

Travail de fin d'études et stage[BR]- Travail de fin d'études : Atteindre l'indépendance énergétique en province de Luxembourg[BR]- Stage

Auteur : Geçim, Hülya

Promoteur(s) : Quoilin, Sylvain

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil électromécanicien, à finalité spécialisée en énergétique

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20927>

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 Appliquées
Année académique 2023-2024

Atteindre l'indépendance énergétique en Province du Luxembourg

Travail de fin d'études réalisé en
vue de l'obtention du grade de master
"Ingénieur Civil en électromécanique,
à finalité énergétique"

par

Hülya GEÇİM

Promoteur :
QUOILIN Sylvain

Résumé

Au cours des dernières décennies, la transition énergétique, les impacts du changement climatique, et les fluctuations des prix de l'énergie ont incité de nombreuses régions, y compris la Province de Luxembourg, à repenser leur système énergétique pour renforcer leur résilience face à ces phénomènes. Cette étude mène sur la réflexion et sur la quantification de divers scénarios appliqués au mix énergétique de la Province du Luxembourg, visant à proposer des stratégies à long terme pour atteindre l'indépendance énergétique et la neutralité carbone. L'étude présente d'abord les enjeux actuels auxquels est soumise la Province de Luxembourg, tels que les enjeux environnementaux. Une revue de la littérature est ensuite établie au sujet de différentes modélisations établies à l'échelle nationale, régionale, et provinciale, montrant que cette étude succède à un travail préalablement élaboré par le comité PEPS. Une description de la Province de Luxembourg est par la suite établie, permettant de calibrer les modèles de simulation de systèmes énergétiques utilisés : EnergyScope Pathway et EnergyScope TD. L'étude des résultats fournis par ces modèles a été divisée en deux parties : les résultats issus du modèle snapshot (fournis par EnergyScope TD) ont d'abord étudiés. Ces résultats consistent à analyser la sensibilité du mix énergétique par rapport à deux indicateurs : la quantité totale des émissions de gaz à effet de serre autorisés, et le taux d'indépendance énergétique. Il a été observé que la Province présente le potentiel d'atteindre un mix avec un taux d'indépendance énergétique de 89% et presque neutre en carbone. Cela implique une électrification accrue des secteurs de la chaleur et de la mobilité, ainsi qu'un investissement dans le stockage saisonnier des réseaux de chaleur. Des premiers résultats d'un modèle pathway permettant d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2040 ont ensuite été fournis. Cette étude conclut enfin sur la nécessité de développer des analyses plus profondes en vue de proposer des stratégies plus concrètes et plus pertinentes qui peuvent être développés sur le territoire de la Province de Luxembourg.

Abstract

The energy transition, the impacts of climate change, and fluctuations in energy prices have led many regions including the Province of Luxembourg to innovate their energy systems in order to enhance their resilience. This study explores and quantifies different scenarios applied to the energy mix of the Province of Luxembourg and propose long-term strategies to achieve energy independence and carbon neutrality.

The study first presents the current challenges faced by the Province of Luxembourg, such as environmental issues. A literature review discusses about different models developed at national, regional, and provincial levels. A description of the Province of Luxembourg is then provided, followed by the calibration of the energy system simulation models EnergyScope Pathway and EnergyScope TD. The analysis of the results from these models is divided into two parts : the first part examines the results from the snapshot model (provided by EnergyScope TD). These results focus on analyzing the sensitivity of the energy mix concerning two indicators : the total allowable greenhouse gas emissions and the energy independence rate. It was observed that the province has the potential to achieve an energy mix with an energy independence rate of 89% and near carbon neutrality. This involves increased electrification of the heating and mobility sectors, as well as investment in seasonal storage for district heating networks. Preliminary results from a pathway model aiming for carbon neutrality by 2040 were then provided.

The study concludes by emphasizing the need for deeper analyses to propose more concrete and relevant strategies that can be developed within the territory of the Province of Luxembourg.

Remerciements

Je remercie mon superviseur Sébastien DUBOIS de m'avoir offert l'opportunité de réaliser un stage chez Idelux, de m'avoir partagé différentes approches et raisonnements que peut mener un.e ingénieur.e en dehors du cadre académique, et surtout je le remercie énormément pour sa disponibilité et son suivi tout au long de ce travail. Je remercie également le Professeur Sylvain QUOILIN de m'avoir fourni les bases nécessaires de la théorie des systèmes énergétiques et les approches à suivre dans le cadre de ce travail.

Je remercie ensuite mes amies Puhia QALAJ et Kawthar ACHARY pour avoir partagé ces années d'étude

Enfin, je remercie mes parents et ma soeur qui n'ont cessé de montrer leur soutien et de croire en moi dans toutes mes initiatives et mes projets.

Table des matières

Introduction	8
1 Mise en contexte et état de l’art	1
1.1 Enjeux actuels	1
1.2 Etat de l’art	3
1.2.1 Travaux antérieurs et contribution	3
1.2.2 Choix du modèle	3
2 Outils et méthode	5
2.1 Méthode	5
2.2 EnergyScope TD	6
2.2.1 Paramètres d’entrée	6
2.2.2 Optimisation	7
2.2.3 Données de sortie	9
2.3 EnergyScope Pathway	10
3 La Province de Luxembourg	11
3.1 Généralités	11
3.2 Activités	12
3.3 Bilan énergétique	15
3.3.1 Consommation énergétique	15
3.3.2 Production	15
3.4 Potentiel énergétique	17
3.5 Emissions de gaz à effet de serre	19
4 Application à la Province du Luxembourg	20
4.1 Adaptations	20
4.1.1 Taux d’indépendance énergétique	20

4.1.2	Production du bois énergie	22
4.1.3	Moyenne température	23
4.1.4	Modification des paramètres liés aux émissions de CO ₂ ,équ des ressources	24
4.1.5	Importation de l'électricité	25
4.1.6	Taux d'intérêt	26
4.2	Données d'entrée - Demande	26
4.3	Données d'entrée - Ressources	27
4.3.1	Ressources locales	27
4.3.2	Ressources importées	27
4.4	Données d'entrée - Technologies	28
4.4.1	Production d'électricité	28
4.4.2	Chaleur Industrielle	29
4.4.3	Basse température	29
4.4.4	Mobilité	30
4.4.5	Stockage	30
4.5	Autres	30
5	Analyse de sensibilité	31
5.1	Etude de l'indicateur CO ₂	32
5.2	Variation du taux d'indépendance énergétique	38
5.3	Un mix neutre et indépendant	40
5.3.1	Electricité	42
5.3.2	Chaleur industrielle	43
5.3.3	Chaleur moyenne température	44
5.3.4	Chaleur basse température	44
5.3.5	Mobilité	46
5.3.6	Infrastructure	47
5.3.7	Réseau de gaz	47
6	Plan et scénario vers 2050	49
6.1	Plan technique	50
6.1.1	Mix initial, 2015	50
6.1.2	Evolution du mix jusque 2050	51
6.2	Plan économique	57
7	Recommandations, limites et améliorations	58
7.1	Recommandations	58

7.2	Limites	59
7.3	Améliorations	60
	Conclusion	61
A	Données d'entrée - Méthode de calcul	62
A.1	Demande d'utilisation finale de l'énergie au Luxembourg	62
A.1.1	Electricité	62
A.1.2	Transport	65
A.1.3	Chaleur	67
B	Technologies implémentées sur EnergyScope TD et Pathway	70

Liste des symboles et notations

td [-]	Numéro du jour typique
h [heure]	heure
i_{rate} [-]	Taux d'intérêt
c_{inv} [Meuros/GW]	Cout d'investissement par unité de capacité installée
c_{maint} [Meuros/GW]	Cout de maintenance par unité de capacité installée
td [jour]	Jour typique
$lifetime$ [années]	durée de vie
t_{op}	durée d'opération
τ [-]	facteur d'annualisation du cout d'investissement
c_{op} [Meuro/GWh]	cout spécifique de la ressource

Introduction

Au cours des dernières décennies, la transition énergétique, les conséquences du changement climatique, la forte fluctuation et l'imprévisibilité des prix de l'énergie ont entraîné de nombreux pays et régions à repenser et restructurer leurs systèmes énergétiques. L'indépendance énergétique représente aujourd'hui une des stratégies adoptées par nombreuses de ces régions afin d'augmenter leur résilience contre ces phénomènes.

La Province de Luxembourg, comme d'autres régions européennes, a été aussi bien marquée par ces phénomènes, tant au niveau de son activité économique, qu'au niveau de ses citoyens et de ses milieux naturels.

Visant à devenir un territoire à énergie positive, la Province ardennaise belge présente des atouts territoriaux, environnementaux et démographiques lui offrant la possibilité de devenir l'une des premières Provinces belges à s'aligner aux ambitions climatiques européennes et wallonnes.

Cette étude a pour objectif d'étudier différents scénarios appliqués au mix énergétique de la Province de Luxembourg en vue de proposer des stratégies à long termes permettant à la Province d'atteindre l'indépendance énergétique et la neutralité carbone. L'étude s'appuie sur la théorie et les outils numériques qui permettent de modéliser des systèmes énergétiques.

Le travail est divisé en sept chapitres. Le premier chapitre présente les enjeux actuels et une revue de littérature. La méthodologie appliquée et les outils numériques utilisés dans le cadre de cette étude sont présentés dans le second chapitre. Le troisième et quatrième chapitres présentent les caractéristiques principales de la Province de Luxembourg et de l'adaptation des outils numériques à cette dernière. Dans le cinquième et sixième chapitres, les résultats numériques sont présentés et discutés. Enfin, le septième chapitre présente les limitations des modèles utilisés, des recommandations territoriales stratégiques et des recommandations pour des travaux futurs.

Chapitre 1

Mise en contexte et état de l'art

L'étude de l'indépendance énergétique de la Province de Luxembourg répond aux objectifs actuels gouvernementaux en matière d'énergie, de climat et de durabilité. Cette section présente ces objectifs ainsi qu'une revue de littérature afin de présenter les travaux et outils existants précédant cette présente étude.

1.1 Enjeux actuels

La Province du Luxembourg, comme autres régions belges et européennes, est soumise à des stratégies et objectifs définis par différents niveaux de pouvoir présentés à la Figure 1.1.

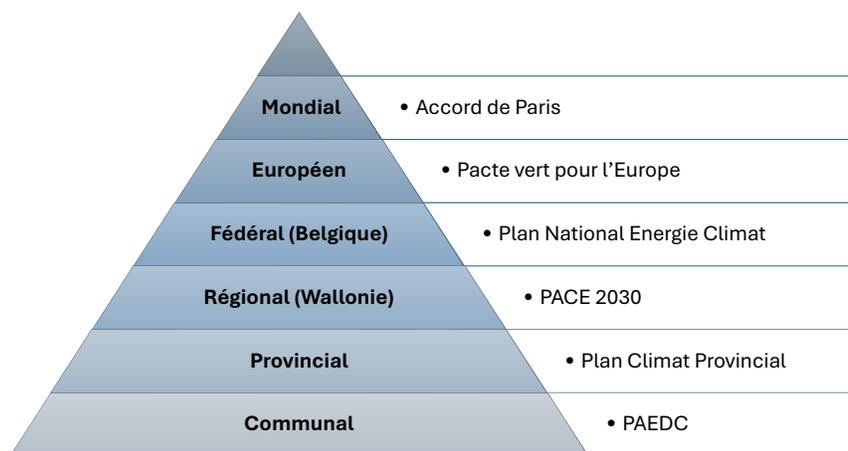


FIGURE 1.1 – Pyramide des différents niveaux de pouvoir et leur stratégie respective en matière de climat, d'énergie et d'économie circulaire.

Les objectifs des différents niveaux de pouvoir sont expliqués plus en détails ci-dessous :

- **Niveau mondial** : L'Accord de Paris réunit presque tous les états du monde, et définit l'objectif à long terme de *contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °* [11].
- **Niveau Européen** : L'Union européenne a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 . Elle implémente une série directives intermédiaires (Pacte Vert) afin d'atteindre cet objectif, dont la réduction des gaz à effet de serre pour l'UE de 55% d'ici 2030.[12]
- **Niveau fédéral (Belgique)** : Soumise aux initiatives européennes, la Belgique a établi le Plan National Energie Climat pour l'intervalle 2019-2030 [14].
- **Niveau régional (Wallonie)** :La Wallonie s'est engagée dans le Plan Air Climat Énergie (PACE) 2030, qui fixe des objectifs régionaux en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'efficacité énergétique, et de développement des énergies renouvelables [13].
- **Niveau provincial (Province du Luxembourg)** La Province de Luxembourg travaille à l'élaboration de stratégies locales en cohérence avec les objectifs régionaux et fédéraux, notamment en matière de transition énergétique et de développement durable. Des initiatives spécifiques sont en cours pour favoriser la production d'énergie renouvelable et l'efficacité énergétique à l'échelle locale[15].
- **Niveau communal** :La plupart des communes de la Province de Luxembourg ont signé la Convention des Maires, et participent donc activement à la transition énergétique à travers les Plans d'Action pour l'Énergie Durable et le Climat (PAEDC). Ces plans visent à réduire les émissions de CO₂ à l'échelle locale et à promouvoir des actions concrètes en faveur du climat. [16]

A ces enjeux climatiques s'ajoute également l'impact conséquent de la crise de l'énergie observée entre 2021 et 2023 sur de nombreux consommateurs finaux européens (y compris les citoyens belges), marquant la forte dépendance des consommateurs par rapport à ces fluctuations et à l'imprévisibilité des prix.

Ce travail vise donc à proposer des stratégies territoriales permettant à la Province de Luxembourg de 1) répondre aux enjeux climatiques actuels, 2) fournir à l'ensemble de ses consommateurs locaux un modèle économique et énergétique suffisamment résilient pour limiter les effets de crise énergétique telle que celle observée entre 2021 et 2023.

1.2 Etat de l'art

1.2.1 Travaux antérieurs et contribution

Au vu des nombreux enjeux actuels, de nombreux scénarios ont déjà été étudiés pour le cas de la Belgique. L'étude la plus récente a été publiée en mai 2024 par le Bureau fédéral du plan, qui présente de nouvelles perspectives énergétiques pour la Belgique d'ici 2050 long terme.[25]

La Wallonie travaille également sur des scénarios énergétiques (non publiques) à l'aide du modèle TIMES, dont les résultats sont repris dans le PACE 2030.

Les résultats de ces modèles et des initiatives mises en place établis à l'échelle nationale et régionale incluent dès lors le territoire de la Province de Luxembourg, définissant différentes perspectives pour cette dernière.

En 2013, un rapport (non public) a été établi par un groupe d'experts, présentant la dynamique PEPS. Ce rapport étudie le mix énergétique de la Province de Luxembourg et développe à l'horizon 2050 trois scénarios exploitant le potentiel énergétique de la Province. Ce travail conclut sur un besoin de réduire la demande de transport dans la Province, d'augmenter l'efficacité énergétique dans le secteur du logement , et que tout mix énergétique futur de la Province nécessite le développement des filières éoliennes, solaires et biomasses en vue de devenir un territoire à énergie positive.

Le rapport PEPS est le rapport le plus récent présentant des scénarios permettant à la Province de devenir un territoire à énergie positive. A ce jour, aucune étude énergétique de la Province utilisant des outils numériques développés et tenant compte des enjeux économiques et environnementaux les plus récents n'a été établie.

La contribution de ce travail est dès lors de proposer différentes stratégies pouvant être mises en place afin de tendre vers un territoire local à énergie positive.

1.2.2 Choix du modèle

Il existe de nombreux modèles qui permettent de modéliser le système énergétique d'une région. Les modèles TIMES et OSeMOSYS et EnergyScope Pathway sont des modèles d'optimisation et de planification à long terme. Les modèles Dispa-SET, Pypsa et Switch permettent de modéliser des systèmes électriques.

Dans le cadre de cette étude, les modèles utilisés sont EnergyScope TD et EnergyScope Pathway. Ces derniers sont en effet adaptés à l'étude de la Province. Il sont des modèles d'optimisation

multi-périodes, définis pour une seule région avec une approche multi-sectorielle, un temps de calcul relativement faible, et sont accessibles au public.

Chapitre 2

Outils et méthode

2.1 Méthode

Cette étude est réalisée en deux parties. A l'aide d'un modèle snapshot (investissement et modélisation sur une seule année), une analyse de sensibilité du mix énergétique de la Province de Luxembourg est en premier lieu réalisée afin d'étudier son évolution et son comportement par rapport à des indicateurs économiques et environnementaux.

En second lieu, un plan d'investissement est établi à l'aide d'un modèle d'investissement sur le long terme permettant de définir les différentes stratégies applicables.

Les modèles numériques utilisés pour la première partie (modèle snapshot) et la seconde (modèle pathways) sont respectivement les modèles EnergyScope TD et EnergyScope Pathways. Ces deux versions d'EnergyScope, dont les caractéristiques principales ont été mentionnées dans le premier chapitre, ont été développés dans l'analyse de mix énergétique de plusieurs pays, y compris celui de la Belgique.[17]

L'application de cet outil à l'échelle belge développée par *Limpens* est utilisée dans l'élaboration de ce travail. Le modèle a cependant été adapté afin de représenter aux mieux les conditions et contraintes actuelles spécifiques à la Province du Luxembourg.

Cette section présente le fonctionnement des deux modèles utilisés dans cette étude.

2.2 EnergyScope TD

Initialement développé en Suisse par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en 2011 [?], EnergyScope TD est un modèle d'optimisation qui conçoit le mix énergétique d'une région donnée. Le modèle opère pour une seule année, avec une résolution temporelle exprimée en heure. Le fonctionnement de ce modèle est divisé en trois étapes illustrées à la Figure 2.1.

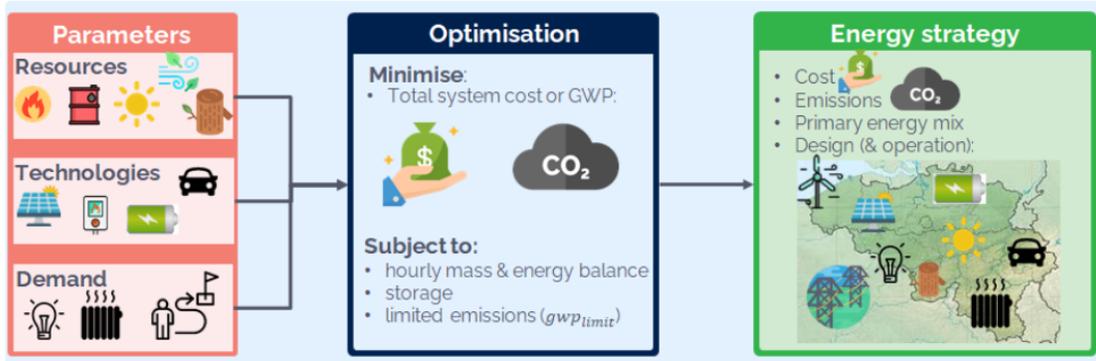


FIGURE 2.1 – Fonctionnement général du modèle EnergyScope TD [10].

Le modèle prend d'abord en entrée une série de paramètres. Ces paramètres sont utilisés pour trouver un mix énergétique optimal, résultant de la résolution d'un problème d'optimisation. Le modèle fournit ensuite en sortie les données qui permettent de quantifier le mix énergétique optimal trouvé.

Ces trois étapes sont décrites plus en détail dans les sections suivantes.

2.2.1 Paramètres d'entrée

Les paramètres fournis en entrée du modèle permettent de caractériser la demande énergétique ainsi que les technologies et ressources disponibles de la région étudiée. Chacune de ces catégories est présentée ci-dessous. Ces données sont fournies par l'utilisateur et sont donc spécifiques à chaque région.

o La demande d'énergie

La demande d'énergie correspond dans ce modèle à la demande d'utilisation finale de l'énergie. Le modèle répartit cette demande énergétique selon quatre usages finaux :

- électricité
- chaleur

- mobilité
- demande non énergétique

Pour chacun de ces usages, la demande est divisée en 3 secteurs distincts : résidentiel, tertiaire et industriel.

o Ressources

Les ressources énergétiques disponibles dans une région peuvent être :

- **Locales** : Les ressources locales sont celles qui sont présentes directement sur le territoire de la région étudiée. Par exemple : le vent, le soleil, la biomasse, les déchets, la géothermie,...
- **Importées** : Les ressources importées sont initialement non présentes sur le territoire de la Province, et nécessitent d'être transportées et généralement achetées pour y avoir accès. Telle que l'essence, le diesel, le mazout, les carburants synthétiques produits ailleurs, la biomasse,...

Chaque ressource est caractérisée par trois paramètres : $avail$ [GWh/an], la quantité de ressource annuelle disponible, gwp_{op} [$ktCO_2_{equ}/GWh$], la quantité de gaz à effet de serre émise par unité énergétique consommée, c_{op} [Meuro/GWh], le cout d'opération de la ressource par unité énergétique consommée.

o Technologies

Les technologies permettent de relier les ressources à la demande énergétique. Toute technologie est alimentée par une ou plusieurs ressources. La technologie convertit ensuite ces ressources pour produire de l'énergie afin de répondre à la demande énergétique. Les technologies sont définies à l'aide de 9 paramètres : c_{inv} [Meuros/GW] le cout d'investissement par unité de capacité installée, c_{maint} [Meuro/GW] le cout de maintenance, gwp_{constr} [$ktonCO_2_{equ}$] la quantité de gaz à effet de serre émis par unité de capacité installée lors de la construction de la technologie, $lifetime$ [années] la durée de vie de la technologie, c_p [-] le facteur de charge, f_{min} [GW] la capacité minimale installée, f_{max} [GW] la capacité maximale installée.

2.2.2 Optimisation

Le modèle a pour objectif d'optimiser son choix de technologies et de ressources pour répondre à la demande, comme illustré à la Figure 2.2.

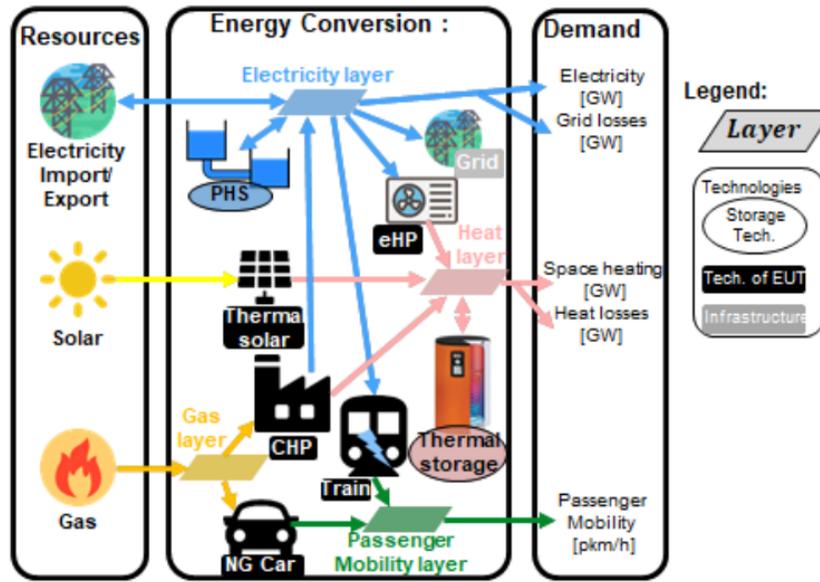


FIGURE 2.2 – Illustration des interactions entre les ressources, technologies et *layers* sur EnergyScope TD [10].

Pour exprimer la conservation de l'énergie ainsi que l'équilibre en tout instant entre la demande, la production et le stockage, le modèle utilise des *layers*.

La résolution du modèle suit deux étapes principales :

- **Étape 1 : Sélection des jours typiques** La sélection des jours typiques consiste à définir des profils de journées "types" que l'on peut rencontrer pendant l'année. Chaque jour typique présente des conditions météorologiques et donc une demande énergétique spécifique. Cette étape initiale construit alors une année de 365 jours (l'année pour laquelle le modèle sera simulé) en attribuant à chacun de ces 365 jours un jour typique. L'année de 365 jours simulée est donc représentée par une série de jours typiques.

Cette optimisation permet ainsi d'éviter les calculs du modèle pour les 365 jours différents de l'année.

- **Étape 2 : Résolution du problème d'optimisation**

Dans le cadre d'EnergyScope TD et Pathway, le problème à résoudre est un problème d'optimisation linéaire, qui vise à minimiser une fonction objective accompagnée d'une série de contraintes physiques et de variables qui constituent les inconnues du problème.

Sur EnergyScope TD, deux fonctions objectives sont implémentées :

- La fonction de coût total, C_{tot} [Meuro/GW], mathématiquement définie par :

$$C_{tot} = \sum_{j \in TECH} (\tau(j)C_{inv}(j) + C_{maint}(j)) + \sum_{i \in RES} C_{op}(i)$$

avec

- j qui représente une technologie, et $TECH$ l'ensemble des technologies,
- i qui représente une ressource, et RES l'ensemble des ressources,
- $\tau(j) = \frac{i_{rate} \cdot (i_{rate} + 1)^{lifetime(j)}}{(i_{rate} + 1)^{lifetime(j)} - 1}$ [-], le facteur d'annualisation de la technologie j ,
- $C_{inv}(j) = c_{inv}(j) \cdot F(j)$ [Meuro] le coût total d'investissement de la technologie j
- $C_{maint}(j) = c_{maint}(j) \cdot F(j)$ [Meuro], le coût de maintenance total de la technologie j
- $C_{op}(i) = \sum_{t \in T | h, td \in T_H_TD(t)} c_{op}(i) \cdot F_t[i, h, td] \cdot t_{op}(h, td)$ le coût total d'opération de la ressource i [Meuro]

- La fonction des émissions totales, GWP_{tot} [ktonCO2,équ], mathématiquement définie par :

$$GWP_{tot} = \sum_{j \in TECH} \frac{GWP_{constr}(j)}{lifetime(j)} + \sum_{i \in RES} GWP_{op}(i)$$

avec

- $GWP_{constr}(j) = GWP_{constr}(j) \cdot F(j)$ [ktonCO2,équ], la quantité totale d'émissions de gaz à effet de serre lors de la construction de la technologie j
- $GWP_{op}(i) = \sum_{t \in T | h, td \in T_H_TD(t)} gwp_{op}(i) \cdot F_t[i, h, td] \cdot t_{op}(h, td)$ [ktonCO2,équ], la quantité totale des émissions de gaz à effet de serre lors de la consommation de la ressource i .

La première fonction objective sera principalement utilisée dans le cadre de cette étude, sauf pour quelques analyses spécifiques qui nécessiteront l'optimisation de la seconde fonction objective.

2.2.3 Données de sortie

Les données en sortie du modèle sont les valeurs des variables calculées par le modèle et qui permettent de quantifier le mix énergétique résultant. On y retrouve par exemple :

- C_{tot} [Meuros], la valeur de la fonction du cout total du système ,
- GWP_{tot} [kton CO2,équ], les émissions totales de gaz à effet de serre du système ,
- f_i [GW], la capacité installée d'une technologie i ,
- Les valeurs des flux d'énergie entrant et sortant de chaque *layer*
- Un diagramme de Sankey représentant l'ensemble des flux énergétiques du système.

2.3 EnergyScope Pathway

Le modèle EnergyScope Pathway est une extension du modèle EnergyScope TD. Il permet de définir une évolution temporelle d'un mix énergétique, en tenant compte des phases de transition entre les différentes années. Pour ce faire, Le modèle EnergyScope TD est appliqué par exemple pour l'année 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 et 2050. Ensuite des contraintes sont définies afin de permettre de mettre en relation ces différentes simulation annuelles entre elles. Ces contraintes définissent des « phases de transition », comme illustré à la Figure X.

Cette extension de modèle nécessite alors l'implémentation de nouvelles variables et de nouveaux paramètres, présentés ci-dessous, et permet d'obtenir un plan d'investissement et technique au cours du temps pour atteindre notamment un mix neutre en carbone et indépendant énergétique.

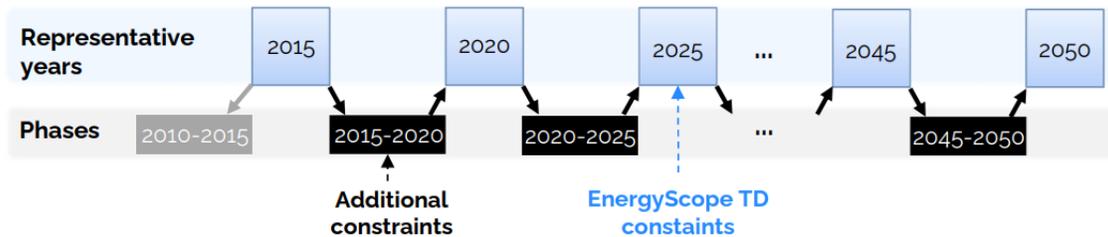


FIGURE 2.3 – Illustration du principe de fonctionnement du modèle EnergyScope Pathway [10].

Chapitre 3

La Province de Luxembourg

Avant d'appliquer les outils et la méthodologie décrits dans la section précédente, les caractéristiques de la région étudiée sont présentés dans ce chapitre, permettant de comprendre au mieux les adaptations nécessaires à implémenter dans le modèle.

3.1 Généralités

La province de Luxembourg, située dans la région wallonne de la Belgique, est la plus grande des provinces belges en termes de superficie (4.440 [km²] [18]), mais elle est également la moins peuplée (290.000 habitants [18]). Ce territoire, caractérisé par un paysage rural et boisé, joue un rôle important dans l'économie locale, notamment grâce à l'agriculture, à la sylviculture, et au tourisme. La région est connue pour ses vastes forêts, ses rivières sinueuses, et son patrimoine historique. Le climat de la province est tempéré, avec des hivers froids et des étés modérés, ce qui influence les besoins énergétiques de la population, notamment en termes de chauffage.



FIGURE 3.1 – Localisation de la Province de Luxembourg en Belgique [20]

3.2 Activités

L'industrie de la Province de Luxembourg est principalement composée de petites et moyennes entreprises (PME) concentrées dans la transformation du bois, l'agroalimentaire, et la production artisanale. L'ensemble des industries sont reprises dans le diagramme ci-dessous.

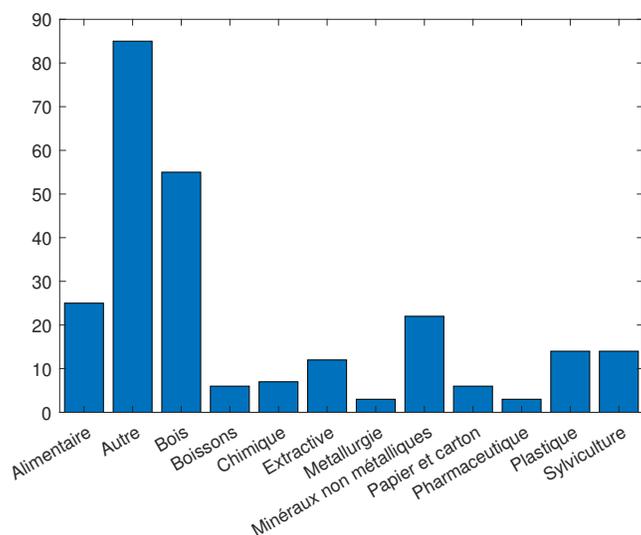


FIGURE 3.2 – Classification des industries présentes dans la Province de Luxembourg en fonction de leur activité (code NACE) [22]

Ces industries ont été classées suivant leur activité (code NACE).

Cette classification peut s'avérer être utile pour déterminer plus précisément la répartition de la consommation énergétique industrielle de la Province en fonction des usages finaux. Cependant, l'accès aux données étant relativement restreinte (confidentialité des entreprises), ces données seront estimées sur base des bilans énergétiques de la Province fournis à l'Annexe A.

Une seconde classification peut également être effectuée au niveau des procédés industriels nécessitant de la chaleur. En effet, la température de cette chaleur peut être :

- *Supérieure à 400°C* : Cette catégorie inclut les procédés industriels qui nécessitent de la chaleur à très haute température,
- *Entre 160 [°C] et 400 [°C]* : Cette chaleur est principalement celle des procédés de combustion.
- *Inférieure à 160°C*. La production de chaleur pour ces procédés peut être remplacée par des pompes à chaleur industrielles [24], ou être électrifiée directement.

Une des activités les plus intéressantes en vue d'atteindre l'indépendance énergétique dans la Province de Luxembourg est l'industrie de production de bois. En effet, l'exploitation forestière génère des déchets qui constituent une ressource essentielle pour la production de combustible biomasse.

Cette étude met l'accent sur deux types de combustibles biomasses sèches qui peuvent être produits au sein de la Province : la plaquette forestière et le pellet.[26]

Les procédés de fabrication de ces deux ressources énergétiques sont illustrés à la Figure 3.3.

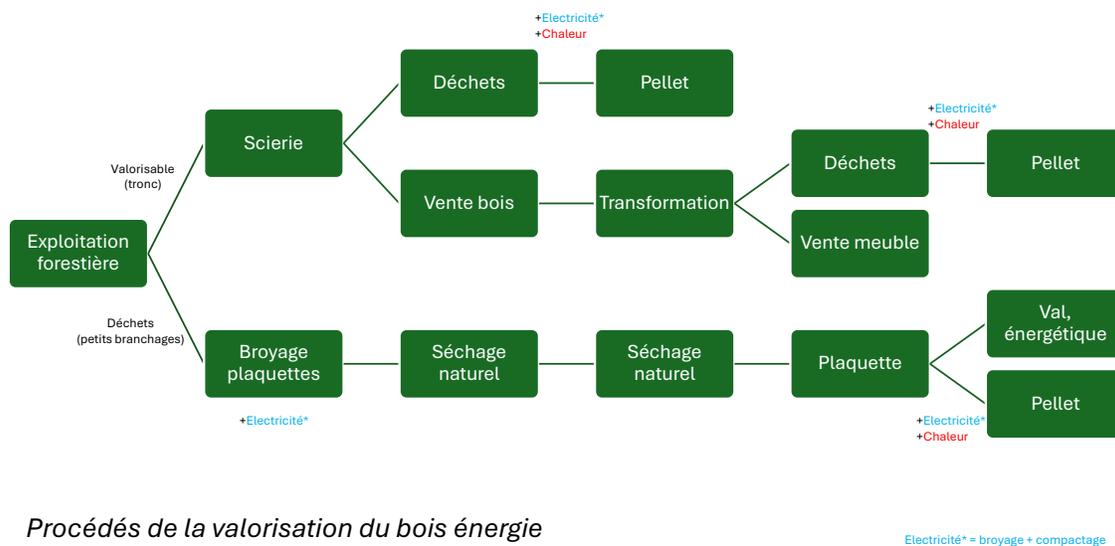


FIGURE 3.3 – Procédés de la valorisation du bois énergie dans la Province de Luxembourg.

Il peut être observé que la production de plaquettes et de pellets nécessite différentes étapes de transformation. Ces transformations utilisent d'autres ressources telles que l'électricité et la chaleur. Dans le cas des plaquettes forestières, ces dernières sont séchées naturellement, et ne nécessitent que de l'électricité.

Quant à la pelletisation, cette dernière nécessite une source de chaleur. En pratique, cette chaleur est fournie par combustion des

La plaquette forestière, caractérisée par une densité plus énergétique plus faible que celle du pellet est principalement utilisée dans les productions de chaleur à grande échelle, tels que dans les réseaux de chaleur, ou dans les procédés industriels.

Le pellet, caractérisé par une densité énergétique plus élevée que la plaquette forestière, est utilisé

dans les technologies de chauffage décentralisé, tels que les poêles à pellet, mais également dans les procédés industriels.

L'évolution du prix de ces deux produits est présentée à la figure 3.4

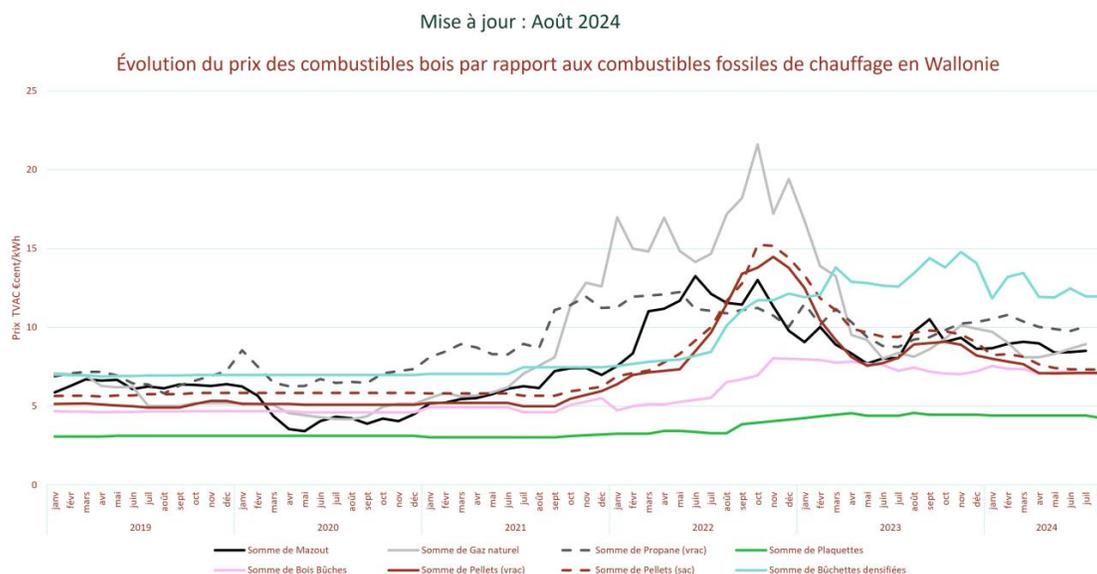


FIGURE 3.4 – Evolution du prix des ressources bois et combustibles fossiles dans le secteur du chauffage [27].

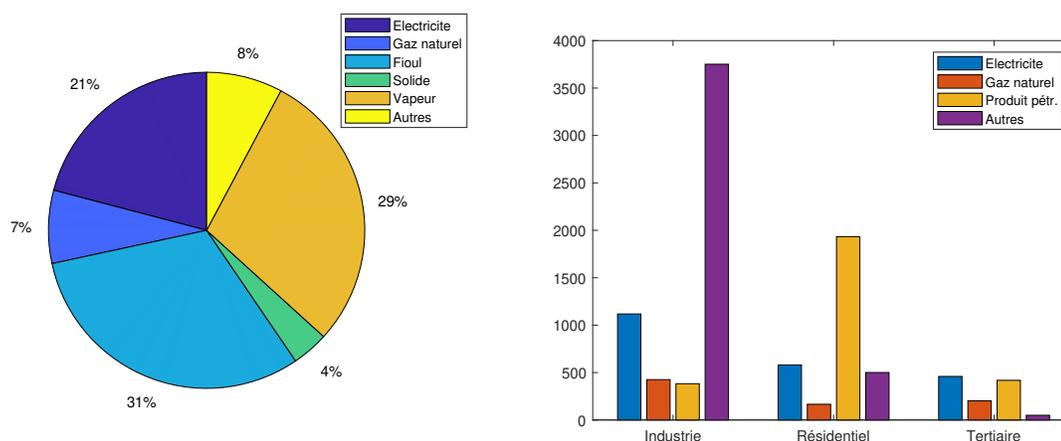
Le graphique montre que le prix de la plaquette reste la ressource la moins chère et la plus stable au cours du temps, et constitue une ressource énergétique intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Le pellet présente des fluctuations plus importantes suite aux différentes tendances du marché. Face à ces fluctuations, la stratégie d'indépendance énergétique, promouvant la production d'un pellet local peut alors fournir une visibilité et stabilité à long terme.

Il est à noter que le coût relativement faible de ces ressources n'est pas un indicateur suffisant pour justifier d'un point de vue économique l'investissement dans ce type de chauffage. D'autres paramètres tels que les coûts d'investissement et d'opération des technologies alimentées par ces ressources sont également à prendre en compte. Ces concepts sont développés dans le chapitre suivant.

3.3 Bilan énergétique

3.3.1 Consommation énergétique

La conception de tout mix énergétique nécessite d'en évaluer d'abord sa consommation. La Province de Luxembourg présentait en 2019 une consommation énergétique totale de 14 233 [GWh]. La répartition de cette consommation par secteur et par vecteur énergétique est présentée à la Figure 6.1



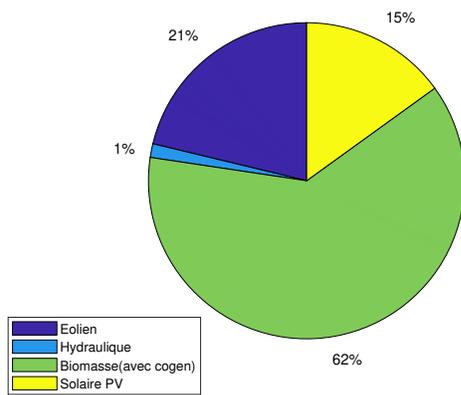
(a) Consommation énergétique de la Province de Luxembourg par vecteur énergétique en 2019.

(b) Consommation énergétique de la Province de Luxembourg par secteur en 2019.

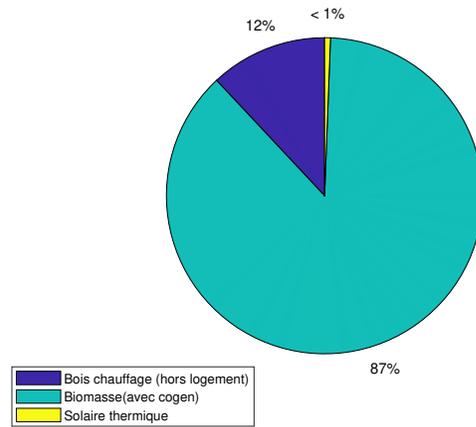
FIGURE 3.5 – Répartition de la consommation énergétique de la Province de Luxembourg par secteur et par vecteur [19].

3.3.2 Production

La Province dispose actuellement des installations de production d'électricité et de chaleur locales. En 2019, la production d'électricité renouvelable était de 950 [TWh], et celle de la chaleur était de 2567 [GWh] (source : *Province*)



(a) Répartition de la production électrique de la Province de Luxembourg par type de ressources en 2019.



(b) Répartition de la production de chaleur de la Province de Luxembourg par type de ressources primaires en 2019.

FIGURE 3.6

3.4 Potentiel énergétique

Les ressources locales de la Province présentent une quantité limitée. Le potentiel énergétique de la Province permet de définir une borne numérique maximale à l'exploitation de ces ressources. Ces potentiels techniques sont présentés ci-dessous :

○ **Potentiel Eolien :**

Le potentiel du grand éolien est estimé à

- 1478.429 [GWh/an] dans le rapport PEPS, supposant que la production unitaire d'une éolienne est de 30 [GWh/km²], et que cette technologie occupe 1% du territoire.
- 4.663,32 [GWh], soit 3.55 [GW] estimée par *Bregilab* [29], en supposant l'utilisation des éoliennes VESTAS V112 3.3 MW et tenant compte des restrictions législatives et territoriales.

La valeur retenue dans cette étude est celle fournie par *Bregilab*.

○ **Potentiel Solaire :**

Le potentiel solaire est estimé à :

- 5 993 [GWh] dans le rapport PEPS pour le solaire photovoltaïque et 182.447 MWh pour le solaire thermique , supposant respectivement une utilisation de 1% du territoire et de 6 m² de panneaux,
- 3 958 [GWh], soit 4.07 [GW] par *Bregilab*,tenant compte des restrictions législatives et territoriales [29].

La valeur retenue dans cette étude est celle de *Bregilab*. Cette comparaison entre les deux sources montre que le potentiel solaire est plus élevé que celui de l'éolien dans le rapport de PEPS, ce qui n'est pas le cas dans les résultats fournis par *Bregilab*. Il est dès lors attendu à ce que les résultats fournis dans cette étude varient de ceux fournis par le rapport PEPS.

○ **Potentiel Biomasse :**

Le potentiel biomasse considéré dans cette étude est celui présenté dans le rapport PEPS, et est classé dans cette étude suivant deux catégories :

- Biomasse humide
 - Lisier fumier : 325.35 [GWh] (production de biogaz)
 - Culture maïs : 960.328 [GWh](production de biogaz)
 - Déchets agricoles : 50 [GWh] (production de biogaz)

-Déchets ménagers organiques : 20 [GWh]

TOTAL : 1355.678 [GWh]

— Biomasse sèche

- Bois chauffage : 468.473 [GWh]

- Déchets lignifiés : 65.544 [GWh]

- Miscanthus : 685.7 [GWh]

TOTAL : 1219.75 [GWh]

3.5 Emissions de gaz à effet de serre

En 2006, la Province de Luxembourg émettait 2 276 [ktonCO_{2,équ}] de gaz à effet de serre. [21] Un des objectifs commun à la Wallonie, la Belgique et l'Europe établi dans le PACE2030 est d'atteindre d'ici 2030 une réduction de 55% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'année de référence 1990.

Afin de quantifier plus précisément cet objectif à l'échelle de la Province, il est supposé que la Province ait subi entre 1990 et 2006 une évolution des émissions de ses gaz à effet de serre similaire à celle de la Belgique.

La Belgique émettait, en 1990, 142 910 [ktonCO_{2,équ}] de gaz à effet de serre, et 140 970 ktCO_{2,équ} en 2006. Les émissions ont donc été réduites de 1.36 % entre ces deux années (à noter que l'évolution des émissions n'est pas linéaire). En supposant que cette même tendance est appliquée à la Province, les émissions de cette dernière sont estimées à 2 307[ktonCO_{2,équ}] pour l'année 1990.

L'objectif de la province est dès lors d'atteindre une quantité des émissions maximale de 1038,6[ktonCO_{2,équ}] pour 2030. Tenant compte de cet objectif, et connaissant les émissions de la Province pour l'année 2019, le plan de décarbonation suivant est proposé :

- 2020 : 2309,737 [ktonCO_{2,équ}] (émissions de l'année 2019)
- 2025 : 1500 [ktonCO_{2,équ}] (-35 %)
- 2030 : 1038,6[ktonCO_{2,équ}] (-55%)
- 2035 : 576.75 (-75 %)
- 2040 : 115.35 [ktonCO_{2,équ}] (-95%)

Ce plan de décarbonation est utilisé dans l'implémentation du modèle EnergyScope Pathway afin de fixer la contrainte CO₂ pour la simulation des années futures.

L'ensemble des données présentées dans cette section permettent ainsi de définir et caractériser la région étudiée. Ces caractéristiques sont utilisées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Application à la Province du Luxembourg

Ce chapitre présente les modifications apportées aux modèles initiaux EnergyScope TD et Pathway définis par défaut afin de les adapter à l'étude de la Province. Les valeurs des données d'entrée de ces modèles sont ensuite présentées.

4.1 Adaptations

4.1.1 Taux d'indépendance énergétique

L'objectif de tendre vers une Province énergétiquement indépendante nécessite l'ajout d'un indicateur de taux d'indépendance énergétique, TIE [-]. En effet, définir un scénario de décarbonation ne permet pas de garantir que la Province tendra vers un mix de plus en plus indépendant en ressources primaires.

Dans cette étude, le taux d'indépendance énergétique TIE [-] est défini par :

$$TIE = \frac{\text{Consommation totale de ressources endogènes [TWh]}}{\text{Consommation totale des ressources primaires [TWh]}}$$

et varie donc entre 0 et 1.

Cet indicateur est uniquement utilisé en lecture des données de sortie, et n'intervient pas en tant que tel dans l'implémentation du problème d'optimisation. Pour définir une contrainte d'indépendance énergétique dans la résolution du problème, une borne inférieure est imposée à la production

d'énergie endogène , permettant de conserver ainsi la linéarité du problème d'optimisation. Cette contrainte est définie de la manière suivante :

$$\text{Consommation totale des ressources endogènes} \geq \text{Valeur arbitraire}$$

où la valeur arbitraire est fixée par l'utilisateur. Cette valeur constitue donc une borne inférieure à la consommation totale des ressources endogènes ainsi qu'au taux d'indépendance énergétique.

Cette contrainte est implémentée dans le modèle de la manière suivante :

$$\sum_{i \in \text{END_RESOURCES}, t \in \text{PERIOD}, h, td \in T_H_TD(t)} F_i[i, h, td] \cdot t_{op}[h, td]) \geq \text{production_endogene}$$

avec

- $\text{END_RESOURCES} = \text{RE_RESOURCES}$
diff {"BIOETHANOL", "BIODIESEL", "GAS_RE", "H2_RE", "AMMONIA_RE", "METHANOL_RE"}
l'ensemble des ressources primaires endogènes (locales),
- RE_RESOURCES l'ensemble des ressources renouvelables,
- $\text{production_endogene}$ [GWh] le paramètre représentant la valeur arbitraire fixée par l'utilisateur.
- $F_i(i, h, td)$ [GW], opération de la technologie ou de la ressource i pendant la durée (h, td)
- t_{op} [h], la durée d'une période (1 heure)

Les ressources telles que les biocarburants et carburants synthétiques sont supposées être importées dans la Province et n'interviennent dès lors pas dans la consommation des ressources primaires endogènes.

Il est à noter que cette formulation fait l'hypothèse d'une consommation totale des ressources primaires relativement constante et non sensible à la variation de la valeur arbitraire.

4.1.2 Production du bois énergie

Comme déjà mentionné dans le second chapitre, la Province de Luxembourg présente un potentiel d'énergie biomasse relativement élevé. Une modélisation plus affine du procédé bois-énergie est donc également implémentée dans le modèle.

Cette modélisation porte l'accent sur la production de plaquettes et de pellets, et est illustrée dans la Figure suivante :

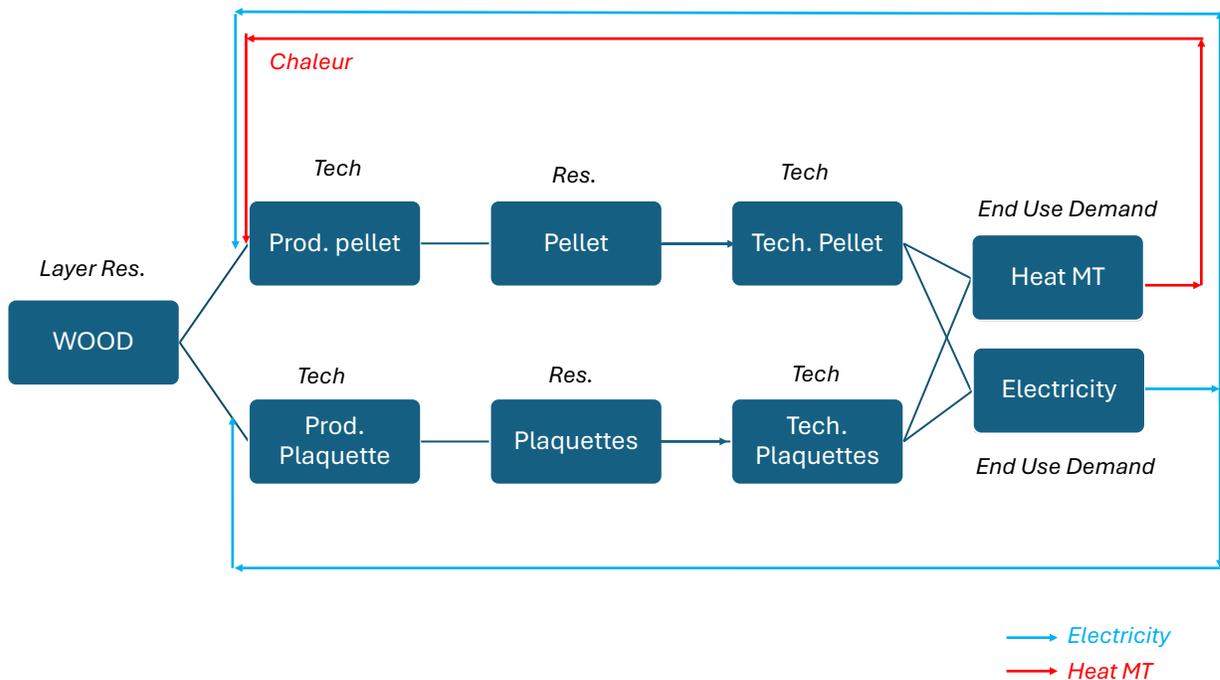


FIGURE 4.1 – Modélisation de la valorisation du bois énergie dans EnergyScope TD et Pathway

Les points suivants sont définis dans le code :

Rendement de conversion de 90%, donc besoin de 1.111 unité d'énergie de bois pour 1 unité d'énergie de pellet

- **Pour la production locale de pellets :**

- Nouvelle ressource biomasse *pellets*
- Nouvelle technologie de production de pellets *PELLETISATION*, incluant le broyage et compactage. Ce procédé prend en entrée de l'électricité, et la ressource biomasse de type « Wood », qui représente les déchets de bois issus des scieries ou de la déforestation. Concernant l'utilisation de chaleur notamment pour le séchage des pellets,

comme cette chaleur est généralement produite à partir de ces mêmes déchets de bois, la consommation de chaleur est alors simplement représentée par une augmentation du taux de conversion du procédé de fabrication de pellets. Pour la production d'1 unité de pellet, la quantité de déchets de bois et d'électricité nécessaires sont respectivement estimés à 1.3 unités et 0.03 unités. Les coûts d'investissement et d'opération sont respectivement estimés à 260 [Meuro/GW] et à 50 [Meuro/GW] [30]

○ **Pour la production locale de plaquettes :**

- nouvelle ressource *plaquettes*, dont les paramètres sont présentées dans la section suivante.
- nouvelle technologie de procédé de fabrication de plaquettes *PLAQUETTISATION*, qui consomme de l'électricité et des déchets biomasses bois présenté par la ressource « BOIS ». Le rendement de conversion de la production ainsi que les coûts estimés sont similaires à la pelletisation.

4.1.3 Moyenne température

Les modèles EnergyScope TD et Pathways incluent initialement tous les procédés industriels dans la même catégorie de demande énergétique *Heat HT*. Cependant, au vu de la classification présentée au chapitre 3, une distinction est appliquée entre les différents procédés industriels selon leur température. Cette distinction est modélisée par

- L'ajout d'une nouvelle catégorie de demande énergétique « Chaleur industrielle moyenne température »
- L'ajout d'une nouvelle technologie électrification directe,
- L'ajout d'une nouvelle technologie *THHP_gaz*
- L'ajout d'une nouvelle technologie *TS MEDIUM*

Les procédés industriels de moyenne température sont ainsi représentés dans le modèle de manière similaire à la catégorie de demande de chaleur haute température. L'estimation de la consommation de ces deux types de procédés étant relativement complexe due à la non disponibilité des données, la consommation énergétique des procédés industriels totale sera équitablement répartie entre ces deux catégories.

4.1.4 Modification des paramètres liés aux émissions de CO₂,équ des ressources

Les références utilisées par défaut dans les modèles EnergyScope TD et Pathway concernant les facteurs d'émissions des ressources sont les références *GWP100* et *IPCC 2013*. Dans le cadre de cette étude, la référence utilisée pour les émissions de CO₂,équ relatives à la consommation des ressources est celle présentée par le Centre de Recherche de la Commission européenne (*Joint Research Center* [31]). Les valeurs considérées présentent une approche *cycle de vie*, et tiennent donc compte des émissions directes ainsi que celles liées à la chaîne d'approvisionnement. Ces valeurs sont présentées ci-dessous :

- Essence (moteur) : 0.314 [ktonCO₂,équ/GWh]
- diesel : 0.306 [ktonCO₂,équ/GWh]
- bioethanol(idem que biogasoline) : 0.207 [ktonCO₂,équ/GWh](avec hypothèse d'un cycle neutre en carbone)
- biodiesel : 0.156 (avec hypothèse d'un cycle non neutre en carbone)
- Fioul : 0.306 [ktonCO₂,équ/GWh]
- Gaz : 0.240 [ktonCO₂,équ/GWh]
- Gaz renouvelable : 0.284 [ktonCO₂,équ/GWh]
- Charbon : 0.370 [ktonCO₂,équ/GWh]
- Déchets (non renouvelables) : 0.295[ktonCO₂,équ/GWh]

Le changement de référence est lié au fait que dans l'implémentation initiale du modèle, les émissions des biocarburants et des carburants synthétiques étaient nulles, et inférieures aux émissions liées à l'utilisation des ressources biomasses. Dans le contexte de l'étude de l'indépendance énergétique de la Province, qui vise à exploiter les ressources locales du territoire, les émissions de gaz à effet de serre liées aux ressources biomasses sont dès lors considérées comme étant nulles. L'on suppose en effet que ces ressources sont utilisées de manière neutre en carbone, et qu'au vu de la superficie relativement restreinte de la Province par rapport au territoire belge ou européen, les émissions liées au transport de cette ressource sur le territoire sont négligeables.

Concernant les autres ressources renouvelables telles que le vent, le soleil, et l'eau, leurs émissions de gaz à effet de serre ainsi que leur coût d'opération sont par défaut considérées comme étant nulles. Enfin, le prix d'opération c_{op} [Meuro/GWh] des ressources biomasses est également fixé à 0 [Meuro/GWh]. Cette hypothèse permet d'implémenter dans le modèle le fait que le prix des ressources bois est inférieurs de manière générale aux autres ressources, comme observé dans le chapitre 3, et que le prix de ce bois produit localement ne subit pas les contraintes liées au marché (taxe, coût d'importation,..).

Le paramètre gwp_{op} [ktonCO₂,équ/ GWh] définit pour chaque ressource les émissions spécifiques

Les émissions de CO₂ des différentes ressources ont été modifiées, en suivant la norme IPCC au lieu de la norme GWP100, initialement implémentée dans le modèle.

4.1.5 Importation de l'électricité

Le prix de l'électricité achetée sur le réseau par un consommateur final est composé :

- du prix de gros de l'électricité en Belgique, qui seront représentés, bien qu'ils présentent des différences, par le coût actualisé de l'électricité (*Levelised cost of electricity* $LCOE_{elec, BE}$ [Meuro/GWh])
- des coûts liés au réseau de transport de l'électricité (géré par Elia)
- des coûts liés au réseau de distribution (géré par ORES)
- des taxes incluant la taxe carbone.

Le prix de l'électricité fournie localement est composé :

- du prix de revient de l'électricité de la Province, $LCOE_{LUX}$ [Meuro/GWh]
- des coûts liés au réseau de distribution (géré par ORES)
- des taxes incluant la taxe carbone.

Lors des analyses des résultats, la comparaison entre ces indicateurs est nécessaire afin de vérifier la pertinence de l'indépendance énergétique d'un point de vue économique.

Pour simplifier la comparaison, les coûts liés au réseau de distribution sont négligés, et le coût de l'électricité fournie par le réseau est exprimée par la variable c_{op} de la ressource *ELECTRICITY*.

Le calcul du $LCOE$ du mix énergétique de la Province, $LCOE_{Lux}$ [Meuro/GWh], est quant à lui calculé sur base d'une somme pondérée des $LCOE$ des technologies contribuant à de mix :

$$LCOE_{mix} = \sum_{j \in TECH} a_j \cdot LCOE_j$$

avec :

- $LCOE_j = LCOE_{capex,j} + LCOE_{opex,j}$ [Meuro/GWh]
- a_j [-] la contribution de la technologie dans le mix énergétique,
- $LCOE_{capex} = \frac{C_{inv} \cdot crf}{c_p \cdot 8760}$
- $crf = i_{rate} \cdot \tau$
- $\tau = \frac{(1+i_{rate})^{lifetime}}{(1+i_{rate})^{lifetime} - 1}$
- $LCOE_{opex} = \frac{c_{op}}{f} + \frac{c_{maint}}{c_p \cdot 8760}$

4.1.6 Taux d'intérêt

Dans le cadre de cette étude, ce taux est fixé une valeur de 6%, qui représente une valeur plus récente.

L'ensemble de ces adaptations sont reprises aussi bien dans le modèle EnergyScope TD que EnergyScope Pathway.

4.2 Données d'entrée - Demande

La répartition de la demande énergétique de la Province de Luxembourg est présentée à la table 4.1 :

Catégorie	Sous-catégorie	Résidentiel	Tertiaire	Industriel	Transport	Unités
Electricité	constante	535.1	284.7	958	0	[GWh]
Electricité	variable	45,69	174,5	169,1	0	[GWh]
Chaleur	haute température	0	0	1712	0	[GWh]
Chaleur	moyenne température	0	0	1712	0	[GWh]
Chaleur	chauffage de l'espace (basse température)	2221	621	1135	0	[GWh]
Chaleur	eau chaude sanitaire (basse température)	378.4	48.6	375	0	[GWh]
Mobilité	passagers	0	0	0	7383	[Mpkm]
Mobilité	fret	0	0	0	0	[Mtkm]
Non énergétique	non énergétique	0	0	0	0	[GWh]

TABLE 4.1 – Demande énergétique de la Province de Luxembourg, estimée à partir des données de la Région Wallonne.

Cette demande est estimée sur base des données de consommation de la Province pour l'année 2019, année la plus récente en terme de disponibilité des données.

Certaines des valeurs présentées dans ce tableau ont été calculées en tenant compte des tendances observées à l'échelle de la Wallonie. Les méthodes de calcul sont présentées à l'Annexe A.

Bien que la demande énergétique soit susceptible de varier pour les prochaines années, notamment due à l'augmentation de la population auprès de la frontière belgo-luxembourgeoise, cette demande énergétique est conservée pour la simulation des années futures.

4.3 Données d'entrée - Ressources

4.3.1 Ressources locales

Les valeurs des paramètres relatifs aux ressources locales de la Province sont présentées à la Table 4.2 :

Nom	Disponibilité [GWh/an]	gwp_{op} [ktonCO ₂ ,équ]	c_{op} [Meuro/GWh]
Vent	∞	0	0
Soleil	∞	0	0
Eau	∞	0	0
Géothermie profonde	0	0	0
Bois	1219.75	0	0
Plaquettes	∞	0	0
Pellets	∞	0	0
Biomasse humide	1355.678	0	0.005285
Déchets (non renouvelables)	500	0.346	0.021188

TABLE 4.2 – Paramètres liés aux ressources locales de la Province de Luxembourg [17].

Au cours de ces dernières années, les études liées au potentiel de la géothermie profonde en Wallonie prennent de plus en plus d'ampleur. Suite à la consultation des cartes des *zones d'intérêt géothermique de faible à moyenne profondeur en Wallonie de 300 à 3000 m et de 3000 à 6000 m de profondeur* publiés par la Région Wallonne [32], il est déduit que le potentiel de géothermie profonde est relativement restreint dans la Province de Luxembourg, et sera donc considéré comme négligeable dans cette étude.

La disponibilité des déchets non renouvelables a été estimée sur base du potentiel estimé pour la Belgique.[17]

4.3.2 Ressources importées

Les paramètres liés aux ressources importées ont été partiellement été présentés au précédent chapitre. Les coûts de ces ressources sont repris depuis l'étude de *Limpens* appliqué à la Belgique. La valeur des émissions et le coût liés à l'importation de l'électricité sont les valeurs présentées par respectivement la CwApe et par Electricity Maps pour l'année 2023. [33][34]

Nom	Disponibilité [GWh/an]	gwp_{op} [ktonCO ₂ ,équ]	c_{op} [Meuro/GWh]
ELECTRICITY	∞	0.178	0.229
GASOLINE	∞	0.314	0.082
DIESEL	∞	0.306	0.079
BIOETHANOL	∞	0.207	0.111
BIODIESEL	∞	0.156	0.12
LFO	∞	0.306	0.06
GAS	∞	0.240	0.044
GAS_RE	∞	0.284	0.118
COAL	∞	0.37	0.017
URANIUM	∞	0.0039	0.003
H2	∞	0.414	0.088
H2_RE	∞	0	0.119
AMMONIA	∞	0.285	0.094
METHANOL	∞	0.35	0.101

TABLE 4.3 – Paramètres liés aux ressources importées.[17]

4.4 Données d'entrée - Technologies

Cette section présente les données des paramètres liés aux technologies déjà implémentées dans la Province de Luxembourg. Les paramètres liés aux autres technologies implémentées dans Energy-Scope TD et Pathway sont identiques à celles utilisées dans l'étude de *Limpens*. L'ensemble de ces technologies est illustrée dans l'Annexe B

4.4.1 Production d'électricité

Les technologies de production d'électricité présentes dans la Province sont présentée dans la Table 4.4

	c_{inv} [Meuro/GW]	c_{maint} [Meuro/GW]	$lifetime$ [années]	c_p [-]	f_{min} [GW]	f_{max} [GW]
Eolien terrestre.	1040	12.1	30	1	0.118	4.7
Solaire PV	870	9.94	25	1	0.221	2.2
Hydraulique (rivière)	5044.92	50.44	40	1	0.004	0.004

TABLE 4.4 – Paramètres des technologies de production d’électricité en entrée du modèle Energy-Scope TD.[35] [17]

4.4.2 Chaleur Industrielle

Les technologies de production de chaleur industrielle sont présentées dans la Table 4.5, et ont été estimés sur base du rapport *Stratégie Chaleur* publiés par la Région Wallonne [36]

	c_{inv} [Meuro/GW]	c_{maint} [Meuro/GW]	$lifetime$ [années]	c_p [-]	f_{min} [GW]	f_{max} [GW]
Chaudière gaz ind.	58.89	1.18	17	0.944	0.049	∞
Chaudière mazout ind.	54.85	1.18	17	0.944	0.055	∞
Chaudière biomasse ind.	115.17	2.3	17	0.895	0.07	∞
Cogén. gaz ind.	1408	90.51	25	0.85	0.168	∞
Cogén. biomasse ind.	1080	39.57	25	0.845	0.575	∞

TABLE 4.5 – Paramètres des technologies de production de chaleur industrielle [36] [17].

4.4.3 Basse température

	c_{inv} [Meuro/GW]	c_{maint} [Meuro/GW]	$lifetime$ [années]	c_p [-]	f_{min} [GW]	f_{max} [GW]
Chaudière gaz déc.	158.5	4.76	17	1	0.083	∞
Chaudière mazout déc.	142.38	8.54	17	1	0.512	∞
Chaudière biomasse déc.	462.4	16.18	17	1	0.512	∞
RDC chaudière bois.	115.2	2.3	17	0.8946	0.0022	∞
RDC cogén. bois.	1080	40	25	0.845	0.001	∞
Solaire th. déc.	719.1	7.98	20	1	0.004	∞
Electrif. déc.	39.98	0.17	15	1	0.005	∞

TABLE 4.6 – Paramètres des technologies de production de chaleur basse température [36] [17]

4.4.4 Mobilité

La répartition de la demande énergétique entre les voitures essences et diesel est établie sur base de la répartition de la consommation énergétique du transport privé en fonction du carburant utilisé. Sur base des bilans énergétiques fournis par la Province, une répartition de 25% et de 75 % est observée à la consommation des voitures respectivement à essence et diesel.

	c_{inv} [Meuro/Mpkm]	c_{maint} [Meuro/Mpkm]	$lifetime$ [années]	c_p [-]	f_{min} [Mpkm]	f_{max} [Mpkm]
Voiture ess.	420.3	24	10	0.051	1762	∞
Voiture dies.	434.5	24	10	0.051	5286	∞
Train	1506	54.35	40	0.275	334.86	∞

TABLE 4.7 – Paramètres des technologies de mobilité (passagers) sur EnergyScope TD [17].

4.4.5 Stockage

	c_{inv} [Meuro/GWh]	c_{maint} [Meuro/GWh]	$lifetime$ [années]	c_p [-]	f_{min} [GWh]	f_{max} [GWh]
Batterie Lithium	302	0.47	15	1	0.01	∞

TABLE 4.8 – Paramètres des technologies de mobilité (passagers) sur EnergyScope TD

La capacité de stockage présente dans la Province est liée à l'installation du parc de batterie ESTOR-LUX à Bastogne. [37]. La Province ne dispose actuellement pas de grande capacité de stockage, et le potentiel présent dans la Province ne

4.5 Autres

- Taux d'intérêt : $i_{rate} = 6\%$
- Surface solaire max : 45 km² -limite du réseau : 1 GW -share

Chapitre 5

Analyse de sensibilité

Ce chapitre présente la première partie de l'étude, qui consiste à étudier le comportement du mix énergétique de la Province de Luxembourg par rapport à deux indicateurs :

- la quantité maximale d'émissions de gaz à effet de serre autorisée annuellement
- le taux d'indépendance énergétique
- le prix de l'électricité fournie par le réseau.

Pour toutes analyses effectuées dans ce chapitre, le modèle tient compte des capacités technologiques actuellement installées dans la Province, et investit dans les technologies nécessaires pour optimiser le mix énergétique pour une seule année future. Les investissements sont supposés être réalisés en "une nuit" (modèle overnight). Les paramètres utilisés pour cette analyse sont ceux de l'année de référence 2035, choisie arbitrairement.

5.1 Etude de l'indicateur CO_2

La première analyse est effectuée en faisant varier la quantité de CO_2 maximale pouvant être émise. Dans cette analyse, l'on suppose que la décarbonation progressive de la Province s'effectue en même temps que la décarbonation du réseau électrique belge. Le taux de diminution de CO_2 appliqué à la Province est donc également appliqué progressivement à la valeur de l'indicateur gwp_{op} de la ressource *ELECTRICITY*, dont la valeur est initialement fixée à 0.178 [kton CO_2 ,éq/GWh][23] (voir Chapitre 4). A noter que le mix initial présente des émissions totales de 3304 [kton CO_2 ,éq], ce qui constitue une différence de 30% avec les émissions de 2019.

L'évolution du mix énergétique par rapport au taux de diminution de $CO_{2,eq}$ appliqué est présentée à la Figure 5.6. Il est à noter que le mix initial (avec 0% de taux de réduction de CO_2) ne représente pas le mix actuel de la Province. Le modèle est en effet libre d'investir dans de nouvelles technologies et de ne pas tenir compte des capacités initialement installées.

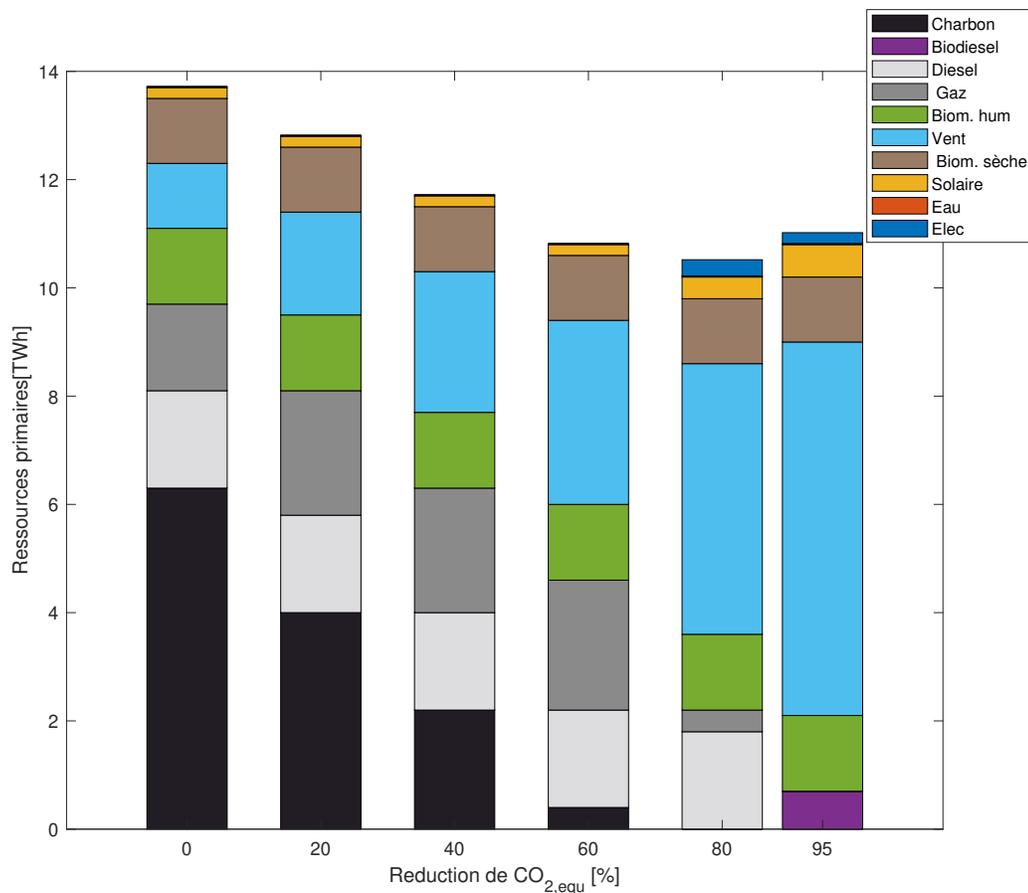


FIGURE 5.1 – Evolution du mix énergétique de la Province de Luxembourg en fonction de la contrainte CO_2 .

Ce premier résultat montre la tendance du modèle à privilégier les ressources peu émettrices de CO_2 , telle que l'énergie éolienne (dont les émissions directes sont nulles) et l'électricité importée (qui a subi une décarbonation progressive).

Cette première analyse montre qu'un mix énergétique de plus en plus décarboné nécessite d'exploiter l'énergie éolienne et biomasse (humide et sèche) de la Province. Ces observations répondent aux intuitions générales au vu du potentiel éolien terrestre élevé dans la Province, ainsi que de l'abondance de la ressource biomasse locale.

L'exploitation de ces ressources impacte dès lors le taux d'indépendance énergétique de la Province. L'évolution de ce taux est présentée dans le graphique suivant :

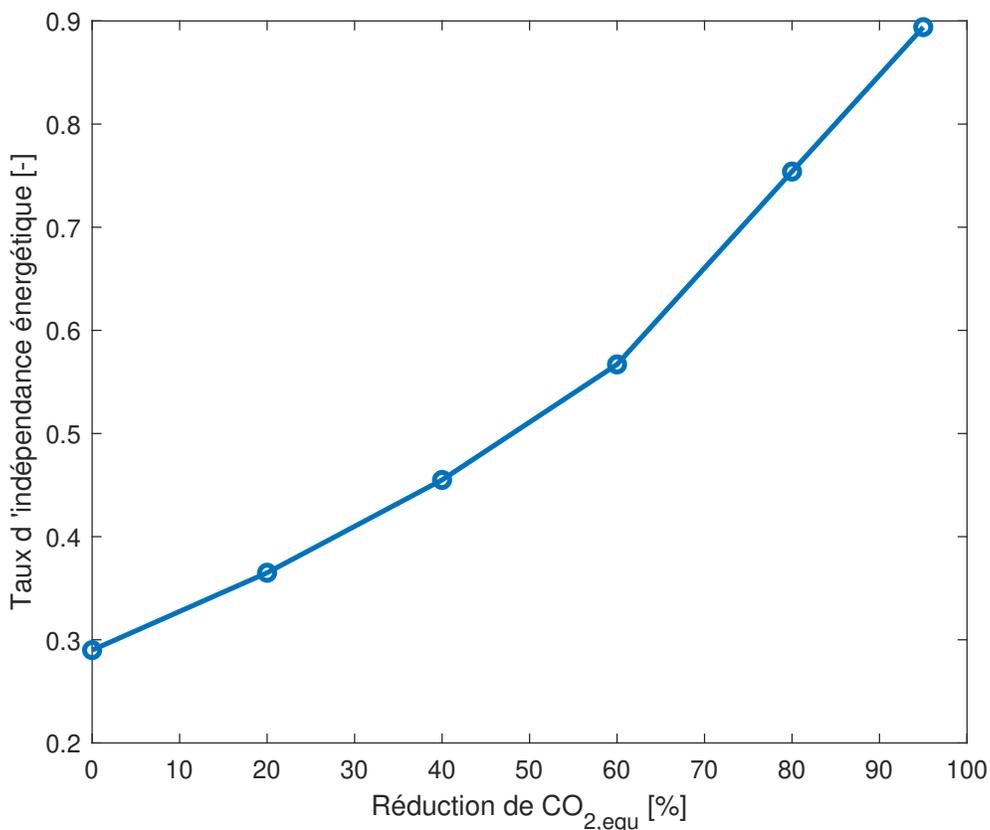


FIGURE 5.2 – Evolution du taux d'indépendance énergétique en fonction de la contrainte CO_2 .

Le taux d'indépendance énergétique augmente d'une valeur de 29% à une valeur de 89 % lorsque le taux de réduction de CO_2 augmente. L'on peut dès lors déduire que l'exploitation des ressources locales ainsi que la stratégie d'indépendance énergétique permet de répondre aux enjeux environnementaux de la Province de Luxembourg.

Afin de comprendre d'un point de vue économique les raisons pour lesquelles ces ressources et technologies sont choisies, il est intéressant de calculer l'évolution du *LCOE* du mix énergétique en fonction du taux de réduction des émissions de CO_2 , *eq.*

Ce dernier est représenté pour les différentes demandes d'utilisation finales de l'énergie :

o **Electricité**

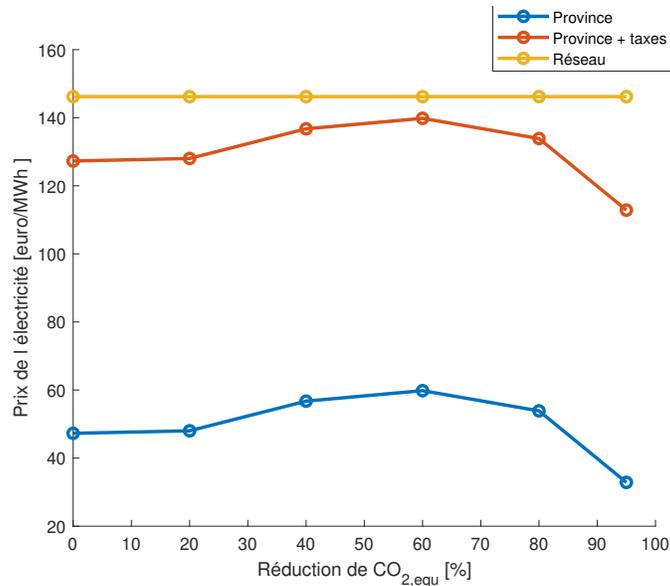


FIGURE 5.3 – Evolution du prix d'électricité de la Province en fonction de la contrainte CO_2 .

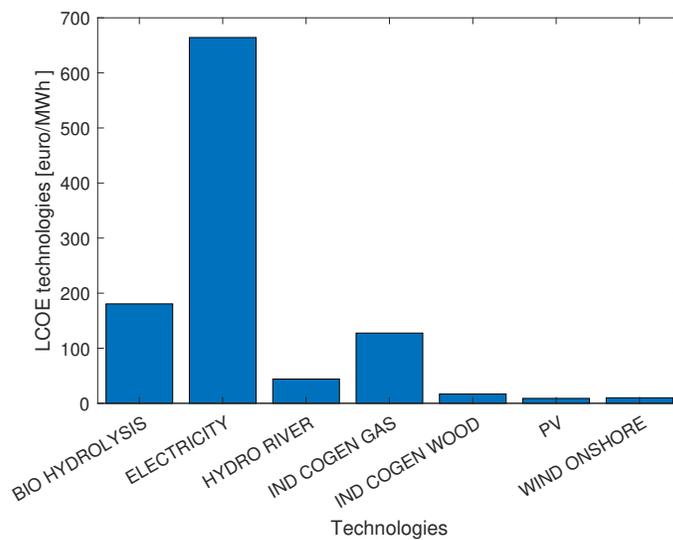


FIGURE 5.4 – LCOE des technologies de production d'électricité repris dans le mix énergétique.

Le premier graphique montre que le prix de l'électricité de la Province ne dépasse jamais celui du réseau, justifiant ainsi la raison pour laquelle l'électricité du réseau n'est que faiblement présente dans le mix énergétique de la Province.

Au niveau des *LCOE* des technologies incluses dans le mix électrique, l'on observe que leur valeur est notamment plus faible que le *LCOE* des autres technologies de production d'électricité telles qu'une centrale nucléaire ($LCOE_{2035} = 95$ [euro/MWh]) ou une centrale à gaz ($LCOE_{2035} = 80$ [euro/MWh]) (voir Annexe B)

Enfin, le *LCOE* de l'électricité importée présente une valeur relativement élevée par rapport aux autres technologies. Cela est dû au CAPEX du réseau électrique, qui est de 518 [euros/MWh].

Cette observation peut dès lors justifier la raison pour laquelle l'électricité du réseau n'est pas privilégiée dans le mix. Quant à l'électricité produite localement, cette dernière diminue de plus en plus au vu de la contribution de plus en plus importante de l'éolien dans le mix énergétique ainsi que de l'élimination progressive des centrales à cogénération de gaz.

○ **Chaleur Haute Température**

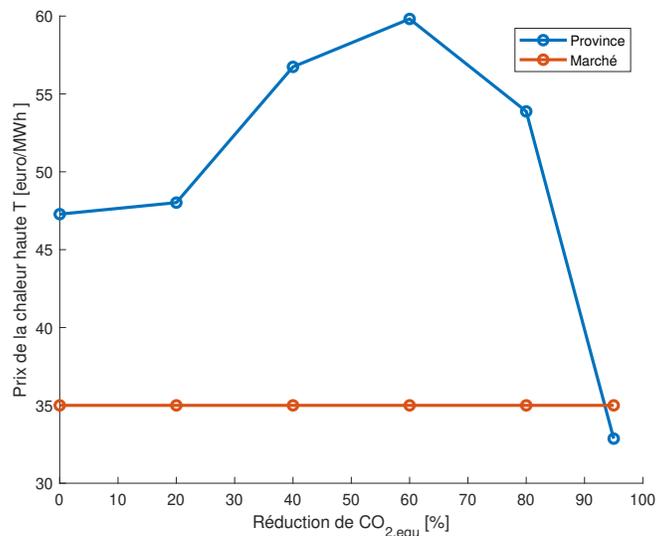


FIGURE 5.5 – Evolution du prix de la chaleur HT en fonction de la contrainte CO₂.

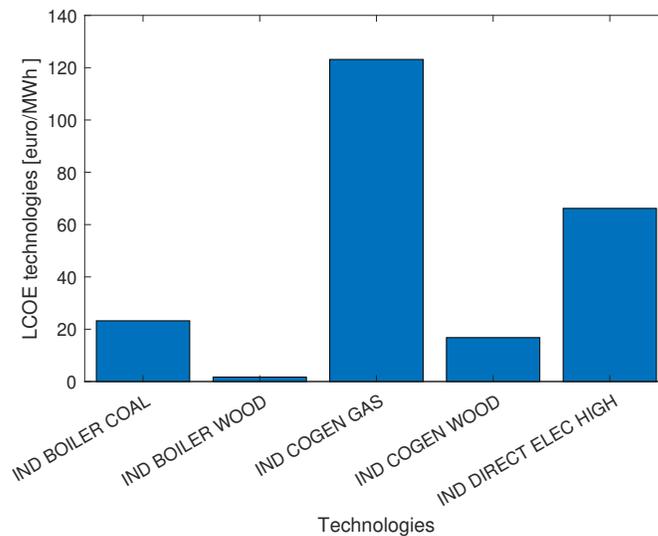


FIGURE 5.6 – LCOE des technologies de production de chaleur haute température repris dans le mix énergétique, estimés pour une réduction d'émissions de 40%.

L'augmentation du prix de la chaleur en fonction du taux de réduction de CO_2 , équ peut être justifié par l'élimination progressive du charbon dans le mix énergétique du à la contrainte de plus en plus élevée des émissions de CO_2 . La chaudière à charbon est en effet au début privilégiée par le mix dû à son LCOE relativement faible observé à la Figure 5.6. Après un taux de 60%, l'on observe que le prix diminue, de manière similaire à l'électricité. Cette similarité peut être justifiée par le fait que la contribution du LCOE de la technologie d'électrification directe présente une contribution de plus en plus importante dans le calcul du LCOE de la chaleur, remplaçant la contribution des chaudières à charbon et une partie des cogénérations gaz. La sensibilité de cette technologie d'électrification directe au prix de l'électricité est donc directement reflétée dans le prix de la chaleur.

Cet effet est une conséquence directe du couplage des secteurs de l'électricité et de la chaleur (*sector coupling* en anglais), qui est représenté par une part de production d'électricité de plus en plus importante dans le mix énergétique final présenté à la Figure 5.1.

Il est important de préciser que dans cette analyse, seuls les valeurs des LCOE des technologies calculés pour le mix de 60% de réduction de CO_2 , équ sont considérés. Une analyse plus précise nécessiterait l'évolution de la valeur de ces LCOE des technologies en fonction de la contrainte CO_2 .

Le prix du marché est estimé à une valeur de 35 [euros/MWh] (voir Figure 3.4), et reste donc inférieur à la chaleur produite localement. Bien que ce prix devienne supérieur au prix local dans le mix final (réduction de 95% de CO_2), il peut représenter un élément défavorable, d'un point

de vue économique, au développement du mix énergétique permettant d'atteindre ce mix final. En effet, ce prix est largement supérieur au prix du marché. Or, comme mentionné dans l'introduction, la perspective d'une indépendance énergétique a pour objectif de protéger également les citoyens des fluctuations importantes des prix du marché de l'énergie, mais il est important de considérer également les avantages du réseau, qui peut présenter, comme dans ce cas-ci, des prix plus faibles et plus avantageux pour les consommateurs finaux.

Une stratégie à mettre en place afin de favoriser d'un point de vue économique le scénario décarbonation de la Province serait la mise en place ou l'augmentation d'une taxe carbone sur le prix du marché de la chaleur. Au vu de l'évolution du prix de la chaleur observée, cette taxe implémentée varierait entre 0 et 25 euro/MWh tout au long du scénario de décarbonation. Imposer une taxe sur le marché n'est cependant pas une compétence de la Province. Une autre solution serait alors de fournir des subsides aux acteurs de la Province afin de les encourager à tendre vers l'indépendance énergétique et la neutralité carbone. En théorie, la valeur de ce subside peut être déterminée à l'aide de la valeur duale de la contrainte de carbone.

5.2 Variation du taux d'indépendance énergétique

Cette seconde analyse a pour objectif de présenter les différents compromis entre la quantité de CO_2 maximale et le taux d'indépendance minimale imposables à la Province de Luxembourg. Les analyses précédentes ont en effet montré que la décarbonation et l'indépendance énergétique peuvent, en fonction du secteur considéré, rentrer en "conflit".

Dans la théorie des modèles énergétiques, ce compromis peut être étudié à l'aide d'un front de Pareto. Un front de Pareto est une courbe dont chaque point représente la solution optimale entre deux paramètres. Il n'est donc pas possible de trouver une meilleure valeur pour un paramètre sans dégrader la valeur de l'autre. Dans le cadre de cette étude, le front de Pareto est une courbe, dont l'abscisse et l'ordonnée de chaque point représentent respectivement les émissions de CO_2 totales, et le taux de dépendance énergétique TDE [-], exprimé comme :

$$TDE = 1 - TIE$$

Dans cette étude, le front de Pareto est également une courbe d'isocout. Le coût total du système reste constant tout le long de la courbe.

Pour obtenir cette courbe, le modèle ESTD optimise cette fois-ci la fonction objective des émissions totales de $CO_{2, equ}$ pour un coût maximal et une production énergétique endogène minimale données.

Plusieurs courbes de Pareto sont représentées à La Figure 6.7. La courbe tout à droite (resp. gauche) est la courbe ayant le coût total du système imposé le plus faible (resp. élevé). Ce coût correspond à la valeur de coût total du mix énergétique avec 0% (resp. 95%).

Les courbes de Pareto montrent de manière générale que les systèmes les plus décarbonés sont les plus coûteux. En effet, la décarbonation d'un système nécessite l'investissement dans de nouvelles infrastructures et de nouvelles technologies présentant des CAPEX plus élevés.

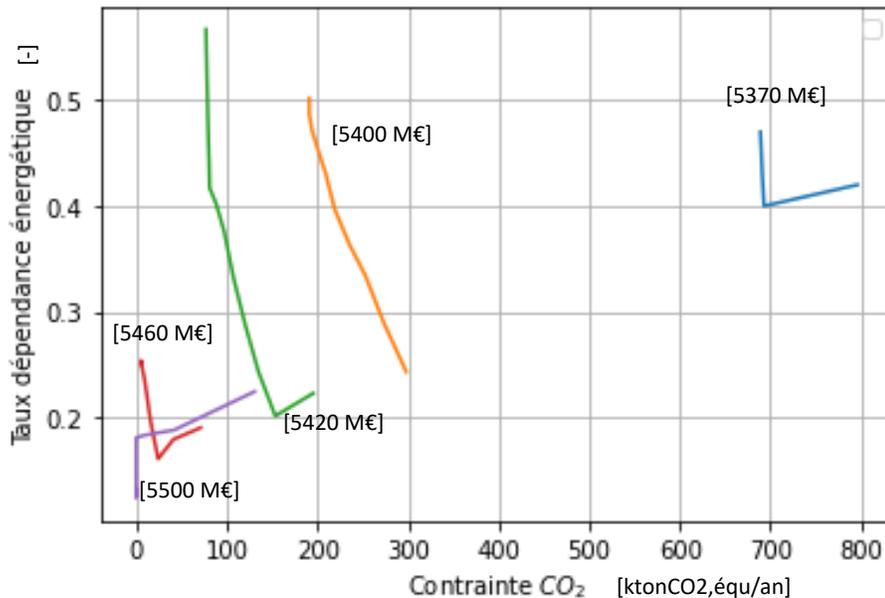


FIGURE 5.7 – Front de Pareto

Il est cependant à noter que ces courbes ont été obtenues à partir de résultats préliminaires qui présentent donc une calibration de données d'entrée différente de celle présentée dans ce travail.

En effet, il a été observé qu'avec la calibration actuelle présentée au chapitre 4, le mix énergétique ainsi que la quantité d'émissions de CO_2 totale restent insensibles à la variation du taux d'indépendance énergétique. Ce résultat peut être dû au fait que le modèle est fortement contraint par une autre variable, trouvant ainsi une solution unique et constante peu importe le taux d'indépendance énergétique souhaité.

De plus, seule les parties décroissantes de ces courbes (de gauche vers la droite) sont à considérer. La partie croissante de ces courbes ne constitue pas des résultats numériques pertinents, car ces derniers résultent d'un modèle fortement contraint qui n'optimise dès lors plus le mix énergétique.

Dès lors, l'on peut déduire de ce graphique qu'il est possible d'obtenir un mix énergétique avec une indépendance énergétique suffisamment élevée, tout en étant neutre en carbone également.

5.3 Un mix neutre et indépendant

Cette section a pour objectif de discuter des caractéristiques techniques d'un mix dont les émissions ont été réduites de 95% (sous l'effet de la contrainte CO_2 , avec un taux d'indépendance énergétique de 89% (sans contrainte d'indépendance appliquée)). Le diagramme de Sankey du mix initial et du mix final (-95% de CO_2,eq sont présentés respectivement aux Figures 5.8 et 5.9

La différence de coût total entre le mix initial et le mix neutre en carbone est de 348 [Meuros]. Cette différence de coût fournit dès lors un ordre de grandeur à l'investissement total nécessaire pour atteindre un mix neutre en carbone. Il est à noter que le mix initial est un mix optimisé, et ne présente pas le mix actuel de la Province. De plus, ce coût tient compte des coûts d'investissements des technologies déjà implémentées dans la Province. Ce coût total peut cependant être mieux approximé à l'aide du modèle EnergyScope Pathway.

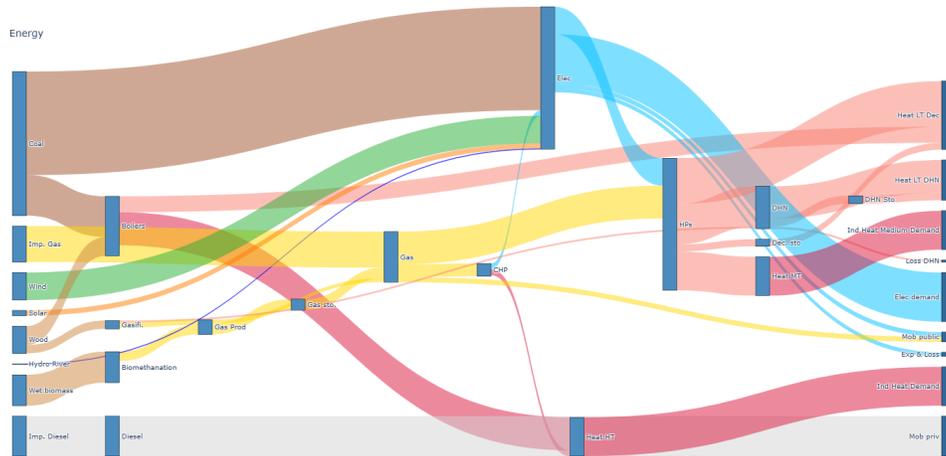


FIGURE 5.8 – Diagramme de Sankey du mix énergétique avec une réduction de 0% des émissions de gaz à effet de serre et un taux d’indépendance énergétique de 29%.

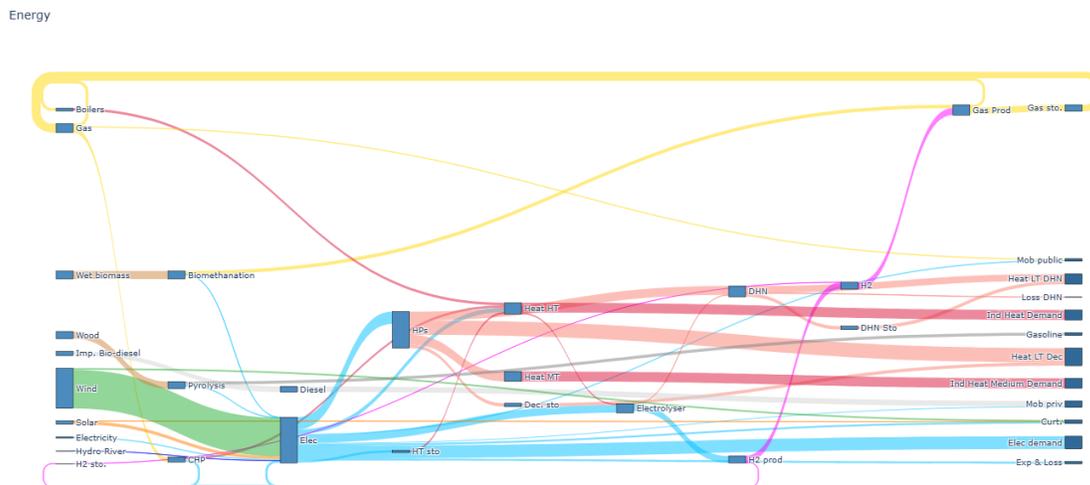


FIGURE 5.9 – Diagramme de Sankey du mix énergétique avec une réduction de 95% des émissions de gaz à effet de serre et un taux d’indépendance énergétique de 89% .

Ces diagrammes permettent d’observer à première approche l’ensemble des flux énergétiques du système et de la répartition de ces flux par rapport à la demande. Premièrement, par rapport au mix initial, le mix réduit en carbone présente une diversification plus importantes des technologies et ressources pour répondre à la demande. En effet, la décarbonation entraîne l’utilisation de ressources intermédiaires telles que l’hydrogène.

La Figure 5.9 met également en évidence l'électrification importante de la production de chaleur moyenne et basse température, comme discuté au préalable, ainsi que d'une centralisation plus accentuée. Cette centralisation de la production de chaleur est due à une utilisation plus importante des réseaux de chaleur. A noter que cette augmentation est cependant limitée par la capacité du territoire à implémenter ce type d'infrastructure. En effet, la Province de Luxembourg est constituée de cinq agglomérations principales, telles que la ville d'Arlon ou de Bastogne. Contrairement à d'autres provinces présentant une densité de population plus élevée, les habitants de la Province de Luxembourg sont répartis dans des villages distancés les uns des autres. L'implémentation de réseaux de chaleur n'aurait alors du sens qu'au niveau des agglomérations, là où la densité de population est la plus forte. Ces contraintes territoriales sont traduites dans le modèle par un pourcentage maximal de la production de chaleur à partir des réseaux de chaleur fixée à 37 %. Ce pourcentage est repris de celui appliqué à la Belgique ([17]).

Les sections suivantes ont pour objectif de discuter plus en détails de la production d'énergie répondant à chaque type de demande.

5.3.1 Electricité

L'évolution temporelle de la production et consommation de l'électricité est présentée sur la Figure 5.10 :

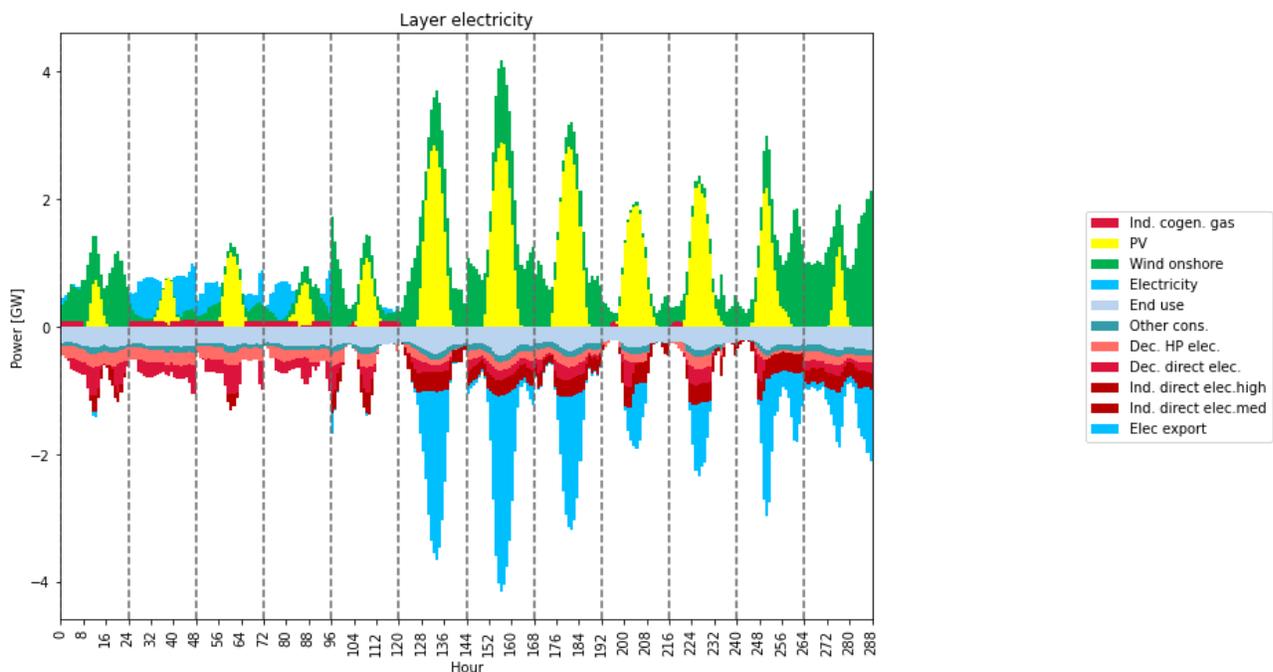


FIGURE 5.10 – Evolution de la production et de la consommation de l'électricité en fonction des jours typiques pour un mix neutre en carbone.

L'évolution de la demande d'électricité au cours du temps est définie par les *times series* ("série temporelle" en français) implémentées dans le modèle. Ces séries définissent les évolution météorologiques (soleil et vent) au cours du temps, l'évolution du débit des rivières, et l'évolution de la demande sur une année. Le mix présenté à la Figure 5.10 montre que certains jours typiques sont favorables à l'exportation de l'électricité (donc le coût d'exportation est considéré comme nul), notamment lorsque la production solaire et éolienne est relativement importante (comme par exemple un jour d'été). Cette exportation permet alors de bel et bien caractériser la Province de "territoire à énergie positive". Cette électricité peut en effet être exportée vers d'autres zones de la Wallonie ou de la Belgique en général, qui présentent moins de potentiel à développer un système énergétique indépendant au vu des contraintes territoriales et d'une forte densité de population (ex : Bruxelles).

Pour produire cette électricité, le mix est constitué de :

- 3.12 [GW] d'éolien onshore, soit 3.1 [GW] de plus qu'en 2023. Cette capacité installée présente des coûts d'investissement total et d'opération annuelle de 245.2 et 39.23 [Meuro].
- 0.513 [GW] de PV solaires, soit 0.2920 [GW] supplémentaires par rapport à 2023. Cette capacité installée présente des coûts d'investissement total et d'opération annuelle de 34.95 et 35.104 [Meuro].

5.3.2 Chaleur industrielle

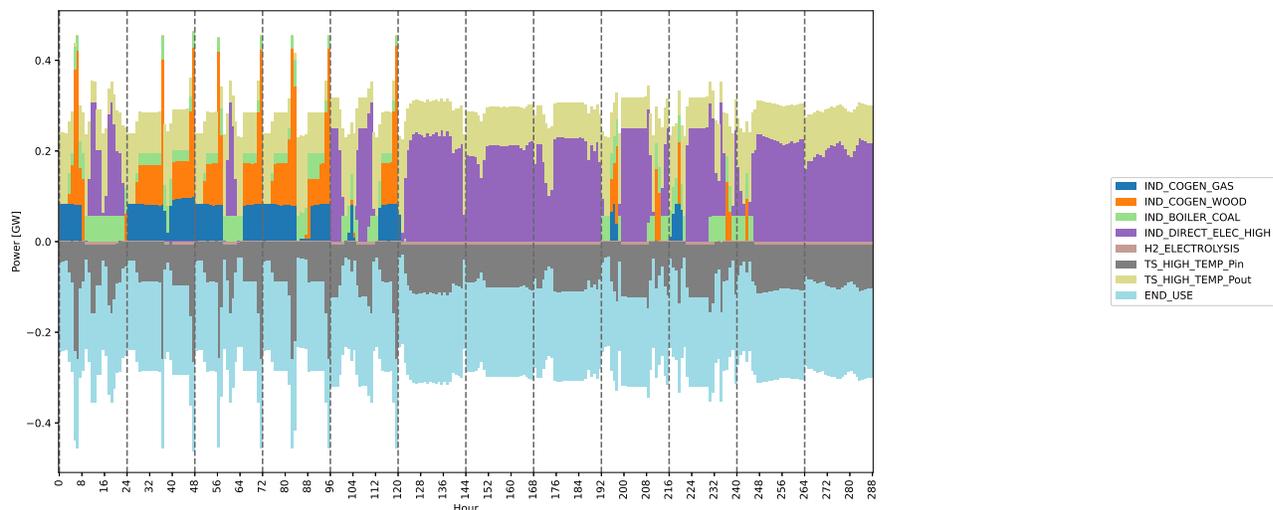


FIGURE 5.11 – Chaleur industrielle

Pour certains jours typiques, on observe que la chaleur industrielle est principalement fournie par le couplage d'électrification directe et de stockage. Pour les autres jours typiques, la chaleur industrielle est fournie par les technologies déjà installées dans la Province et par le stockage de chaleur à haute température. Ce mix nécessite dès lors :

- 1.2 [GW] de stockage de chaleur à haute température, avec des coûts d'investissement et d'opération annuelle de 2.65 [Meuro] et 0.36 [Meuro/an].
- 0.412 [GW] d'électrification directe, avec un coût d'investissement et d'opération annuelle de 14.14 [Meuros] et 0.62 [Meuro/an]

5.3.3 Chaleur moyenne température

La demande de chaleur moyenne industrielle nécessite

- 0.195 [GW] de pompe à chaleur industrielle.

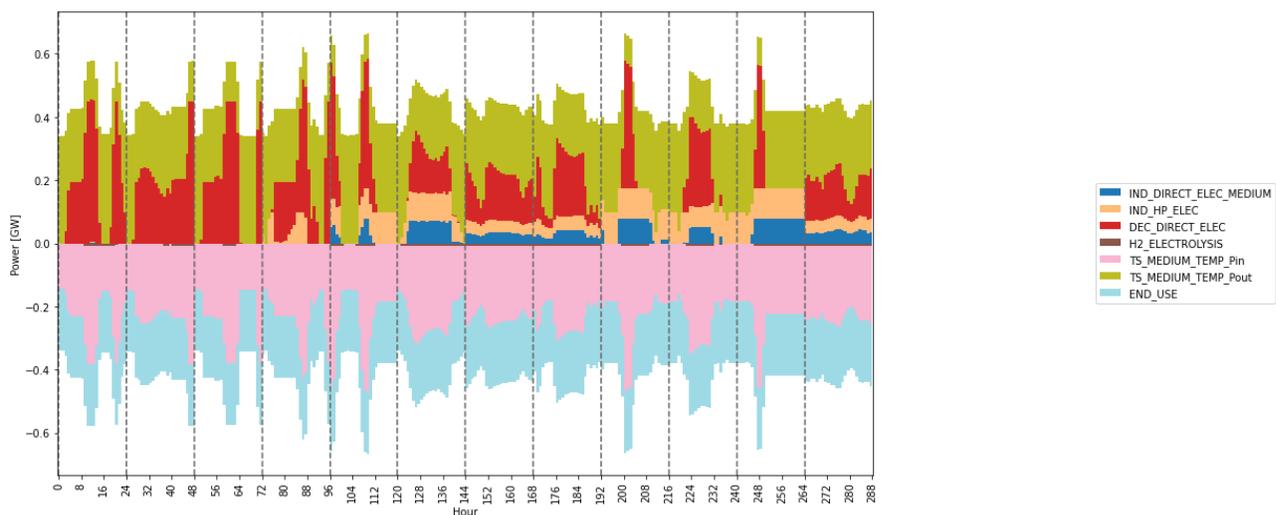


FIGURE 5.12 – Chaleur moyenne température

Le graphique montre la présence d'électrification directe décentralisée. Cette technologie n'est cependant pas supposée répondre à la demande de chaleur moyenne température. Cela peut être dû à une erreur d'implémentation dans le code.

5.3.4 Chaleur basse température

Décentralisée

La production de chaleur décentralisée nécessite 1.58 [GW] de pompes à chaleur domestique. Afin de vérifier la pertinence de cette valeur, il serait intéressant d'estimer combien de logements il est

possible d'alimenter avec cette technologie, et voir si le nombre de logements calculé n'est pas supérieur au nombre de logements actuel dans la Province.

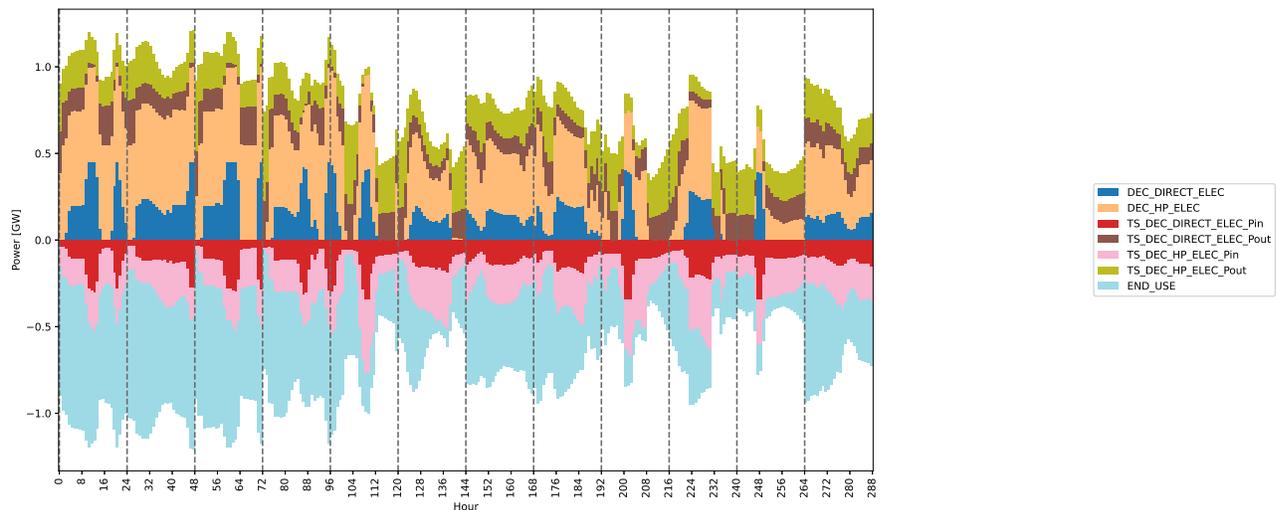


FIGURE 5.13 – Front de Pareto

Centralisé

La production de chaleur centralisée nécessite nécessite une capacité installée de 0.44 [GW] de réseau de chaleur et de 0.29 [GW] de pompes à chaleur centralisées. Afin de vérifier la pertinence de la valeur 0.44 [GW], il serait intéressant de la comparer avec le potentiel de réseau de chaleur qu'il est possible d'implémenter dans la Province de Luxembourg(valeur fournie par la Région Wallonnes).

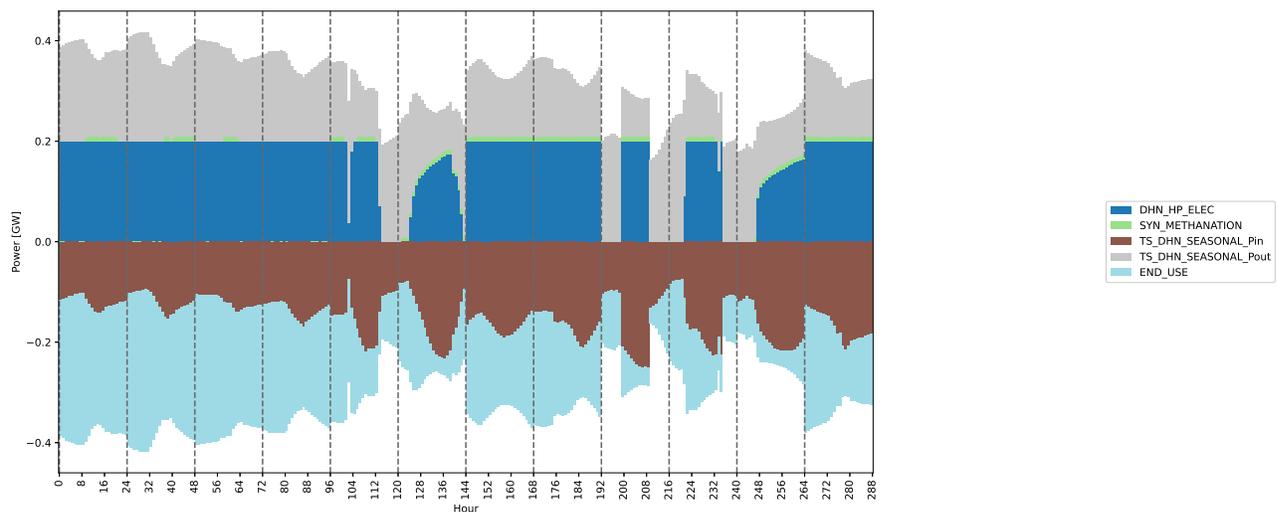


FIGURE 5.14 – Front de Pareto

5.3.5 Mobilité

○ **Privée :**

La mobilité privée ne présente pas de nouvel investissement au niveau de ces technologies. A noter qu’au vu de la Figure 5.1 et du diagramme Sankey relatif au mix neutre en carbone, la ressource utilisée change, et devient du biodiesel au lieu du diesel.

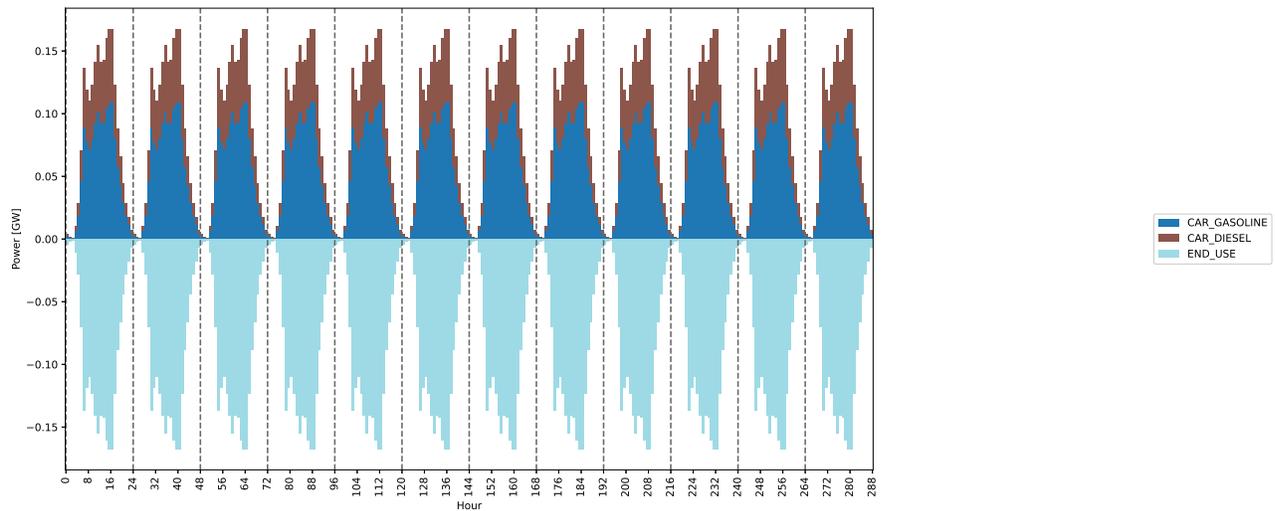


FIGURE 5.15 – Front de Pareto

○ **Publique :**

La mobilité publique, quant à elle , présente l’introduction du tramway trolley, représentant une capacité de 0.39 [GW]. Cette technologie nécessite la mise en place d’une infrastructure. Cette infrastructure n’est cependant une nouveauté pour la Province étant donné que le tram trolley a par le passé déjà existé dans la Province.

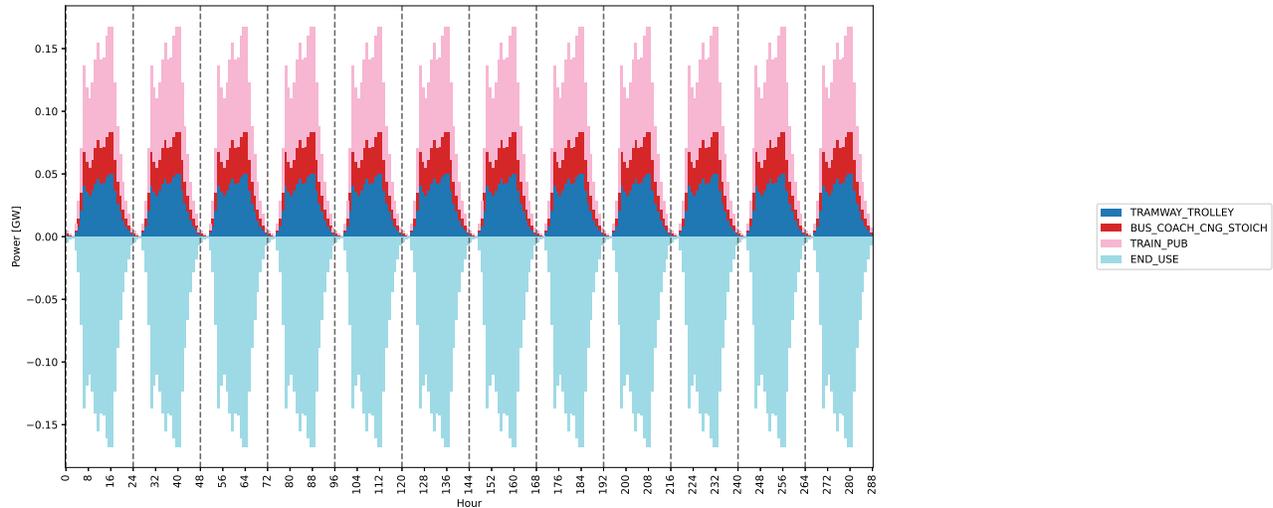


FIGURE 5.16 – Front de Pareto

FIGURE 5.17 – Front de Pareto

5.3.6 Infrastructure

Réseau électrique

Le mix neutre en carbone ne nécessite pas un investissement en infrastructure supplémentaire par rapport à la capacité actuelle (supposée égale à 1 [GW] de capacité d'importation).

5.3.7 Réseau de gaz

La Province de Luxembourg n'est pas la Province pour laquelle le réseau de gaz naturel est le plus développé. En effet, l'infrastructure présente permet d'alimenter principalement les industries. Mais au niveau du secteur résidentiel, les maisons sont principalement alimentées par les technologies de chauffage de bois et de fioul (mazout et éventuellement propane).

Le mix neutre en carbone présente cependant une capacité de production de gaz synthétique à partir d'hydrogène et de biométhanation. Ce gaz alimente ensuite les technologies conventionnelles telles que les unités de cogénération et les chaudières à gaz pour répondre à la demande de haute température (voir diagramme de Sankey).

Cette chaîne de production énergétique nécessite 800 [GWh] de stockage de gaz supplémentaire. Cette valeur atteint la borne maximale qui lui a été fixée, correspondant approximativement à la

consommation actuelle de gaz naturel dans la Province de Luxembourg. La Belgique présente une capacité de stockage de gaz naturel comprise entre 8,4 et 8,9 [TWh].[38] La capacité nécessaire serait alors 10 fois moins importante que celle de la Belgique, ce qui représente une valeur raisonnable. Cependant, le manque de données relatives à la capacité territoriale de la Province pour développer un stockage de gaz naturel ne permet pas de conclure sur la pertinence de ce résultat.

Enfin, le modèle investit dans de l'hydrogène. La capacité des électrolyseur est de 0.43 [GW]. L'investissement dans la technologie d'hydrogène est en ligne avec les initiatives wallonnes actuelles.

Le chapitre suivant a pour objectif d'établir un pathway qui tient compte de paramètres supplémentaires afin de proposer des coûts et investissements plus proches de la réalité dans les technologies nécessaires pour atteindre un mix neutre en carbone.



Chapitre 6

Plan et scénario vers 2050

Ce chapitre présente la deuxième partie de l'étude, qui vise à proposer un plan économique et technique à long terme permettant d'atteindre un mix énergétique neutre en carbone et présentant une indépendance énergétique relativement élevée. En effet, jusqu'à présent, seul le modèle overnight a été étudié. Cela signifie que le modèle a toujours supposé, dans les résultats, que l'investissement envers de nouvelles technologies se faisait en une nuit, et ne prenait donc pas l'aspect temporel des investissements. De plus, les coûts de ces investissements incluaient également les coûts d'investissement des technologies déjà présentes dans la Province.

Un plan technique est d'abord étudié, suivi du plan économique.

6.1 Plan technique

Le modèle EnergyScope Pathway permet de développer un pathway pour une région donnée à partir de l'année 2015 jusqu'à l'année 2040. Le pathway peut alors être présenté en deux parties : d'abord son année de référence (2015), et ensuite son évolution jusqu'en 2040.

6.1.1 Mix initial, 2015

Le mix initial est simulé en tenant compte des paramètres existants dans le modèle pour l'année 2015. Ce mix tient cependant compte des capacités installées et de la demande énergétique pour 2019. Il s'agit en effet de l'année la plus récente pour laquelle les données de consommation énergétique de la Province sont disponibles. De plus, l'année 2019 n'est pas une année ayant été impactée par des crises majeures telles que la crise du COVID19, ou de la guerre en Ukraine, et représente donc un profil de demande de consommation non atypique.

Le mix énergétique initial est présenté à la Figure suivante :

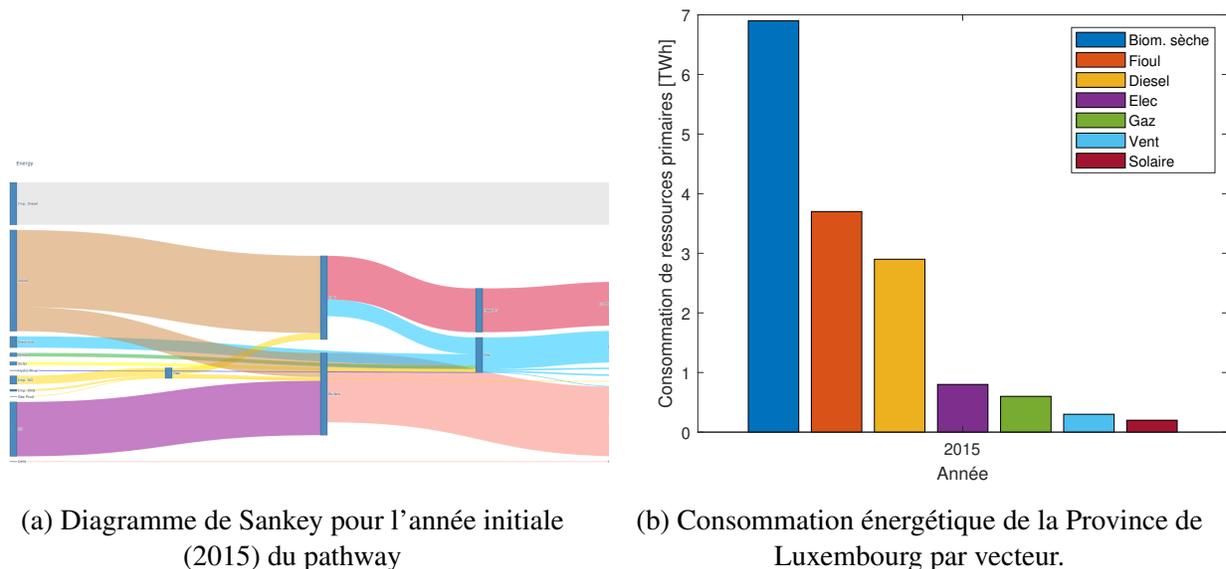


FIGURE 6.1

Ce mix initial est relativement proche du mix énergétique de la Province en 2019 (présenté au chapitre 3). À noter que l'utilisation massive de la ressource bois présentée dans la figure 6.1.a représente la consommation du bois local et du bois importé, ainsi que la consommation de vapeur utilisée dans les procédés industriels haute température, qui ne sont pas implémentés dans le modèle.

6.1.2 Evolution du mix jusque 2050

Le modèle EnergyScope pathway, soumis au scénario de décarbonation présenté à la section 3.5. fournit les résultats suivants :

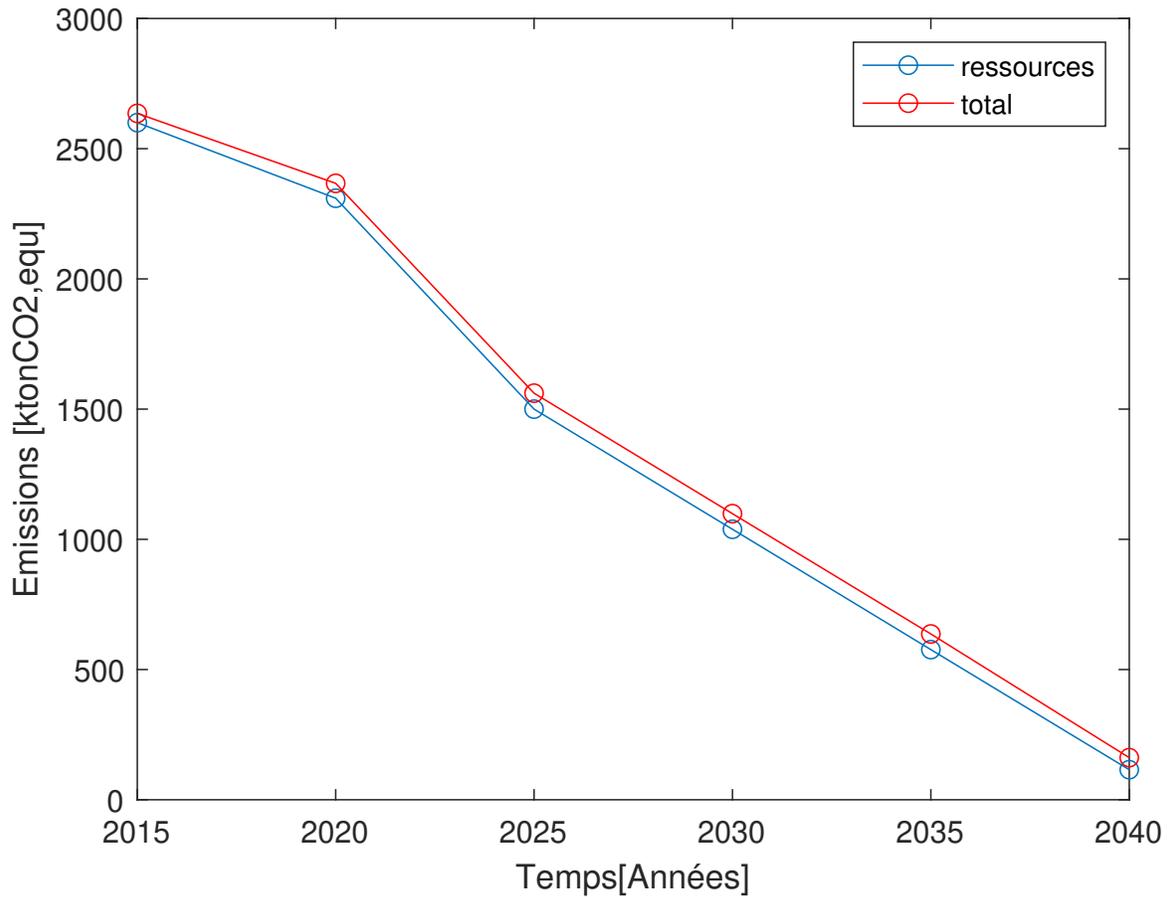


FIGURE 6.2 – Evolution des émissions de CO_2 dans le modèle pathway.

Le graphique 6.2 présente le scénario de décarbonation suivi par le modèle Pathway. La courbe rouge représente les émissions totales, tenant compte de la désinstallation des technologies.

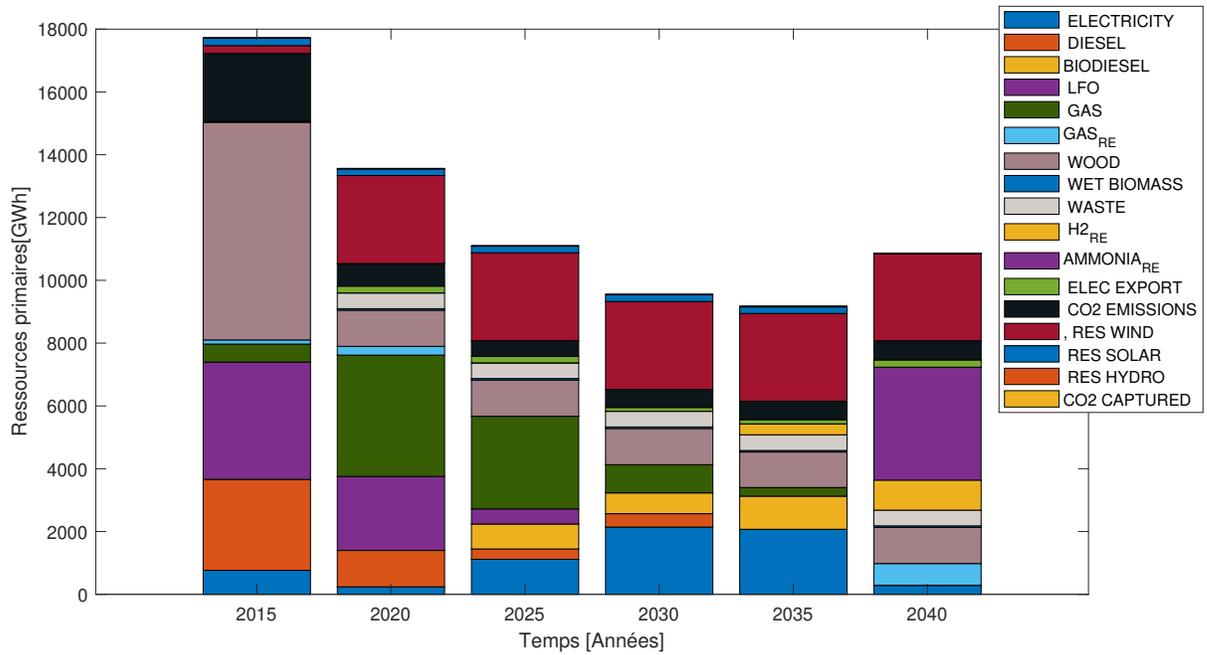


FIGURE 6.3 – Evolution de la répartition ressources dans le modèle Pathway.

La Figure ci-dessus présente l'évolution de la répartition des ressources primaires consommées par le système jusque 2040. L'année 2035 présente un mix énergétique relativement semblable au mix énergétique analysé à l'aide du modèle snapshot (étant donné que les paramètres avaient été évalués pour cette année-là).

La diminution de la proportion de bois est due au fait que l'on considère qu'à partir de 2020, seul le potentiel local biomasse de la Province est utilisé.

Le modèle tend vers un mix énergétique qui utilise principalement l'éolien et l'ammoniac, capture les émissions de CO_2 , et utilise de l'hydrogène renouvelable. Le mix énergétique de 2040 présente cependant un taux d'indépendance énergétique de 50 %. En effet, les ressources de gaz, d'hydrogène et d'ammoniac renouvelables sont considérées comme étant des ressources importées.

Les graphiques suivants présentent l'évolution des mix énergétiques relatifs à différents type de demande :

○ **Chaleur haute température**

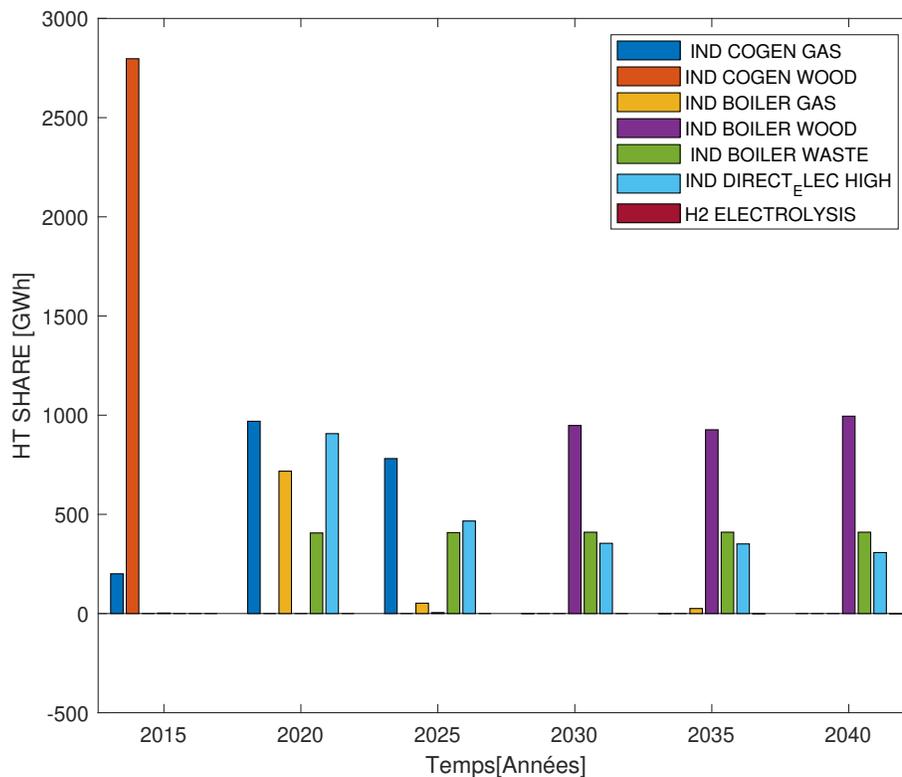


FIGURE 6.4 – Evolution de la répartition de la production de la chaleur haute température

○ **Chaleur moyenne température**

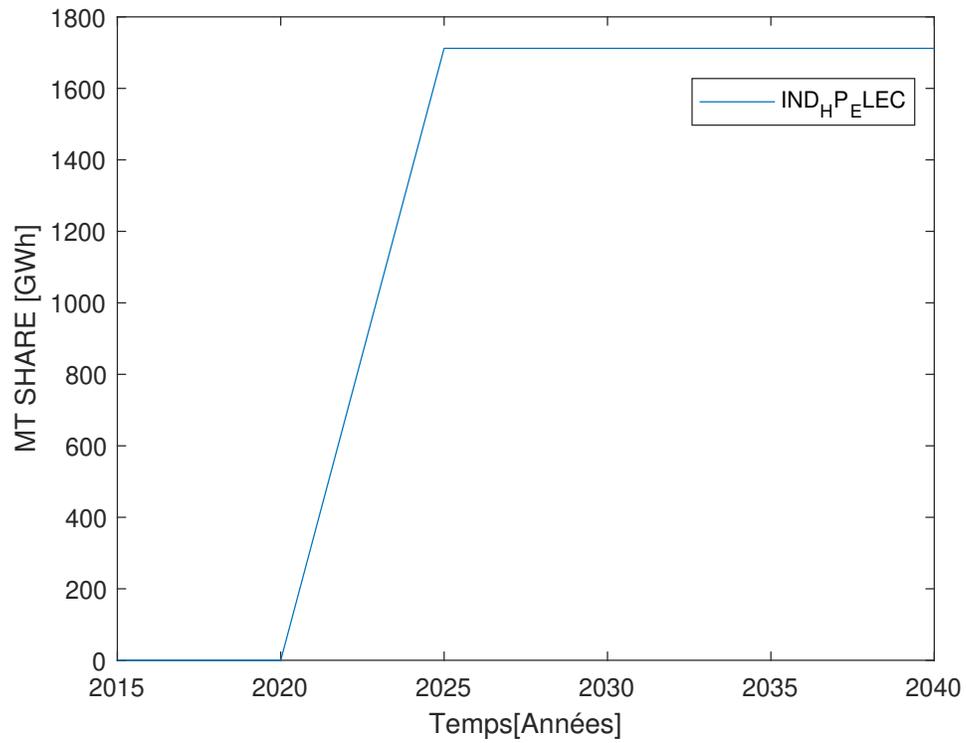


FIGURE 6.5 – Evolution de la production de la chaleur moyenne température

○ **Chaleur basse température décentralisée**

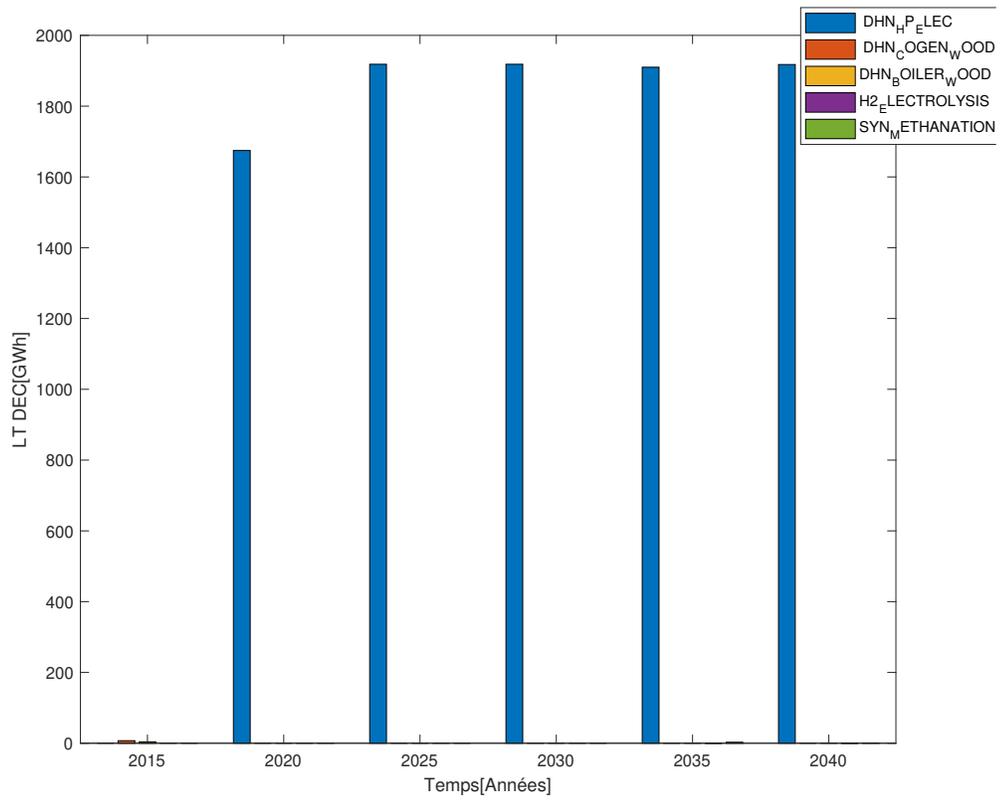


FIGURE 6.6 – Evolution de la répartition de la chaleur basse température décentralisée

○ **Chaleur basse température décentralisée**

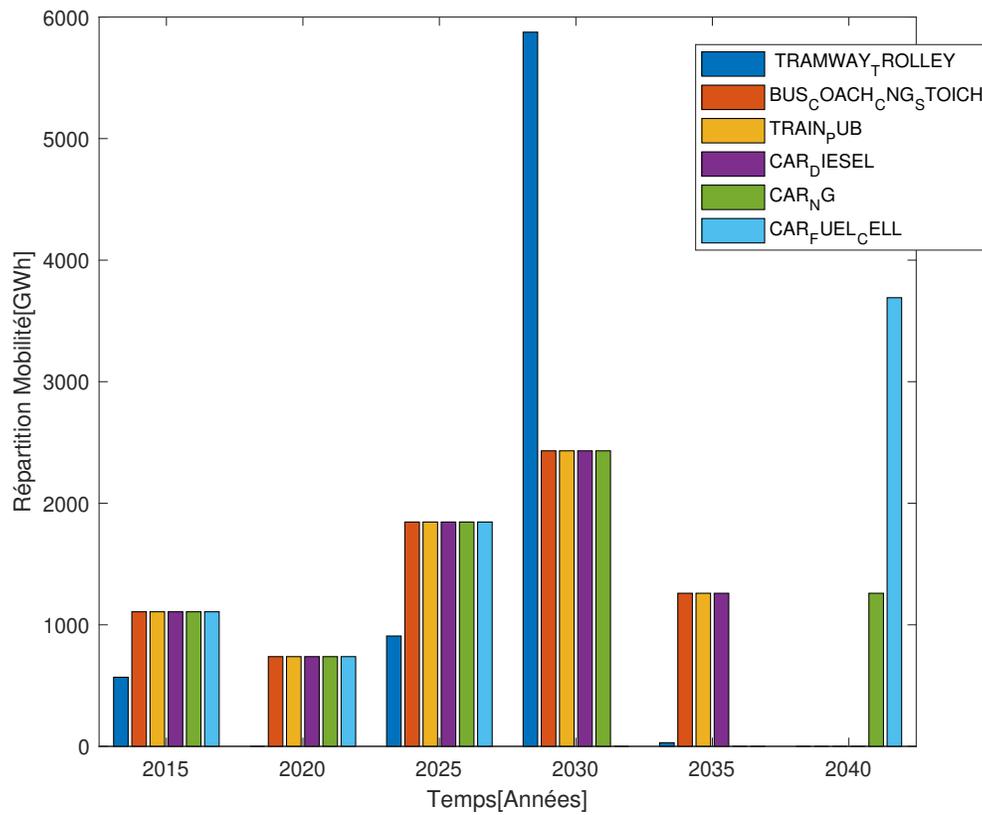


FIGURE 6.7 – Evolution de la répartition des technologies dans le secteur de la la mobilité

De manière générale, l'on observe que le modèle pathway propose un plan d'investissement technique relativement cohérent afin d'atteindre le mix énergétique "neutre en carbone" discuté au chapitre précédent. Certains changements majeurs apparaissent cependant entre l'année 2035 et 2040, notamment au niveau du secteur de la mobilité, qui requiert une utilisation de voitures électriques au lieu des technologies conventionnelles (voiture diesel), ainsi que l'utilisation des voitures à gaz naturel. De plus, la demande de mobilité n'est pas conservée au cours du temps, remettant en cause la fiabilité des données observées.

D'un point de vue technique, des analyses plus détaillées sont dès lors nécessaires afin de valider la pertinence des résultats avec les contraintes territoriales de la Province.

6.2 Plan économique

Le plan économique a pour objectif de présenter les projections futurs des coûts du système énergétique de la Province, et à l'aide de l'indicateur *LCOE*, de comparer ce coût aux projections du marché. En effet, cette comparaison permettra de justifier ou non d'un point de vue économique les investissements présentés par le plan technique. Le scénario de décarbonation serait alors validé si le plan technique répond aux contraintes territoriales de la Province, ainsi que si pour chaque année du pathway, l'énergie fournie par la Province présente un *LCOE* annuel inférieur au prix du marché. En effet, cette étude adopte le point de vue d'un consommateur final, et ne présente pas l'objectif d'une indépendante énergétique stricte, mais d'analyser les possibilités d'un modèle hybride entre la production locale et l'achat de l'énergie, permettant ainsi aux consommateurs tant de bénéficier des avantages du marché (prix d'énergie relativement bas), que de pouvoir s'en protéger notamment en période de crise.

Chapitre 7

Recommandations, limites et améliorations

"Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles". Cette citation de Georges Box rappelle en effet que tout modèle présente des limites. Ce chapitre présente des recommandations faisant suite aux résultats observés, ainsi que les limites des modèles EnergyScope TD et Pathway et des améliorations qui peuvent y être apportées.

7.1 Recommandations

De manière générale, les analyses et résultats présentés dans cette étude ne suffisent pas à fournir des recommandations stratégiques pertinentes pour la Province de Luxembourg. En effet, différentes analyses sont manquantes, tant au niveau de la faisabilité technique des résultats proposés par les deux modèles, que de leur faisabilité économique.

Certains résultats permettent cependant de tirer quelques conclusions. En effet, l'étude de la variation de la contrainte carbone a montré que la stratégie d'indépendance énergétique est une stratégie permettant de répondre aux enjeux climatiques et d'atteindre la neutralité carbone. Ce scénario prévoit d'investir en priorité dans le potentiel éolien et biomasse de la Province de Luxembourg. Cet objectif peut nécessiter cependant la mise en place de subsides ou de taxes carbone selon les fluctuations du prix du marché. Dans le cadre de cette étude, le secteur de l'électricité ne nécessiterait pas d'initiatives. Cependant le secteur de la chaleur haute température nécessite l'implémentation de subsides ou de taxes afin de parvenir à la neutralité carbone. Les autres types de demande n'ont

pas été analysées.

Les résultats du modèle pathway n'ont suffisamment pas été analysés et discutés pour fournir un plan d'investissement fiable d'un point de vue économique et technique. Les résultats fournis par ce plan présentent cependant une corrélation au niveau du mix énergétique de l'année 2035 avec le modèle snapshot, et peut constituer dès lors un premier résultat préliminaire dans l'établissement d'un plan fiable et réalisable.

7.2 Limites

- **Limites générales :**

Plusieurs limites du modèle ES TD ont été relevées par *Limpens* telles que le non équilibre du marché entre la production et la demande, la faible considération du taux d'activation des technologies (*ramp rate* en anglais), le non équilibre du marché entre la demande et la production d'énergie, ainsi que la faible résilience du modèle par rapport aux changements de certains paramètres. [28]

- **Utilisation des layers :**

Les *layers* implémentés dans EnergyScope assurent la conservation de l'énergie entre la production, la demande et le stockage. Cette modélisation, qui peut être observée dans les différents diagrammes Sankey de cette étude, centralise alors l'énergie produite avant de la redistribuer vers les différents usages finaux. Dans la réalité, la production n'est pas toujours entièrement centralisée et parfaitement redistribuée.

- **Stockage de l'énergie :** Le mix final présenté pour la Province de Luxembourg présente différentes solutions de stockage, tel que le stockage saisonnier des réseaux de chaleur. Le modèle ne tient cependant pas compte de l'énergie nécessaire pour conserver la chaleur à une température suffisamment élevée tout au long de la période de stockage (notamment en hiver).

- **Hypothèse d'un marché parfait :**

Le modèle EnergyScope fait l'hypothèse d'un marché parfait, ce qui n'est pas le cas en réalité. En effet, chaque unité énergétique et chaque technologie s'y retrouve. Le système est donc exactement rentable par rapport au taux d'intérêt, et fait l'hypothèse de subsides octroyés par le gouvernement afin d'atteindre cette rentabilité. Ces subsides, comme mentionné préalablement, peuvent être calculés à l'aide de la théorie duale des contraintes.

7.3 Améliorations

De nombreuses améliorations peuvent être apportées à cette étude afin de proposer des stratégies plus précises et réalistes pour la Province :

- Implémentation dans les modèles EnergyScope TD et Pathway de la demande de chaleur industrielle de combustion à température située entre 160 [°C] et 400 [°C].
- Estimation plus précise des paramètres liés à la chaleur moyenne température.
- Amélioration de l'implémentation des technologies de production de plaquettes et de pellets (ajustement des paramètres et de l'implémentation de ces technologies dans le code). En effet, bien que ces technologies aient été implémentées dans le code de sorte à présenter un *LCOE* compétitif, ces technologies n'apparaissent dans aucun des résultats.
- Implémentation des scénarios de projection de la demande énergétique wallonnes à l'échelle de la Province de Luxembourg.
- Réalisation d'analyses plus approfondies au niveau de la fiabilité des résultats (comparaison avec la littérature) et adopter une meilleure évaluation des indicateurs permettant d'établir les analyses. Par exemple, dans le modèle snapshot, une étude supplémentaire faisant varier le prix du réseau serait intéressante à mener, afin d'analyser la sensibilité du mix énergétique par rapport à ce paramètre, et de pouvoir discuter de la résilience du système énergétique par rapport à ce paramètre. Cette étude permettrait en effet de quantifier plus précisément les initiatives économiques qui peuvent être mises en place afin de réduire la dépendance du système au marché de l'énergie.
- Les analyses économiques établies dans ce type d'étude nécessitent l'évaluation permanente de l'indicateur *LCOE* afin de comprendre les choix d'investissements du modèle dans les différentes technologies, ainsi que d'établir des analyses économiques fiables. L'évaluation de cet indicateur n'est cependant pas directement implémentée dans EnergyScope, et nécessite donc des calculs supplémentaires à effectuer. Cette tâche devient d'autant plus difficile lorsque le mix énergétique présente de plus en plus de diversifications en terme d'utilisation de ressources (primaires et secondaires) et des technologies. L'indicateur *LCOE* des technologies est en effet très sensible à la composition du mix énergétique et nécessite donc d'être évalués pour chaque configuration étudiée du système énergétique.
- Initialisation du modèle à partir de l'année 2020, permettant ainsi de mieux corrélérer la demande énergétique de 2019 avec les paramètres du modèle de l'année 2020.

Conclusion

Cette étude a pour objectif de proposer des stratégies de décarbonation et d'indépendance énergétique du territoire de la Province de Luxembourg. La motivation de développement de ces stratégies est due aux enjeux climatiques actuels, ainsi qu'aux impacts néfastes observés sur les consommateurs énergétiques finaux lors de la crise énergétique de 2021-2023. Les résultats ont montré que la Province de Luxembourg présente un potentiel d'indépendance énergétique pouvant atteindre une valeur de 89%. D'un point de vue technique, cette indépendance énergétique va de paire avec une stratégie de décarbonation de la Province permettant d'atteindre ainsi un mix énergétique également neutre en carbone. Ce mix est caractérisé par une électrification relativement importante des secteurs de la chaleur basse température et dans la production de ressources intermédiaires telles que l'hydrogène. Le secteur de la mobilité est également électrifié dû à l'introduction du tramway trolley. Le mix présente également un investissement dans les solutions de stockage saisonniers, liés aux technologies de réseau de chaleur. Les considérations économiques de ces résultats ainsi que leur fiabilité technique nécessitent cependant des analyses plus approfondies que celles établies dans le cadre de cette étude. Cette étude présente cependant une base importante en recherche de données, en manipulation et compréhension de modèles de systèmes énergétiques relativement complexes, et dans la calibration et adaptation de ces modèles au territoire de la Province de Luxembourg. Elle constitue dès lors une base sur laquelle peuvent s'appuyer de futures études présentant des objectifs et des considérations territoriales similaires.

Annexe A

Données d'entrée - Méthode de calcul

A.1 Demande d'utilisation finale de l'énergie au Luxembourg

A.1.1 Electricité

Consommation variable d'électricité (CVE)(éclairage)

- Logement :

$$CVE = CVE_{unit,logement,2019} \cdot nb,logements,2019 = 45,689 \quad [GWh/an]$$

avec

- $CVE_{unit,logement,2019} = 320$ [kWh/an/logement],
la consommation d'un logement wallon en 2019.
- $nb,logements,2019 = 142\,689$ [Logements],
le nombre de logements total au Luxembourg en 2019

Hypothèses :

- $nb,logements,2019 = \frac{nb,logements,2018+nb,logements,2020}{2}$

Sources :

- SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents – p. 32
- CEHD - CHIFFRES-CLÉS DU LOGEMENT EN WALLONIE- QUATRIÈME ÉDITION – p.37
- CEHD -CHIFFRES CLÉS DU LOGEMENT EN WALLONIE CINQUIÈME ÉDITION - p.55

o **Tertiaire :**

$$CVE_{\text{tertiaire}} = \%eclairage, \text{tertiaire}, 2019 \cdot consomm, \text{elec}, \text{total}, \text{tertiaire}, 2019 = 174,496 \text{ [GWh/an]}$$

avec

- $\%eclairage, \text{tertiaire}, 2019 = 38\%$,
le pourcentage d'électricité du secteur tertiaire dédié à l'éclairage,
- $consomm, \text{elec}, \text{total}, \text{tertiaire}, 2019 = 459,2 \text{ [GWh/an]}$
, la consommation électrique totale du secteur tertiaire au Luxembourg en 2019

Hypothèse : $\%eclairage, \text{tertiaire}, 2019 = \%eclairage, \text{tertiaire}, 2019, \text{Wallonie}$

Sources :

- SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents – p.91
- Province de Luxembourg

o **Industrie :**

$$CVE_{\text{industrie}} = \%eclairage, \text{industrie}, 2019 \cdot consomm, \text{elec}, \text{total}, \text{industrie}, 2019 = 169,125 \text{ [GWh/an]}$$

avec

- $\%eclairage, \text{industrie}, 2019 = 15\%$,
le pourcentage d'électricité en industrie dédié à l'éclairage ,
- $consomm, \text{elec}, \text{total}, \text{industrie}, 2019 = 1127,5 \text{ [GWh/an]}$
, la quantité d'électricité totale consommée par l'industrie en 2019

Hypothèse :

- L'éclairage en industrie représente en moyenne 15% de la facture totale d'électricité
- La donnée *consomm,elec,total,industrie,2019* comprend également la consommation électrique du secteur de l'agriculture

Sources :

- Province de Luxembourg
- <https://energie.wallonie.be/fr/caracteristiques-techniques-de-l-eclairage-en-industrie.html?IDC=9063>

Consommation constante d'électricité(CCE)

o Logement :

$$CCE_{\text{logement}} = \text{consomm,elec,total,logement,2019} - CVE_{\text{logement,2019}} = 535,111 \text{ [GWh/an]}$$

Sources : Province de Luxembourg

o Tertiaire :

$$CCE_{\text{tertiaire}} = \text{consomm,elec,total,tertiaire,2019} - CVE_{\text{tertiaire,2019}} = 284,705 \text{ [GWh/an]}$$

Sources : Province de Luxembourg

o Industrie :

$$CCE_{\text{logement}} = \text{consomm,elec,total,industrie,2019} - CVE_{\text{industrie,2019}} = 958,375 \text{ [GWh/an]}$$

Hypothèse :

- La donnée *consomm,elec,total,industrie,2019* comprend également la consommation électrique du secteur de l'agriculture

Sources : Province de Luxembourg

A.1.2 Transport

Marchandises

Hypothèse : La consommation d'énergie pour le transport de marchandises ne sera pas considérée dans le cadre de ce projet. Le transport dans la province sera particulièrement analysé pour les citoyens.

Demande de transport de passagers (DTP) en million de passagers.kms

- **Ferroviaire :**

$$DTP_{trains} = \frac{nb, pass, train, wall, 2019}{consomm, pass, train, wall, 2019} \cdot consomm, train, Lux, 2019 = 334,86 [Mp - kms]$$

avec

- $nb, pass, train, wall = 3135$ [Mp-kms],
le nombre de passagers dans le secteur ferroviaire en wallonie en 2019
- $consomm, pass, train, wall = 512,5$ [GWh PCI],
l'énergie consommée par les passagers dans le secteur ferroviaire en Wallonie en 2019
- $consomm, pass, train, Lux = 54,742$ [GWh],
l'énergie totale consommée par le secteur ferroviaire au Luxembourg

Hypothèses :

- La donnée $nb, pass, train, wall$ a été trouvée comme suit :

$$nb, pass, train, wall = \%pass, train \cdot nb, tot, pass, Wall$$

(où $\%pass, train$ est le pourcentage de passagers qui utilisent le train en Wallonie)

- Les données sont celles de 2009, par manque d'informations plus récentes

Sources :

- Fiche M007-TRANSP.TERR, Iweps, Wallonie.
- Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan de consommation des transports - p.36

- **Routier :**

$$DTP_{\text{routier}} = \frac{nb, \text{pass}, \text{route}, \text{wall}}{\text{consomm}, \text{pass}, \text{routier}, \text{wall}} \cdot \% \text{pass}, \text{route} \cdot \text{consomm}, \text{route}, \text{total}, \text{Lux}$$

$$\iff DTP_{\text{routier}} = 7048,45 [Mp - kms]$$

avec

- $nb, \text{pass}, \text{route}, \text{wall} = 52,9e+3$ [Mp-kms],
le nombre de passagers routiers en wallonie
- $\text{consomm}, \text{pass}, \text{route}, \text{wall} = 18\,244,7$ [GWh PCI],
l'énergie consommée par les passagers routiers en Wallonie
- $\text{consomm}, \text{route}, \text{Lux} = 3985,2$ [GWh],
l'énergie totale consommée par le transport routier total au Luxembourg
- $\% \text{pass}, \text{route} = 61,09 \%$, le pourcentage de passagers routiers par rapport au transport routier total (marchandises + passagers)

Hypothèses :

- La donnée la plus récente pour $nb, \text{pass}, \text{route}, \text{wall}$ date de 2016.
- La donnée $\text{consomm}, \text{pass}, \text{route}, \text{wall}$ est calculée comme suit : $\text{consomm}, \text{pass}, \text{route}, \text{wall} = \text{consom}, \text{total}, \text{route}, \text{wall} - \text{consomm}, \text{camion}, \text{camionnettes}, \text{wall}$
- La donnée $\% \text{pass}, \text{route}$ est calculée comme suit :

$$\% \text{pass}, \text{route} = 100 - \% \text{march}, \text{route} = 100 - \frac{\text{consomm}, \text{camions}, \text{camionnettes}, \text{wall}}{\text{consomm}, \text{total}, \text{route}, \text{wall}}$$

La répartition entre le transport de passagers et de marchandises a donc été répartie à la Province de la même manière qu'elle a été répartie sur la région wallonne, par manque de donnée.

- Certaines données datent de 2009

Sources :

- Fiche M007-TRANSP.TERR, Iweps, Wallonie.
- Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan de consommation des transports.
- Province du Luxembourg

A.1.3 Chaleur

Consommation de chaleur à Haute température (CHT)(Industrie)

$$CHT = \text{consomm, indu, total, 2019} - \text{consomm, indu, elec, 2019} - \text{consomm, indu, chauff, 2019} = 3424,7 \text{ [GWh]}$$

avec

- $\text{consomm, indu, total, 2019} = 5678,5 \text{ [GWh]}$,
la consommation énergétique totale du secteur de l'industrie en 2019
- $\text{consomm, indu, elec, 2019} = 1118,1 \text{ [GWh]}$,
la consommation électrique totale du secteur de l'industrie
- $\text{consomm, indu, chauff, 2019} = 1135,7 \text{ [GWh]}$,
la consommation énergétique du secteur de l'industrie dédiée au chauffage de l'espace

Hypothèse :

- La chaleur à haute température est uniquement consommée dans le secteur de l'industrie.
- La chaleur haute température n'est pas utilisée dans l'agriculture.
- On considère que l'énergie utilisée par l'industrie présente uniquement trois usages : électricité, production de chaleur haute température, chauffage de l'espace.
- Le chauffage de l'espace d'un site industriel représente 10 à 30% de sa facture globale d'énergie. On prendra ici une valeur de 20%.

Sources :

- Province de Luxembourg
- <https://energie.wallonie.be/fr/le-chauffage-des-grands-espaces-industriels.html?IDC=8670&IDD=97680>

Consommation énergétique pour Eau chaude sanitaire (CECS) (basse température)

- **Logements :**

$$CECS_{\text{logements}} = \%ECS \cdot \text{consomm, total, energie, logement, Lux} = 381,6 \text{ [GWh]}$$

avec

- $\%ECS = 12\%$,
le pourcentage de consommation du secteur du logement wallon dédié à l'eau chaude sanitaire
- $consomm, total, energie, logement, Lux = 3180$ [GWh],
la consommation énergétique totale du secteur du logement au Luxembourg

Hypothèses :

- Les pourcentages wallons sont appliqués à l'échelle provinciale par manque de donnée. On estime que la tendance à l'échelle wallonne est applicable à l'échelle provinciale étant donné qu'elle se réfère au comportement des Wallons, et pas à la géographie.

Sources :

- Province du Luxembourg,
- SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents.

o **Tertiaire :**

$$CECS_{tertiaire} = \%ECS \cdot consomm, total, energie, tertiaire, Lux = 4,4 \text{ [GWh]}$$

avec

- $\%ECS = 0,39\%$,
le pourcentage de consommation du secteur du tertiaire wallon dédié à l'eau chaude sanitaire
- $consomm, total, energie, tertiaire, Lux = 1129,1$ [GWh],
la consommation énergétique totale du secteur du tertiaire au Luxembourg

Hypothèses :

- Les pourcentages wallons sont appliqués à l'échelle provinciale par manque de donnée.

Sources :

- Province du Luxembourg,
- SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents.

o **Industrie :**

Hypothèse : Pas d'utilisation d'eau chaude (manque de donnée).

Consommation de chaleur pour le Chauffage de l'espace (CCCE)(basse température)

○ **Logement :**

$$CECS_{logement} = \text{consomm, total, logement} - \text{consomm, elec, logement} - \text{consomm, ECS, logement}$$

$$\iff CECS_{logement} = 2218 \quad [GWh]$$

○ **tertiaire :**

$$CECS_{tertiaire} = \text{consomm, total, logement} - \text{consomm, elec, logement} - \text{consomm, ECS, logement}$$

$$\iff tertiaire = 665,5 \quad [GWh]$$

○ **industrie :**

$$CECS_{industrie} = 20\% \cdot \text{consomm, total, industrie} =$$

$$\iff CECS_{industrie} = 1135,7 \quad [GWh]$$

Hypothèses : Ces données ont été calculées sur base des données précédentes, afin de respecter les bilans annuels de consommation d'énergie dans les différents secteurs fournis par la Province.

Sources :

- Bilan domestique et équivalent wallon, 2019, p.32.p.91,



Annexe B

Technologies implémentées sur EnergyScope TD et Pathway

La Figure B.1 présente l'ensemble des technologies et ressources implémentées dans les modèles EnergyScope TD et EnergyScope Pathway. La Figure B.2 présente l'évolution de l'indicateur *LCOE* relatifs à différentes technologies.

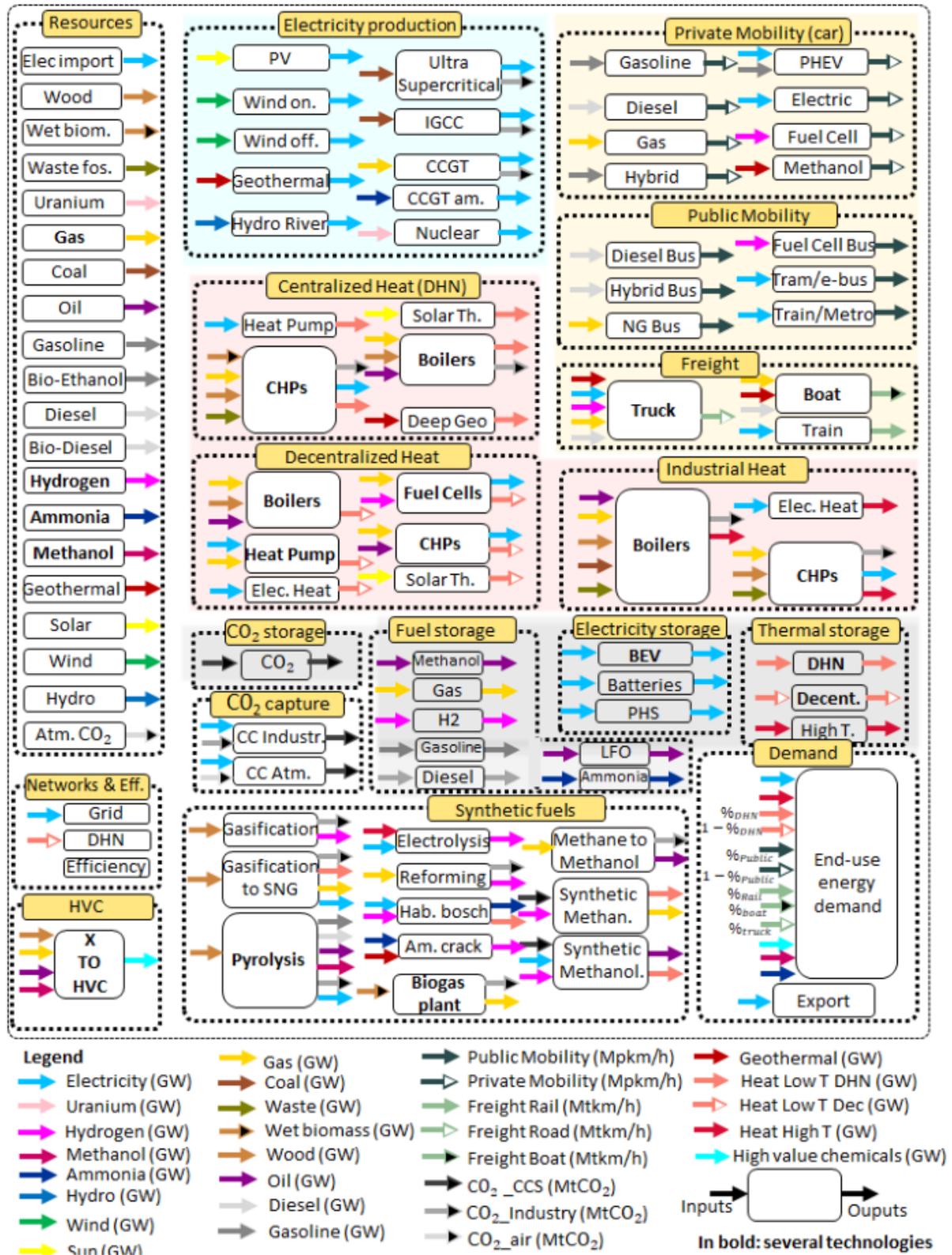


FIGURE B.1 – Ensemble des ressources et technologies implémentées dans les modèles EnergyScope TD et EnergyScope Pathway.

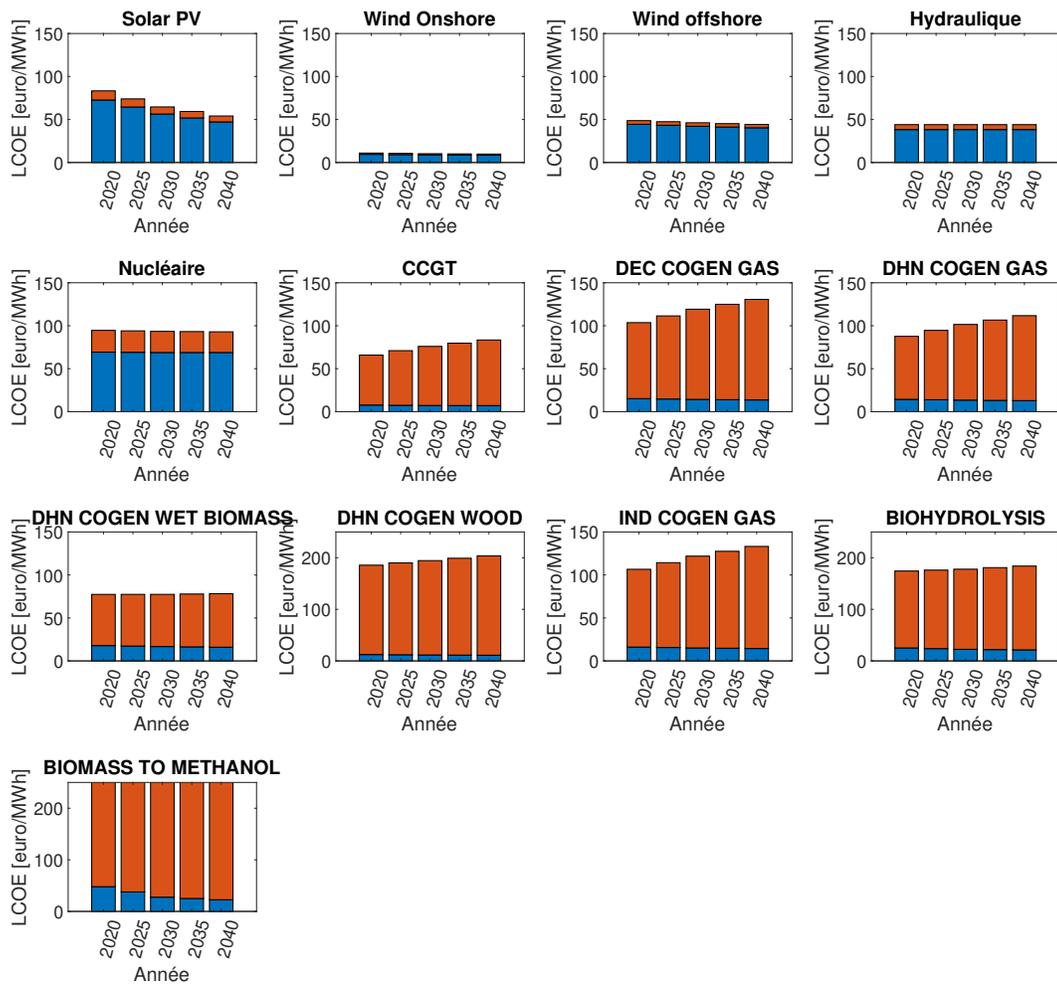


FIGURE B.2 – LCOE des certaines technologies implémentées dans EnergyScope Pathway

Bibliographie

- [1] K.
- [2] SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents – p. 32
- [3] CEHD - CHIFFRES-CLÉS DU LOGEMENT EN WALLONIE- QUATRIÈME ÉDITION – p.37 — CEHD - CHIFFRES CLÉS DU LOGEMENT EN WALLONIE CINQUIÈME ÉDITION - p.55
- [4] SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents – p.91
- [5] Province du Luxembourg
- [6] <https://energie.wallonie.be/fr/caracteristiques-techniques-de-l-eclairage-en-industrie.html?IDC=9063&IDD=113466>
- [7] SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents
- [8] SPW : Bilan énergétique de la Wallonie 2019 Bilan du secteur domestique et équivalents
- [9] V. Codina Giron, S. Moret, F. Maréchal, D. Favrat (2015) .Strategicenergyplanningforlarge-scaleenergysystems: Amodellingframeworktoaiddecision-making. Energy, 90(PA1), 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.008>
- [10] <https://energyscope.readthedocs.io/en/master/sections/Model%20formulation.html>
- [11] <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [12] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr
- [13] <https://energie.wallonie.be/fr/21-03-2023-plan-air-climat-energie-2030.html?IDD=168395&IDC=8187>
- [14] <https://www.plannationalenergieclimat.be/fr/le-pnec-c-est-quoi?plan-actualise-2023>

- [15] <https://province.luxembourg.be/vivre/environnement-service-aux-communes/energie#:~:text=La%20Province%20met%20en%20place,pour%20catalyser%20la%20transition%20%C3%A9nerg%C3%A9tique.>
- [16] <https://lampspw.wallonie.be/dgo4/conventiondesmaires/les-signataires>
- [17] G.Limpens (2021). Generating energy transition pathways: application to Belgium. Ph.D thesis Université Catholique de Louvain. <http://hdl.handle.net/2078.1/249196>
- [18] <https://www.province.luxembourg.be/province-de-luxembourg :text=La%20Province%20de%20Luxembourg>
- [19] https://walstat.iweps.be/walstat-catalogue.php?niveau_agre=C&theme_id=16&indicateur_id=811400&sel_niveau_catalogue=P&ordre=14
- [20] https://fr.wikidia.org/wiki/Province_de_Luxembourg
- [21] https://indicators.be/fr/i/G13_GHG/%C3%89missions_de_gaz_%C3%A0_effet_de_serre_%28i59%29
- [22] <http://www.entreprisesdewallonie.be/Entreprises/FR/Entreprises.wb?REFID=RDIAAAAAACNAPcKYYh117vTWto>
- [23] <https://app.electricitymaps.com/zone/BE>
- [24] <https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2022/12/Industrial-Heat-Pumps-overview.pdf>
- [25] https://www.plan.be/publications/publication-2488-fr-perspectives_energetiques_de_la_belgique_a_politique
- [26] Valbiom, *Panorama des filières bois-énergie et agrocombustibles en Wallonie*, Édition 2018.
- [27] <https://www.valbiom.be/actualites/suivi-mensuel-des-prix-des-combustibles-bois>
- [28] <https://energyscope.readthedocs.io/en/master/sections/Overview.html>
- [29] <https://report.vito.be/t/DynamicEnergyAtlas/views/Bregilab/Belgium?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y>
- [30] <https://www.hotelseconews.com/Ouverture-de-la-plus-grande-usine.html>
- [31] JRC, *CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union*, Dataset Version 2017.
- [32] <https://energie.wallonie.be/fr/la-geothermie-profonde.html?IDC=6173#:~:text=La%20g%C3%A9othermie%20moyenne%20%C3%A9nergie&text=Cette%20solution%20est%20envisageable%20en,un%20de%20ses%20atouts%20majeurs.>
- [33] [prix à l'éc2023:https://www.cwape.be/node/138#observatoire-des-prix](https://www.cwape.be/node/138#observatoire-des-prix)
- [34] <https://app.electricitymaps.com/zone/BE>
- [35] <https://energie.wallonie.be/fr/carte-dynamique-de-la-wallonie.html?IDC=6185&IDD=144019>
- [36] Région Wallonne, *DIRECTIVE D'EFFICACITE ENERGETIQUE 2012/27/EU – ART.14 POTENTIEL D'EFFICACITE EN MATIERE DE CHALEUR ET DE FROID*, 2021.

- [37] <https://www.idelux.be/fr/estor-lux-premier-parc-de-batteries-de-stockage-electrique/~:text=Le%20parc%20de%20batteries%20ESTOR,l'%C3%A9quilibre%20du%20r%C3%A9seau%20wallon.>
- [38] <https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/lenergie-en-chiffres/donnees-annuelles-de-gaz>