes (écoles, industries, ...).

Le potentiel avait préalablement fait l'objet d'une évaluation lors de la rédaction du PAEDC [20]. Cependant, pour différentes raisons, notamment de précision, une nouvelle méthodologie basée sur la précédente est proposée et utilisée dans ce travail. La méthode suivie est la suivante :

- **Détermination de la surface totale disponible de toits**

- Evaluée à partir des surfaces au sol bâties sur l'ensemble de la commune, c'est-à-dire respectivement 486.411 m² d'habitations et 393.209 m² d'autres bâtiments. Les bâtiments mesurant moins de 25 m² n'ont pas été retenus, car leur surface était trop faible.
- Pour les habitations, une pente de 40° a été prise en compte pour l'inclinaison de la toiture. Les habitations du Pays de Herve possèdent généralement une pente comprise entre 40 et 45° [21]. De plus, seulement 40 % de la toiture sont gardés afin de pouvoir considérer un seul versant de toiture ainsi qu'un écart potentiel entre des rangées. Un coefficient de 52% est donc appliqué pour tenir compte de ces contraintes ($\frac{0,4}{\cos 40^\circ} = 0,52$).
- Pour les autres bâtiments, aucune pente n'est considérée et seulement 40 % de la toiture sont conservés.

- **Estimation de la puissance installée sur les toits**

- En survolant le marché actuel du PV, la surface moyenne d'un panneau PV se situe aux alentours de 1,7 m². Nous ferons l'hypothèse conservatrice sur la puissance crête d'un module comme étant de 250 W_c. Ensuite, nous arrondirons la valeur trouvée vers le haut pour obtenir la superficie occupée par 1 kW_c. Nous retiendrons que la surface occupée par 1 kW_c est de 7 m². Cette hypothèse est assez conservatrice au vu de la puissance des modules actuellement sur le marché (280-400 W_c). De plus, avec l'évolution technologique, il serait adéquat de revoir cette hypothèse dans le futur.
- Pour les habitations, la puissance maximale installable est limitée à 10 kW_c par habitation. Cela permet de profiter du système du compteur à l'envers.
- Pour les autres bâtiments, on ne considérera, pour la puissance installable, que les plages des valeurs suivantes :

$$10 \leq P \quad \text{et} \quad 20 \leq P \leq 250 \quad [kW_c]$$

- La plage $P \geq 10 \text{ kW}_c$ permet de profiter du compteur tournant à l'envers ;
 - La plage $20 \leq P \leq 250 \text{ [kW}_c]$ permet aux installations de disposer d'un TRI minimum de 7%, valeur de référence pour le PV (Figure 17).
 - Enfin, au potentiel brut obtenu est soustraite la puissance des installations actuelles.
- **Estimation de la puissance installée au sol**
 - La surface totale disponible au sol est évaluée de manière cartographique selon les contraintes expliquées au point suivant 3.3.
 - Nous retiendrons que la puissance installable est de $150 \text{ W}_c/\text{m}^2$ [20].
 - **Estimation de la production**
 - A l'aide du logiciel PVGIS [22] , le Tableau 2 a été construit. Il reprend la production annuelle d'énergie en kWh, d'un kW_c de panneaux photovoltaïques installés à Welkenraedt.

	Inclinaison [°]					
		25	30	35	40	45
Orientation	Ouest	808,11	796,75	784,16	768,99	751,91
	Sud-Ouest	926,9	932,08	932,11	928,24	920,11
	Sud	979,17	991,34	998,26	999,42	994,87
	Sud-Est	938,75	946,09	948,44	946,37	939,63
	Est	824,2	815,31	804,77	791,02	774,87

Tableau 2: Production photovoltaïque à Welkenraedt selon l'inclinaison et l'orientation (d'après [22])

- L'orientation des toitures a été supposée se trouver dans 4 zones possibles (Figure 13), ouest-sud-ouest, sud-sud-ouest, sud-sud-est, est-sud-est. A chaque zone est attribuée une valeur moyenne, en considérant une pente de 40° . Afin de pouvoir évaluer tous les bâtiments, toutes les orientations ont été considérées. La production annuelle moyenne a été calculée égale à $913,5 \text{ kWh/an}$.
- Pour le sol, la production optimale d'un kW_c , à un azimut de -4° (4° vers l'est en partant du sud) en direction et une inclinaison de 38° , vaut $999,87 \text{ kWh/an}$. Cependant, il n'est pas toujours aisé de pouvoir mettre la configuration optimale en place. A cette fin, la moyenne des zones sud-sud-ouest et sud-sud-est de la Figure 13 a été retenue. La valeur de 964 kWh/an sera donc considérée.
- Enfin, pour tenir compte de l'ombrage ainsi que d'autres facteurs limitants éventuels, la valeur de la production est nuancée par un coefficient valant 0,9.

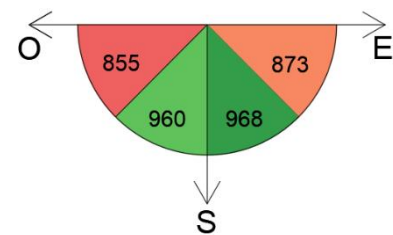


Figure 13: Répartition en zones de production selon l'orientation

3.2 Potentiel sur les toits

Les résultats obtenus par la méthode décrite ci-dessus sont repris dans le tableau suivant. La ligne "Total" reprend les valeurs restantes, après soustraction des installations existantes. Il reste donc encore la possibilité de produire 30.470 MWh d'énergie électrique.

Catégorie	Surface de toiture disponible [m ²]	Surface de toiture rectifiée [m ²]	Puissance installable [kW _c]	Potentiel brut [MWh/an]
Habitations	486.411	253.986	27.363	22.497
Autres	393.210	157.284	17.365	14.277
Installations existantes	-	~48.300	- 6.900	- 6.303
Total	879.621	362.970	37.829	30.470

Tableau 3: Potentiel photovoltaïque des toitures

Le fait de limiter les surfaces en fonction de la plage des valeurs suivantes : $10 \leq P$ et $20 \leq P \leq 250$ [kW_c] traduit une perte de 468.351 m² de toiture. Bien que pénalisante, cette hypothèse se veut réaliste et permet de mieux coïncider avec la réalité. La Figure 14 illustre concrètement cette perte de surface avec un nombre très important d'installations de 10 kW_c. La superficie de toiture non utilisée n'est cependant pas complètement perdue, puisqu'elle peut servir à d'autres utilisations, comme par exemple le solaire thermique.

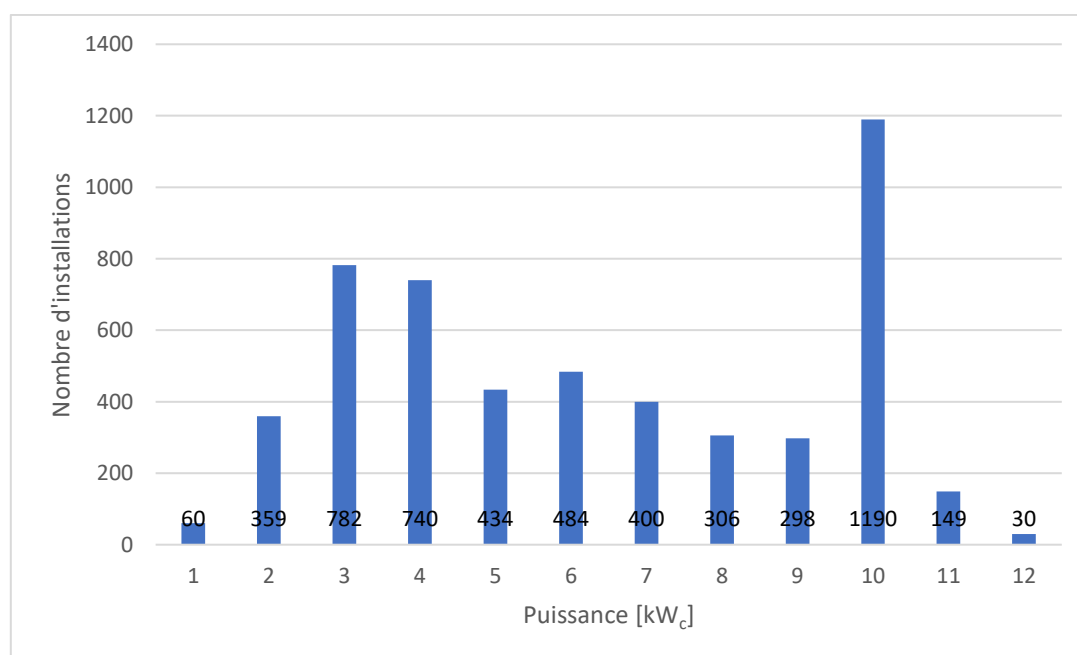


Figure 14: Répartition des installations selon leur puissance

3.3 Potentiel au sol

Le territoire de la Commune de Welkenraedt est essentiellement composé de prairies. Il existe par conséquent une grande surface potentiellement disponible pour installer du photovoltaïque au sol. L'objectif de ces installations serait la production d'électricité pour l'injection dans le réseau électrique. Ce seraient ainsi des "centrales solaires".

Pour être intéressantes financièrement, les installations de ce type doivent être réalisées à grande échelle, de l'ordre de la dizaine de MW. Cela s'explique par le prix moyen de l'électricité sur le marché belge. En moyenne, en 2019, un MWh coûte 39,3 €/MWh [23]. Le business plan est donc dès lors très différent d'une installation où l'on autoconsomme, puisque dans ce cas, le prix d'un MWh autoconsommé dépasse les 100 €.

Cependant, si la puissance d'un site de production est supérieure à 250 kW_c, cette installation ne peut plus être connectée au réseau traditionnel de distribution d'électricité. Elle doit alors obligatoirement se connecter au réseau haute tension [24].

Ce raccordement peut entraîner un surcoût important. Le GRD de Welkenraedt, RESA, facture le raccordement de manière forfaitaire si ce dernier mesure 400 m ou moins. Une fois la distance des 400 m franchie, chaque mètre de raccordement supplémentaire entraîne un surcoût de l'ordre de 230 € [25]. La distance de raccordement peut ainsi entraîner un surcoût non négligeable pour la rentabilité financière du projet.

Pour être rentable, il faut donc se trouver dans une zone proche des équipements haute tension. A cette fin, la carte ci-dessous a été réalisée. Elle reprend, sur le territoire de Welkenraedt, l'unique site potentiel où l'on peut se raccorder en haute tension en vue de réinjecter sur le réseau [26]. Même pour un site en zone agricole, une installation aussi conséquente peut poser des problèmes aux maisons isolées se trouvant à proximité. C'est pourquoi, par mesure de précaution, une distance tampon subjective de 200 m est considérée entre la zone étudiée et les maisons avoisinantes.



Figure 15: Zone potentielle d'une installation PV au sol (QGIS)

Théoriquement, nous avons une zone au sol de 20.000 m² exploitable. Selon la méthodologie définie précédemment (voir point 3.3), la puissance potentiellement installable y est donc de 3.000 kW_c, pour une production annuelle de 3 GWh.

La crise économique et sanitaire actuelle rend aussi la mise en place d'installations en full injection difficile. Nous pouvons supposer que les installations à 100% d'injection, dont le but est purement économique et ne vise aucune autoconsommation, ne seront pas économiquement viables avant 2025 [27].

Lorsque tous ces facteurs sont combinés, il est difficile d'envisager, dans un premier temps, une installation au sol. Pour être compétitif, il faut donc développer un projet qui présente une certaine autoconsommation de la production. Le décret communauté d'énergie peut renverser cette tendance et favoriser ce type d'installations, mais il faudra attendre le nouveau décret et son application pour réaliser un business plan précis.

4. Solution

4.1.1 Objectif

Notre objectif défini pour le secteur photovoltaïque est le suivant :

« La commune de Welkenraedt vise l'installation annuelle d'une puissance de 1 MW_c de solaire photovoltaïque sur les toitures jusqu'à 2030 et au-delà ».

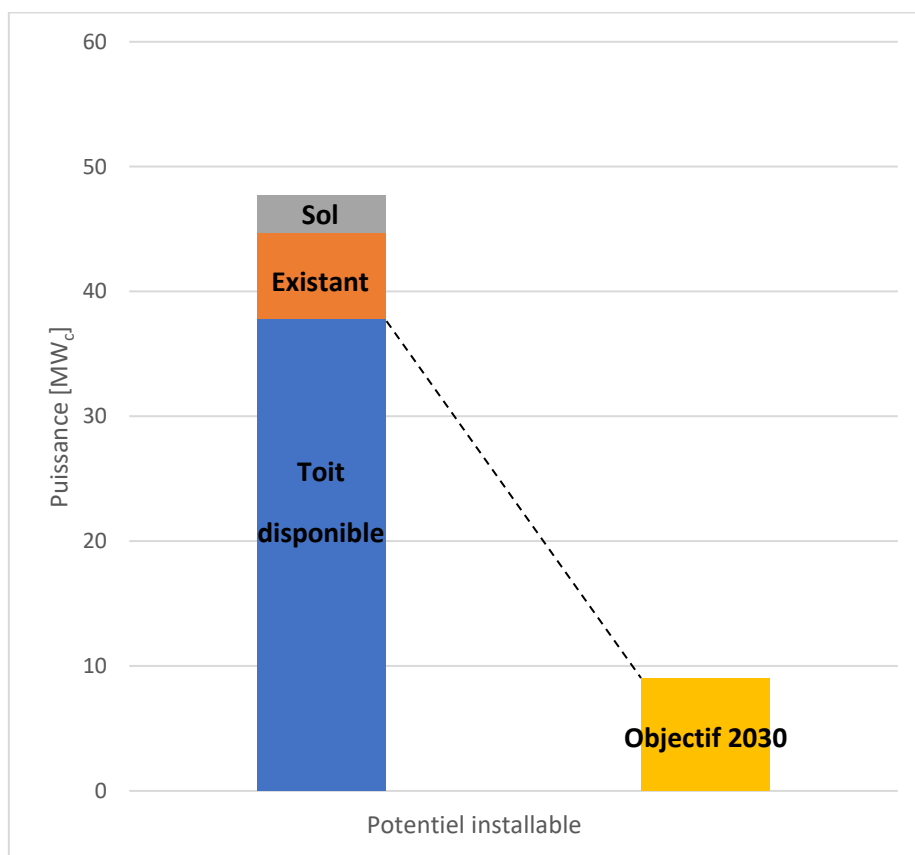


Figure 16: Objectif par rapport au potentiel photovoltaïque disponible

Ce dernier se traduit au travers d'un objectif SMART de la façon suivante:

- **Spécifique** : L'objectif est bien défini et ciblé. Il détaille de manière concrète la vision pour la technologie PV.
- **Mesurable** : La puissance installée, en kW_c ou MW_c, est utilisée comme référence. Il suffit de regarder ce qui a été installé par rapport à l'objectif.
- **Atteignable** : La valeur de 1 MW_c est un juste milieu entre ambition et réalisme. A titre purement illustratif, cela représente 150 installations de 4 kW_c pour des particuliers, et 4 installations de 100 kW_c pour le secteur tertiaire et industriel. Installer 1 MW_c de photovoltaïque sur les toits représente la valorisation de 2,6 % du potentiel restant des toitures par an.
- **Réalisable** : Le point 4.1.2 reprend la méthode définie pour mettre en œuvre le projet. De plus, des fiches d'action ont été réalisées afin de permettre et d'atteindre les ambitions définies tant au niveau économique que technique.
- **Temporellement défini** : On définit plusieurs périodes d'action sur base annuelle ainsi qu'une date butoir.

La Figure 16 illustre l'objectif de déploiement pour 2030 par rapport au potentiel disponible. En 2030, un quart du potentiel des toitures est exploité. Le gisement au sol reste intact. Au travers de ce graphique, il est très important de constater qu'après 2030, il restera encore un énorme potentiel installable. Le secteur photovoltaïque a encore de beaux jours devant lui.

4.1.2 Mise en place

Le marché du photovoltaïque est un marché stable et en constante évolution : le nombre d'installations augmente chaque année. Cependant, si on laisse le marché livré à lui-même, l'objectif défini ne sera pas atteint. Une identification des barrières empêchant le déploiement du PV est donc nécessaire afin de pouvoir trouver une solution. Cette dernière doit être mise en place de façon à ce qu'elle trouve une parade aux barrières existantes suivantes :

Technologique	Règlementaire	Economique	Sociale
■ Connexion et intégration au réseau ■ Intermittence	■ Complexes et/ou obsolètes ; mauvaises connaissances du public ■ Manque d'une vision et d'une politique claire et précise sur le long terme	■ Temps de retour assez long (7-8 ans) ■ Externalités sociales non prises en compte	■ Manque de confiance dans les politiques ■ Manque d'informations générales pour le consommateur lambda ■ Manque d'interlocuteurs compétents

Tableau 4: Barrières au déploiement du photovoltaïque (d'après [28])

Une poussée externe est dès lors nécessaire. Cette dernière peut être mise en place de diverses manières. Les fiches projets réalisées dans l'Administration communale décrivent des propositions de mises en œuvre différentes.

Ces propositions visent à mettre en place, en suivant 3 axes, des actions spécifiques visant :

1. La communication : la communication est un facteur clé permettant de relever les barrières sociales. Au travers de divers médias, la commune transfère des informations claires et fiables.
2. Les mesures administratives : ces mesures permettent de lever certaines barrières réglementaires afin de rendre plus faciles la demande de permis et le déploiement du PV.
3. Les mesures de promotion : elles visent les barrières économiques et sociales grâce à d'un réseau d'accompagnement ou une coopérative citoyenne.

Actuellement, les barrières liées aux technologies n'ont, en pratique et à grande échelle, que peu de réponses. Bien qu'il existe des solutions à l'échelle individuelle comme les batteries pour l'intermittence de production, il n'est pas envisageable, dans le contexte actuel, de ne miser que sur cette solution. Cet axe est donc toujours un sujet de recherche. Malgré cela, les futures communautés d'énergie renouvelable permettront de lever partiellement ou totalement ces barrières.

5. Rentabilité

5.1 Paramètres de calcul

Selon le type d'installation, résidentielle ou industrielle, la rentabilité diffère. Nous étudierons à l'aide des paramètres ci-dessous, le résultat économique pour chaque type d'installation.

Résidentiel ($P < 10kW_c$)

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de vie	20	[an]
Année de remplacement de l'onduleur	15	[an]
Investissement initial	1.331	[€/kW _c]
Prix de l'électricité autoconsommée [29]	29,37	[c€/kWh]
Indexation du prix de l'électricité autoconsommée	2	[%/an]
Frais d'exploitation et de maintenance	33	[€/kW _c *an]
Frais de remplacement de l'onduleur	450	[€/kW _c]
Production électrique à l'année 1	913,5	[kWh/kW _c]
Dégradation de la performance PV	0,5	[%/an]
Tarif prosumer [30]	76,04	[€/kW _c]

Tableau 5: Paramètres de calcul – PV résidentiel (d'après [31])

Industriel ($P > 20 kW_c$)

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de vie	20	[an]
Durée d'octroi des CV	10	[an]
Année de remplacement de l'onduleur	10	[an]
Taux d'octroi CV	0,79	[CV/MWh]
Prix CV	65	[€/CV]
Prix de l'électricité autoconsommée	130,67	[€/MWh]
Prix de l'électricité revendue	48,06	[€/MWh]
Frais de remplacement de l'onduleur	121	[€/kW _c]
Indexation du prix de l'électricité autoconsommée	2	[%/an]
Frais d'exploitation et de maintenance	1,6	[% _{initial} /an]
Indexation des coûts	2	[%]
Taux d'autoconsommation	78	[%]
Taux d'imposition	46	[%]
Production électrique à l'année 1	964	[kWh/kW _c]
Dégradation de la performance PV	0,5	[%/an]

Tableau 6: Paramètres de calcul – PV industriel (d'après [32])

Nous prendrons comme hypothèse que l'investissement se fait en fonds propres. L'investissement initial nous est donné par [32]:

$$I = A * P^n$$

avec :

- I : investissement initial [€]
- P : la puissance crête de l'installation [kW_c]
- A : coût du kW_c installé ; égal à 1 568,6 [€/kW_c]
- n : facteur représentant l'économie d'échelle ; égal à 0,9338.

5.2 Résultats

Les calculs effectués révèlent que les installations photovoltaïques sont toujours rentables. Cela s'illustre à la Figure 17 où le TRI est toujours supérieur à 6 %. Un particulier peut voir son placement doubler de valeur après 20 ans. Pour un entrepreneur, la rentabilité dépendra de la puissance installée. On peut néanmoins s'attendre, dans la majorité des cas, à un temps de retour inférieur à 9 ans.

Les résultats obtenus peuvent sembler élevés par rapport à ceux habituellement annoncés. Cela s'explique par deux facteurs.

Le premier concerne un abus de langage entre le TRI et le TRIM. Le TRIM, ou taux de rentabilité interne modifié, permet de tenir compte des cashflows pouvant être réinvestis chaque année. Ainsi, pour un projet PV avec un TRI de ~11 %, on obtiendra un TRIM de ~5 %. De nombreux interlocuteurs ne font pas la distinction entre TRI et TRIM.

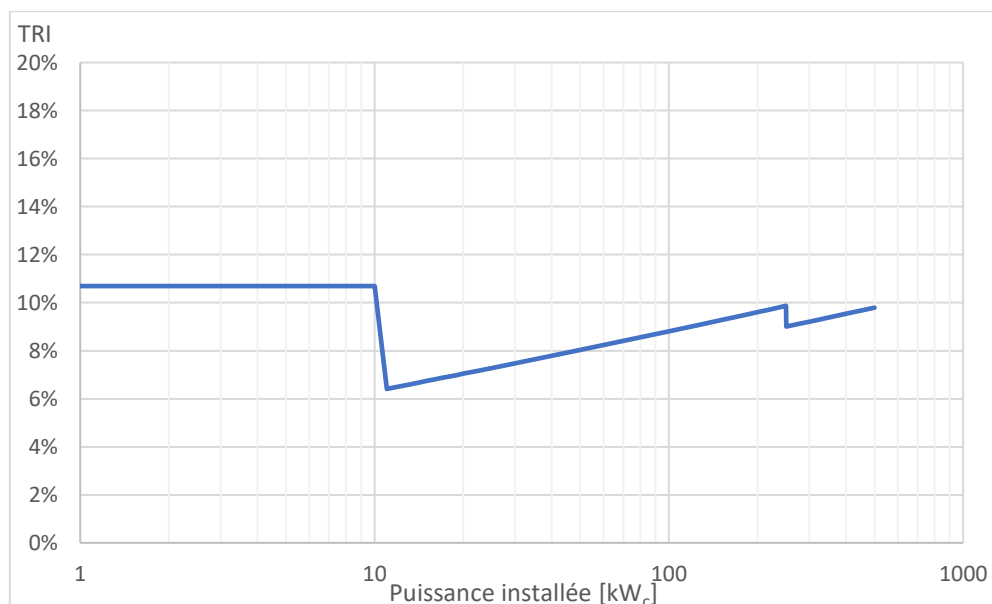


Figure 17: Taux de rentabilité interne d'une installation photovoltaïque en fonction de la puissance installée

Le deuxième concerne l'obsolescence des données. Comme l'illustre la Figure 18, les prix du marché sont en constante diminution. Les valeurs ne sont pas assez souvent mises à jour, alors que même un laps de temps d'une année peut voir apparaître une diminution significative des coûts.

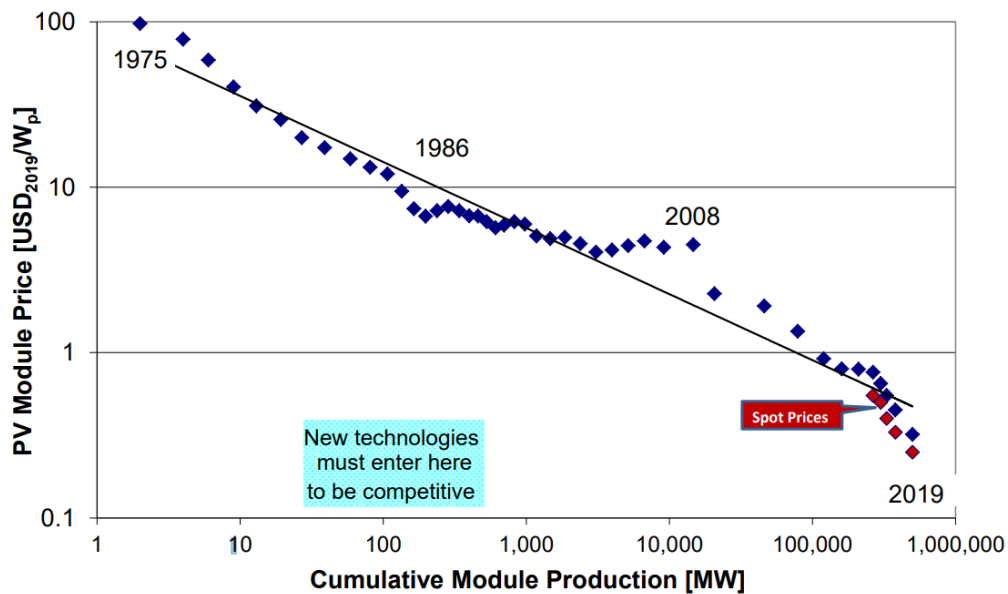


Figure 18: Courbe coût-expérience pour des modules solaires [31]

Hypothèses et limitations

Les valeurs de certains paramètres de calcul ont été sujettes à certaines suppositions. Le changement en pratique de ces valeurs peut modifier complètement les résultats obtenus.

Pour une installation résidentielle, deux hypothèses importantes ont été émises. La première concerne le compteur qui tourne à l'envers. Il est supposé ici que l'on consomme annuellement l'équivalent de l'entièreté de la production et que l'on ne produit pas plus que ce que l'on consomme. Puisque production et consommation ne vont que rarement de pair, nous sommes donc en présence d'une autoconsommation fictive, situation dans laquelle le réseau sert de batterie aux prosommateurs. La deuxième concerne le financement. Il est supposé être réalisé en fonds propres. Aucun coût lié aux intérêts d'un emprunt n'est présent.

Pour une installation industrielle, l'autoconsommation est le facteur le plus important. Si, à titre d'exemple, l'on diminue l'autoconsommation de 78 % à 50 %, le TRI passe de 8,8 % à 4,7 %. Il faut donc veiller à avoir un dimensionnement le plus correct possible de l'installation.

Les résultats obtenus restent purement théoriques. Ils doivent être étudiés au cas par cas, en mettant un point d'attention particulier sur la correspondance entre production et consommation.

5.2.1 Aides financières

Le solaire photovoltaïque est une technologie mature et rentable ayant déjà fait ses preuves. L'arrêt de subventions pour les installations privées en est l'exemple parfait. En 2018, le mécanisme de soutien Quali watt s'est arrêté puisque les installations types privées étaient jugées avoir un temps de retour de 8 ans, et ce, sans subsides [33].

Voilà pourquoi on ne retrouve que peu d'aides publiques pour le déploiement du photovoltaïque. Les seules qui subsistent concernent uniquement les entreprises ou les grosses puissances. Il convient cependant de noter que, même s'il n'y a pas d'aides directes pour les installations domestiques, il y a toujours le mécanisme de compensation. Ce mécanisme dit du « compteur à l'envers » permet au compteur de tourner dans le sens horaire lorsque l'on injecte de l'électricité dans le réseau.

Concrètement, cela permet d'annuler sa facture d'électricité, même si l'on ne consomme pas instantanément sa production.

Nom	Instance à contacter	Public cible	Description
Easy green	Novallia (Sowalfin)	TPE, PME	Prêt à taux bas, intervention dans le capital
Certificats verts	SPW Energie	Gros producteurs (P > 10kVA)	Aide financière octroyée pour chaque MWh produit
Déduction fiscale pour investissements économeurs d'énergie	SPW Energie	Entreprises	Déduction fiscale de 13,5 %
ADISA	SPW Agriculture	Agriculteurs	Aide financière pour les agriculteurs

Tableau 7: Aides disponibles pour le photovoltaïque

6. Impacts sociaux et environnementaux

Recyclage

Le recyclage des panneaux PV produit très clairement des bénéfices environnementaux positifs. Malgré cela, seulement 10 % des déchets mondiaux issus du PV sont recyclés. Et pourtant, en pratique, en Europe, il est possible de recycler jusqu'à 96 % de la fraction solide des modules [34]. Mais alors, pourquoi un taux de recyclage si bas ?

La quantité de déchets est actuellement trop faible. La plupart des installations sont encore en fonctionnement. La faible demande pour le recyclage se traduit par des coûts de recyclage élevé. Il y a donc une certaine difficulté pour la filière du recyclage à s'installer. Cela changera cependant dans un futur proche avec l'augmentation des déchets liée au démantèlement des installations mises en service il y a déjà plus de 20 ans, et qui sont arrivées en fin de vie.

Economie énergétique et carbone

Afin de produire des modules PV, des matières premières et de l'énergie sont consommées. De grandes quantités de CO₂ sont donc émises. Il est dès lors judicieux d'étudier si cette consommation d'énergie et cette production de CO₂ sont récupérées lors de la période de fonctionnement.

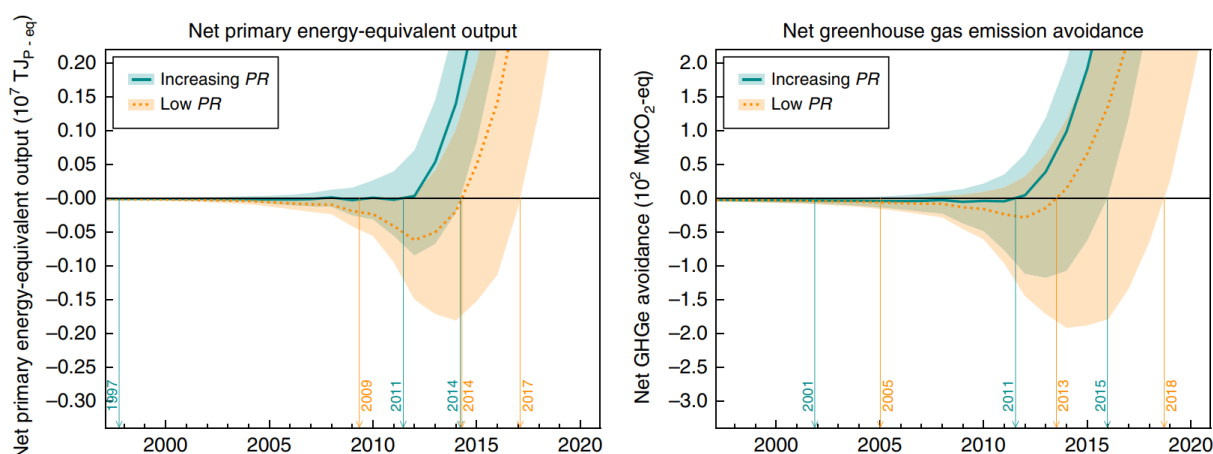


Figure 19: Résultat de la méthode Monte-Carlo sur la contribution nette du PV [35]

La Figure 19 illustre cette réflexion. Au niveau mondial, le PV apporte bien une indéniable contribution au secteur énergétique et des émissions de carbone. La dette énergétique et carbone se voit être remboursée.

Un panneau produira 20 ou 25 kgCO₂/MWh selon la technologie utilisée (respectivement mono- et poly-cristallins) [35]. Comparé à une centrale TGV, cela représente plus de 20 fois moins d'émissions par unité d'énergie produite (on ne considère uniquement que la combustion).

Production locale

La production locale d'énergie permet d'augmenter l'indépendance énergétique du territoire. Cela se traduit par une plus grande sécurité d'approvisionnement, une diminution des risques en cas de problèmes et une fluctuation moins importante du prix de l'énergie.

La production des panneaux se fait principalement en Chine. Une vision de résilience voudrait que la production ait lieu majoritairement dans un périmètre proche. Cela peut déjà être le cas, notamment

avec la société ISSOL, implantée à moins d'un kilomètre de la commune. De plus, une réelle envie de stimuler l'industrie photovoltaïque européenne émerge. Cette dernière est basée sur les constats suivants : si l'on considère toute sa durée de fonctionnement, un module PV européen est aussi compétitif qu'un module chinois. Ensuite, la réappropriation citoyenne de l'énergie va favoriser la consommation et l'économie locales [36]. Enfin, la technologie photovoltaïque crée aussi de l'emploi local. Il est estimé que la filière PV crée entre 0,4 et 1,1 équivalent temps plein par MWh produit annuellement [37]. Si l'on considère la valeur intermédiaire de 0,75, alors les objectifs pour 2030 vont permettre de créer 6,2 emplois à temps plein.

VI. Eolien

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique qui, au travers d'un générateur, va permettre la production d'électricité.

Les éoliennes sont classées en trois familles selon leur puissance. On parle de grand éolien, pour des puissances supérieures à 1 MW, de petit éolien pour des petites puissances, c'est-à-dire inférieures à 100 kW. Le moyen éolien couvre la gamme des puissances intermédiaires.

L'installation d'une éolienne dépend de différents paramètres essentiels propres à chaque famille. Dans le cas du petit éolien, c'est le potentiel venteux à basse altitude qui déterminera principalement si l'implantation est envisageable. Pour le grand éolien, cela change: ce sont les réglementations en vigueur qui vont principalement déterminer si un projet peut se concrétiser ou non.

1. Grand éolien

Actuellement, deux projets éoliens sont en cours sur une parcelle du zoning des Plenesses (zoning situé en partie sur la commune de Welkenraedt). Cela démontre qu'il existe un gisement potentiel venteux suffisant dans au moins une partie du territoire.

Lorsque l'on parle de gisement venteux pour le grand éolien, il s'agit des vents se trouvant à haute altitude, souvent aux alentours de 100 m. Ces éoliennes sont donc de hautes constructions qui peuvent avoir de grands impacts.

Voilà pourquoi l'implantation d'éoliennes est soumise à des conditions réglementaires très strictes. Les zones exploitables répondant à toutes les conditions d'exploitation ne sont existantes qu'en nombre réduit.

A cette fin, une carte de la commune de Welkenraedt a été réalisée. Cette dernière reprend l'ensemble des contraintes du Tableau 8 pour les appliquer au contexte local. Cette carte (Figure 20) a été réalisée pour une éolienne de 100 et de 150 m de hauteur totale (en bout de pale) à l'aide du logiciel QGIS.

Eléments	Distance à respecter
Voies ferrées	> 50 [m]
Voies ferrées – TGV	> 190 [m]
Lignes haute tension	> 1,5 x le diamètre du rotor [m]
Zone d'habitat et ZACC	> 4 x la hauteur de l'éolienne [m]
Habitations isolées	> 400 [m] pour le grand éolien
Zone Natura 2000	> 200 [m]
Axes structurants et zones d'activités économiques ¹	< 1.500 [m]

Tableau 8: Conditions sectorielles à l'implantation d'éoliennes (d'après [38])

¹ Il est possible d'installer une éolienne si cette règle n'est pas respectée, mais cela demande une dérogation au plan de secteur, ce qui complique les démarches administratives (Art. D.II.36. du CoDT).

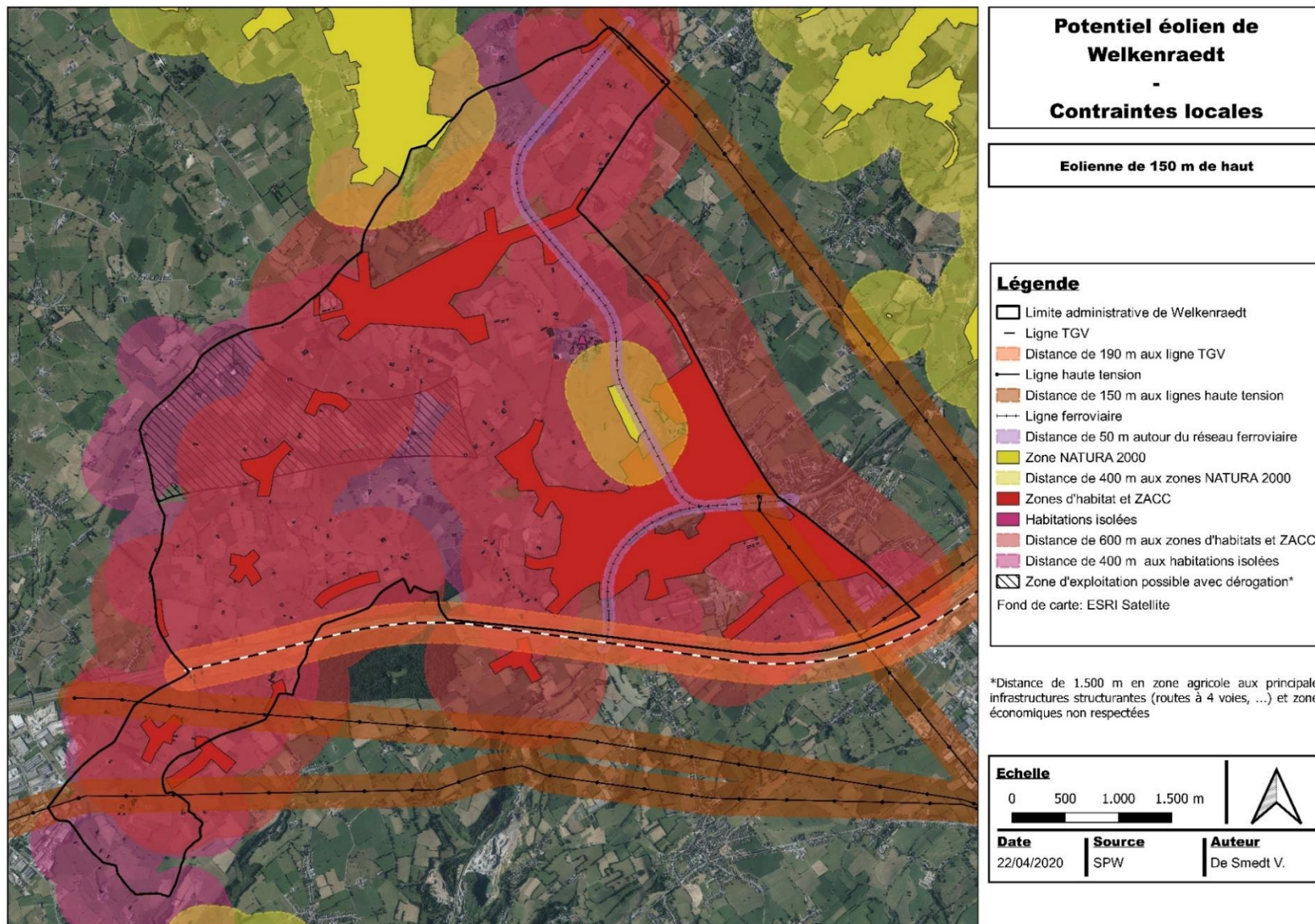


Figure 20: Carte des contraintes locales – Eolienne de 150 m

L'analyse de ces cartes nous permet d'identifier 9 sites pouvant accueillir une éolienne de 100 m et 4 sites pouvant accueillir une éolienne de 150 m de hauteur. Au vu de la faible superficie des espaces identifiés, il n'est possible d'installer qu'une seule éolienne par site.

Il y a donc, théoriquement, possibilité d'installer plusieurs grandes éoliennes sur le territoire de la commune.

Quel potentiel de production ?

Afin de connaître la production potentielle d'une éolienne, le taux de charge est utilisé. Le taux de charge est le rapport entre l'énergie produite par une installation, divisée par l'énergie qu'elle aurait produite si elle fonctionnait à pleine puissance. Généralement, le taux de charge est étudié sur une année.

Ainsi, pour une éolienne de 2 MW et un taux de charge de 10 %, la production en électricité sera de $2 \text{ [MW]} * 10 \text{ [%]} * 8.760 \text{ [h]} = 1.752 \text{ [MWh]}$.

Le taux de charge permet indirectement de caractériser la ressource ventuse. Un taux de charge élevé signifie souvent un fort potentiel de vent. De même, un faible taux de charge traduit souvent une ressource de vent médiocre. L'historique des éoliennes wallonnes nous donne un taux de charge moyen de 21,8 % [39]. La CWaPE considère la valeur de 25 % comme référence [33]. L'étude d'incidences réalisée sur le zoning des Plenesses traduit un taux de charge de 23,5 % [40]. Toutes les données convergent donc vers des valeurs semblables. Nous choisirons la valeur de 23,5 %, car elle correspond à une situation géographique proche de celle de la Commune de Welkenraedt et se situe à une valeur intermédiaire entre les deux autres valeurs.

En considérant 9 sites exploitables et 9 éoliennes de 2 MW, il serait théoriquement possible de récupérer 37.055 MWh/an. Il est pourtant bien évident qu'il est irréaliste de penser exploiter tous les sites, et ce, pour diverses raisons. Une première visite des sites a été effectuée par le responsable énergie de la Commune et un membre de la coopérative "Courant d'air". Quatre sites ont été identifiés comme intéressants, dont deux comme très intéressants.

A titre plus réaliste, seuls ces 2 sites seront considérés comme exploitables. Cela correspond donc à un potentiel de production de 8.234 MWh/an.

2. Petit éolien

Le secteur éolien est actuellement en plein développement en Wallonie. Bien que la plupart des projets concernent le grand éolien, un gain d'attention émerge en parallèle pour le petit éolien. Cela est dû notamment à la promotion de ce secteur induite par la réalisation d'une étude universitaire belge commandée par Engie [41]. Cette étude démontre la pertinence des petites éoliennes, la viabilité de celles-ci et montre qu'à basse altitude, les éoliennes à axe vertical se comportent mieux que les éoliennes à axe horizontal.

Axe horizontal ou vertical?

Il existe deux grands types d'éoliennes : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

Les éoliennes tri pales traditionnelles font partie de la famille des éoliennes à axe horizontal. Le rotor y est parallèle au sol. Les éoliennes à axe vertical sont caractérisées par un rotor en continuité avec le mât. Il est donc orienté perpendiculairement au sol.

Pour mettre en rotation les pales, les éoliennes à axe vertical utilisent la trainée tandis que les éoliennes à axe horizontal utilisent la portance du vent. L'avantage de ce premier type par rapport au modèle traditionnel consiste en ce que le fonctionnement ne dépend pas de l'orientation du vent et est peu influencé par les turbulences. En revanche, le couple de démarrage est beaucoup plus important et la zone brassée est souvent plus petite.

2.1 Législation

Le petit éolien est très différent du grand éolien, dans le sens où il ne dispose pas de cadre légal spécifique. Le CoDT fait office de texte de référence et est complété par le décret relatif aux permis uniques.

Selon le CoDT, dans une zone agricole, « Une éolienne est autorisée par propriété pour autant que le mât soit d'une hauteur maximale de vingt-quatre mètres (Art. R.II.36-11) » [42]. Concrètement, tant que la puissance reste inférieure à 100 kW [43] et que le mât est inférieur à 24 m, seul un permis d'urbanisme s'avère nécessaire. En cas de hauteur supérieure à 24 m et toujours pour une puissance inférieure à 100 kW, un flou juridique existe. Un permis est nécessaire, mais les conditions spécifiques seront dans les mains de l'Administration communale.

2.2 Potentiel de production

Nous considérerons la hauteur de 24 m comme hauteur de référence, car c'est celle reprise dans le CoDT. A cette altitude, la vitesse du vent est évidemment inférieure à celle que l'on peut retrouver à 100 m (Figure 21). Puisque le potentiel de production est proportionnel au cube de la vitesse du vent, il y est donc, par défaut, plus faible.

Le taux de charge est, lui aussi, moins important. Au lieu des 21% attendus du grand éolien, on se retrouve avec un taux presque deux fois moindre : 12% [44].

Ces deux variables à elles seules peuvent expliquer pourquoi, à puissance égale, la production d'énergie est aussi différente entre le grand et le petit éolien.

Estimation de la distribution de Weibull

La distribution de Weibull est une ressource qui va nous permettre, au travers de la courbe de charge d'une éolienne, de connaître la production énergétique d'un site.

A partir des données de la distribution pour le grand éolien issues de l'E.I. décrite précédemment, la distribution de Weibull a été estimée pour 24 m de hauteur, afin de correspondre à la situation du petit éolien. Au travers des paramètres repris dans le Tableau 9 et de la formule suivante [45] :

$$v(z_2) = v(z_1) * \frac{\ln(\frac{z_2}{z_0})}{\ln(\frac{z_1}{z_0})}$$

avec :

- $v(z_1)$: la vitesse du vent à la hauteur z_1 , en [m/s]
- $v(z_2)$: la vitesse du vent à la hauteur z_2 , en [m/s]
- z_0 : la longueur de rugosité, égale à 0,1 [m] [46]
- z_1 : la hauteur au point 1, égale à 100 [m]
- z_2 : la hauteur au point 2, égale à 24 [m]

qui permet d'obtenir la vitesse des vents à une hauteur différente de celle mesurée, les paramètres de la distribution de Weibull à 24 m ont pu être obtenus (Tableau 9).

Altitude [m]	A [m/s]	k	Vitesse de vent moyenne [m/s]
100	6,48	1,86	5,75
24	4,73	1,76	4,17

Tableau 9: Paramètres de la distribution de Weibull (d'après [40])

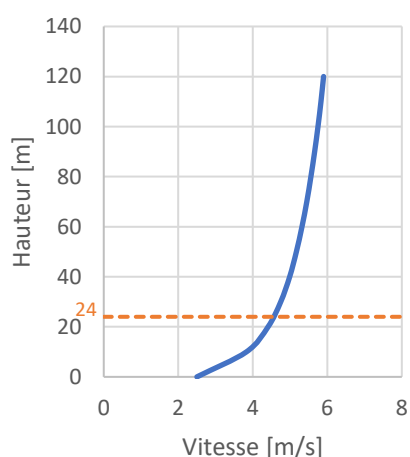


Figure 21: Profil vertical de la vitesse du vent à Welkenraedt

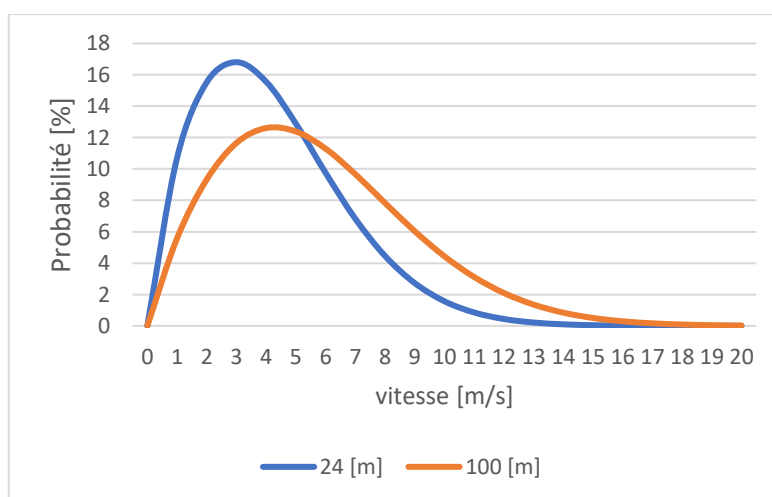


Figure 22: Distribution de Weibull

Attention : L'estimation des paramètres de la distribution de Weibull se base sur des extrapolations de données. Bien que les résultats correspondent aux valeurs attendues (Figure 21), le recours aux extrapolations fait apparaître des approximations. Le résultat obtenu ici est donc à but purement illustratif. De plus, étendre les résultats à l'ensemble de la commune peut niveler par le bas le potentiel réel et, ainsi, "masquer" des sites qui, en pratique, seraient intéressants.

2.3 Marché wallon



Figure 23: Eolienne FairWind (Engie.be)

Actuellement, sur le marché du petit éolien wallon, l'éolienne de FairWind domine. D'origine belge, cette éolienne de 10 kW utilise cet argument pour se mettre en avance par rapport à ses concurrents.

De plus, un partenariat existe entre FairWind et le groupe Engie. Ce dernier fait la promotion des éoliennes et offre de multiples services, dont un service clé en main qui ne se retrouve, aujourd'hui, nulle part ailleurs sur le marché wallon.

Bien sûr, les petites éoliennes sont déclinées en de nombreux modèles, mais aucun n'équivaut la rentabilité et le service proposés par cette dernière [47]. C'est pourquoi ce produit sera étudié en particulier.

Au travers de la courbe de puissance de l'éolienne FairWind F100-10 et de la distribution de Weibull, le potentiel de production a pu être estimé [46].

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Production annuelle de 9.627 kWh ;
- Taux de charge de 11 %.

La production résultante de l'aérogénérateur s'avoisine de celle obtenue avec une installation photovoltaïque de 10 kW_c. Pour produire plus d'énergie, il faudrait plus de vent. Sur son site, Fairwind recommande d'ailleurs d'avoir une vitesse de vent moyenne d'au moins 5,5 m/s.

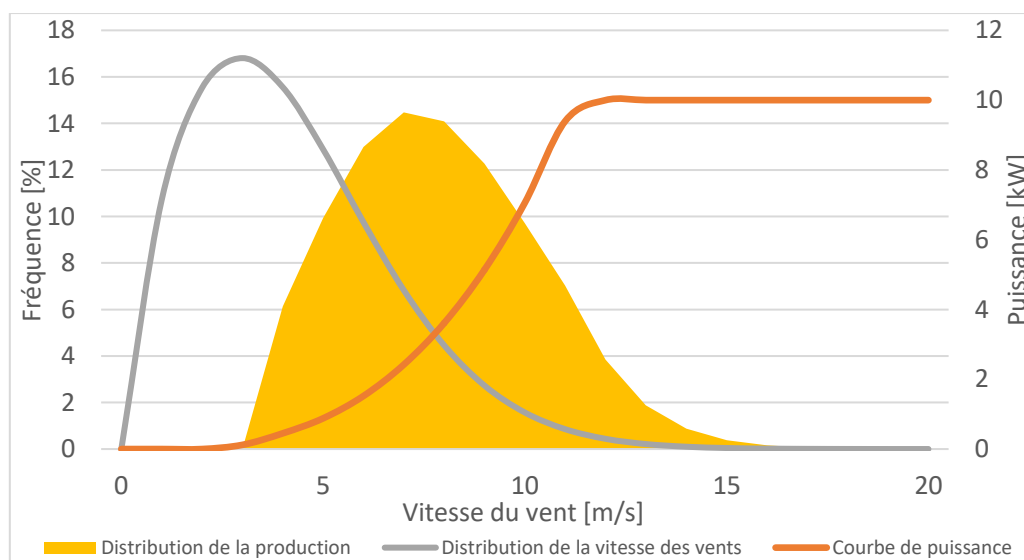


Figure 24: Distribution de la production pour la situation étudiée (d'après [46])

2.4 Rentabilité

2.4.1 Paramètres de calcul

Au travers des paramètres suivants, nous allons étudier la rentabilité du petit et du grand éolien.

Grand éolien

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de vie	20	[an]
Durée d'octroi des CV	10	[an]
Taux d'octroi CV	0,86	[CV/MWh]
Prix CV	65	[€/CV]
Heures de fonctionnement [40]	2.059	[h]
Taux d'indexation	2	[%/an]
Frais d'exploitation et de maintenance	3,1	[% _{initial} /an]
Investissement initial	1.320	[€/kW]
Frais d'injection	0,25	[€/MWh]
Prix de l'électricité injectée	42,81	[€/MWh]

Tableau 10: Paramètres de calcul – grand éolien (d'après [33])

Le taux de charge considéré est, rappelons-le, de 23,5 % (2.059 heures par an). Cette valeur, comme expliquée précédemment, est censée être représentative du contexte local. Le choix de la valeur du taux de charge est extrêmement important, car il impacte énormément le résultat économique. Utiliser la valeur de référence de la CWaPE, 25 %, engendre une VAN plus élevée de 50 %. Nous ne pouvons donc faire que des suppositions sur la valeur du taux de charge, et être prudents sur sa valeur. Elle n'en reste pas moins propre au site installé et doit donc être sujette à une étude spécifique.

Petit éolien

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de vie	20	[an]
Durée d'octroi des CV	10	[an]
Taux d'octroi CV	1	[CV/MWh]
Prix CV	65	[€/CV]
Production	9.627	[kWh]
Taux d'indexation	2	[%/an]
Investissement	95.000	[€]
Prix de l'électricité autoconsommée [29]	29,37	[c€/kWh]

Tableau 11: Paramètres de calcul – petit éolien (d'après [47])

Nous étudions ici le cas spécifique d'une puissance égale ou inférieure à 10 kW. Cela permet, comme pour le photovoltaïque, de profiter du dispositif du compteur qui tourne à l'envers. Il est aussi supposé que l'on ne produit pas plus que ce que l'on consomme. Ces hypothèses permettent un calcul simplifié et une plus grande rentabilité.

2.4.2 Résultats

Si deux projets éoliens sont actuellement en concurrence au zoning des Plenesses, cela y témoigne de l'intérêt économique du grand éolien.

Le petit éolien, quant à lui, n'est pas viable. Même en tenant compte d'aides économiques équivalentes à un tiers du coût, l'installation est légèrement en déficit. Cette faible rentabilité s'explique par la vitesse de vent trop faible entraînant une production, elle aussi, trop faible. C'est seulement à partir d'une vitesse moyenne du vent de 5 m/s, que le petit éolien devient rentable et peut être exploitable.

Solution	Aide	Investissement [€]	VAN [€]	TRI [%]	Temps de retour [année]
Eolienne 2 MW	CV	2.640.000	695.925	6	9-10
FairWind	CV	95.000	- 33.273	- 2,1	/
FairWind	CV, UDE, déduction fiscale	95.000	- 2.072	1,7	/

Tableau 12: Rentabilité - éolien

2.4.3 Aides

Le tableau ci-dessous reprend toutes les aides identifiées dans le cadre de l'installation d'éoliennes en Wallonie. Bien qu'il y en existe plusieurs types, il n'est pas réaliste de penser qu'un projet serait éligible à toutes les aides. C'est pourquoi, lors du calcul de rentabilité, toutes n'ont pas été prises en considération.

Nom	Instance à contacter	Public cible	Description
Easy green	Novallia (Sowalfin)	TPE, PME	Prêt à taux bas, intervention dans le capital
Utilisation durable de l'énergie	SPW Economie	Entreprise	Aide à l'investissement, à hauteur de 20% pour P<100 kW
Certificats verts	SPW Energie	Tous	Aide financière octroyée pour chaque MWh produit
Déduction fiscale pour investissements économiseurs d'énergie	SPW Energie	Entreprises	Déduction fiscale de 13,5 %
ADISA	SPW Agriculture	Agriculteurs	Aide financière pour les agriculteurs
UREBA	SPW Energie	Organismes publics	Prime proportionnelle à l'investissement

Tableau 13: Aides disponibles pour l'éolien

3. Propositions

3.1 Objectif

Grand éolien

Notre objectif défini pour le secteur éolien est le suivant :

« La commune de Welkenraedt vise, pour 2025, l’obtention d’un permis unique en vue d’exploiter au moins un mât éolien d’une puissance de 2 MW ».

Ce dernier se traduit au travers d’un objectif SMART de la façon suivante:

- **Spécifique** : L’objectif est bien défini et ciblé. Il détaille de manière concrète la vision du grand éolien pour les prochaines années.
- **Mesurable** : Le nombre de mâts. Cette donnée est quantifiable et permet de savoir si l’objectif est atteint ou non.
- **Atteignable** : 1 mât correspond à l’exploitation d’un des 9 sites disponibles sur le territoire communal. Sur les 9 sites, il est donc réaliste de penser qu’au moins un sera favorable au déploiement d’une éolienne.
- **Réalisable** : Le responsable énergie de la commune de Welkenraedt et une coopérative citoyenne se sont déjà contactés au sujet de ce projet. Une première visite des sites a déjà été effectuée, et une discussion avec le GRD est prévue.
- **Temporellement défini** : Un projet éolien prend des années pour se voir réalisé. De nombreuses complications, comme par exemple des recours en instance par des opposants au projet, peuvent rallonger la durée de plusieurs années. Il n’en reste pas moins possible de compter une période de réalisation de 5 ans, avec comme date butoir 2030.

La puissance de l’éolienne sera considérée être de 2 MW. Bien que choisie arbitrairement, cette puissance correspond au standard du marché. Au travers d’un taux de charge de 23,5 %, cette éolienne permettrait de produire 4.117 MWh d’électricité par an.

Petit éolien

Au vu de la faible production et de la faible rentabilité du petit éolien, aucun objectif ne sera établi vis-à-vis de cette filière.

Puisque les hypothèses ont été effectuées sur base d’un seul site, puis extrapolées à l’ensemble de la commune, il peut être intéressant de se renseigner sur le potentiel venteux à plusieurs endroits. Une campagne de mesure à faible altitude (10-20 m) permettrait d’obtenir une idée fiable et de dresser une carte du développement positif du petit éolien sur l’ensemble de la commune.

3.2 Mise en place

La mise en place d'un projet éolien revêt un caractère particulier, dans le sens où ce projet touche de façons variées un très grand nombre d'acteurs. Son impact visuel peut déranger de nombreux habitants, même situés à plusieurs kilomètres. Les effets négatifs sur la faune et la flore peuvent exercer un mouvement négatif de la part d'associations protectrices. En résumé, un public très large pourrait s'opposer au projet.

Il est donc nécessaire, non seulement de mettre en place une démarche d'information et de communication pour faciliter le déploiement de ce projet et inciter les gens à y participer, mais aussi, et surtout, de faire en sorte que ce projet suscite un minimum d'oppositions.

Pour ce faire, le Tableau 14 reprend les principales barrières au déploiement des éoliennes. Il s'avère donc très important de trouver une manière de lever ces freins lors de la mise en œuvre du projet.

Règlementaire	Biodiversité	Sociale
■ Multiplication des recours contre le permis unique	■ Impacts potentiels sur la faune et la flore	■ Acceptabilité (justice distributive et procédurale)
■ Régime "premier arrivé, premier servi"		■ NIMBY

Tableau 14: Barrières au déploiement des éoliennes (d'après [48])

Comment ?

Les impacts sur la biodiversité font normalement l'objet d'une étude d'incidences (voir point suivant « *Impacts sur l'homme, la faune et la flore* »). Si aucune étude n'est effectuée, il est intéressant d'aborder le point de la biodiversité de manière préventive en évitant de choisir un site présentant une grande biodiversité. Afin de s'inscrire dans une vision durable de l'énergie, des mesures de compensations peuvent se prendre sans même qu'elles soient obligatoires.

Les barrières sociales peuvent être levées en informant les citoyens du projet suffisamment tôt et en suscitant leur participation. En leur fournissant le plus d'informations possibles et en les impliquant dans le projet, ces derniers sont plus enclins à accepter la construction d'éoliennes [48].

Réaliser une carte des contraintes locales (Figure 20) a permis à la Commune d'avoir tous les outils nécessaires pour mettre en place sa vision de l'éolien. Elle peut choisir les ambitions qu'elle souhaite sans dépendre d'une société externe.

Enfin, une modification du cadre légal est en cours. L'objectif est de fournir un cadre de référence pour les études acoustiques et les conditions attenantes. De nombreux recours sur base de plaintes acoustiques seront dès lors évités. La consultation publique s'étant terminée le 2 avril 2020, les résultats devraient être disponibles fin juin de la même année.

4. Impacts sociaux et environnementaux

Impacts sur l'homme, la faune et la flore

Afin d'évaluer au mieux à l'échelle locale les impacts que peut engendrer une éolienne sur le milieu dans lequel elle se trouve, il existe les notices d'évaluation et les études d'incidences sur l'environnement. Ces études ont pour but de quantifier et de proposer des solutions pour mitiger les éventuelles incidences d'un projet. Habituellement, ces documents sont suffisants pour quantifier l'impact local sur la faune et la flore, mais aussi sur l'homme.

Puissance	Permis	Notice d'évaluation des incidences sur l'environnement	Etude d'incidences
P < 10 kW	Urbanisme	Oui	Non
Classe 2 500 kW < P < 3 MW	Unique	La demande fait notice	Sur demande de l'administration
Classe 1 P > 3 MW	Unique	La demande fait notice	Oui

Tableau 15: Documents nécessaires pour un projet éolien (d'après [38])

La réalisation de ces études dépend toutefois de la puissance du projet (Tableau 15). Or notre objectif (2 MW) n'est pas sujet à une étude d'incidences obligatoire. Des questions sur l'impact potentiel de l'éolienne peuvent donc se poser.

L'APERe a récemment publié un document intitulé « Eolien: rumeurs et réalités » [49]. Ce rapport répond à la plupart des questions tournant autour de l'éolien. Certes, il existe des impacts liés à la construction d'éoliennes ; néanmoins ils ne sont pas toujours négatifs ni aussi importants que laissent croire les informations véhiculées par le public. Dans cette brochure, de nombreuses autres interrogations trouvent réponse, notamment concernant le recyclage, l'utilisation de ressources ou encore le temps de retour énergétique.

Economie de carbone

L'ADEME a évalué, sur base d'analyse de cycle de vie, l'émission de CO₂ par les éoliennes. Il en ressort que l'électricité produite par une éolienne terrestre a une intensité carbone de l'ordre de 12,7 kgCO₂/MWh. Les éoliennes émettent dès lors deux fois moins de carbone par rapport au photovoltaïque, et 36 fois moins par rapport à une centrale TGV.

Emploi local

Le secteur éolien wallon crée approximativement, directement et indirectement, 600 emplois par TWh/an, dont 250 emplois locaux non délocalisables [50]. Cela représente, pour une éolienne de 2 MW et un facteur de charge de 25 %, la création de 2,6 équivalents temps plein, dont 1,1 temps plein local.

VII. La biomasse

Afin d'atteindre leurs objectifs climatiques, l'Union européenne et la Région wallonne misent sur l'utilisation de la biomasse comme nouvelle source d'énergie. La biomasse, c'est l'ensemble des matières organiques, provenant aussi bien des animaux que des végétaux, dont le contenu énergétique peut être valorisé. Cette source d'énergie se veut propre, puisque les émissions de CO₂ résultantes de la combustion de la biomasse sont compensées par le carbone capté, puis stocké par les végétaux lors de leur croissance. Ainsi, son utilisation pour la production d'énergie, essentiellement sous forme thermique, est fortement plébiscitée, tant pour les communes que pour les particuliers.

La mise en place de cette technologie, bien que toujours assez marginale, est fortement incitée par l'Etat. La biomasse, comme source d'énergie, commence donc à se démocratiser et va devenir de plus en plus présente dans le futur. Dans ce chapitre, la biomasse va être étudiée d'un point de vue territorial. Seules les productions du territoire seront considérées.

1. Potentiel

1.1 Résidus d'élevage

Le Pays de Herve est une région bocagère dont le paysage est essentiellement composé de pâturages destinés à l'élevage bovin. Il existe donc un fort potentiel de récupération énergétique résultant de l'élevage.

Sur base des modalités fixées par le Gouvernement wallon [51], de la table de conversion en annexe et des chiffres relatifs aux exploitations agricoles de la commune [52], le tableau suivant a été réalisé:

Animal	Nombre	Fumier [t]	Lisier [t]	Méthane [m ³]
Bovins				
- de 1 an	633	842	633	31.587
1 à 2 an(s)	536	1.238	911	46.257
2 ans et +				
Mâles	18	49	36	1.834
Génisses	229	625	458	23.335
Laitières	1.210	5.082	3.630	188.760
Allaitantes	102	286	204	10.608
Porcs				
Porcins	3.748	2.099	1.124	74.210
Poulets				
Poulets	13.000	182	260	8.060
Total	/	10.403	7.257	384.651

Tableau 16: Potentiel énergétique des résidus d'élevage (d'après [5])

Ce tableau reprend le potentiel méthanogène récupérable issu de l'élevage dans la commune de Welkenraedt. Annuellement, il est possible de récupérer **384.651 m³** de CH₄.

1.2 Résidus de station d'épuration

Le territoire de la Commune est couvert par deux stations d'épuration de l'AIDE, celle de Welkenraedt et celle de Henry-Chapelle. Ces stations couvrent respectivement 9.500 et 1.800 Equivalents-Habitants. La quantité de résidus disponible correspond donc aux déchets de 11.300 EH [53].

Chaque Equivalent-Habitant produit annuellement 7,3 m³/an de biogaz [54]. La production de 82.490 m³ de biogaz par an est donc possible. Cependant, ce biogaz n'est pas pur et ne contient que 65 % de méthane. Ramené à un m³ de méthane standard, cela correspond à la production de **53.618 m³** chaque année.

1.3 Résidus forestiers

On compte 58 ha de surface boisée à Welkenraedt [19]. Néanmoins, la forêt n'occupe que 43,9 ha. Le reste est constitué de bosquets. Les bosquets, souvent de très petite taille (moins de 10 arbres), n'ont pas comme vocation d'être exploités pour leur ressource en bois. Pour cette raison, ces derniers ne seront pas pris en compte lors de l'évaluation du potentiel forestier.

Afin de s'inscrire dans une optique durable, la quantité de bois prélevée annuellement dans les forêts ne doit pas être supérieure à leur taux d'accroissement. En 2019, cette valeur était de 6,44 m³/ha*an [55]. La valeur de production annuelle retenue sera donc de 6,44 m³/ha, soit 282,6 m³ par an à Welkenraedt.

L'exploitation forestière n'a pas pour unique vocation d'être utilisée à des fins énergétiques. Seuls les reliquats forestiers seront valorisés énergétiquement après broyage sous forme de plaquettes forestières.

Les résidus issus de l'exploitation forestière (Figure 25) sont estimés représenter entre 25 et 38 % du volume prélevé, selon les espèces [56]. La valeur de 30 % sera dès lors retenue.

Après transformation en plaquettes forestières, 212 m³ apparents de plaquettes (MAP) sont valorisables avec un PCI de 875 kWh/MAP [57]. Le potentiel brut est de **185,5 MWh**. En considérant une combustion avec un rendement de 85%, l'énergie récupérable est de 157,6 MWh/an.

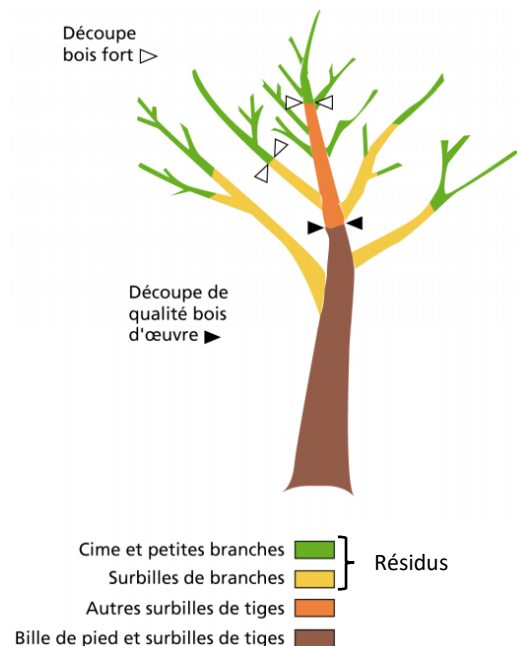


Figure 25: Schéma de compartimentation d'un arbre [56]

1.4 Coproduits de cultures

Les coproduits de cultures correspondent aux matières résiduelles obtenues pendant l'exploitation des surfaces agricoles pour leur ressource principale. Ils peuvent être valorisés de plusieurs façons, notamment par biométhanisation ou combustion.

Les coproduits étudiés sont ceux dérivés des exploitations agricoles situées sur Welkenraedt. Leur potentiel a été évalué pour deux valorisations différentes : sous forme de combustion ou de

biométhanisation. Afin de tenir compte de la difficulté de récolter certains coproduits, le gisement mobilisable a été pondéré par un coefficient. Ce dernier permet de prendre en considération plusieurs critères, notamment :

- la motivation des exploitants à valoriser leurs coproduits ;
- le bénéfice économique à exploiter ces coproduits au lieu de les traiter comme simples déchets ;
- la capacité de récolter les matières.

Les pourcentages utilisables pourront donc être réévalués et se voir augmentés lorsque les agriculteurs constateront les avantages d'utiliser les coproduits comme intrants en biométhanisation.

Produit	Production [t]	Pourcentage utilisable [%]	Méthane [m ³]	PCI [MWh]
Pailles de céréales	84	20	3.175	68
Menues pailles de céréales	25	50	2.632	50
Issues de silo	14	100	3.958	56
Feuilles de betteraves	259	40	5.662	N.A.
Ecarts de tri de pommes de terre	15	100	1.175	N.A.
Paille de maïs	2.136	50	71.548	1.281
Rafle de maïs	329	50	30.065	N.A.
Herbe ²	1.858	33	61.927	N.A.
TOTAL	4.719	55	180.144	1.456

Tableau 17: Potentiel énergétique des coproduits de culture (d'après [5], [52], [58])

1.5 Déchets verts

Les déchets verts sont des déchets liés à l'entretien des espaces verts privés ou publics (entretien de jardins, d'arbustes ...). Ces derniers sont, à l'heure actuelle, directement amenés et mélangés dans les parcs à conteneurs. Le mélange de ces différentes matières rend une valorisation impossible par combustion ou biométhanisation.

Une partie de ces déchets est cependant facilement exploitable : les déchets de tonte. Ils constituent 25% des déchets verts collectés, ce qui correspond, en 2016, à l'équivalent de 17,7 kg/habitant et donc approximativement de 177 tonnes pour Welkenraedt [59]. Après biométhanisation, la quantité équivalente de méthane obtenue est de **17.660 m³**.

Le reste des déchets verts est difficilement valorisable énergétiquement et une utilisation en compostage est alors préférée.

² Herbe de 3^e ou 4^e coupe. Le potentiel est supposé correspondre à une récolte un an sur trois.

1.6 Culture dédiée

Actuellement, il n'y a pas de culture à vocation énergétique sur la commune. Si l'on veut cependant considérer cette option, en règle générale, on considère que 5% de la surface agricole peuvent être voués à un changement d'utilisation pour des fins énergétiques [20]. Dans notre cas, cela représente 60 ha de culture dédiés à la production d'énergie.

Il existe plusieurs types de cultures pouvant être utilisés : betteraves sucrières, maïs, colza.... En Région wallonne, on considère essentiellement deux types de cultures pour une valorisation énergétique, de par leurs avantages et leur rendement adaptés aux conditions climatiques [58]. Ce sont le miscanthus et le taillis à courte rotation.

Le taillis à courte rotation (TCR) présente comme avantages son prix et son entretien qui ne nécessite que très peu de ressources. Quant au miscanthus, s'il coûte plus cher à l'investissement, il est beaucoup plus productif et ne nécessite pas de matériel spécifique.

Miscanthus ou taillis à courte rotation ?

Chaque espèce a ses propres avantages et inconvénients. Dans ce travail, l'étude s'est uniquement portée sur le miscanthus pour les raisons suivantes [60] :

- Il s'agit d'une culture pérenne, d'une durée de vie d'au moins 20 ans (contre ± 3 ans pour le TCR). Ce type de culture permet d'obtenir des récoltes stables dans le temps, et donc des rentrées financières fixes pour les exploitants.
- Le miscanthus ne nécessite pas de matériel spécifique.
- L'énergie récoltée par la culture du miscanthus est supérieure à celle récoltée par la culture du TCR.
- Le miscanthus fixe plus de carbone dans le sol que le TCR.

Selon les considérations et l'évolution de l'écosystème agricole, le TCR pourra aussi être étudié. Ce dernier fournit des services environnementaux semblables à ceux du miscanthus et peut se voir classé comme étant une surface d'intérêt écologique.

Valorisation	Superficie disponible [ha]	Potentiel brut récupérable [MWh]
Biométhanisation	60	3.333
Combustion	60	5.100

Tableau 18: Valorisation énergétique du miscanthus (d'après [61], [62])

1.7 Autres

D'autres matières biosourcées peuvent être utilisées à des fins énergétiques. Les déchets des entreprises agroalimentaires localisées sur la commune (BHA, Ransonnet ...) ou encore les déchets dus à l'entretien des haies peuvent présenter un potentiel certain, mais celui-ci est dans un premier temps difficilement évaluable.

2. Valorisation

Il existe diverses façons de valoriser la biomasse au travers de différents procédés. Les plus courants sont la combustion, pour produire de la chaleur, et la biométhanisation, pour produire du biogaz. Le biogaz peut, quant à lui, être valorisé en cogénération ou via son injection sur le réseau de gaz. L'étude se portera donc sur ces trois manières de valoriser la biomasse. Précisons que la biomasse peut aussi être valorisée autrement, comme au travers du CNG (gaz naturel comprimé), de la production de biocarburants... Ces techniques ne sont cependant pas très répandues et non pertinentes dans le cadre de ce travail.

2.1 Combustion

Incinérer la biomasse poursuit un objectif énergétique différent de la biométhanisation. En effet, l'objectif n'est pas d'obtenir un vecteur énergétique réutilisable, mais d'obtenir directement de l'énergie sous forme thermique. L'énergie thermique récupérée après combustion est alors souvent appelée chaleur verte.

Nous ne considérerons que deux sources de biomasse dans le cadre de la combustion : le miscanthus et les résidus forestiers. Le reste de la biomasse incinérable sera considérée comme étant valorisée via la biométhanisation en vue d'obtenir un vecteur énergétique plus noble que la chaleur : l'électricité.

Bien que le miscanthus puisse à la fois être utilisé en biométhanisation et en combustion, son usage comme carburant sera préféré pour les raisons suivantes :

- 50% d'énergie supplémentaire sont récupérables lors de la combustion par rapport à la biométhanisation.
- Il est facilement stockable en tant que combustible. En tant qu'intrant biométhanisable, il doit être récolté pendant la période automnale. Cela n'est pas en adéquation avec la saisonnalité des substrats déjà existants (voir Figure 28 p.55).
- Son temps de séjour dans un biodigesteur est long : il doit y résider plus de 300 jours, ce qui n'est donc pas compatible avec des unités de taille conséquente [62].

Produit	Production [t]	PCI [MWh]
Culture miscanthus	~600	5.100
Résidus forestiers	64	185
TOTAL	664	5.285

Tableau 19: Synthèse du potentiel biomasse valorisé par incinération

Comme l'indique le Tableau 19, on peut théoriquement récupérer 5.285 MWh d'énergie thermique via la combustion de la biomasse. Pour un rendement de combustion de 90%, la quantité nette de chaleur obtenue est égale à 4.765 MWh.

Si l'on considère que la demande de chaleur pour une habitation est de 19.339 kWh [63], la biomasse permet de fournir en chaleur l'équivalent de 246 habitations par an.

2.2 Biométhanisation

La biométhanisation est un processus anaérobie naturel au cours duquel la matière organique est dégradée. Les conditions anaérobies permettent aux bactéries méthanogènes de produire du biogaz et un résidu de matières organiques, le digestat.

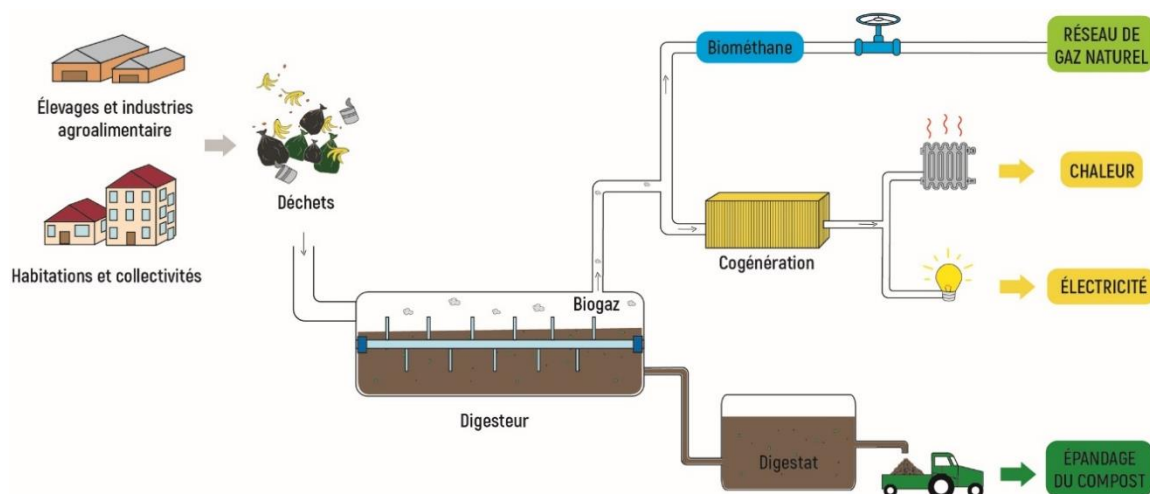


Figure 26: Valorisation de la biométhanisation (entrepose.com)

Les matières premières disponibles pour la biométhanisation sont nombreuses. Le Tableau 20 reprend l'ensemble des éléments méthanisables ainsi que leur production potentielle.

Produit	Ressource [t]	Méthane [m³]
Fumier	10.403	312.085
Lisier	7.257	72.566
Pailles de céréales	17	3.175
Menues pailles de céréales	13	2.632
Issues de silo	14	3.958
Feuilles de betteraves	104	5.662
Ecarts de tri de pommes de terre	15	1.175
Paille de maïs	1.068	71.548
Rafle de maïs	164	30.065
Herbe	613	61.927
Boues d'épuration	330	53.618
Déchets verts	177	17.660
TOTAL	22.885	636.075

Tableau 20: Synthèse du potentiel biométhanisable

On peut remarquer que la majorité du potentiel est assuré par des résidus d'élevage. Cela correspond bien à la situation agricole de Welkenraedt qui est une zone bocagère où l'élevage bovin prédomine.

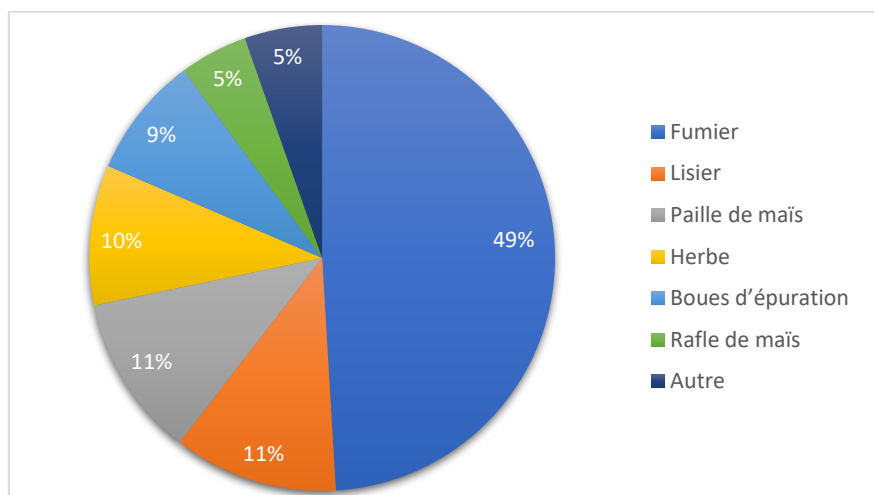


Figure 27: Répartition des substrats selon leur potentiel méthanogène

Toutes les ressources biométhanisables ne sont pas disponibles à la même période de l'année. Elles dépendent de leur moment de récolte. Puisqu'il est important d'introduire, dans un digesteur, un flux de matière le plus régulier possible, l'étude de la saisonnalité des substrats est très appréciable.

Si la disponibilité des matières premières n'est pas suffisamment constante, il faudra atténuer les fluctuations de leur disponibilité via des systèmes de stockage des intrants.

La Figure 28 nous montre la répartition de la disponibilité des substrats en fonction de leur saisonnalité. Comme nous pouvons le constater, il existe un intervalle creux durant la période de mai à octobre. A ce moment, les bovins sont considérés comme étant dans les pâtures. Leurs fumier et lisier ne sont dès lors plus mobilisables. Il faudra alors mettre en place une zone de stockage de la matière organique afin d'assurer un lissage de la disponibilité des intrants. Il est possible d'assurer un lissage correct juste en stockant une partie de la production de déchets bovins.

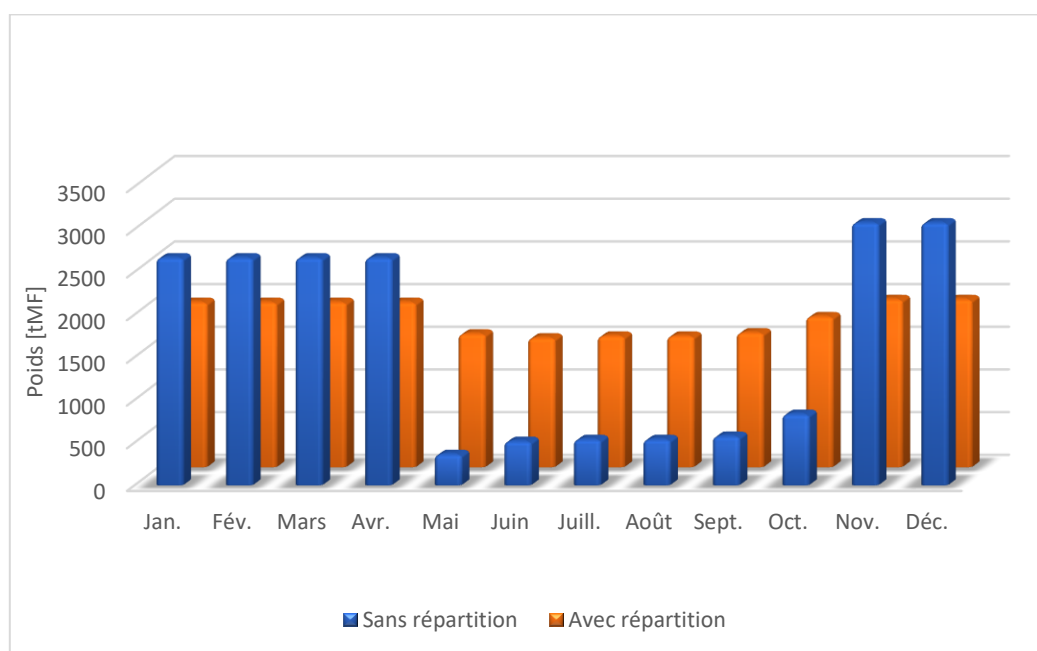


Figure 28: Répartition de la disponibilité des substrats en fonction de leur saisonnalité (d'après [64])

2.2.1 Biométhanisation - Injection

Après la biométhanisation des intrants, du biogaz est obtenu. Ce biogaz diffère du gaz présent sur le réseau de distribution par de nombreux paramètres, notamment sa composition, sa densité et son pouvoir calorifique. La purification du biogaz est dès lors obligatoire pour obtenir un gaz présentant des propriétés similaires à celui du réseau.

La biométhanisation permet de produire localement le combustible qui sera réinjecté dans le réseau puis utilisé, par après, dans une unité de combustion (essentiellement des chaudières) par une tierce partie.

En Région wallonne, ce mode de valorisation du biogaz suscite un intérêt croissant. En effet, les GRD sont obligés de prioriser le biométhane d'origine renouvelable. De plus, un soutien d'accompagnement et financier est mis en place. Ce dernier est très important puisqu'il vise à garantir un taux de rentabilité interne de 9 % [65]. Pour finir, le bilan environnemental de cette filière est positif. On peut estimer que les économies de CO₂ sont de l'ordre de 188 kgCO₂eq/MWh [66].

Un certain engouement existe bien pour la réinjection. Néanmoins, nous préférons privilégier la production d'électricité et donc la cogénération à l'injection. A noter que si l'intérêt pour ce mode de fonctionnement augmente, le réseau de Welkenraedt est théoriquement capable de recevoir cette production.

2.2.2 Biométhanisation – Cogénération

Le principe de la cogénération consiste à produire un travail utile, permettant de faire tourner une turbine et de récupérer le maximum de chaleur qui serait perdue afin de la valoriser ailleurs. Le travail utile permet, via la turbine couplée à un alternateur, de produire de l'électricité. La cogénération donne donc la possibilité de produire deux vecteurs énergétiques différents à un moindre coût d'énergie primaire (Figure 29). L'économie d'énergie primaire engendrée est souvent de l'ordre de 20% [67].

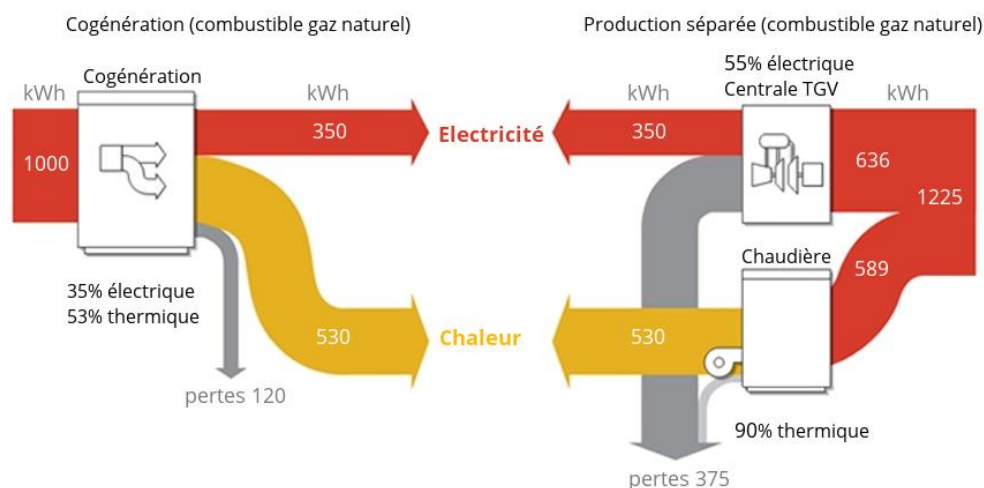


Figure 29: Principe de la cogénération [67]

Il y a actuellement 3 sites de cogénération à Welkenraedt. Ces sites possèdent une puissance primaire installée de 615 kW et fonctionnent au gaz naturel. Sur ces sites privés industriels ont été produits, en 2017, 1 GWh électrique et 1,2 GWh thermique (SPW – communication interne).

Aucun site utilisant du biogaz n'existe. Pourtant, le potentiel est présent. Il est possible de produire localement le biogaz, à raison de 636.075 m³ par an (Tableau 20 ici-avant).

En considérant une cogénération avec un rendement électrique de 40% et un rendement thermique de 50% ainsi qu'un PCI de 10 kWh/m³ de méthane [20], il est théoriquement possible de récupérer 2,5 GWh d'électricité et 3,2 GWh de chaleur. Si l'on considère une centrale TGV avec un rendement de 55% et une chaudière avec un rendement de 90 %, une économie en énergie primaire de 2,2 GWh est réalisée.

Si, pour un ménage, la demande de chaleur est de 19.339 kWh et la consommation en électricité de 3.898 kWh [15], la cogénération peut théoriquement répondre à 18% de la demande en électricité et 4 % de la demande en chaleur des ménages (Figure 30).

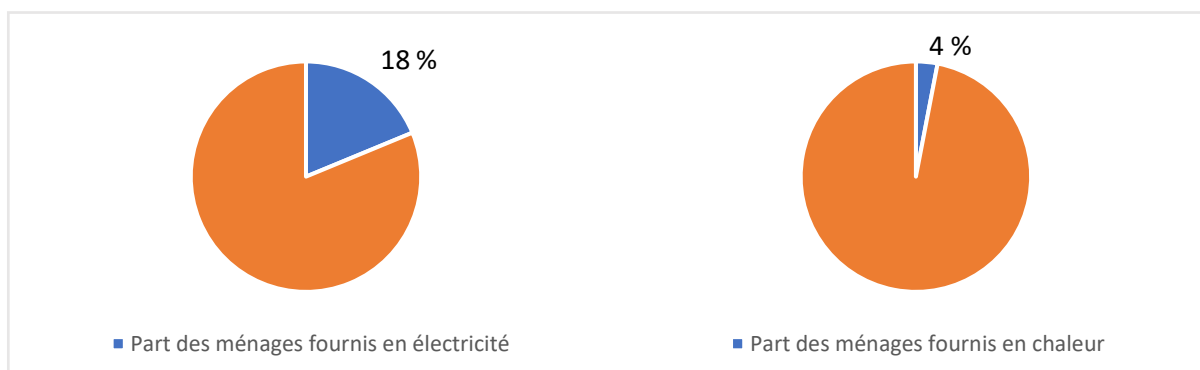


Figure 30: Part des ménages pouvant être fournis en énergie par la cogénération

Plus réalistement, les boues des stations d'épuration sont soumises à des conditions réglementaires spécifiques, ce qui limite leur utilisation. Pour un déploiement plus aisé de cette filière, des 636.075 m³ récupérables, seulement 582.457 m³ seront considérés comme directement exploitables. Concrètement, **5.824.570 kWh d'énergie primaire** sont récupérables. Si l'on considère une durée de fonctionnement de 7.200 h [68] et les rendements définis plus haut, les puissances maximales installables sont de 324 kW_{th} et 404 kW_e. Il est possible de récupérer **2,3 GWh_{th} et 2,9 GWh_e** par an.

2.2.3 Biométhanisation – Digestat

Le digestat est le résidu de la biométhanisation des intrants organiques. Approximativement ~80% de la masse introduite dans le digesteur en ressort sous forme solide ou liquide. Le digestat est majoritairement composé d'éléments organiques non minéralisés et de minéraux. C'est pourquoi il est revalorisé sous la forme d'amendement du sol [68].

Selon la législation wallonne actuelle, il est considéré comme un déchet et est donc soumis à la réglementation sur l'utilisation des déchets. Pour le valoriser et l'épandre sur les champs, il est nécessaire de disposer des autorisations de la Région wallonne et du SPF environnement [69].

Sa valorisation se voit bridée par des démarches administratives. Heureusement, en juin 2019, le Conseil européen a approuvé un nouveau règlement sur les engrais et les fertilisants. Ce règlement vise à créer un marché européen de libre échange des fertilisants organiques et donc du digestat [70]. Cela va permettre de faciliter les démarches administratives et valoriser économiquement le digestat.

3. Solution

La filière de la biomasse est tellement vaste que plusieurs solutions s'offrent à nous. Ici, nous allons proposer deux objectifs pour cette filière.

3.1 Chaudière biomasse

3.1.1 *Objectif*

« La commune de Welkenraedt vise en 2030 à fournir la totalité de la demande de chaleur d'au moins un bâtiment communal au travers l'installation d'une chaudière biomasse alimentée au miscanthus local ».

Ce dernier se traduit au travers d'un objectif SMART de la façon suivante:

- **Spécifique** : L'objectif est défini et ciblé. Il détaille de manière concrète la vision pour la filière de la biomasse – valorisation combustion - au travers d'un bâtiment communal très consommateur.
- **Mesurable** : La consommation de combustible fossile. Il suffit d'observer si cette dernière est bien entièrement remplacée par la consommation de biomasse.
- **Atteignable** : Un bâtiment communal est choisi comme projet pilote. La Commune étant porteuse du projet, il n'y a aucune difficulté à mettre en œuvre l'installation.
- **Réalisable** : Techniquement et financièrement, le projet est valable. Les retours d'expériences d'installations similaires permettent d'aborder l'objectif de manière réaliste [71].
- **Temporellement défini** : Une date butoir en 2030 pour voir la réalisation de toutes les actions.

Derrière cet objectif s'en cache un autre : l'introduction de la culture du miscanthus. Ce projet a donc un rôle pilote à la fois du point de vue énergétique et du point de vue agricole.

3.1.1 *Mise en œuvre*

La Commune établit un partenariat avec un agriculteur. Ce dernier, contre rémunération, accepte de fournir du miscanthus à l'Administration communale.

Une partie des terres de l'agriculteur sont destinées au miscanthus. Il n'est pas recommandé de transformer directement une parcelle en culture, mais d'établir des bandes d'une dizaine de mètres de large, permettant ainsi au miscanthus de jouer à la fois le rôle de haie et celui de culture.

La Commune finance la chaudière soit en fonds propres, soit via un mécanisme de tiers investissement où elle rembourse l'investisseur au prorata des économies générées.

3.1.2 Sites potentiels

Les bâtiments communaux retenus sont ceux répondant à un critère minimal de consommation (>100.000 kWh/an). Les bâtiments très consommateurs retenus sont repris dans le tableau ci-dessous.

Bâtiment	Consommation annuelle moyenne [kWh]
Centre sportif Welkenraedt	252.559
Centre sportif Henri-Chapelle	161.000
Ecole communale Welkenraedt	306.080
Ecole communale Henri-Chapelle	245.909
Maison communale Welkenraedt	100.588
Maison communale Henri-Chapelle	192.355

Tableau 21: Bâtiments communaux éligibles à une chaudière biomasse

Certains de ces bâtiments font actuellement l'objet d'une étude RenoWatt pour déterminer leur éligibilité à la réception de subsides UREBA exceptionnels en vue de l'amélioration de leur performance énergétique. Tous les bâtiments ne pourront pas recevoir ce subside, mais il est judicieux d'attendre le résultat du SPW afin d'éviter d'installer une unité non adaptée au besoin du bâtiment.

La consommation moyenne des sites retenus est de ~210.000 kWh. Cela représente la conversion de 2,5 ha de culture agricole en culture dédiée au miscanthus. Si ce projet pilote offre des résultats concluants, il est intéressant de constater qu'il reste encore 57,5 ha pouvant être transformés en culture à vocation énergétique. Le potentiel reste élevé. A long terme, il est envisageable de fournir l'entièreté des bâtiments communaux en énergie verte.

3.1.3 Résultat

Rentabilité

Le calcul de rentabilité va se faire pour une chaudière de 100 kW. Bien qu'il existe une aide disponible pour ce projet (UREBA), elle ne sera pas prise en compte au vu de la très grande rentabilité initiale du projet.

Paramètre	Valeur	Unité
Coût chaudière biomasse	70.000	[€]
Coût chaudière gaz	36.000	[€]
Prix achat miscanthus	0,028	[€/kWh]
Prix achat gaz [29]	0,0625	[€/kWh]
Consommation annuelle	210.000	[kWh]
Rendement chaudière	90	[%]
Maintenance annuelle	3	[%] _{initial}]
Taux d'indexation	2	[%]

Tableau 22: Paramètres de calcul - chaudière biomasse (d'après [72])

Même si l'investissement initial est beaucoup plus important, l'économie générée suite au passage du combustible gaz au combustible miscanthus permet au projet d'arborer, après 20 ans, une VAN de 61.611 € et un TRI de 9%. L'installation s'amortit au bout de 6 ans.

Impact carbone

Lors de sa croissance, le miscanthus stocke du carbone dans des valeurs égales à celles libérées lors de son incinération. Il est considéré comme neutre sur les émissions de CO₂. Mais lors de l'analyse de son bilan carbone, les émissions liées à la consommation des carburants pour le transport, l'entretien et la récolte sont à prendre en compte.

La culture du miscanthus produit en moyenne 290,9 kg CO₂/(ha*an) [61]. Par MWh d'énergie récupéré, 3,4 kg CO₂ sont émis. Cette valeur est nettement inférieure à celles des combustibles fossiles. De plus, lors de sa pousse, le miscanthus permet de stocker du carbone dans le sol. Cela a pour conséquence un bilan environnemental encore plus favorable. Cependant, comme il est difficile d'évaluer ce facteur à l'avance, il ne sera pas pris en compte.

En comparant avec une chaudière au gaz émettant 251 kgCO₂/MWh [73], 247,6 kg de CO₂ sont économisés par MWh produit. Selon notre objectif, 57,8 tCO₂ sont économisés chaque année.

3.2 Unité de cogénération

3.2.1 Objectif

« La commune de Welkenraedt vise à installer une unité de cogénération en 2030. Cette unité doit permettre de valoriser au maximum les ressources méthanisables, tout en consommant l'entièreté de la chaleur produite ».

Ce dernier se traduit au travers d'un objectif SMART de la façon suivante:

- **Spécifique** : L'objectif est bien défini et ciblé. Il détaille de manière concrète la vision de la filière de la biomasse – valorisation cogénération - au travers d'une unité de biométhanisation-cogénération.
- **Mesurable** : Si une unité est mise en place, l'action est réussie. La quantité d'intrants permet aussi de mesurer la quantité du potentiel valorisé.
- **Atteignable** : Le site doit exploiter au maximum les ressources biométhanisables. L'ambition est d'exploiter toutes les ressources aisément mobilisables pour produire un maximum d'énergie. Pour consommer toute la chaleur issue des processus, des réseaux de chaleur doivent être considérés ainsi que la demande de chaleur des consommateurs reliés à ce même réseau. Une analyse de la demande doit être préalablement réalisée.
- **Réalisable** : En considérant tous les sites potentiels, l'entièreté du potentiel méthanisable ne permet d'installer au maximum qu'une unité de taille moyenne. Considérer ce potentiel n'est donc pas dérisoire.
- **Temporellement défini** : Une date butoir, 2030, est définie.

3.2.2 Mise en œuvre

La mise en place d'un tel projet n'est que partiellement dans les mains de l'Administration communale. En effet, les coûts d'investissement, les acteurs impliqués ainsi que la disponibilité des sites susceptibles d'accueillir une unité de cogénération rendent difficile l'accès à ce projet. On ne compte d'ailleurs qu'une seule unité 100% communale en Wallonie, celle d'Aiseau-Presles.

L'Administration communale poursuit donc avant tout un but de promoteur du projet. Au travers de rencontres avec les acteurs, de soutiens et de campagnes d'information, la Commune a pour but de faciliter le lancement du projet.

La mise en œuvre "réelle" de l'installation sera prise en charge par une coopérative ou une société d'exploitation (dont la Commune peut faire partie). Cela comprend les différentes études, la construction et l'exploitation.

3.2.3 Détermination des sites potentiels

Pour être retenu, un site doit répondre aux conditions suivantes :

- Situé à minimum 50 m des habitations [74] ;
- Situé en zone agricole, afin de respecter la conformité avec le plan de secteur (d'autres zones sont envisageables, mais il faut alors une dérogation au plan de secteur) ;
- Un espace de stockage proportionnel à la taille de l'installation doit être disponible ;
- Situé à proximité d'une installation agricole ;
- Présence d'un ou plusieurs gros consommateur(s).

Une fois le site choisi, une analyse de sa demande de chaleur devra être effectuée. Cela permettra d'évaluer la puissance installable. Le dimensionnement ne sera réalisé ici qu'en fonction de la demande de chaleur. La demande en électricité n'est pas étudiée ici. Nous supposons donc que l'électricité produite est injectée dans le réseau.

A) Site 1 – Blanchisserie & clinique

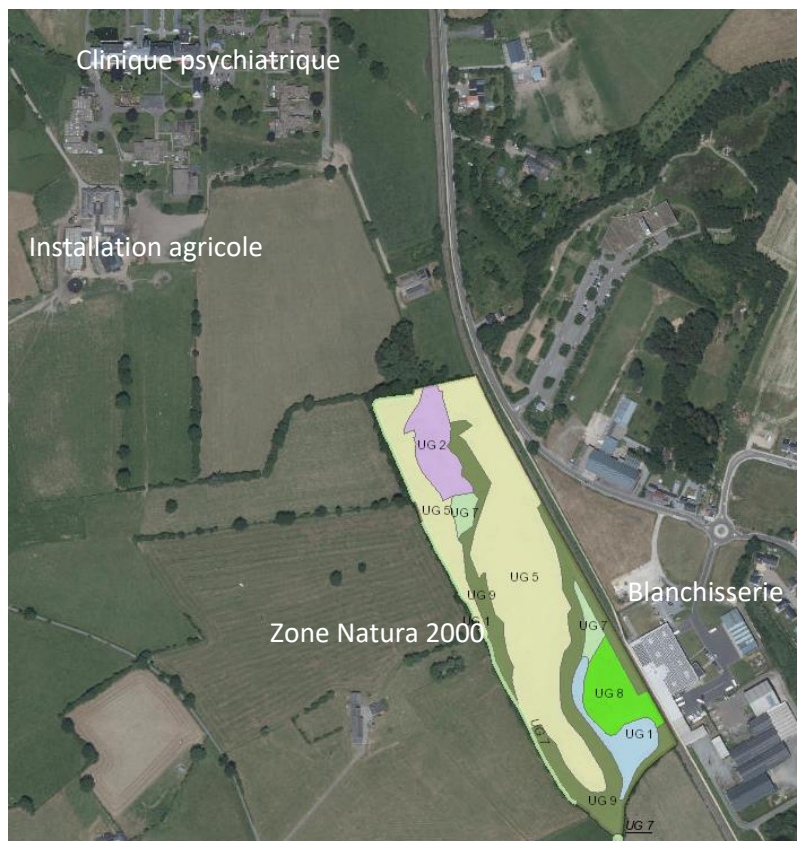


Figure 31: Cogénération - Site 1 (WalOnMap)

Estimation de la consommation :

- **Blanchisserie** : Servitex traite 7.000 tonnes de vêtements par année. Les meilleures performances énergétiques des blanchisseries donnent des consommations de chaleur aux alentours de 0,77 kWh par kg de vêtements traité [75]. L'usine consomme donc annuellement 5.390 MWh de chaleur pour pouvoir fonctionner.
- **Clinique psychiatrique** : Sur base de sa superficie mesurée, 12.000 m², sa consommation a été estimée en se référant à la consommation moyenne des maisons de soins, à savoir 199 kWh/m² [76]. La clinique a un besoin annuel de chaleur estimé correspondre à 2.388 MWh.

Ces consommations ont été réparties selon des profils types de prélèvement (Figure 32). Le profil D, correspondant à une activité continue 7 j/7, et le profil E, correspondant à une activité diurne 5 j/7, ont été appliqués respectivement aux consommations de la clinique et de la blanchisserie [77].

Une fois ces consommations réparties selon leur profil type, nous obtenons la monotone de chaleur du site étudié (Figure 33). A partir de cette monotone, il est possible de trouver la puissance nominale thermique permettant un temps de fonctionnement de 7.200 h à plein régime. Cette dernière vaut 290 kW_{th}. Sur base des rendements définis précédemment, nous obtenons une puissance électrique de 232 kW_e.

Un micro-réseau de chaleur devra être installé pour distribuer l'eau chaude aux différents sites. En contournant la zone Natura 2000, ce dernier ferait 800 m de long.

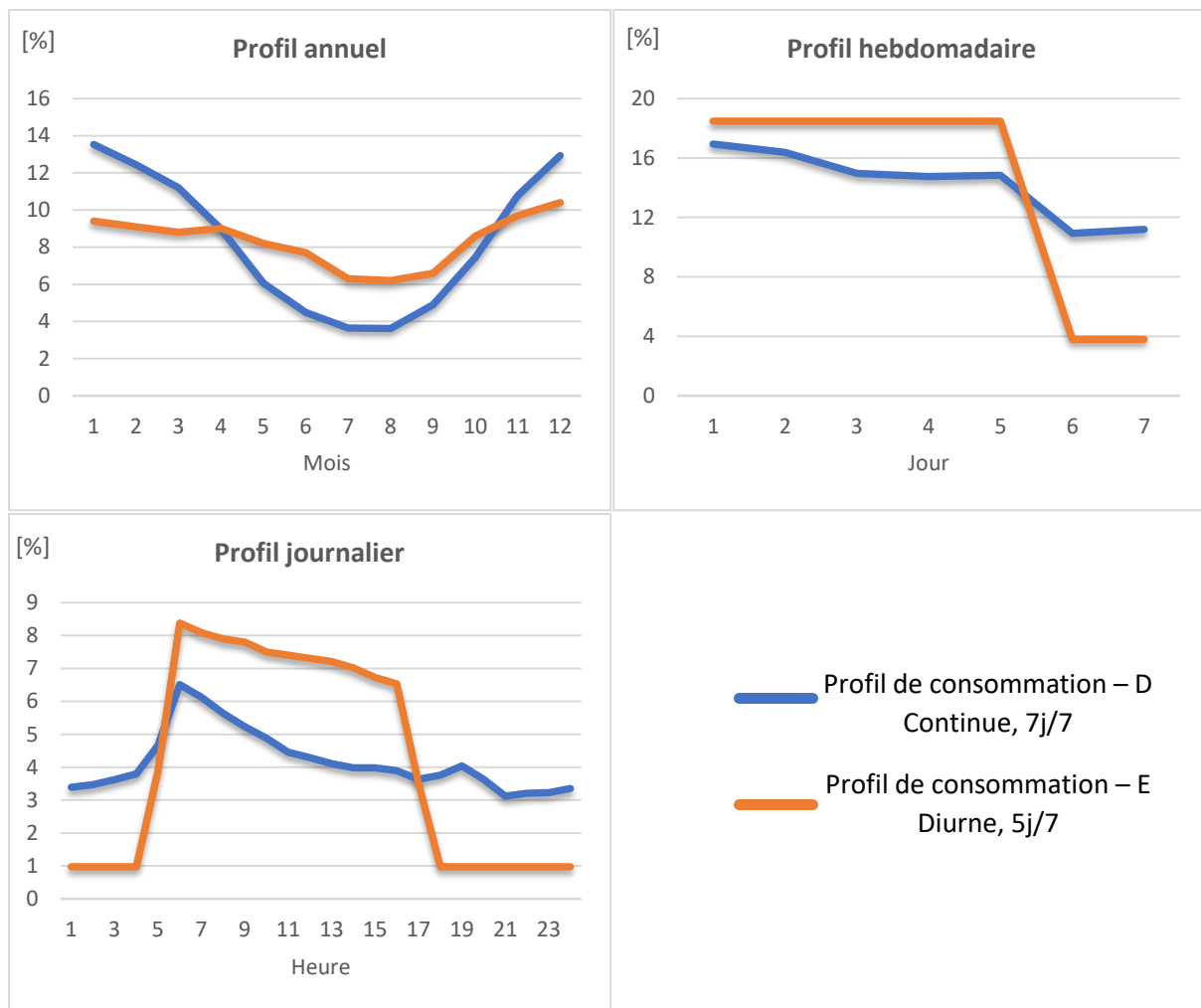


Figure 32: Profil type – site 1 (d'après [77])

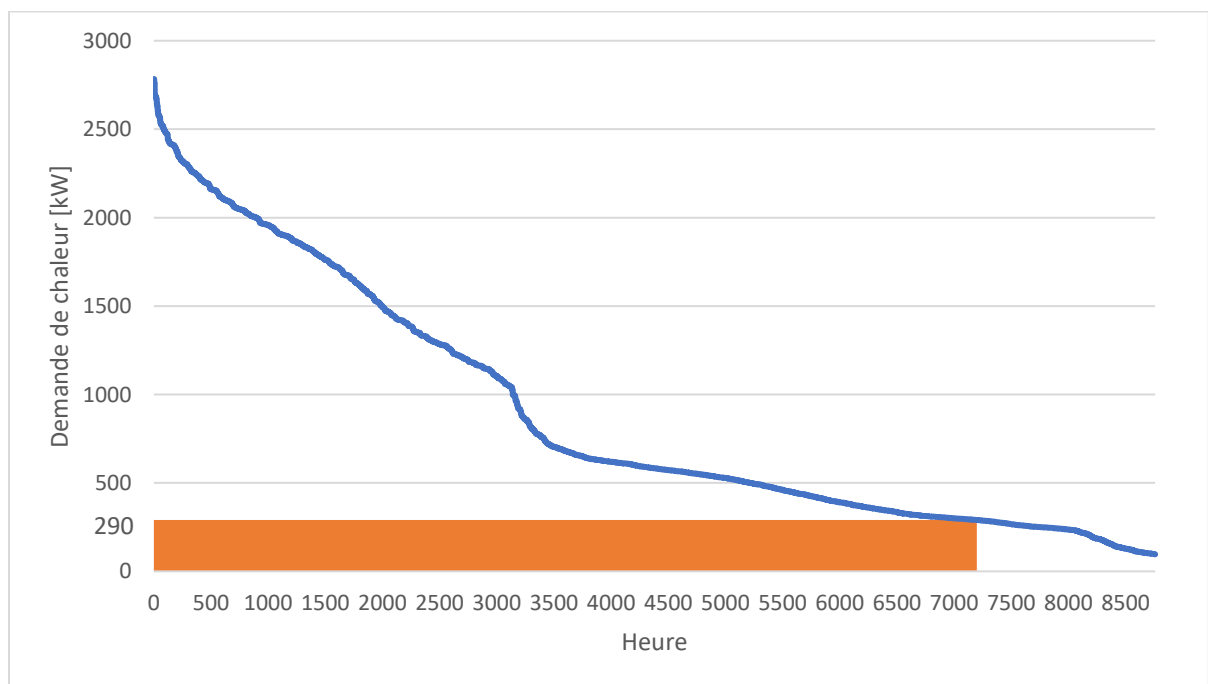


Figure 33: Monotone de chaleur – site 1

B) Site 2 – Générique- Ferme & habitations



Figure 34: Cogénération - site 2 (WalOnMap)

Sur ce site, nous étudierons, de manière générique, la consommation de bâtiments résidentiels situés à proximité d'une installation agricole. Il est ici question de petite cogénération.

La monotone (Figure 35) a été construite sur base du profil de demande type de chaleur pour l'ECS et le chauffage d'un bâtiment résidentiel en province de Liège [78]. La valeur moyenne en Wallonie pour cette demande, 19.339 kWh, a été utilisée comme référence [63]. Le cas considéré ici est de 10 habitations, reliées avec l'unité de cogénération via un réseau de 250 m.

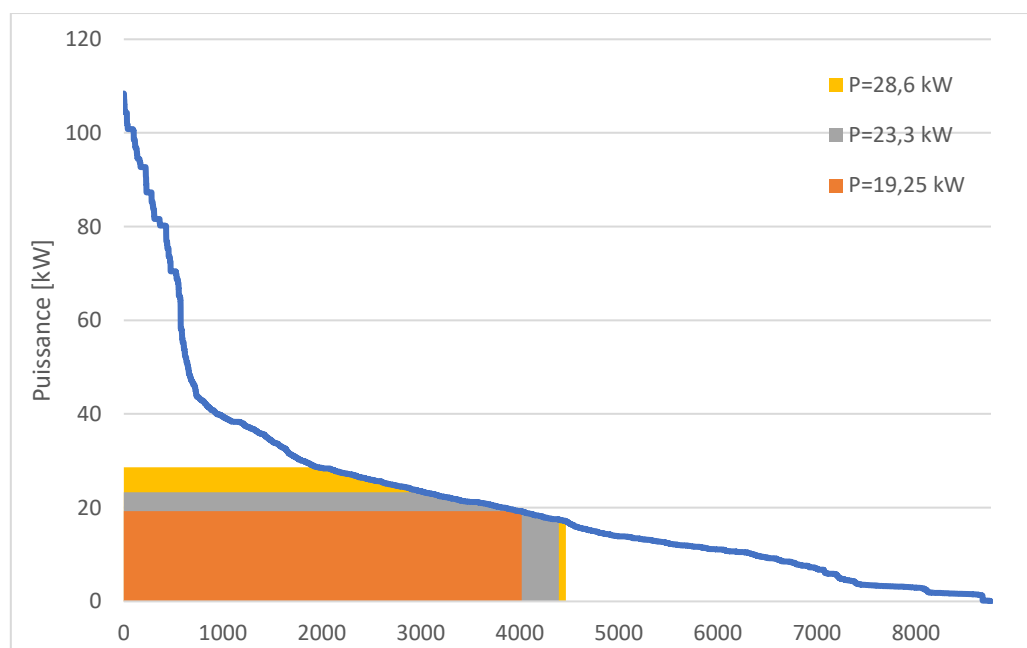


Figure 35: Monotone de chaleur- site 2

A partir de cette monotone, il est possible de trouver la puissance thermique qui permet de maximiser l'énergie à produire. Si l'on voulait maximiser le temps de fonctionnement, la puissance serait très négligeable. Il est donc recommandé de maximiser la puissance et de stocker le surplus de biogaz pour des moments de forte demande de chaleur ou en support du réseau électrique. Le recours à des moyens de stockage de la chaleur peut aussi permettre d'augmenter le temps de fonctionnement.

Charge partielle permise [% P_{nominale}]	Puissance thermique [kW]	Durée de fonctionnement [h]	Production [kWh]	Couverture de la demande [%]
0	19,25	4.020	77.389	40
>75	23,30	4.395	98.432	51
>60	28,60	4.464	112.195	58

Tableau 23: Puissance nominale installable - site 2

En fonction du type de technologie envisagé, il est possible d'exploiter une puissance thermique de 28,6 kW_{th}. Sur base des rendements définis précédemment, nous obtenons une puissance électrique de 22,9 kW_e.

3.2.4 Résultats

Rentabilité

Sur base des paramètres de calcul ci-dessous, différents indicateurs économiques ont été déterminés. L'investissement est considéré comme effectué en fonds propres.

Paramètre	Valeur	Unité
Réseau de chaleur [79]	250	[€/m]
Coût cogénération ~30 kW _e	10.350-12.260	[€/kW _e]
Coût cogénération ~250kW _e	5.580-6.820	[€/kW _e]
Taux d'octroi CV	2,5	[MWh]
Prix de vente CV	65	[€]
Prix de vente électricité	48,06	[€/MWh]
Prix de vente chaleur	50	[€/MWh]
Main d'œuvre ³	200	[€/kW]
Maintenance annuelle	2-3	[%] _{initial}
Assurance annuelle	0,6	[%] _{initial}
Impôts sur les revenus	33,99	[%]

Tableau 24: Paramètres de calcul – Cogénération (d'après [68], [80])

Une hypothèse importante est réalisée concernant le prix d'achat des intrants. Ce dernier a été considéré comme égal à zéro. En effet, la plupart des intrants sont des déchets et n'ont aucune valeur économique. Un système d'échange des intrants par du digestat peut être mis en place. De plus, il est

³ Sur l'hypothèse de 1 ETP = 50.000 €/an

supposé que les agriculteurs amenant les intrants font partie de la coopérative/société d'exploitation. Un remboursement des intrants par rapport au bénéfice réalisé est aussi envisageable.

Les aides disponibles sont peu nombreuses : les CV, les aides UDE et FEADER. Ces aides peuvent atteindre jusqu'à 35,75% du montant initial. D'autres aides exceptionnelles peuvent cependant exister, comme par exemple un subside communal, provincial ou régional.

Les résultats repris au Tableau 25 ci-dessous permettent d'obtenir une idée du résultat selon les paramètres définis. Il est important de noter que ces paramètres sont sujets à des modifications, dont la valeur pourrait avoir un impact réel sur le résultat. Considérer un réseau de 250 m avec 10 habitations est plus pénalisant que de considérer un réseau de 300 m avec 30 habitations.

P_e [kW]	Aide	Investissement initial [€]	TRI [%]	VAN [€]	Temps de retour [année]
232	CV	1.782.240	6	491.572	9-10
22,9	CV	218.678	- 5	- 85.564	-
22,9	CV + 37,75 % de l'investissement initial	218.678	1,4	- 4.632	-

Tableau 25: Résultat – cogénération

Impact carbone

Les valeurs moyennes des émissions liées à une cogénération varient entre 10,8 kgCO₂/MWh de biogaz lorsque le digestat est stocké dans une structure ouverte, et -302,4 kgCO₂/MWh lorsque le digestat est stocké dans une structure fermée [81]. La valeur négative signifie une économie de CO₂ par rapport à la situation de référence où la biomasse n'est pas utilisée pour produire de l'énergie.

Par mesure conservatrice, les émissions liées à la cogénération sont prises à 0 kgCO₂/MWh. Chaque unité d'énergie produite permet donc d'économiser respectivement 251 kgCO₂/MWh_{chaud} et 456 kgCO₂/MWh_{électrique} [73].

Emploi local

Outre la valorisation du travail des agriculteurs, la mise en place d'une unité de cogénération crée quatre emplois locaux non délocalisables par MWh_e produit [68]. Pour la construction, il faut compter 6,4 ETP/MW_e. Répartis sur 20 ans, cela nous donne 0,32 ETP/MW_e. Au final, la cogénération induit 4,32 emplois par MW_e installé.

VIII. Chaleur verte

1. Réseau de chaleur

En Région wallonne, le secteur résidentiel (tertiaire et logement) est un gros consommateur d'énergie. Il représente un tiers de la consommation totale en énergie et 17 % des émissions de gaz à effet de serre [82]. La part d'énergie utilisée pour répondre au besoin de chaleur des ménages wallons représente 87% de la consommation totale [63]. Des économies substantielles de CO₂ sont réalisables en agissant sur la consommation de chaleur. Cette dernière peut être récupérée ou produite de façons moins polluantes que traditionnellement. Citons, entre autres, la chaleur issue de process industriels, de la géothermie, d'une unité de cogénération ou encore produite à partir de biomasse. Cependant, ces formes de chaleur nécessitent un réseau de chaleur pour pouvoir être distribuées aux différents consommateurs.

Un réseau de chaleur est une installation comportant au moins une unité de production de chaleur, un circuit de distribution composé de canalisations suivant les voiries, et des sous-stations qui permettent la fourniture de chaleur aux utilisateurs.

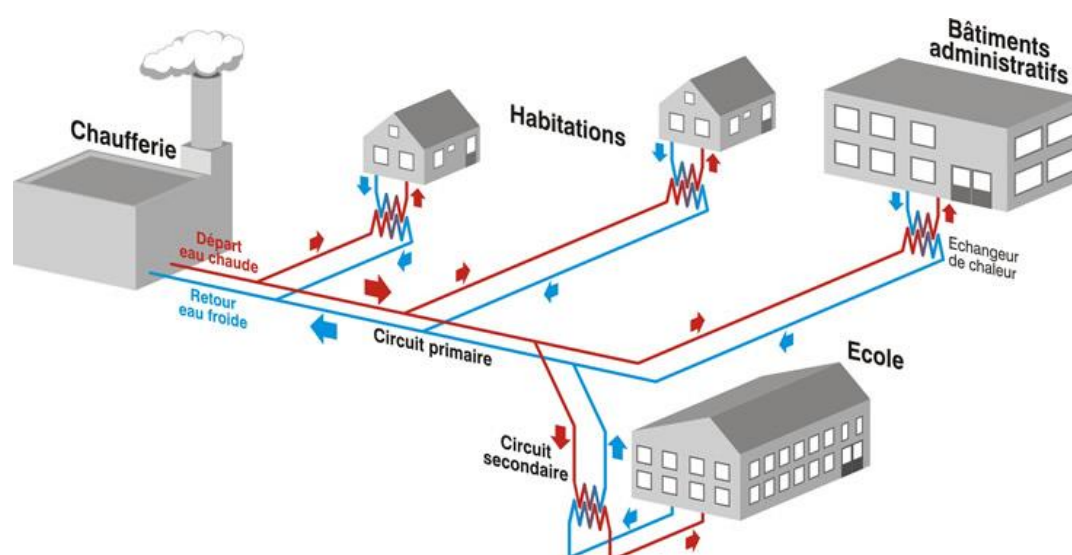


Figure 36: Réseau de chaleur schématique [83]

1.1 Cadre législatif

L'avant-projet de décret relatif à "l'organisation du marché de l'énergie thermique et à l'organisation des réseaux d'énergie thermique" est la référence légale pour les réseaux de chaleur. Ce dernier, approuvé fin 2018 par le Gouvernement wallon, a pour but de poser des bases de travail et d'encadrer les modalités d'exploitation. Cependant, cet avant-projet de décret se veut minimaliste et laisse de nombreux flous juridiques.

Il précise toutefois la possibilité de recevoir des aides à l'investissement et à la production par le Gouvernement. De plus, il définit des obligations pour les fournisseurs et les opérateurs, ainsi que la nécessité d'un permis d'environnement [84].

1.2 Potentiel

Heat Roadmap Europe a développé un atlas thermique européen. Cet atlas propose, sous forme de cartes, différentes informations concernant la viabilité et le potentiel de réseaux de chaleur en Europe [85].

Une première consultation de cet atlas permet de constater qu'il existe en effet un certain potentiel à Welkenraedt (Figure 37). Sans surprise, ce potentiel est localisé dans le centre-ville et dans les zonings industriels. Théoriquement, sauf les habitations isolées, la quasi-totalité de l'habitat situé en centre-ville peut être potentiellement raccordé à un réseau de chaleur. Il est évident que les maisons isolées ou peu regroupées ne présentent pas ou peu de potentiel.

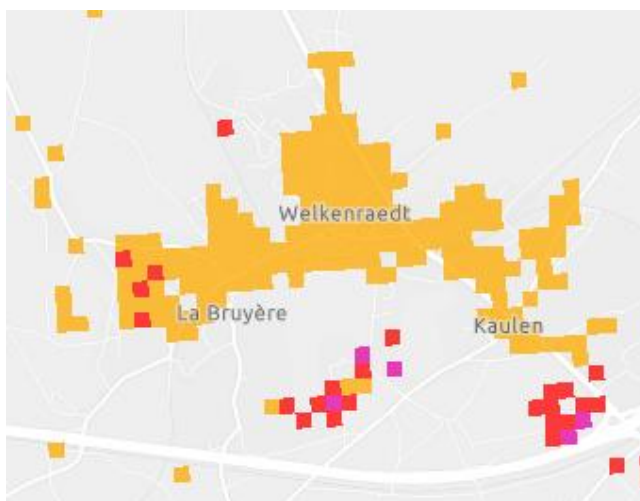


Figure 37: Densité de demande de chaleur [85]

Deux situations ont été analysées. La première est un quartier « type » de Welkenraedt, le deuxième étant le centre-ville. Pour chaque cas, la densité de chaleur linéaire a été fixée respectivement à 1,4 et 3,1 MWh/m. La densité de chaleur linéaire est le rapport entre la demande de chaleur et la longueur du réseau. La demande a été établie comme suit : $\text{nombre}_{\text{bâtiments}} * \text{demande}_{\text{bâtiment}}$. La demande unitaire par bâtiment vaut 19.339 kWh [63]. Le nombre de bâtiments ainsi que la longueur du réseau ont été déterminés à l'aide du logiciel THERMOS [86]. En règle générale, un réseau de chaleur est considéré économiquement viable lorsque sa densité de chaleur linéaire est supérieure à 2 MWh/m [87]. On cherchera donc à maximiser cette valeur, c'est-à-dire à favoriser les endroits à forte concentration d'habitations.

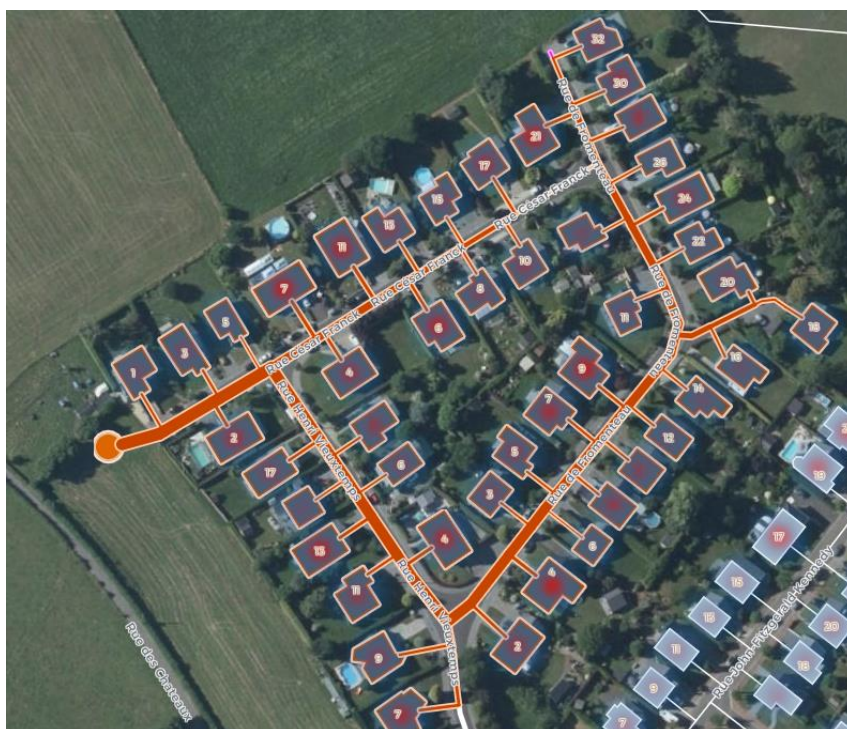


Figure 38: Réseau de chaleur - quartier type de Welkenraedt [86]



1.3 Résultat

Economique

Le coût engendré par un réseau de chaleur dépend surtout des infrastructures de distribution. Une première estimation du coût de ces infrastructures peut s'obtenir de la manière suivante [88]:

$$\text{Coût moyen d'investissement} = 130 + 2858 * (\text{diamètre moyen des tuyaux}) \quad [\text{€/m}]$$

pour lequel le diamètre peut se calculer à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Diamètre moyen des tuyaux} = 0,0486 * LN + 0,063 \quad [\text{m}]$$

où paramètre LN correspond à la densité de chaleur linéaire, calculée précédemment.

Au coût du réseau vient s'ajouter l'investissement lié à la chaudière biomasse pour la production de la chaleur. Pour déterminer la puissance de cette dernière, et afin de simplifier le prédimensionnement, on multipliera simplement la puissance nécessaire par habitation (11 kW, déterminée sur base de la monotone de chaleur, voir Figure 40) par le nombre d'habitations.

Ainsi, le réseau « quartier » a besoin d'une puissance de 450 kW, le réseau « centre-ville » d'une puissance de 2,7 MW (en ne considérant que le réseau sélectionné dans la Figure 39).

Enfin, un dernier paramètre de calcul important est le prix de vente de la chaleur. Pour être compétitif avec les technologies actuelles, il doit être égal à leur prix d'achat. C'est pourquoi nous considérerons qu'un kWh de chaleur doit être vendu au même prix qu'un kWh de gaz.

La rentabilité d'un réseau de chaleur a été étudiée à partir des paramètres du Tableau 26. Les résultats obtenus après 25 ans sont repris dans le Tableau 27.

Paramètres	Valeur	Unité
Durée de vie	25	[an]
Coût du réseau - quartier	306.910	[€]
Coût du réseau - centre-ville	1.216.808	[€]
Coût de la chaudière biomasse	740.000	[€/MW]
Rendement de combustion	108	[%]
Coût O&M fixe	10.335	[€/MW]
Coût O&M variable	25	[€/MWh]
Prix de vente de la chaleur [29]	62,5	[€/MWh]
Pertes du réseau [87]	10	[%]
Taux d'indexation	2	[%]

Tableau 26: Paramètres de calcul du réseau de chaleur (d'après [89])

Les résultats obtenus consistent en une première approche du potentiel. De manière théorique, il est néanmoins observable qu'il peut être intéressant d'installer des réseaux de chaleur, à la fois à grande et à petite échelle. Il est d'ailleurs recommandé de se focaliser en priorité sur les réseaux de petite taille. Ces derniers nécessitent un investissement initial bien moins important, mais surtout permettent de trouver des sites de chaufferie plus facilement.

Enfin, la rentabilité peut se voir augmenter via des aides. La seule prime existante est la prime UDE fournie par la Région wallonne. D'autres sources de financement extraordinaire sont malgré tout envisageables, comme des aides de la Province, de la Commune ou encore d'autres organismes.

Installation	Investissement total [€]	VAN [€]	Temps de retour [année]	TRI [%]
Quartier	3.214.808	755.871	20-21	3,8
Centre-ville	639.910	35.385	23-24	2,4

Tableau 27: Résultat du calcul réseau de chaleur

Afin de pouvoir comparer la production de chaleur au travers d'une pompe à chaleur avec une autre source de chaleur verte, le LCOH (Levelized Cost Of Heat) est utilisé [90] :

$$LCOH = \frac{I_0 - S + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

avec :

- I_0 : investissement initial, en [€]
- S : subside, en [€]
- C_t : coûts d'opérations et de maintenance, en [€/an]
- r : le taux d'actualisation, défini à 2 [%]
- E_t : énergie fournie, en [kWh/an]
- t : durée de vie, équivalant à 20 [an]

Le coût obtenu est de 0,066 €/kWh pour le réseau centre-ville, de 0,071 €/kWh pour le réseau quartier.

1.3.1 Impact carbone

Le recours à la biomasse permet de réaliser des économies substantielles de gaz carbonique. Chaque MWh produit émet en moyenne 5 fois moins de CO₂ dans l'atmosphère qu'une solution au gaz standard. Si l'on rajoute, en plus, une économie en énergie primaire qu'offre le réseau de chaleur, l'économie de CO₂ est six fois plus importante.

Technologie	Energie consommée ⁴ [MWh/an]	Facteurs d'émissions [kgCO ₂ /MWh] (valeur CWaPE [73])	Emissions de CO ₂ annuelle [tCO ₂ /an]
Réseau de chaleur - centre-ville	5.239	45,6	239
Chaudière gaz individuelle (p=90%)	5.716	251	1.435
Economie	476		1.196
Réseau de chaleur - quartier	886	45,6	40
Chaudière gaz individuelle (p=90%)	967	251	243
Economie	81		203

Tableau 28: Economie réalisée par un réseau de chaleur

⁴ Pertes et rendements de l'installation pris en considération.

2. Pompes à chaleur

Une pompe à chaleur est une machine thermodynamique dont le but est de chauffer un bâtiment ou de l'eau chaude sanitaire. Son principe de fonctionnement repose sur un transfert d'énergie thermique d'une source froide (extérieur) à une source chaude (intérieur) via un travail fourni.

L'intérêt principal d'une pompe à chaleur se trouve dans le principe que la quantité d'énergie à fournir est inférieure à la quantité d'énergie récupérable. Cela s'illustre par le COP, coefficient de performance, indiquant l'efficacité du système. Un COP de 4 signifie que pour chaque unité d'énergie électrique consommée par la PAC, 4 unités d'énergie thermique sont fournies par la PAC. Cependant, durant la période de chauffe, les températures internes et externes sont sujettes à des variations constantes. Pour illustrer ce phénomène et obtenir un COP réaliste, on utilise le FPS, facteur de performance saisonnier. Le FPS s'apparente à un COP moyen annuel.

Chaleur renouvelable ?

Pour fonctionner, une PAC a besoin d'électricité. Cette dernière n'étant pas forcément d'origine renouvelable, beaucoup s'interrogent sur le fait de savoir si les PAC ont leur place dans les énergies renouvelables. Heureusement pour nous, la question de savoir si la chaleur fournie par les PAC est, ou non, d'origine renouvelable a reçu réponse en 2009 par le Parlement européen [91]:

« La quantité d'énergie [...] capturée par des pompes à chaleur, devant être considérée comme énergie produite à partir de sources renouvelables [...] se calcule selon la formule suivante:

$$E_{RES} = Q_{utilisable} * (1 - \frac{1}{FPS})$$

sachant que:

- $Q_{utilisable}$ = la chaleur [...] délivrée par des pompes à chaleur [...] pour lesquelles $FPS > 1,15 * 1/\eta$;
- FPS = le facteur de performance saisonnier moyen estimé pour lesdites pompes à chaleur;
- η représente le ratio entre la production brute totale d'électricité et la consommation énergétique primaire requise pour la production d'électricité [...] ».

Concrètement, une pompe à chaleur possédant un FPS supérieur à 2,5 peut être considérée comme une source d'énergie renouvelable [92].

2.1 Technologie

On distingue plusieurs technologies de pompes à chaleur selon la source de chaleur et l'échangeur. Parmi toutes les configurations existantes, nous allons nous intéresser à trois technologies les plus pertinentes au vu de la disponibilité des sources extérieures.

- **PAC sol/eau** : ce type de pompe à chaleur utilise le sol comme source froide. Au travers d'un échangeur parcouru par un fluide frigorigène, la PAC prélève la chaleur du sol pour le fournir à la source chaude, essentiellement de l'eau. On distingue deux types de PAC sol selon l'orientation de leur échangeur. Les PAC sol dites horizontales sont caractérisées par un échangeur occupant une grande surface, et posé de manière parallèle au sol à faible profondeur (~1,5 m). Les PAC sol dites verticales sont caractérisées par des échangeurs plus petits, mais perpendiculaires au sol. Ces derniers descendent plus profondément, mais permettent de disposer d'une source froide se situant à une température relativement constante, de l'ordre de 10°C.

- *PAC Air/Eau* : ce sont les PAC les plus courantes. Ces dernières utilisent, au travers d'une unité externe, l'air extérieur comme source froide.

Technologie	Energie finale [kWh]	Rendement [%]	FPS	Facteur d'énergie primaire	Consommation énergie primaire [kWh]
Air/eau	1	/	2,8	2,5	0,89
Sol/eau (horizontale)	1	/	4	2,5	0,62
Sol/eau (verticale)	1	/	4,7	2,5	0,53
Chaudière traditionnelle	1	90	/	1	1,11

Tableau 29: Consommation énergétique des PAC (d'après [93])

2.2 Potentiel

Pour évaluer le potentiel du déploiement des PAC, nous ne considérerons que les PAC air/eau, et ce pour plusieurs raisons. Les PAC sont considérées comme remplacement d'un système existant pour des bâtiments déjà construits. Il est donc compliqué de faire des travaux importants pour installer des PAC sol/eau. De plus, elles présentent comme avantages d'être facilement réalisables sur le plan technique et abordables sur le plan économique.

Les PAC air/eau génèrent du bruit lors de leur fonctionnement. C'est pourquoi, afin d'obtenir une dispense de permis d'urbanisme, elles doivent être situées à minimum 3 m des limites mitoyennes des habitations [42]. Cette limite n'est malgré tout pas suffisante pour assurer un niveau de confort acoustique suffisant [94].

Sur base de ce constat, l'hypothèse suivante est émise : pour respecter un environnement sonore calme, seuls les bâtiments ouverts sur 4 façades ou semi-mitoyens sont pris en considération. Cela permet d'assurer une distance minimale entre les différentes habitations et les échangeurs des PAC. Ce type de bâtiment correspond à 54,9 % des logements de Welkenraedt [7], soit 2.329 installations potentielles.

Il convient aussi de noter que les bâtiments autres que résidentiel ne sont pas étudiés dans le cas présent, car leur dimensionnement aurait été trop complexe.

2.3 Dimensionnement

Parfois, il est plus intéressant du point de vue économique d'investir dans une PAC légèrement sous-dimensionnée par rapport aux besoins. Cela signifie que, pendant les périodes de forte demande, la PAC ne peut pas combler l'entièreté de la demande. Le surplus de la demande est alors couvert par une résistance électrique d'appoint. Ce mode de fonctionnement est appelé bivalent-parallèle.

Il existe donc un optimum économique entre la puissance de la pompe à chaleur et celle de la résistance électrique. Par pas de 1 kW au travers de l'exploration de la monotone de chaleur, il est possible d'estimer la puissance qui offre l'optimum économique.

La monotone (Figure 40) a été construite sur base du profil de demande type de chaleur pour l'ECS et le chauffage d'un bâtiment résidentiel en province de Liège [78]. La valeur moyenne en Wallonie pour cette demande, 19.339 kWh, a été utilisée comme référence [63].

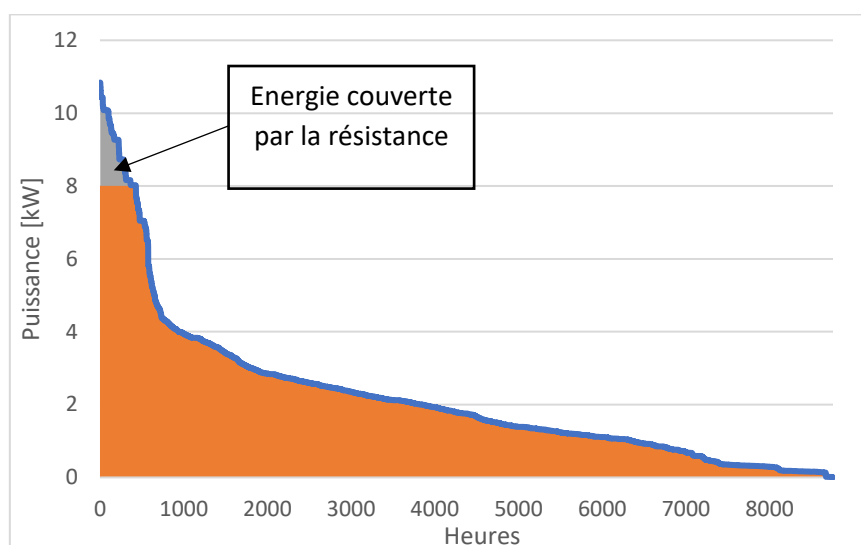


Figure 40: Monotone de chaleur - bâtiment résidentiel type de la province de Liège (d'après [78])

A partir des paramètres définis dans le Tableau 30, le dimensionnement optimal a été calculé comme étant de 8 kW de PAC et de 3 kW de résistance électrique. La PAC permet de couvrir 97,6 % du besoin de chaleur, soit 18.872 kWh thermiques. La consommation totale d'électricité est de 7.207 kWh.

Il est important de noter que des travaux de rénovation doivent être effectués avant d'installer une PAC. Cela permet de modifier la monotone de chaleur, de sorte que la puissance optimale est réduite. Cela a aussi pour effet de changer la rentabilité du projet.

2.4 Résultats

Economique

Paramètre	Valeur	Unité
FPS	2,8	-
Demande	19.339	[kWh]
Investissement PAC	920	[€/kW]
Investissement résistance	80	[€/kW]
Entretien	23,2	[€/kW]
Prix moyen d'achat de l'électricité en 2018 [29]	29,37	[c€/kWh]
Taux d'indexation	2	[%]

Tableau 30: Paramètres de calcul - PAC (d'après [78])

Les aides possibles sont reprises au Tableau 33. Afin d'avoir une base commune au niveau des primes "habitation", le revenu médian est utilisé comme référence pour le calcul [7]. La prime s'élève donc à 4.000 € pour une PAC de 8 kW.

Le LCOH résultant est 0,128 €/kWh. Contrairement au résultat obtenu pour le réseau de chaleur, le taux d'actualisation (r) est défini à 0%, car l'installation est considérée comme payée en une fois [90] et sa durée de vie est considérée être égale à 20 ans.

Impact carbone

L'impact CO₂ est donné par le TEWI (équivalent réchauffement climatique total). Il correspond à la somme de deux éléments : l'impact lié au fluide caloporteur, pendant et après utilisation, ainsi que les impacts liés à la consommation d'électricité pendant la période de fonctionnement [95].

$$TEWI = GWP_{100} * L * n + GWP_{100} * m * (1 - \alpha_{recyclage}) + n * E * \beta$$

avec:

- GWP_{100} : potentiel de réchauffement climatique du fluide caloporteur, par ex. 1.800 [kgCO₂/kg fluide] pour le R 407 C.
- L : masse du fluide perdu lié à l'étanchéité, soit 0,072 [kg/an]
- n : durée de fonctionnement = 20 [an]
- m : masse initiale du fluide caloporteur dans la PAC = 2,4 [kg]
- $\alpha_{recyclage}$: taux de recyclage du fluide après la durée de vie = 75 [%]
- E : quantité d'électricité consommée par la PAC, en [kWh/an]
- β : intensité carbone du mix électrique belge = 456 [kgCO₂/MWh] (réf. Centrale TGV)

$$TEWI = 1.800 * 0,072 * 20 + 1.800 * 2,4 * (1 - 0,75) + 20 * 7.206,9 * 456$$

$$TEWI = 69.399 \text{ kgCO}_2$$

Mais si l'on considère les émissions liées au mix électrique de 2030, à savoir 150 kgCO₂/MWh [96], le TEWI vaut :

$$TEWI = 25.293 \text{ kgCO}_2$$

Et enfin, si l'on considère l'intensité carbone du secteur électrique belge actuel, soit 262 kgCO₂/MWh [97], l'on obtient :

$$TEWI = 41.436 \text{ kgCO}_2$$

L'impact carbone est très dépendant de l'intensité carbone du mix énergétique. Prendre la référence d'une centrale TGV pénalise les PAC. Il est donc utile de définir une valeur de référence. Puisque l'objectif de ce travail vise la période 2030 et que la durée de vie de l'installation est de 20 ans, nous considérerons donc le mix énergétique belge à l'horizon 2030. Une PAC émettra ainsi 25.293 kgCO₂ pour produire 386,8 MWh. L'intensité carbone est donc de 65,4 kgCO₂/MWh.

3. Solaire thermique

La technologie solaire thermique permet de récupérer l'énergie solaire et de la transformer sous forme de chaleur. Elle permet de produire de la chaleur en appoint sans émettre de polluants et donc, de répondre à un besoin en ECS et/ou chauffage, de manière propre.

Le secteur solaire thermique est un secteur très mature pour lequel un marché existe depuis plus de trente ans. Depuis 1990, à Welkenraedt, le marché du solaire thermique s'est essentiellement développé via des installations domestiques. La Figure 41 illustre bien la tendance du marché à la hausse, avec un boom lors de la mise en place du système Soltherm et des aides financières attenantes.

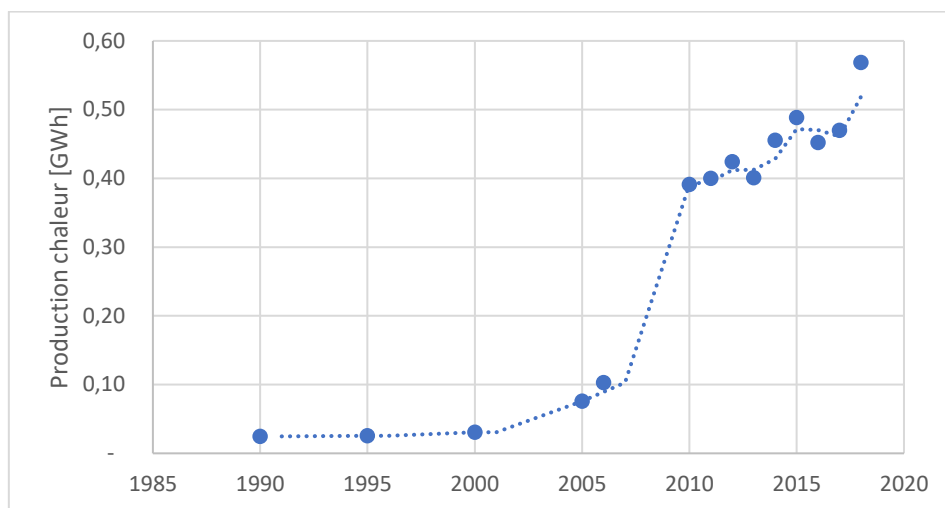


Figure 41: Evolution de la production de chaleur à partir de solaire thermique à Welkenraedt (SPW – communication interne)

3.1 Potentiel

Bien que la surface de toiture disponible soit très importante, elle ne peut pas être complètement exploitée pour les installations solaires. Une grande installation signifie une plus grande couverture des besoins en énergie, mais aussi un plus petit rendement de l'installation [98].

Il y a donc une valeur optimale à déterminer entre la couverture des besoins et la fraction utilisable de l'énergie solaire. Pour ce faire, une hypothèse sur la taille des installations a été émise : on limite volontairement la taille de l'installation à 5 m².

Cette surface correspond à la valeur recommandée par la méthode de dimensionnement PACER pour un logement de 4 personnes [99]. Par manque de données concernant la consommation des bâtiments de

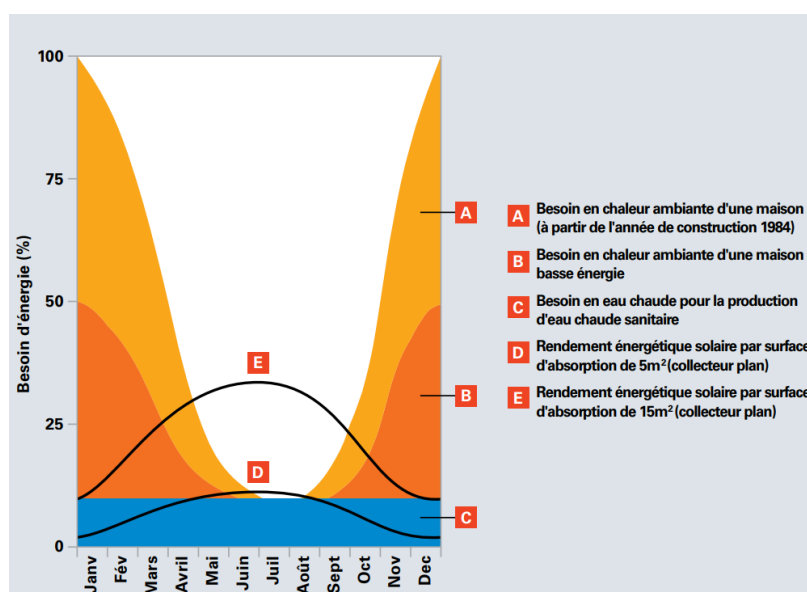


Figure 42: Chauffage d'appoint solaire sans stockage saisonnier [98]

type "autre", ainsi que par mesure conservatrice, les installations sur ce type de bâtiments seront aussi limitées à 5 m².

On considère qu'en Wallonie, il est possible de récupérer entre 300 et 450 kWh de chaleur par m² de capteur solaire [100]. La moyenne de l'intervalle, soit 375 kWh/m², sera donc utilisée comme production de référence. Une installation de 5 m² pour une habitation produira ainsi 1.875 kWh/an, soit 10 % de sa demande totale en chaleur.

A cela, il faut soustraire les installations existantes. La Figure 41 nous montre la production des installations existantes. Sur base des dernières valeurs de production, et si l'on considère une surface de 5 m² par installation, cela correspond à 303 installations préexistantes.

Les résultats sont repris dans le Tableau 31 :

Catégorie	Surface totale après installation PV [m ²]	Surface après limitation [m ²]	Nombre de sites théoriques	Energie récupérable [MWh]
Habitations	62.443	4.539	984	1.702
Autre	35.726	875	183	328
Existants	-	-	- 303	- 568
Total	98.169	5.414	864	1.462

Tableau 31: Potentiel toiture - solaire thermique

De tous ces sites, seuls 20 % sont destinés à recevoir des installations d'une surface inférieure à 5 m². Les 80 % restants peuvent accueillir une installation de 5 m² ou plus.

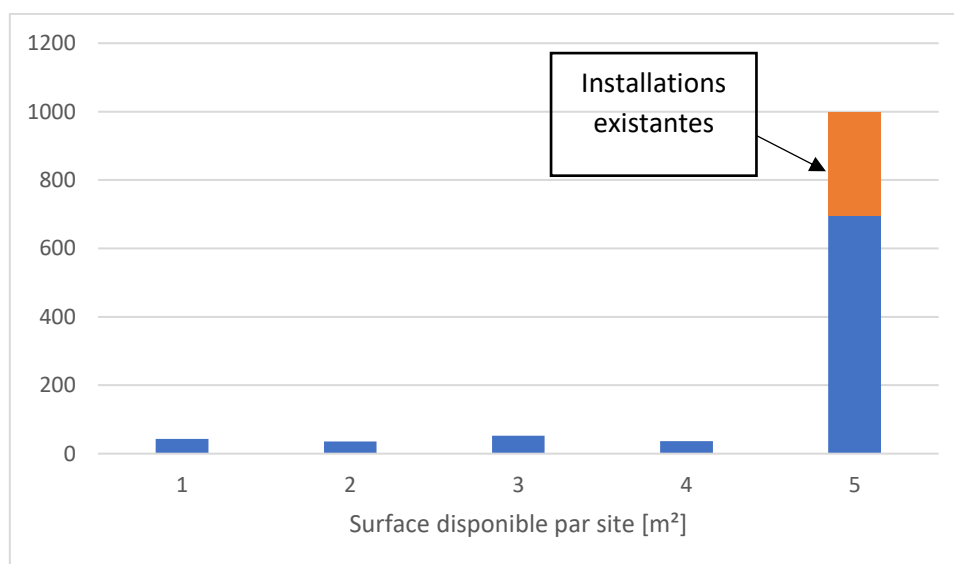


Figure 43: Répartition des sites – solaire thermique – selon leur surface

3.2 Résultats

Economique

Ici, le calcul va se faire de manière illustrative pour les bâtiments pour lesquels l'installation de panneaux solaires thermiques sont considérés comme un appoint à leur chaudière gaz.

Paramètre	Valeur	Unité
Production	375	[kWh/(m²*an)]
Surface	5	[m²]
Investissement solaire thermique	874	[€/m²]
Entretien	14,08	[€/m²]
Prix moyen d'achat du gaz en 2018 [29]	6,25	[c€/kWh]
Rendement chaudière gaz	90	[%]
Economie annuelle	375	[kWh]
Taux d'indexation	2	[%]

Tableau 32: Paramètres de calcul - solaire thermique (d'après [78])

Les aides possibles sont reprises dans le Tableau 33. Ces aides sont identiques à toutes les installations de production de chaleur renouvelable. Comme précédemment, le revenu médian est utilisé comme référence pour le calcul de la prime. Le montant s'élève à 3.000€ pour une installation de 5 m².

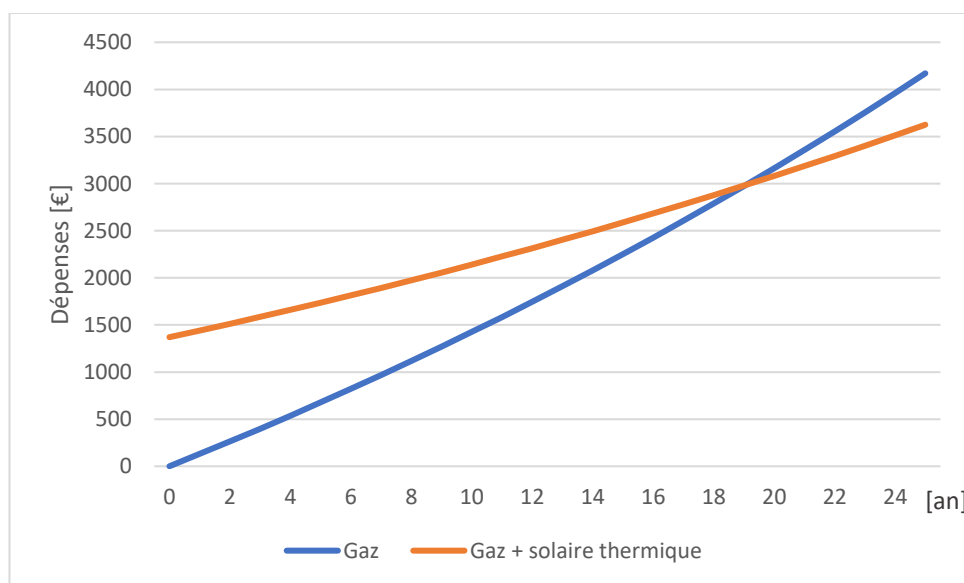


Figure 44: Impact d'une installation solaire thermique sur les dépenses

A la fin des 25 années d'exploitation, l'installateur est gagnant. Les bénéfices engendrés par l'installation permettent de l'amortir sur 20 ans. Après cette période, la chaleur produite sera donc gratuite pendant 5 ans.

Le LCOH résultant, calculé avec : $r = 0$ [%] ; $t = 25$ [an] est de 0,067 €/kWh.

Impact carbone

Le solaire thermique est souvent considéré comme une technologie propre qui permet de produire de la chaleur sans émettre aucun polluant. Ce discours est vrai lorsqu'on ne considère que la période de fonctionnement. Par contre, si l'on considère aussi la fabrication des panneaux, le discours change. Les panneaux deviennent alors de (faibles) émetteurs de carbone.

La littérature n'est pas unanime sur l'ensemble des émissions liées aux panneaux solaires thermiques. Les valeurs recensées varient fortement, allant de 20 à 305,2 kgCO₂/m² [101], [102].

Dans l'optique de correspondre au mieux à une situation réelle, la valeur de 150 kgCO₂/m² est prise comme valeur de référence.

3.3 Aides

Le tableau ci-dessous reprend toutes les aides identifiées dans le cadre de l'installation de panneaux solaires thermiques en Wallonie. Ces primes sont d'ailleurs les mêmes pour les installations de PAC ou encore de chaudière biomasse. A noter que, pour les installations résidentielles, seule la prime habitation existe.

Nom	Instance à contacter	Public cible	Description
Primes Habitation	SPW Energie	Particuliers	Prime proportionnelle aux revenus
UDE	SPW Economie	Entreprises	Aide à l'investissement
Déduction fiscale pour investissements économeurs d'énergie	SPW Energie	Entreprises	Déduction fiscale de 13,5 %
ADISA	SPW Agriculture	Agriculteurs	Aide financière pour les agriculteurs
UREBA	SPW Energie	Organismes publics	Prime proportionnelle à l'investissement

Tableau 33: Aides financières de la Région wallonne- chaleur verte

4. Bois-énergie

Une chaudière bois est une alternative aux chaudières traditionnelles fonctionnant au gaz ou au mazout. Le principe de fonctionnement étant exactement le même, il permet de remplacer les installations fonctionnant aux énergies fossiles, par des installations fonctionnant à l'énergie renouvelable. Le combustible est de la biomasse sous forme de bois : pellets, sciure, bûches, ...

4.1 Potentiel

Théoriquement, cette technologie peut remplacer sans aucun souci les installations traditionnelles. Le seul point technique susceptible de poser problème serait la place liée au stockage requis. En effet, les chaudières reliées au gaz de ville ne nécessitent pas de stockage. Passer à une chaudière biomasse signifie donc la nécessité de consacrer un espace supplémentaire dédié à la production de chaleur.

La plupart des chaudières bois fonctionnent avec des pellets comme combustible. Un m³ de pellets possède un PCI approximatif de 3.000 kWh [57]. Si l'installation est réapprovisionnée en combustible à cinq reprises par an, le volume de stockage nécessaire est de 1,3 m³. Une chaudière bois est dès lors envisageable sans entraîner une perte significative d'espace.

Sur les 4.242 logements de la commune, 90 % seront considérés comme recevables à l'installation d'une chaudière bois. Cette valeur est choisie arbitrairement, car même si un volume de stockage est nécessaire, il n'est pas conséquent. Finalement, 3.818 sites sont donc disponibles.

4.2 Résultats

Economique

Paramètre	Valeur	Unité
Demande	19.339	[kWh]
Investissement chaudière bois	644	[€/kWth]
Entretien	44	[€/kWth]
Prix pellet (premier semestre 2020) [103]	5,8	[c€/kWh]
Rendement chaudière	90	[%]
Taux d'indexation	2	[%]

Tableau 34: Paramètres de calcul - bois-énergie (d'après [78])

A nouveau, le revenu médian est utilisé comme référence pour le calcul de la prime. Le montant s'élève à 4.000 € pour une installation de 11 kW.

Le LCOH résultant, calculé avec : $r = 0$ [%] et $t = 20$ [an] est de 0,096 €/kWh.

Impact carbone

En considérant le facteur d'émission de 45,6 kg CO₂/MWh [73], la filière bois-énergie domestique émet 980 kg CO₂/an, soit 50,7 kgCO₂ par MWh d'énergie finale consommée.

5. Se chauffer de manière durable en 2030

L'essentiel des habitations de la commune de Welkenraedt ont recours au gaz et au mazout comme vecteurs énergétiques en vue de produire de la chaleur. Et pourtant, une chaleur verte, sans recours aux énergies fossiles, est envisageable.

Une installation de production de chaleur a une durée de vie moyenne de 20 à 30 ans. Logiquement, entre 33 et 50 % des systèmes de chauffage doivent être changés pendant la période 2020 – 2030. Le défi est donc de réussir à mettre en place une transition allant d'une installation fossile vers une installation verte. C'est pour cela que l'objectif suivant est fixé :

« La commune de Welkenraedt vise à fournir 20 % de ses logements en chaleur renouvelable d'ici 2030 ».

Ainsi, 848 logements seront ciblés et 16,4 GWh de chaleur seront issus de production renouvelable. Cela se traduit au travers d'un objectif SMART de la façon suivante:

- **Spécifique** : L'objectif est défini et ciblé. Il détaille de manière concrète la vision pour la production de chaleur renouvelable pour les habitations.
- **Mesurable** : La consommation d'énergie. Il suffit d'observer si l'équivalent de la consommation des 20% est bien couvert par la production des nouvelles installations renouvelables.
- **Atteignable** : Entre un cinquième et un tiers des nouvelles installations de chauffage sont concernées. Il y a donc un large public qui est majoritairement favorable à cette transition.
- **Réalisable** : Techniquement et financièrement, l'objectif est valable. Les technologies considérées sont matures et sont déjà présentes dans divers logements wallons.
- **Temporellement défini** : Une date butoir en 2030 pour voir la réalisation de l'objectif.

Quelles technologies ?

Comme la chaleur renouvelable peut être produite par diverses technologies, il est fort probable que l'ensemble de ces technologies se retrouvent déployées, mais à des degrés variables. C'est ce que nous allons essayer d'examiner ci-dessous.

- **Solaire thermique**

Le potentiel d'installation global est assez faible puisque les surfaces de toits sont dédiées en premier lieu au PV. Cette technologie se retrouve sur le terrain depuis déjà 30 ans. La tendance historique à Welkenraedt traduit une augmentation de l'ordre de 0,03 GWh chaque année. Continuer avec cette tendance permet de produire, à terme, 0,3 GWh d'origine solaire.

Ce serait 20 % du potentiel solaire thermique atteint en 2030.

- **PAC**

Les pompes à chaleur ne sont pas les solutions les plus économes. Malgré tout, il s'agit d'un des rares systèmes qui présente une très bonne synergie avec des panneaux photovoltaïques. L'électricité produite par les panneaux va être consommée par la PAC pour fournir de la chaleur

(autoconsommation fictive). Ce type de système permet d'obtenir un LCOH de 0,086 €/kWh pour une installation de 4 kW_c. Il est alors compétitif.

Il n'en reste pas moins que sans l'installation PV, c'est la solution la plus coûteuse. Son déploiement en est donc limité. On ne considérera ainsi que 5 % des sites potentiels qui passeront à la PAC, soit 116 habitations, pour une couverture de 2,2 GWh.

- **Réseau de chaleur**

En 2030, il est impensable de mettre en œuvre un réseau à l'échelle de la ville. Pourtant, il est intéressant d'avoir un projet témoin dans la commune, pour justement en montrer la pertinence. On considérera donc la mise en place d'un réseau à l'échelle d'un quartier, soit 50 maisons alimentées en chaleur et 1 MWh de chaleur couverte.

- **Chaudière bois**

20 % des installations avec chaudière(s) passent au bois-énergie comme source de chaleur. Les 382 systèmes produisent 7,4 GWh.

Pour finir, en 2030, en considérant le mix de chaleur défini ci-dessus, la production de chaleur renouvelable s'élèvera à 18,3 GWh, ce qui représente une couverture des besoins de 22 %.

Technologie	LCOH [€/kWh]	Emissions CO ₂ ⁵ [kgCO ₂ /MWh]	Economie en énergie primaire [%]	Installations potentielles
Chaudière gaz – ρ= 90%	0,085	278,9	référence	-
Chaudière bois	0,096	50,7	0 ⁶	3.818
Réseau de chaleur- quartier	0,066	46,4	8	1
Réseau de chaleur – centre-ville	0,071	46,4	8	-
PAC	0,128	65,4	16	2.329
Solaire thermique	0,067	16	100	864
Chaudière mazout – ρ= 90%	0,098	340	0 ⁷	-
Chaudière gaz à condensation ρ= 110%	0,073	228,2	18	-

Tableau 35: Résumé des caractéristiques des différents moyens de production de chaleur verte

Il est intéressant de noter que les hypothèses ont été effectuées en supposant que l'on remplace une chaudière gaz. Dans le cas où c'est une ancienne chaudière au mazout qui est remplacée, l'intérêt est bien plus important, autant du point de vue économique qu'écologique.

⁵ Les émissions sont données par unité d'énergie finale consommée.

^{6,7} Aucune économie n'est réalisée car le rendement est supposé être du même ordre de grandeur que celui de la chaudière de référence.

IX. Roadmap

1. Le contexte énergétique à Welkenraedt en 2030

En tant qu'entité wallonne, la Commune de Welkenraedt voit son contexte énergétique à l'horizon 2030 modelé par les objectifs climatiques de l'Europe et de la Wallonie. Pour rappel, les objectifs wallons sont :

- 37 % de décarbonation par rapport à 2005 ;
- 23,5 % d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute ;
- 23 % d'efficacité énergétique en plus par rapport à 2005 [4].

Afin de rencontrer les valeurs cibles, des actions doivent être prises sur un périmètre régional et local. Les énergies renouvelables vont donc foisonner dans la commune. Des mesures d'efficacité énergétique doivent être prises. Bref, la Commune va devoir jouer un rôle clé dans le secteur énergétique.

En suivant les valeurs wallonnes définies dans le Plan national énergie-climat [4], il est possible de faire une projection des consommations en énergie. En 2030, on estime la consommation en énergie finale totale à 261,3 GWh, et la consommation finale en électricité à 71,4 GWh. La Figure 45 illustre la tendance à la hausse de la consommation électrique, alors que la consommation en énergie de manière générale a tendance à baisser. L'électrification du secteur est bien représentée.

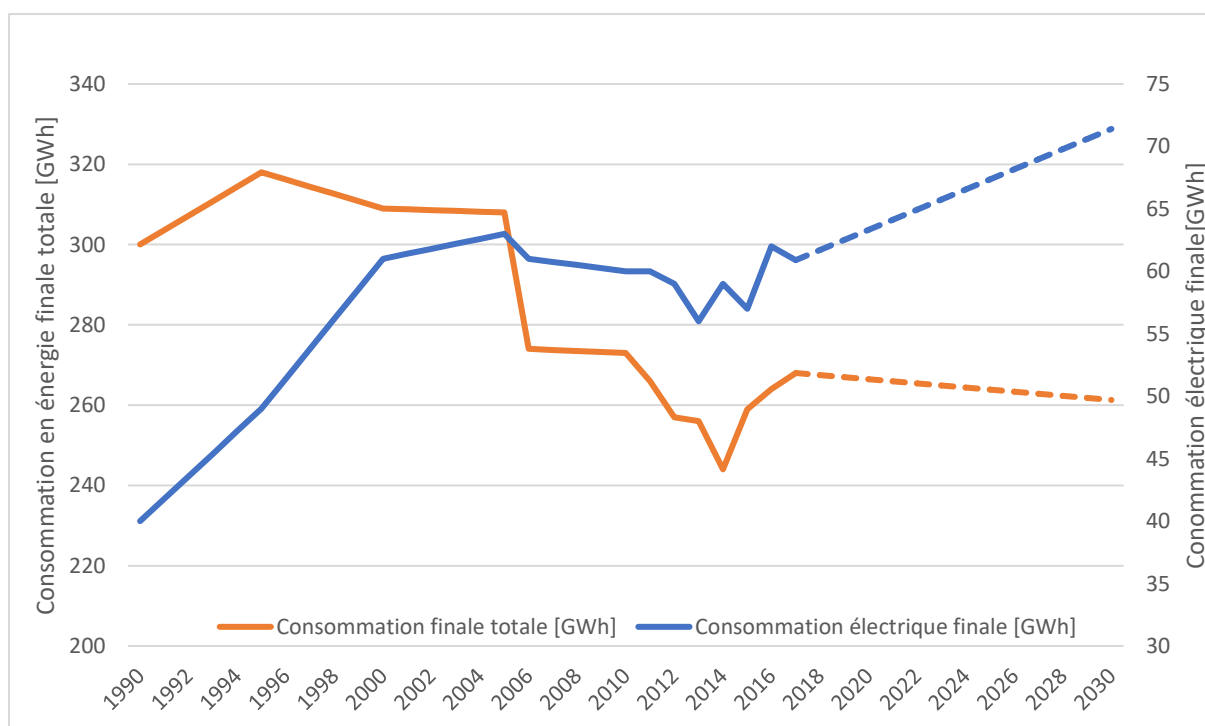


Figure 45: Evolution de la consommation énergétique à Welkenraedt (chiffres : [7])

Les émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie devraient s'élever à 43.870 tonnes pour respecter les objectifs régionaux, et 41.782 tonnes pour respecter les objectifs du PAEDC. Cela

représente, tous vecteurs énergétiques confondus, une intensité carbone de 159,9 tCO₂/GWh, ou 159,9 kgCO₂/MWh.

Cette valeur se rapproche de celle du réseau électrique. On considère, en 2030, que le réseau électrique belge émettra 150 kgCO₂/MWh [96].

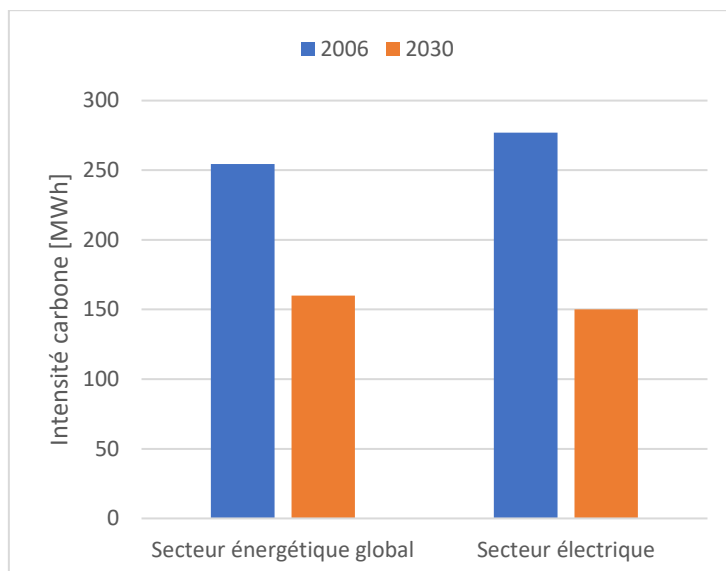


Figure 46: Intensité carbone de l'énergie

L'horizon 2030 voit ainsi les émissions de CO₂ diminuer de 40 % par rapport à celles de 2006⁸. Le secteur énergétique se modernise et tend à passer vers des technologies propres. Le gaz devient un vecteur énergétique polluant, puisqu'il est 1,6 fois plus polluant que l'ensemble du secteur énergétique.

Ce travail vise, au travers de ces propositions, à mettre en place des actions afin d'atteindre ces valeurs pour 2030. Ne prendre aucune mesure signifie s'éloigner des objectifs climatiques et, à terme, ne pas les atteindre.

⁸ 2006 est l'année de référence choisie pour le PAEDC de Welkenraedt.

2. Scénarios

2.1 Scénario 1 : « business as usual »

Ce scénario correspond à un scénario sans changement d'habitudes et sans prise de mesures supplémentaires vis-à-vis des énergies renouvelables. Il projette le contexte actuel dans le futur, en 2030. Aucune action supplémentaire n'est retenue. La Commune n'opère plus comme un acteur dans la transition énergétique. La consommation en énergie augmente jusqu'à atteindre 290,9 GWh (projection selon [4]).

Performance économique

Le LCOE (Levelized Cost Of Energy) est le coût complet d'une énergie fournie par un système de production. Le LCOE correspond à l'ensemble des coûts de production sur la quantité d'énergie produite pendant la période de fonctionnement de l'installation. Le recours au LCOE et au LCOH va permettre de comparer les différentes énergies et les divers scénarios entre eux.

Le LCOE est donné par :

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

avec :

- I_0 : investissement initial, en [€]
- S : subside, en [€]
- C_t : coûts d'opération et de maintenance, en [€/an]
- r : le taux d'actualisation, défini à 2 [%]
- E_t : électricité produite, en [kWh/an]
- t : durée de vie, équivalant à 20 [an]

Pour le scénario 1, le LCOE traduira l'électricité achetée au réseau, et le LCOH la chaleur provenant d'une chaudière au gaz ($\eta = 90\%$).

Nous avons ainsi LCOE = 0,364 €/kWh et LCOH = 0,085 €/kWh

Performance CO₂

Dans le contexte local de l'entité de Welkenraedt, cela signifie une évolution naturelle des secteurs énergétiques. On estime la consommation en énergie finale totale à 290,3 GWh. Malgré l'augmentation de la consommation, les émissions de CO₂ diminuent. La diminution est très légère par rapport aux émissions de 2006 : on passe de 69.636 à **65.226 tCO₂/an**.

Cette diminution s'explique par l'intensité carbone du mix belge : même si la Commune ne prend pas de mesures, ce n'est pas le cas ailleurs. L'ensemble du secteur voit ses émissions diminuer. Le bilan carbone communal profite d'un effet d'aubaine et voit ses émissions diminuer.

2.2 Scénario 2 : « master plan »

Ce scénario correspond au scénario défini dans ce travail. Il vise à mettre en œuvre les objectifs énoncés pour chaque filière renouvelable. L'objectif de ce scénario est de proposer des actions et des mesures à prendre afin d'atteindre les ambitions climatiques du PAEDC. Les mesures prises aux niveaux régional et national sont considérées comme effectives.

D'ici 2030, les actions suivantes seront effectuées:

- Electricité
 - Photovoltaïque : 9 MW_c supplémentaires installés
 - Eolien : 2 MW de puissance installée
 - Cogénération : mise en place d'une unité de 232 kW_e
- Chaleur
 - Cogénération : mise en place d'une unité de 290 kW_e
 - Biomasse – chaudière miscanthus : installation d'une unité de 100 kW
 - Réseau de chaleur : création d'un réseau de quartier pour 50 habitations
 - PAC : équipement de 116 habitations
 - Solaire thermique : couverture de 20 % du potentiel restant
 - Chaudière bois : équipement de 382 habitations

Performance économique

Nous allons comparer, avec le scénario de base, les LCOE et LCOH et estimer un coût global du système.

LCOE :

- PV : 0,076 €/kWh pour 8.221 MWh
- Eolien : 0,051 €/kWh pour 4.380 MWh
- Cogénération : 0,057 €/kWh pour 1.670 MWh
- Réseau : 0,364 €/kWh pour 57.138 MWh

Le coût global du système électrique nous donne un LCOE de 0,304 €/kWh. En considérant la consommation en 2030 de 71,4 GWh, la solution nous permet d'économiser 4.248.542 €.

LCOH :

- Cogénération : 0,057 €/kWh pour 1.503 MWh
- Biomasse – chaudière miscanthus : 0,052 €/kWh pour 210 MWh
- Réseau de chaleur : 0,056 €/kWh pour 870 MWh
- PAC : 0,128 €/kWh pour 5.220 MWh
- Solaire thermique : 0,067 €/kWh pour 300 MWh
- Chaudière bois : 0,056 €/kWh pour 17.190 MWh

Le recours aux solutions proposées permet d'économiser 353.694 €/an par rapport à la solution « business-as-usual ».

Performance carbone

Le recours aux technologies renouvelables permet d'éviter, par an, l'émission de 10.821 tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, soit 15,5 % de réduction des émissions par rapport à celles de l'année de référence, 2006.

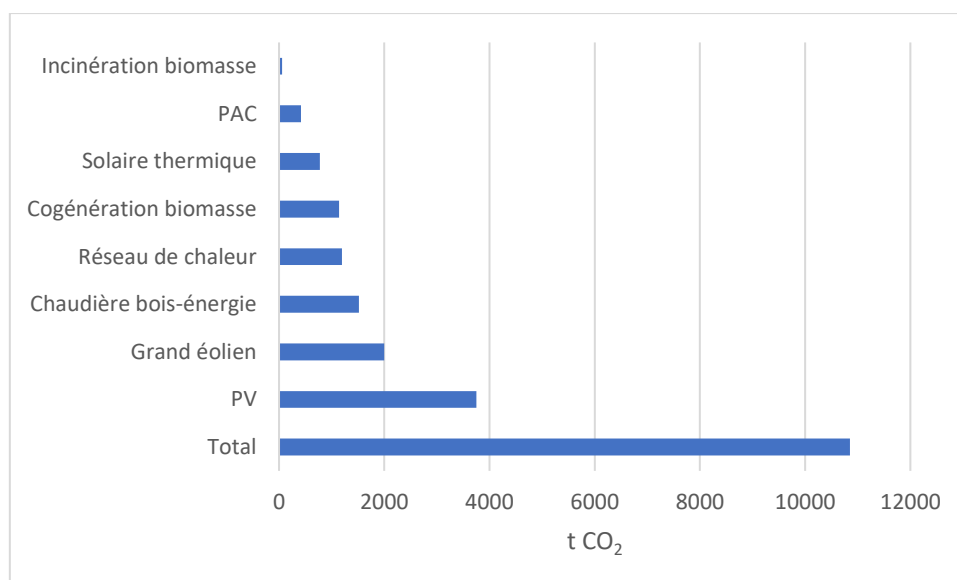


Figure 47: Economie de CO₂ - scénario "masterplan"

2.3 Scénario 3 : « potentiel technique maximum »

Dans ce scénario, tout le potentiel disponible est exploité. Aucune contrainte économique n'est considérée. Il permet d'évaluer le potentiel total disponible de la commune. Seules les contraintes physiques et pratiques définies dans ce travail sont respectées.

En considérant tout le potentiel disponible, nous obtenons :

- PV : 33,5 GWh (sol et toit)
- Eolien : 8,8 GWh (2 grandes éoliennes et 5 petites)
- Biomasse : 10 GWh ($\eta_{\text{générale}}$ de 90 %)
- Réseau de chaleur : 19,3 GWh (on alimente l'équivalent de 1.000 habitations du centre-ville)
- Solaire thermique : 1,5 GWh
- Chaleur verte : 20,6 GWh (25 % des logements: 2/3 couverts par une chaudière bois-énergie ; 1/3 couvert par une PAC)
- **Total : 93,6 GWh**

Théoriquement, il est possible d'exploiter 96,6 GWh d'énergie renouvelable, pour une économie de 29.763 tonnes de CO₂/an, soit 43 % des émissions de CO₂ de 2006.

3. Evaluation multicritère

Déterminer quelle solution mettre en œuvre en priorité passe par une analyse multicritère.

Pour chaque solution, une évaluation des différents critères est réalisée.

Pour chaque critère, une échelle est créée, avec comme maxima les meilleures performances obtenues à l'aide des solutions proposées, et en minima, le moins bon résultat parmi les propositions. Pour certains critères difficilement quantifiables, une autre échelle est utilisée. On répertorie plusieurs éléments dans cette catégorie, dont le nombre déterminera la valeur de l'échelle. A chaque élément, la valeur de 0 est attribuée s'il est recensé dans le projet, 1 dans le cas contraire.

Les critères sont ensuite regroupés en catégories, puis pondérés. Ces catégories sont elles-mêmes sujettes à une pondération entre elles, de sorte que la somme de toutes les pondérations permet d'obtenir 100%. Plus le pourcentage obtenu sera élevé, plus le projet sera considéré comme intéressant. On cherchera donc à développer en priorité les projets avec la valeur la plus élevée possible.

Catégorie	Critère	Pondération [%]
<i>Environnement</i>		30
	1 Economie de CO ₂	50
	2 Impacts liés à la construction	15
	3 Impacts liés à la biodiversité	35
<i>Social</i>		30
	4 Finançable et accessible par les citoyens	40
	5 Création d'emplois et soutien à l'économie locale	35
	6 Impacts liés à l'utilisation	25
<i>Economique</i>		25
	7 Investissement initial	20
	8 LCOE	80
<i>Mise en œuvre</i>		15
	9 Ressource humaine et mise en route	70
	10 Temps de mise en œuvre	30

Tableau 36: Détails des pondérations de l'évaluation

Explicitation des critères :

1. Quantité de CO₂ économisée annuellement à l'aide du projet. Les valeurs de 456 kgCO₂/MWh pour l'électricité et de 251 kgCO₂/MWh pour la chaleur sont choisies comme émissions de référence (base : centrale TGV et chaudière gaz). L'unité définie est [tCO₂/an].
2. Les impacts liés à la construction sont répertoriés au nombre de 4 : charroi, occupation du sol, risque, bruit.
3. Les impacts liés à la biodiversité sont répertoriés au nombre de 5 : qualité du sol, qualité des eaux, pollution lumineuse, déchets, danger présenté par l'installation.

4. Par "finançable et accessible", on sous-entend la possibilité de la réappropriation citoyenne des moyens de production. Cela peut se traduire par une solution susceptible d'être mise en place directement par un citoyen chez lui ou bien l'implication et la prise de participation dans un plus grand projet. Si un citoyen peut fournir des moyens financiers, 1 point est attribué et s'il peut prendre part à la réalisation, un deuxième point est accordé.
5. Comme son nom l'indique, il s'agit du nombre d'emplois créés par le projet. L'unité retenue est l'équivalent temps plein.
6. Les impacts liés à l'utilisation sont répertoriés au nombre de 3 : charroi, bruit, qualité de l'air.
7. Investissement initial = la somme à mobiliser pour financer le projet. Plus elle est élevée, plus elle constitue une barrière à l'investissement. Une valeur faible est plus intéressante, car elle traduit un accès plus aisé à la mise en oeuvre de cette solution.
8. Le LCOE permet de comparer les énergies entre elles. Plus la valeur est faible, plus il est intéressant d'investir dans cette énergie.
9. Ce critère permet d'évaluer la prise en main du projet par la Commune et de quantifier l'inertie du projet. Si un projet nécessite beaucoup d'intervenants autres que les membres de l'Administration communale, le projet n'est plus uniquement sous le "contrôle" de la Commune. De plus, la communication entre les différents intervenants a tendance à ralentir le processus. 2 points sont attribués si la Commune est seule maitre du projet, 1 si 2 intervenants sont nécessaires (ex : Commune et coopérative), 0 s'il y a 3 intervenants ou plus.
10. La durée nécessaire pour effectuer toutes les démarches nécessaires à la réalisation du projet. L'unité retenue est le nombre de semestres.

Le détail des évaluations est repris dans le Tableau 37 de la page suivante, tandis que le résultat global de chaque solution est synthétisé ci-dessous :

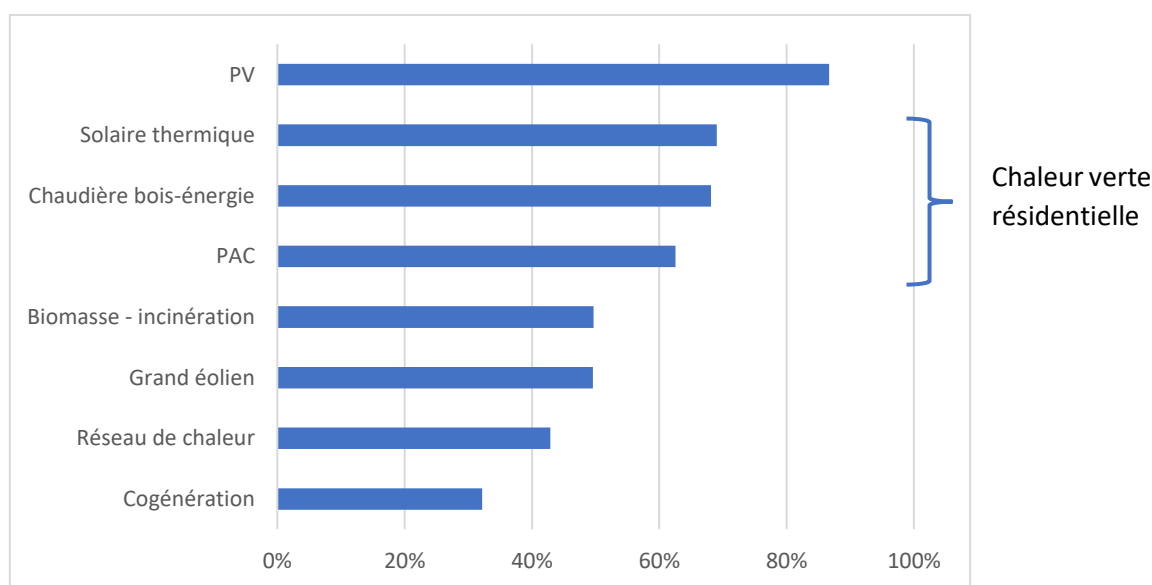


Figure 48: Résultats de l'évaluation multicritère

Solution	Environnement				Social		Economique		Mise en œuvre	
	CO ₂	Construction	Biodiversité	Finançable & accessible	Economie locale	Utilisation	Investissement	LCOH/LCOE	Ressource humaine	Temps
PV	3.749	0	0	2	5,16	0	7.200.000	0,0764	2	2
Petit éolien ⁹	22	1	0	2	0,1	1	475.000	0,4934	1	2
Grand éolien	1.997	4	3	1	2,6	2	2.640.000	0,0513	0	10
Incinération biomasse	58	1	2	0	0,1	0	70.000	0,0522	2	1
Cogénération biomasse	1.139	3	5	0	1,25	3	1.782.240	0,0568	0	10
Réseau de chaleur	1.196	3	3	1	0	2	639.910	0,0562	0	8
PAC	416	0	0	2	0	1	417.600	0,128	2	1
Solaire thermique	727	0	0	2	0,06	0	219.200	0,067	2	1
Chaudière bois-énergie	1.517	0	1	2	0	0	1.178.088	0,096	2	1

Tableau 37: Valeurs de l'évaluation des différentes solutions du scénario masterplan

⁹ A titre purement théorique, nous étudierons la mise en place de 5 petites éoliennes pour 2030.

4. Roadmap

4.1 2030

Cette roadmap est une étude quantitative basée sur les projets d'énergies renouvelables à mettre en œuvre à l'horizon 2030. Elle est établie en vue d'arriver à des objectifs de diminution de carbone pour atteindre les objectifs de la Convention des Maires.

Elle établit, sur base des actions proposées dans ce travail, les étapes, les coûts et les économies mis en place par le scénario 2 – « master plan ». D'ici 2030, on considère pour les secteurs ci-dessous la mise en place de:

- Electricité
 - Photovoltaïque : 9 MW_c supplémentaires installés
 - Eolien : 2 MW de puissance installée
 - Cogénération : mise en place d'une unité de 232 kW_e
- Chaleur
 - Cogénération : mise en place d'une unité de 232 kW_e
 - Biomasse – chaudière miscanthus : installation d'une unité de 100 kW
 - Réseau de chaleur : création d'un réseau de quartier pour 50 habitations
 - PAC : 116 habitations en sont équipées
 - Solaire thermique : 20% du potentiel
 - Chaudière bois : 382 habitations en sont équipées

Dans l'hypothèse on l'on arrive à mettre en œuvre tous les projets envisagés, et étant donné qu'ils concernent des entités différentes, on peut supposer sommer les résultats (qui ne sont donc pas interdépendants). Les différents coûts et bénéfices attendus sont repris dans ce tableau :

Solution	Coût [€]	Bénéfices annuels [€]	Economie de CO ₂ [tCO ₂ /an]
PV	7.200.000	2.364.503	3.749
Solaire thermique	219.300	5400	777
Chaudière bois-énergie	1.178.088	-189.090	1.517
PAC	417.600	-224.460	416
Grand éolien	2.640.000	1.369.626	1.997
Biomasse - incinération	70.000	6.888	58
Réseau de chaleur - quartier	639.910	25.056	1.196
Cogénération	1.782.240	555.542	1.139
Total	14.147.038	3.913.465	10.849

Tableau 38: Résumé - roadmap

En réalisant une mise en œuvre des solutions selon la priorité définie dans le point précédent, l'ensemble des solutions proposées résultent en une diminution de 20 % des émissions de CO₂.

Les figures suivantes représentent, sous forme de graphiques, les résultats du scénario étudié (Figure 49 et Figure 50), ainsi que des comparaisons avec les autres scénarios (Figure 51).

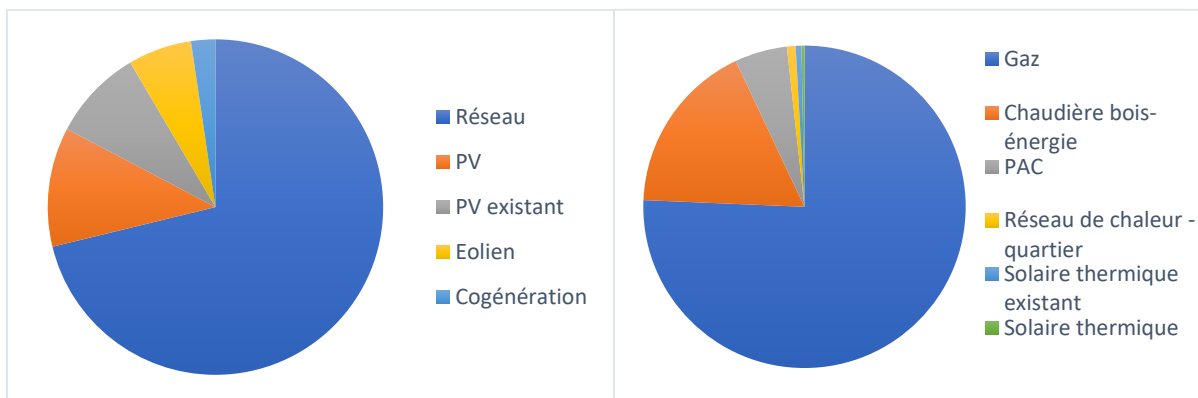


Figure 49: Mix électrique à l'horizon 2030

Figure 50: Sources de chaleur dans les habitations



Figure 51: Résultats 2030 des scénarios modélisés

4.2 2050

A très long terme, en 2050, la Commune de Welkenraedt vise à devenir un territoire neutre en carbone. Cela signifie que l'entièreté de la demande en énergie du territoire doit être couverte par la production locale des En.R [5].

Afin d'atteindre cet objectif, il convient de:

- Réduire l'ensemble des consommations énergétiques à un tiers de la consommation de 2010 ;
- Exploiter les énergies renouvelables selon un scénario semblable au scénario «potentiel technique maximum» défini dans un délai plus long: non plus à l'horizon 2030 mais 2050 ;
- Faire correspondre production et consommation d'énergie dans le périmètre de la commune.

En se basant sur les projections à l'horizon 2030 définies à la page 83, la Figure 52 a pu être obtenue. Elle met en évidence l'urgence de la situation, aussi bien pour le déploiement des énergies renouvelables que pour une politique ambitieuse de réduction des consommations. Sans être irréaliste, la vision de l'énergie à l'horizon 2050 nécessite des engagements très ambitieux à mettre en place le plus rapidement possible.

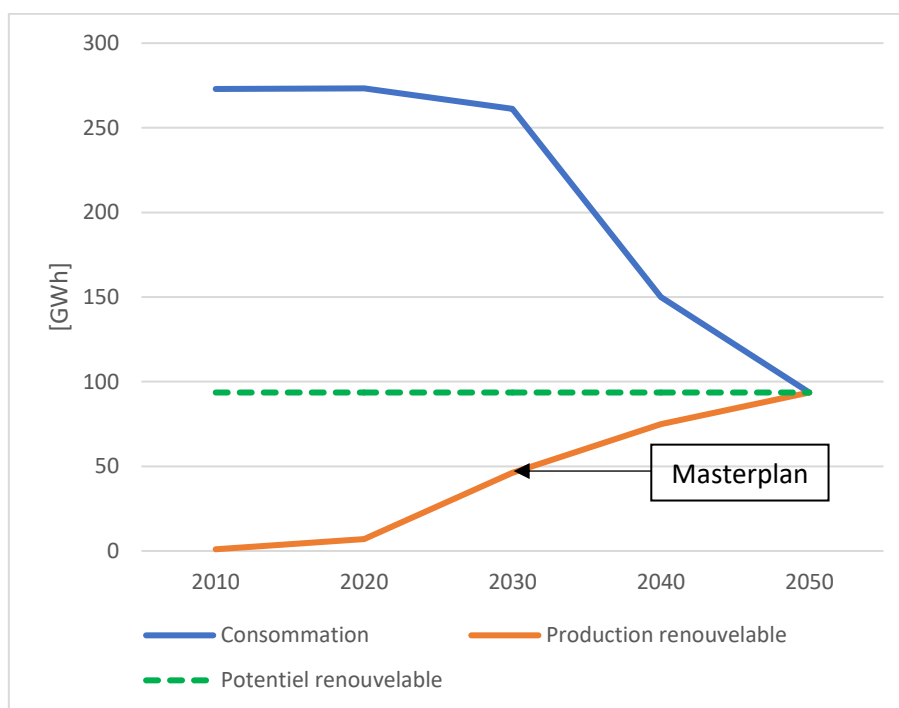


Figure 52: Vision 2050

5. SWOT

Le scénario « masterplan » proposé dans ce travail fait l'objet d'une analyse SWOT (**S**trengths, **W**eaknesses, **O**pportunities, **T**hreats). Cette analyse permet d'établir la pertinence et la cohérence des actions proposées.

Il importe de traiter ces points de manière totalement objective. La lecture de la matrice SWOT peut susciter des critiques amenant à des réflexions et des recommandations pour un lecteur futur. L'analyse SWOT a été abordée en suivant trois aspects :

- Environnement ;
- Economique ;
- Social.

La matrice SWOT a été nourrie de pistes de réflexion proposées dans un rapport de l'IWEPS sur les futurs réseaux énergétiques en Wallonie [104]. Cette matrice se trouve aux pages 95 et 96.

Pistes de réflexion

Participation citoyenne

Ce scénario repose essentiellement sur une coopération citoyenne. Ce n'est qu'au travers d'une prise de conscience à l'échelle du territoire qu'il peut fonctionner. Pour cela, il convient que tous les citoyens puissent s'inscrire dans des actions locales de participation. Les coopératives constituent dans ce cas de bons outils.

Impliquer un grand nombre de citoyens nécessite de consacrer beaucoup de temps et de ressources dans des moyens de communication. Des aides financières ou taxes peuvent agir comme incitants pour induire le lancement de la transition énergétique.

Actions recommandées

Dans un futur proche, il est recommandé à la Commune de concrétiser les actions suivantes :

- « renforcement des axes de formation spécifiques des élus en matière d'énergie afin de les aider à comprendre et à s'emparer réellement des enjeux liés aux En.R ;
- promotion auprès des citoyens de l'économie sociale de type collaborative ;
- formation des citoyens aux diverses formes de management collaboratif ;
- mise en place de formule permettant aux citoyens de s'impliquer» [104].

Ces actions, essentiellement basées sur la communication, ont donc pour but de favoriser la participation citoyenne sur laquelle repose l'ensemble des objectifs proposés dans ce document.

	Forces	Faiblesses
Social	▪ Les citoyens bénéficient d'une énergie locale à des prix compétitifs ▪ Perception durable de l'énergie ▪ Précarité énergétique maîtrisée au travers des coopératives ▪ Rassemblement et participation de la population autour de projets locaux ▪ Conscientisation d'un besoin de changement et compréhension des enjeux par davantage de citoyens	▪ Certaines formes d'inégalité peuvent apparaître ▪ L'ensemble des concepts liés à la transition énergétique n'est pas compréhensible par tous les citoyens, ni le besoin de s'adapter ▪ Manque de cohésion sociale ▪ Phénomène NIMBY
Environnement	▪ Réduction des émissions de gaz à effet de serre ▪ Indépendance vis-à-vis des ressources fossiles ▪ Le nombre croissant d'installations décentralisées, autonomes et/ou pluri-acteurs augmente la résilience du système ▪ Utilisation rationnelle du territoire : une faible surface du sol supplémentaire est transformée et les ressources disponibles sont exploitées durablement ▪ Les déchets sont en grande partie recyclables	▪ Utilisation de ressources dont les stocks sont limités (terres rares) ▪ Perturbations possibles induites par les installations
Economique	▪ Toutes les technologies envisagées sont matures ; on ne compte pas sur une rupture technologique pour résoudre les problèmes ▪ Retombées économiques locales ▪ Différents modèles de financement sont envisageables ▪ Création d'emplois locaux ▪ Sécurité d'approvisionnement ▪ Coût de production marginal nul	▪ Investissement nécessaire pour permettre au réseau d'accueillir des quantités importantes d'En.R. Ces dernières étant intermittentes, il devra être capable de gérer ce paramètre au travers, probablement, de moyens de stockage. ▪ Les communautés d'énergie renouvelable ont un avenir incertain ▪ La compétitivité de certaines technologies traditionnelles les favorise ▪ Investissement initial important

	Opportunités	Menaces
Social	▪ Renforcer l'éducation nécessaire aux changements de comportement ▪ Nouveaux mécanismes de solidarité ▪ Diminuer drastiquement la précarité énergétique au travers de mécanismes solidaires ▪ Réappropriation de l'énergie et possibilité de la gérer démocratiquement	▪ Participation citoyenne pas au rendez-vous ▪ Risques d'opposition à certains projets ▪ Changement de décisions politiques ▪ Désinformation
Environnement	▪ Exigences énergétiques plus strictes ▪ Territoire neutre en carbone	▪ Un retard dans la mise en œuvre du scénario se traduit par une économie de CO₂ "perdue"
Economique	▪ De nouveaux emplois non délocalisables apparaissent : services de maintenance, monitoring, recyclage, ... ▪ Moment clé pour les GRD de restructurer et réinventer le réseau de distribution ▪ Recentralisation de l'économie de manière locale et résiliente pour résister en cas de crise	▪ Les acteurs du secteur électrique déjà présents érigent des barrières au changement de mode de production ▪ Peu de contrôle de la dynamique des entreprises ▪ Crises qui limitent l'approvisionnement en matériaux et/ou la mise en place de projets ▪ Aide publique insuffisante

Tableau 39: Matrice SWOT du scénario proposé par le masterplan

Conclusion

Le développement des énergies renouvelables est une réalité à laquelle la Commune de Welkenraedt va devoir se confronter dans un futur proche. Certaines de ces énergies sont déjà partiellement développées sur le territoire communal, mais le potentiel global reste presque intouché.

Ce travail a, dans un premier temps, permis d'évaluer pour chaque filière renouvelable, le potentiel disponible sur l'ensemble du territoire communal. Ensuite, il a introduit des objectifs se voulant réalistes. Ces derniers ont pour vocation d'être cohérents à la fois avec le potentiel disponible sur la totalité de la commune et sur le plan technico-économique. Un scénario concret est présenté. Au travers de différents objectifs définis précisément pour chaque filière renouvelable, ce scénario offre une vision des énergies renouvelables permettant d'atteindre, en 2030, une diminution de 20 % des émissions de CO₂ par rapport à 2006.

Le master plan propose d'installer différentes technologies pour produire de l'électricité à l'horizon 2030. Il est possible de considérer que les énergies renouvelables couvrent 29 % de la consommation électrique en 2030. Les objectifs proposés permettent, à eux seuls, d'économiser l'émission de 6.508 tCO₂/an grâce à la production annuelle de 20,6 GWh d'électricité.

De même, il est proposé dans ce document d'avoir recours à diverses solutions pour produire de la chaleur. La chaleur d'origine renouvelable permet de couvrir 31 % de l'ensemble de la demande en chaleur des logements. Cela correspond à économiser annuellement 4.341 tCO₂ et à fournir 25,651 GWh de chaleur en 2030.

La vision énoncée dans ce travail démontre l'importance d'une implication citoyenne dans le déploiement des énergies renouvelables. Les citoyens doivent faire partie de la transition énergétique pour assurer une transformation aisée avec une dimension sociale.

Si l'implication citoyenne est assurée, la seconde difficulté réside dans l'investissement initial des En.R, souvent important, constituant une certaine barrière à leur installation. Une fois les premiers investissements effectués, les bénéfices obtenus pourront être réinvestis dans d'autres projets d'énergies renouvelables, supprimant ainsi cette barrière. Bien qu'il soit impossible de prédire le futur, la sortie du nucléaire, prévue en 2025, peut nous laisser spéculer sur une augmentation forte du prix de l'énergie ainsi qu'un attrait sans cesse grandissant pour les En.R.

Pour conclure, il m'apparaît évident que le recours aux énergies renouvelables est la voie que doit suivre la Commune de Welkenraedt. Bien que les propositions émises dans ce travail ne permettent que d'atteindre la moitié des objectifs climatiques de la Commune pour l'horizon 2030, ces dernières sont réalistes et envisageables. En diminuant les consommations au travers, par exemple, du Trias Energetica et en adoptant une politique décarbonée du transport, rien n'empêche la Commune de Welkenraedt d'atteindre la totalité de ses objectifs d'ici 2030.

Discussion

L'intermittence des En.R est un problème n'ayant été que peu abordé dans ce travail. Le réseau de distribution a été supposé se comporter en tant que batterie pour les producteurs. Or, cette considération transfère la problématique du stockage des producteurs aux GRD.

Le besoin de stockage apparaît surtout pour l'énergie produite sous forme électrique. Les systèmes de production d'énergie thermique disposent, pour la plupart, d'un système de stockage sous la forme d'un réservoir d'eau chaude, ce qui explique une nécessité moins importante de stockage.

Le recours aux batteries comme moyen de stockage de l'électricité est certes la solution la plus aisée à mettre en œuvre à l'échelle domestique, mais non la plus sensée à l'échelle de la commune. Les questions d'approvisionnement des ressources, des impacts environnementaux et de la complexification du système empêchent le déploiement en tout lieu de cette solution technologique.

Une autre piste de solution, simple, efficace et durable serait de changer nos habitudes et notre relation à l'autoconsommation. Outre le devenir incertain des communautés d'énergies renouvelables, un projet de l'UE, Energy Neighbourhoods, a permis de mettre en évidence qu'un comportement rationnel vis-à-vis de l'énergie permet de réduire, sans difficultés, les consommations de 10 % [105]. Pourquoi ne pas appliquer le même principe à l'autoconsommation? De même, les entreprises peuvent, elles aussi, adopter une nouvelle politique de production. Tels les "balancing agent" d'Elia, les gros consommateurs industriels peuvent réduire leur consommation dans les moments de faible disponibilité de l'énergie et, à l'inverse, l'augmenter durant les périodes de grande disponibilité.

Bibliographie

- [1] Climate Action Tracker, « Temperatures », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>. [Consulté le: 07-juin-2020].
- [2] Latvia and the European Commission, « Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States », 2015.
- [3] European Commission, « 2030 climate & energy framework ». [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Consulté le: 07-juin-2020].
- [4] Service public fédéral belge, « Plan national énergie-climat 2021-2030 », 2019.
- [5] Commune de Welkenraedt, « Plan d'Actions en faveur de l'Energie Durable et du Climat », 2018.
- [6] P. Bertoldi, D. B. Cayuela, S. Monni, et R. Piers De Raveschoot, « Comment développer un Plan d'Action en faveur de l'Energie Durable (PAED) ».
- [7] Iweps, « WalStat - Détail de l'entité WELKENRAEDT (Commune) ». [En ligne]. Disponible sur: https://walstat.iweps.be/walstat-fiche-entite.php?entite_id=63084. [Consulté le: 27-mai-2020].
- [8] CAPRU, « Communes wallonnes en chiffres », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.capru.be/communes-wallonnes-en-chiffres>. [Consulté le: 05-juin-2020].
- [9] M.A.S. – Marktanalyse & Synthese, « Enquête publique sur le projet de Plan national intégré Énergie-Climat ».
- [10] European Commission, « Clear – WP2.1: Consumer survey 1 – Attitudes, opinion, drivers and barriers and satisfaction with regard to Renewable Energy Systems », p. 1-59, 2015.
- [11] A.L, « Les entreprises belges face aux défis de l'énergie », *La Libre*, 2018.
- [12] CCE, « La transition énergétique vers une économie bas carbone, tout en garantissant la sécurité d'approvisionnement et des prix compétitifs », 2019.
- [13] S. Lacassagne, C. Crzych, M. Buron Jacob, et C. Maurer, « Fabrique de transition démocratique », 2020.
- [14] Energie partagée, « Les retombées économiques locales des projets citoyens », 2019.
- [15] CWaPE, « Communautés d'énergie renouvelable ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cwape.be/?dir=4.9.6>. [Consulté le: 05-juin-2020].
- [16] SPW, « Code du développement territorial », 2017.
- [17] SPW, « Permis-on-web environnement: Outil de recherche des rubriques ». [En ligne]. Disponible sur: http://environnement.wallonie.be/cgi/dgrne/aerw/pe/__drup/chx_rub_liste.idc. [Consulté le: 30-mars-2020].
- [18] Resa, « Production décentralisée ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.resa.be/raccordement/production-decentralisee/>. [Consulté le: 30-mars-2020].
- [19] SPW, « Projet Informatique de Cartographie Continue (PICC) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/b795de68-726c-4bdf-a62a-a42686aa5b6f.html>. [Consulté le: 12-mai-2020].

- [20] APERe, « Méthodologie d'estimation de potentiel des différentes filières renouvelables », 2017.
- [21] FRW, « Règlement général sur les bâtisses en site rural - Le Pays de Herve », 2001.
- [22] European Commission Joint Research Centre, « JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) ». [En ligne]. Disponible sur: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP. [Consulté le: 24-avr-2020].
- [23] CREG, « Rapport annuel 2019 », 2020.
- [24] Gouvernement Wallon, *Arrêté du Gouvernement wallon approuvant le règlement technique pour la gestion des réseaux de distribution d'électricité en Région wallonne et l'accès à ceux-ci*. 2011, p. 27325.
- [25] RESA, « ELECTRICITE: TARIFS NON PERIODIQUES – 2020 ». p. 1-24, 2020.
- [26] Elia, « Capacités d'accueil de nouvelles unités de production décentralisée ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.elia.be/fr/infrastructure-et-projets/nos-infrastructures/capacites-accueil-de-nouvelles-unites-de-production-decentralisee>. [Consulté le: 07-mai-2020].
- [27] A. Grundy, « European power prices may not recover until 2025, report claims », *PV Tech*, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pv-tech.org/news/european-power-prices-may-not-recover-until-2025-report-claims>. [Consulté le: 18-mai-2020].
- [28] IRENA, *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [29] European Commission, *EU energy in figures*. 2019.
- [30] RESA, « Le tarif prosumer ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.resa.be/tarifs/le-tarif-prosumer/>. [Consulté le: 30-avr-2020].
- [31] A. Jäger-Waldau, « PV Status Report 2019 », 2019.
- [32] SPW Energie, « Coefficients économiques keco applicables pour la filière photovoltaïque de plus de 10 kw pour la période du 1^{er} janvier 2020 au 30 juin 2020 », 2019.
- [33] CWaPE, « Coefficients économiques (keco) applicables pour les différentes filières de production d'électricité verte à partir du 1^{er} janvier 2019 jusqu'à l'entrée en vigueur du mécanisme réformé », 2018.
- [34] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, J. I. Bilbao, et R. Corkish, « A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules », in *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, IntechOpen, 2018.
- [35] A. Louwen, W. G. J. H. M. Van Sark, A. P. C. Faaij, et R. E. I. Schropp, « Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development », *Nat. Commun.*, vol. 7, 2016.
- [36] C. Haveaux, « La Démocratie énergétique va soutenir la renaissance d'une industrie photovoltaïque en Europe », *Renouvelle*, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.renouvelle.be/fr/actualite-internationale/la-democratie-energetique-va-soutenir-la-renaissance-dune-industrie>. [Consulté le: 18-mai-2020].
- [37] Will Blyth *et al.*, « Low carbon jobs: The evidence for net job creation from policy support for energy efficiency and renewable energy », 2014.
- [38] Gouvernement Wallon, « Cadre de référence pour l'implantation d'éoliennes en Région

wallonne », 2013.

- [39] APERe, « Production électrique renouvelable », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.apere.org/fr/production-electrique-renouvelable>. [Consulté le: 24-mai-2020].
- [40] Ventis SA, « Etude d'incidences sur l'environnement, projet éolien à Thimister-Clermont », 2019.
- [41] Véronique Waroux, « Le petit éolien », 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.veroniquewaroux.info/le-petit-eolien/>. [Consulté le: 23-mai-2020].
- [42] SPW, *Code du Développement territorial*. 2019.
- [43] SPW, « Permis d'Environnement - Rubrique 40 Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'eau chaude ». [En ligne]. Disponible sur: http://environnement.wallonie.be/cgi/dgrne/aerw/pe/rubri/chx_rub_liste.idc. [Consulté le: 24-avr-2020].
- [44] Compagnons D'Eole, APERe, Vents D'Houyet, et E.R.B.E, « Vade-mecum pour l'implantation d'éoliennes de faible puissance en Wallonie », 2012.
- [45] Forskningscenter Risø et Norske Veritas, « Design of Wind Turbines », Det Norske Veritas et Wind Energy Dept. Wind Energy Dept. Risø National Laboratory, Éd. Copenhagen, 2002, p. 286.
- [46] Suisse Eole, « Die Website für Windenergie-Daten der Schweiz ». [En ligne]. Disponible sur: <https://wind-data.ch/tools/>. [Consulté le: 23-mai-2020].
- [47] V. De Smedt, « Réalisation d'un cadastre des possibilités de production et de récupération d'énergie sur la station de Wegnez », HEL, 2018.
- [48] C. De Schoutheete, « Freins et leviers au développement éolien en Wallonie », Namur, 2018.
- [49] APERe, « Eolien: rumeurs et réalités », 2019.
- [50] SPW, « Analyse des coûts et des bénéfices socio-économiques du secteur nucléaire et du secteur éolien », 2014.
- [51] Gouvernement Wallon, *Arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement, contenant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture (M.B. 12.09.2014)*. 2014.
- [52] STATBEL, « Exploitations agricoles et horticoles - Plus de chiffres ». [En ligne]. Disponible sur: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles/plus>. [Consulté le: 12-mai-2020].
- [53] AIDE, « Ouvrages de collecte et de traitement », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aide.be/epuration/ouvrages-de-collecte-et-de-traitement>. [Consulté le: 12-mai-2020].
- [54] J. Hansen, « Sustainable water and resource management », *Notes de cours, Université de Luxembourg*, 2019.
- [55] OEW, « PanoraBois Wallonie - Edition 2019 », 2019.
- [56] R. Grovel, F. Pasquier, T. Eñaut Helou, D. Barthelet, et E. Boittin, « Bois énergie : L'approvisionnement en plaquettes forestières », 2014.
- [57] ValBiom, « Les Combustibles Bois », 2015.
- [58] ValBiom, « Cadastre de la biomasse wallonne valorisable énergétiquement-2015 », 2016.

- [59] SPW-DG03-DEMNA-DEE, *Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (REEW 2017)*. Jambes, 2017.
- [60] L. Somer, « De la biomasse locale pour réduire les factures d'énergie. Visite de terrain à Tihange ».
- [61] D. Robinet, « Bilan environnemental et énergétique de la culture du miscanthus », 2009.
- [62] G. GAUTHIER et L. Somer, « Guide pratique de la culture de miscanthus », 2013.
- [63] SPW, « Consommation résidentielle d'énergie », 2018. [En ligne]. Disponible sur: http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/MEN_Focus_1.html. [Consulté le: 16-avr-2020].
- [64] Greenwatt, « Etudes du potentiel d'installation d'unités de biométhanisation sur le territoire du Pays Burdinale Mehaigne », 2012.
- [65] CWaPE, « Vade-mecum relatif à l'injection de biométhane dans le réseau de distribution », 2019.
- [66] B. Verzat, M. Vargas-Gonzales, F. Graveaud, E. Carlu, et GrDF, « Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans les réseaux de gaz naturel », 2015.
- [67] Y. Marenne, « Moyens de production et de stockage 3 », *Notes de cours, Haute Ecole de la Ville de Liège*, p. 1-112, 2018.
- [68] ValBiom, « De la conception à la gestion de son unité de biométhanisation », 2019.
- [69] T. Henrotte, « Utilisation de digestat issu de la Biométhanisation en AB », in *Tour de la Biométhanisation 2020*, 2020.
- [70] C. Heneffe, « Le Règlement européen « Fertilisants » est approuvé par le Conseil », *ValBioMag*, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/le-reglement-europeen-fertilisants-est-approuve-par-le-conseil>. [Consulté le: 21-mai-2020].
- [71] Valbiom, *Installer une chaudière biomasse pour me chauffer j'y pense !* 2020.
- [72] P.-L. Bombeck, « La chaudière biomasse multi-combustible », in *TER'Action*, 2018.
- [73] Energie+, « Emissions de polluants liée à la consommation énergétique ». [En ligne]. Disponible sur: https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/les-emissions-de-polluants-liee-a-la-consommation-energetique/#Emissions_de_CO2. [Consulté le: 18-avr-2020].
- [74] Gouvernement Wallon, « Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions sectorielles relatives aux installations de biométhanisation visées par la rubrique 90.23.15 et modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 relatif à la procédure et à diverses mesures ». 2014.
- [75] S. Kettani, « Une blanchisserie qui n'a pas à rougir de ses performances énergétiques », *Réactif*, vol. 77, 2014.
- [76] ICEDD, « Bilan énergétique de la Wallonie 2012 », 2014.
- [77] ICEDD, « Profils types de demande de chaleur et monotone », *Energie Plus*. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/donnees/cogeneration4/profils-types-de-demande-de-chaleur-et-monotone/>. [Consulté le: 22-mai-2020].
- [78] S. Pezzutto *et al.*, « Hotmaps Project, D2.3 WP2 Report – Open Data Set for the EU28 », 2019.

- [79] Cluster TWEED, « Réseaux de chaleur en Wallonie », in *Workshop: Réseaux de chaleur en Wallonie*, 2019.
- [80] C. Mignon et C. Heneffe, « Evaluation technico-économique de la micro-biométhanisation à la ferme et de son cadre réglementaire en Wallonie », 2014.
- [81] J. Giuntoli, A. Agostini, R. Edwards, et L. Marelli, « Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions », 2014.
- [82] Climact, 3E, et BPIE, « Stratégie wallone de rénovation énergétique à long terme du bâtiment », 2017.
- [83] SPW Energie, « Guide PEB 2015 », 2016. [En ligne]. Disponible sur: https://energie.wallonie.be/fr/11-15-encodage-d-une-fourniture-externe-de-chaleur-reseau-de-chaleur.html?IDC_PEB=9491&IDD=113768&IDC=9098. [Consulté le: 16-avr-2020].
- [84] Gouvernement Wallon, *Avant-projet de décret relatif à l'organisation du marché de l'énergie thermique et à l'organisation des réseaux d'énergie thermique*. Belgique, 2018.
- [85] Heat Roadmap Europe, « Peta4 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://heatroadmap.eu/peta4/>. [Consulté le: 16-avr-2020].
- [86] Thermos, « THERMOS software », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tool.thermos-project.eu/>. [Consulté le: 28-mai-2020].
- [87] Aalto University, « Module 6 - Energy Distribution: District Heating and Cooling », 2016, p. 1-51.
- [88] B. Möller et S. Werner, « Quantifying the Potential for District Heating and Cooling in EU Member States », 2016.
- [89] Grøn Energi, « The competitiveness of district heating compared to individual heating », 2018.
- [90] Y. Louvet, « Heat Cost Calculations Applied to Solar Thermal Systems LCoH Calculation Method », 2017.
- [91] Conseil et Parlement européen, « DIRECTIVE 2009/28/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE ». 2009.
- [92] J. Doneux, « Les pompes à chaleur dans le contexte bruxellois », in *La pompe à chaleur, du potentiel à Bruxelles !*, 2016, p. 164.
- [93] IWT, « Eindverslag IWT-CO-WP-DIRECT (070662) », 2012.
- [94] A. Dijckmans, « Quelles limites de bruits pour les pompes à chaleur ? », *Les Dossiers du CSTC*, vol. 4, n° 12, p. 2, 2018.
- [95] Energie+, « Pompes à chaleur ». [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-par-pompe-a-chaleur2/pompes-a-chaleur-d2/>. [Consulté le: 30-mai-2020].
- [96] European Commission, « Technical Note - Results of the EUCO3232.5 scenario on Member States », 2019.
- [97] AWAC, « Calcul du FE moyen belge de l'électricité-2013-2017 », 2019.
- [98] Viessmann, « Brochure technique sur le solaire thermique », 2014.
- [99] P. Andre, « Energies renouvelables: technologies et projet Partim: Energie solaire », *Notes de*

cours, Uliège - DSGE, 2019.

- [100] J. Dejonghe, « Carnet de bord de l'utilisateur d'un Chauffe-eau solaire », 2016.
- [101] UNEP, « Technical study report on solar thermal technology lcia methods and lcc models », p. 72, 2015.
- [102] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, et V. Lo Brano, « Life cycle assessment of a solar thermal collector », *Renew. Energy*, vol. 30, n° 7, p. 1031-1054, 2005.
- [103] APERe, « Observatoire des prix de l'énergie », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.apere.org/fr/observatoire-prix>. [Consulté le: 17-avr-2020].
- [104] IWEPS, « Quels réseaux énergétiques pour la Wallonie aux horizons 2030 et 2050 ? », 2018.
- [105] European Commission, « Energy Neighbourhoods2 - The Energy Challenge », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/en2>. [Consulté le: 14-juin-2020].

Autre source :

Outils Excel réalisé par l'ICEDD pour le compte de la SPW, « Commune de Welkenraedt - Bilan communal estimé sur base des bilans énergétiques régionaux », version mars 2020.

Annexes

Annexe 1: Tables de conversion biomasse

Animal	Production de fumier [t/an]	Potentiel méthanogène du fumier [m ³ CH ₄ /t]	Production de lisier [t/an]	Potentiel méthanogène du lisier [m ³ CH ₄ /t]
Bovins: - de 1 an	1,33	30	1	10
Bovins: 1 à 2 an(s)	2,31	30	1,7	10
Bovins: Mâles	2,73	30	2	10
Bovins: Génisses	2,73	30	2	10
Bovins: Laitières	4,2	30	3	10
Bovins: Allaitantes	2,8	30	2	10
Porcins	0,56	30	0,3	10
Poulets	0,014	30	0,02	10

Tableau 40: Table de conversion - biodigestion d'intrants d'élevage (d'après [51])

Produit	Rendement [tMF/ha]	Potentiel méthanogène [m ³ CH ₄ /tMF]	PCI [MWh/t]
Pailles de céréales	4	190	4,06
Menues pailles de céréales	1,2	210	4
Issues de silo	0,075* (surface de culture de céréale)	285	4,06
Feuilles de betteraves	40	54,7	/
Ecart de tri de pommes de terre	2	77	/
Paille de maïs	13	67	1,2
Rafle de maïs grain	2	183	/
Herbe	2	100	/
Dechet verts (tondes)	/	100	/
Miscanthus [61]	17	/	5
Tailli a courte rotation	10	/	3,3
Culture dédié de maïs	45	120	/

Tableau 41: Table de conversion - valorisation de la biomasse (d'après [5], [58])

Résumé

Ce document a été conçu en collaboration avec la cellule POLLEC de la Commune de Welkenraedt (Belgique). En signant la Convention des Maires en 2016, la Commune a pour ambition de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre de 40 % à l'horizon 2030. Pour arriver à ses fins, un passage par les énergies renouvelables est donc nécessaire.

En premier lieu le potentiel disponible et directement déployable a été identifié. Ensuite, des solutions réalistes, mais ambitieuses ont été proposées. Ces dernières visent à répondre à la question des énergies renouvelables à travers un agenda prenant fin en 2030. Au travers de différents scénarios, les bénéfices obtenus en appliquant une transition énergétique ont pu être chiffrés.

Ce travail fournit une stratégie générale pour une perspective à moyen ou long terme de l'énergie. La vision proposée aborde aussi bien les points technique et économique, que social, le tout dans une vision locale de l'énergie.

Mots clés : énergie renouvelable, Welkenraedt, masterplan, 2030

Abstract

This document has been developed in collaboration with the POLLEC cell of the municipality of Welkenraedt (Belgium). By signing the Covenant of Mayors in 2016, the municipality aims to reduce its greenhouse gas emissions by 40% by 2030. In order to achieve this goal, a switch to renewable energies is therefore necessary.

First of all, the available and directly implementable potential has been identified. Then, realistic but ambitious solutions have been proposed. These aim to respond to the issue of renewable energies through an agenda ending in 2030. Through different scenarios, the benefits obtained by applying an energy transition could be quantified.

This work provides a general strategy for a medium to long-term energy outlook. The proposed vision addresses both technical and economic, but also social issues, all within a local vision of energy.

Key words : renewable energy, Welkenraedt, masterplan, 2030