

Mémoire

Auteur : Merlo, Julien

Promoteur(s) : Davin, Elisabeth; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20817>

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.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UNI.LU – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

Étude de l'effet du changement climatique **sur la production d'énergie renouvelable en** **Belgique sur base de simulations TRNSYS**

JULIEN MERLO

MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES RENOUVELABLES ET
BATIMENTS DURABLES (ULiège)
MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE ELISABETH DAVIN (ULiège) ET FRANK SCHOLZEN (UNI.LU)

COMITÉ DE LECTURE :

Anne Wouters

Gratien Kiki

Philippe André

Xavier Fettweis

Copyright

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

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

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Merlo Julien julienmerlo1@gmail.com

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Madame Élisabeth Davin du Département des Sciences et de la Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, promotrice principale de ce mémoire, pour son soutien et son suivi tout au long de ce projet de recherche. Ses conseils éclairés et son engagement ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier mon co-promoteur, Monsieur Frank Scholzen de l'Université du Luxembourg, d'avoir contribué à la relecture et au suivi de ce travail.

Je souhaite également remercier sincèrement l'Université de Liège et l'Université du Luxembourg pour ma formation de ces deux dernières années, ainsi que pour avoir fourni un environnement propice à l'apprentissage et à l'épanouissement intellectuel. Les ressources mises à disposition ainsi que le cadre académique ont grandement facilité la réalisation de cette étude.

Mes remerciements vont également à mes camarades, mes amis et ma famille qui ont partagé avec moi des discussions enrichissantes. Leurs points de vue ont contribué à élargir mes horizons et à améliorer la qualité de ce travail.

Enfin, je suis reconnaissant envers ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique. Leur bienveillance et leurs encouragements ont été une source constante de motivation.

Merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien a été précieux et a grandement enrichi mon expérience d'étudiant en master en Sciences et Gestion de l'Environnement, à finalité Energies Renouvelables et Bâtiments Durables.

Abstract

Français

Le changement climatique est un sujet qui revient souvent dans l'actualité, dans des articles scientifiques et même dans certains programmes scolaires. Il est souvent fait mention des effets du changement climatique sur l'environnement ou encore sur les conditions météorologiques. Les énergies renouvelables sont alors présentées comme l'une des solutions à ce problème planétaire. Un nombre incalculable d'articles scientifiques couvrent les bienfaits de ces producteurs d'énergie verte sur les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, mais il est beaucoup plus rarement fait mention des effets que le changement climatique aura sur ces producteurs, qui dépendent fortement de l'environnement dans lequel ils se trouvent.

L'objectif de ce travail est de réaliser des simulations dynamiques à l'aide de TRNSYS pour modéliser les variations de production photovoltaïque et éolienne en Belgique jusqu'à l'horizon 2100. Ce travail tente de montrer et de quantifier les augmentations ou les diminutions de production en fonction de différents scénarios de changement climatique envisagés par le GIEC et de les chiffrer pour la Belgique. Pour ce faire, des données météorologiques prévisionnelles développées par le laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège ont été utilisées.

Pour construire notre avenir sur des sources d'énergie intermittentes dont la production dépend fortement des conditions climatiques, alors que ces mêmes conditions climatiques sont amenées à changer drastiquement, il est primordial de pouvoir anticiper les variations futures. Pour pouvoir en tenir compte dans l'élaboration du plan de transition énergétique, l'un des grands sujets politiques du moment, il est essentiel d'essayer de prévoir l'effet du changement climatique sur la production renouvelable, ce qui est précisément l'objectif de ce travail. Cette étude ne vise pas à décourager l'installation d'énergies renouvelables, mais plutôt à fournir un complément d'information, pour la Belgique en vue d'élaborer un plan de développement cohérent.

English

Climate change is a topic that often resurfaces in the news, scientific articles, and even in some school programs. The effects of climate change on the environment or weather conditions are often addressed. Renewable energies are then presented as one of the solutions to this planetary problem. Countless scientific articles cover the benefits of these green energy producers on anthropogenic greenhouse gas emissions, but much less mention is made of the effects that climate change will have on these producers, which heavily depend on the environment in which they operate.

The aim of this work is to conduct dynamic simulations using TRNSYS to model the variations in photovoltaic and wind production in Belgium up to the year 2100. This work seeks to demonstrate and quantify the increases or decreases in production according to different climate change scenarios envisaged by the IPCC and to quantify them for Belgium. To achieve this, forecast meteorological data developed by the Laboratory of Climatology and Topoclimatology at the University of Liège were utilized.

To build our future on intermittent energy sources whose production heavily relies on climatic conditions, especially when these conditions are expected to change drastically, it is crucial to anticipate all future variations. It is essential to try to predict the effect of climate change on renewable production, which is precisely the aim of this work, in order to incorporate it into the development of the energy transition plan, one of the major political topics of the moment. The aim of this study is not to discourage the installation of renewable energies, but rather to provide additional information for Belgium to develop a coherent development plan.

Table des matières

Remerciements	2
Abstract	3
Français	3
English	4
Table des illustrations	7
Table des tableaux	8
Abréviations	9
Unités	10
Préfixes	10
1 Introduction	11
1.1 Le changement climatique	11
1.2 Le GIEC et les scénarios SSP	12
1.3 Disparités entre pays dans la responsabilité et les effets perçus du changement climatique	14
1.3.1 Émissions	14
1.3.2 Effets perçus	15
1.4 Étude climat Université de Liège	17
2 Météorologie	18
2.1 L'ensoleillement	18
2.1.1 Introduction	18
2.1.2 L'ensoleillement en Belgique	20
2.1.3 Historique belge	20
2.2 Le vent	22
2.2.1 Introduction	22
2.2.2 Le vent en Belgique.....	23
2.2.3 Historique	24
3 Les énergies renouvelables	25
3.1 Politiques et objectifs énergies renouvelables	25
3.1.1 Paquet sur le climat et l'énergie 2030.....	25
3.1.2 Pacte vert européen.....	25
3.1.3 Une UE climatiquement neutre en 2050.....	26
3.2 État des lieux en Belgique	26
3.3 Solaire photovoltaïque	27
3.3.1 Historique	27
3.3.2 Cartographie des ressources.....	28
3.3.3 Fonctionnement.....	28
3.3.4 Notions photovoltaïques.....	29
3.3.5 Variations envisageables dans la production d'énergie solaire	30
3.4 L'éolien	32
3.4.1 Historique	32
3.4.2 Cartographie des ressources.....	32

3.4.3	Fonctionnement.....	32
3.4.4	Notions éoliennes.....	33
3.4.5	Variations envisageables.....	35
3.5	Hydroélectricité et biomasse	37
3.5.1	Hydroélectricité.....	37
3.5.2	Biomasse	38
4	Problématique	39
4.1	Introduction de la question de recherche.....	39
4.2	Littérature	39
4.2.1	Forecasting the inevitable: A review on the impacts of climate change on renewable energy resources [43].....	39
4.2.2	Climate change impacts on renewable energy supply [51]	41
4.2.3	Évolution du potentiel énergétique éolien et solaire en Belgique [52].....	44
4.2.4	Conclusion de ces différentes études.....	44
5	Méthodologie.....	45
5.1	Méthodologie	45
5.2	Données météorologiques	45
5.2.1	Fichiers météorologiques.....	45
5.2.2	Données et unités.....	46
5.3	Simulation TRNSYS	47
5.3.1	Environnement de simulation.....	47
5.3.2	Paramètres du Type 103b TRNSYS (panneau photovoltaïque).....	48
5.3.3	Paramètres du Type 90 TRNSYS (éolienne)	49
5.3.4	Validation du modèle	49
6	Présentation des résultats.....	51
6.1	Production ville par ville.....	51
6.1.1	Production photovoltaïque.....	52
6.1.2	Production éolienne	54
6.2	Production moyenne en Belgique	55
6.2.1	Production photovoltaïque et éolienne moyenne en Belgique	56
6.2.2	Variation de la production photovoltaïque et éolienne moyenne en Belgique	57
7	Analyse et interprétation des résultats.....	59
7.1	Analyse des résultats.....	59
7.1.1	Variabilité de la production	59
7.1.2	Analyse des tendances	60
7.2	Analyse des données météo.....	60
7.2.1	Photovoltaïque	61
7.2.2	Éolien.....	63
7.2.3	Analyse croisée de production et des données météo	64
7.3	Mise à l'échelle belge 2023	64
7.4	Mise à l'échelle belge 2050	66
8	Conclusion	69
	Bibliographie.....	70
	Annexes.....	74

Table des illustrations

Figure 1 : Concentration de CO ₂ dans l'atmosphère relevée au laboratoire de Mauna Loa (Hawaï) [4].....	11
Figure 2 : Schéma explicatif et quantitatif de l'effet de serre naturel (valeurs moyennes sur 10 ans) [3]	12
Figure 3 : Écriture et signification des SSP (Shared Socio-economic Pathways) [7].....	13
Figure 4 : Projection climatique à l'horizon 2100 et les émissions de GES associées [7]	14
Figure 5 : Répartition des émissions de GES par secteur d'activité en Belgique en 2022 [11]	15
Figure 6 : Cartographie des variations de température et de précipitations pour trois scénarios SSP et à l'horizon 2100 [13].....	16
Figure 7 : Carte de la vulnérabilité au CC des différents pays du monde et de leur population [15]	16
Figure 8 : Fonctionnement schématique du modèle climatique MAR [16].....	17
Figure 9 : Puissance solaire perçue au sol en fonction de la couverture nuageuse [18]	18
Figure 10 : Cycles solaires et nombre de taches solaires dans le temps [20]	19
Figure 11 : Spectre solaire (rayonnement électromagnétique) [18]	19
Figure 12 : Variation de l'ensoleillement par rapport à la station météo de Uccle [18].....	20
Figure 13 : Historique de la durée d'insolation en Belgique de 1887-2023 [22].....	20
Figure 14 : Historique du rayonnement solaire global en Belgique [22].....	21
Figure 15 : Rayonnement global en Belgique en 2023 / 2009 / 1995 / 1985 [24]	21
Figure 16 : Carte des vitesses de vent moyennes en Belgique à 100m [29]	23
Figure 17 : Année de vent typique à l'aéroport de Bruxelles à 10m du sol [30]	23
Figure 18 : Historique du vent moyen à Uccle à 10m du sol [22].....	24
Figure 19 : Historique des vitesses de vent à Zaventem à 10m du sol [22].....	24
Figure 20 : Objectifs et axes de travail du pacte vert européen [31].....	25
Figure 21 : Production d'électricité en 2023 et 2022 [33]	26
Figure 22 : Consommation totale et sollicitation du réseau belge [35].....	27
Figure 23 : Carte de l'énergie solaire exploitable reçue annuellement sur une surface horizontale [37].....	28
Figure 24 : Composition et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [39].....	29
Figure 25 : Courbe caractéristique tension-courant photovoltaïque [40]	29
Figure 26 : Cartographie des vitesses de vent moyennes à 100m [29]	32
Figure 27 : Composition d'une éolienne tripale à axe horizontal [45].....	33
Figure 28 : Explication graphique du facteur k de la distribution de Weibull [47].....	34
Figure 29 : Profil logarithmique de vent en fonction du terrain [48].....	34
Figure 30 : Courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent [50]	36
Figure 31 : Répartition géographique des études existantes sur l'effet du CC sur la production des ER [43].....	40

Figure 32 : Recensement des résultats obtenus en pourcentage de variation comparée au présent pour la production éolienne des différentes études et des différents continents [43]	40
Figure 33 : Recensement des résultats obtenus pour la production photovoltaïque en pourcentage de variation comparée au présent des différentes études et des différents continents [43].....	41
Figure 34 : Recensement des résultats obtenus pour la production hydroélectrique en pourcentage de variation comparée au présent des différentes études et des différents continents [43].....	41
Figure 35 : Impact du CC sur la production d'ER par région [51].....	42
Figure 36 : Variation des conditions météo principales affectant la production d' ER. Rayonnement incident solaire (a), température (b), vent (c), la quantité d'eau qui rejoint les cours d'eau (d) [51]	43
Figure 37 : Variation de la production photovoltaïque (a), centrale solaire à concentration (b), éolien (c), hydroélectricité (d) [51]	43
Figure 38 : Capture d'écran de l'environnement de simulation TRNSYS.....	48
Figure 39 : Légende des graphiques des chapitres 6.1.1 et 6.1.2	51
Figure 40 : Carte de Belgique avec les 5 villes étudiées [58]	51

Table des tableaux

Tableau 1 : Données et unités météo des fichiers utilisés pour les simulations.....	47
Tableau 2 : Comparaison simulation vs réalité.....	50
Tableau 3 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue énergie pour les scénarios TMY	64
Tableau 4 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue énergie pour les scénarios XMY.....	65
Tableau 5 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue économique pour les scénarios TMY .	65
Tableau 6 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue économique pour les scénarios XMY .	65
Tableau 7 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios TMY	66
Tableau 8 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios XMY	66
Tableau 9 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue énergie pour les scénarios TMY	67
Tableau 10 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue énergie pour les scénarios XMY.....	67
Tableau 11: Mise à l'échelle belge 2050 point de vue économique pour les scénarios TMY.	67
Tableau 12 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue économique pour les scénarios XMY	67
Tableau 13 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios TMY	68
Tableau 14 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios XMY	68

Abréviations

AR	: Assessment Report (Rapport d'évaluation)
CC	: Changement Climatique
COP	: Conférence des Parties
EOL	: Éolien / Éoliennes
ER	: Energie Renouvelable
ETS	: Emissions Trading System (Échange de quotas d'émission)
GES	: Gaz à effet de serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	: Infrarouge
IRM	: Institut Royal Météorologique de Belgique
ISO	: International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
MAR	: Modèle Atmosphérique Régional
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONU	: Organisation des Nations Unies
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PV	: Photovoltaïque
SSP	: Shared Socio-economic Pathways (Trajectoires socio-économiques partagées)
TMY	: Typical Meteorological Year (Année météorologique typique)
TRNSYS	: Transient System Simulation Tool
UE	: Union Européenne
UV	: Ultraviolet
XMY	: eXtreme Meteorological Year (Année météorologique extrême)

Unités

Concentration	ppm	Part par million
Densité / Masse volumique	kg/m ³	Kilo par mètre cube
Distance	m	Mètre
Energie	kWh	Kilowattheure
Energie	J	Joule
Force	N	Newton
Humidité spécifique	Kg H ₂ O/Kg Air	Kilo d'eau par kilo d'air
Quantité de matière	Mol	Mole
Masse	kg	Kilogramme
Nébulosité	Octa	Octa
Température	K	Kelvin
Température	°C	Degré Celsius
Pouvoir radiatif	équCO ₂	Équivalente CO ₂
Puissance	W	Watt
Puissance	Wc	Watt crête
Pression	Pa	Pascal
Surface	m ²	Mètre carré
Vitesse	m/s	Mètre par seconde
Volume / Capacité	l	Litre

Préfixes

Téra	T	10 ¹²
Giga	G	10 ⁹
Méga	M	10 ⁶
Kilo	k	10 ³
Hecto	h	10 ²
Déca	da	10 ¹
-	-	10 ⁰
Déci	d	10 ⁻¹
Centi	c	10 ⁻²
Milli	m	10 ⁻³
Micro	μ	10 ⁻⁶
Nano	n	10 ⁻⁹
Pico	p	10 ⁻¹²

1 Introduction

1.1 Le changement climatique

Le changement climatique est défini comme les variations à long terme de la température et des modèles météorologiques.

Ces changements peuvent être induits par des variations naturelles comme le cycle d'activité solaire (chapitre 2.1.1) ou encore des éruptions volcaniques massives. Ces variations naturelles existent depuis toujours et l'homme n'a aucun pouvoir dessus, elles font parties du cycle naturel de la Terre.

Les autres causes bien plus impactantes, et cette fois d'origine anthropique¹, sont toutes liées à l'émission de gaz à effet de serre (GES) [1]. Les GES, sont des gaz présents dans l'atmosphère qui induisent l'effet de serre. Il est naturel et même vital que l'atmosphère en soit composée. Ce qui pose problème, c'est la quantité de ces GES qui ne sont pas d'origine naturelle et présents pour une très longue durée dans notre atmosphère. Parmi ces gaz il y a le dioxyde de carbone CO₂, dont l'évolution de la concentration dans l'atmosphère est représentée sur le graphique ci-dessous, le méthane CH₄, le protoxyde d'azote N₂O, les hydrofluorocarbures et bien d'autres encore [2]. Chacun de ces gaz n'a pas la même influence sur l'effet de serre. Ce qui les caractérise est leur potentiel de réchauffement global. Le potentiel de réchauffement global de référence est celui du CO₂, il est de 1. Celui du méthane en comparaison est de 28. Cela signifie que l'émission d'un kg de méthane équivaut en terme de potentiel de réchauffement global à 28 kg de CO₂ [3].

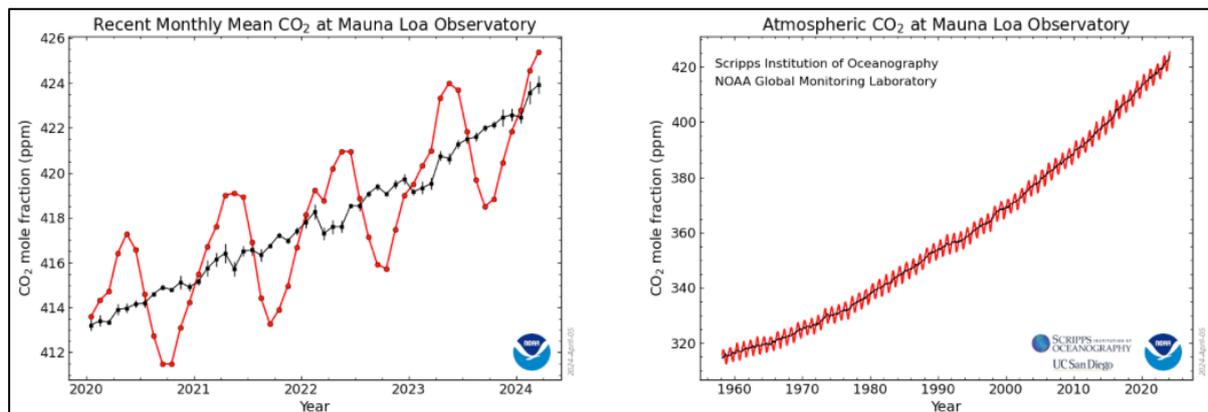


Figure 1 : Concentration de CO₂ dans l'atmosphère relevée au laboratoire de Mauna Loa (Hawaï) [4]

Le climat propice à la vie que nous connaissons sur Terre est le résultat d'un équilibre entre l'énergie entrante, représentée par les flèches jaunes sur la figure 2, et l'énergie sortante de notre atmosphère, représentée par les flèches rouges.

La part d'énergie incidente² provenant du soleil qui atteint la surface de la Terre (environ 48%) est partiellement réfléchiée et partiellement absorbée par la Terre. L'entièreté de cette énergie solaire incidente ne demeure donc pas dans le système terrestre.

A son tour, la Terre émet de l'énergie vers l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge (IR), une partie duquel ne quitte pas directement l'atmosphère. Une grande portion de ce rayonnement est absorbée dans l'atmosphère notamment par les gaz à effet de serre (GES). Ceux-ci émettent ensuite un rayonnement IR aussi bien vers la Terre que hors de l'atmosphère.

¹ Se réfère à tout ce qui est causé ou influencé par l'activité humaine.

² Provenant d'une source extérieure et atteignant une surface donnée.

Il en résulte au final une différence entre le rayonnement entrant dans l'atmosphère et le rayonnement sortant ce qui est défini comme le bilan radiatif terrestre.

Sans cet effet de serre, la température à la surface de la Terre serait d'environ 30°C inférieure à celle que l'on connaît actuellement, soit -18°C [3].

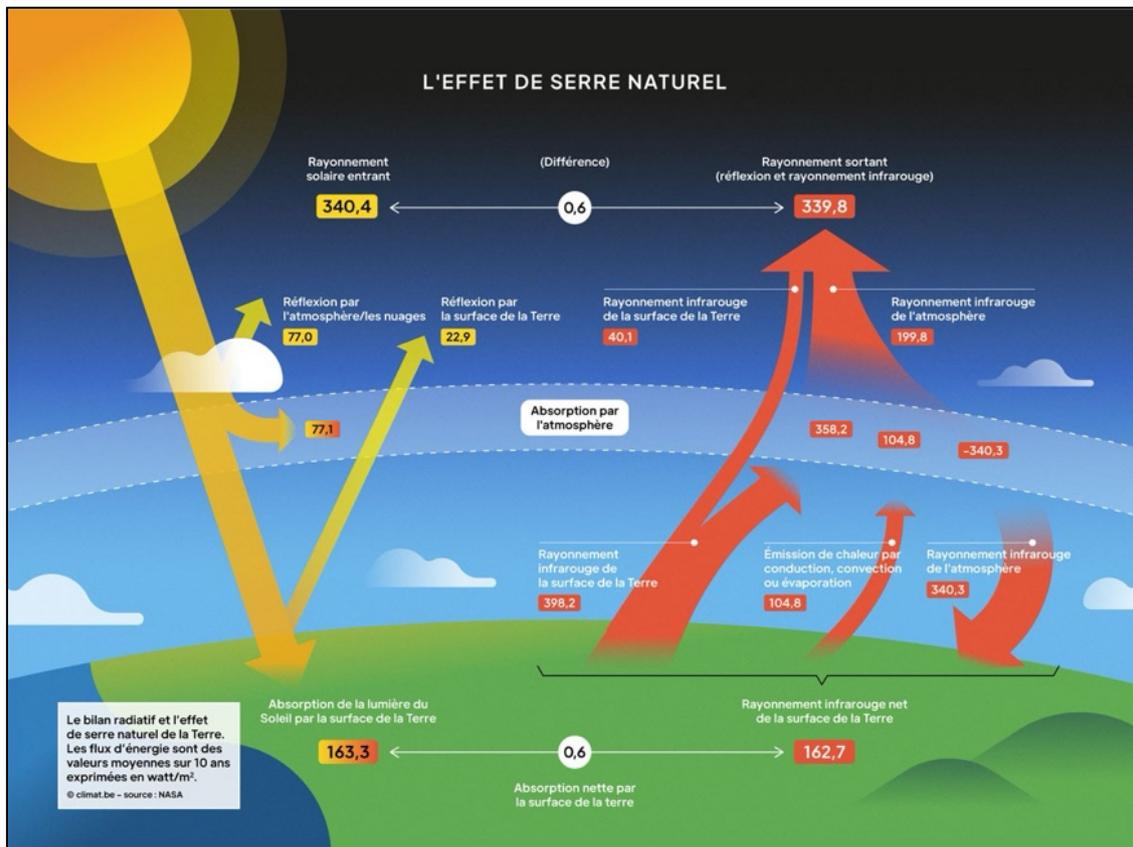


Figure 2 : Schéma explicatif et quantitatif de l'effet de serre naturel (valeurs moyennes sur 10 ans) [3]

L'augmentation des émissions de GES perturbe l'effet de serre naturel et par conséquent la température d'équilibre à la surface de la Terre. Les causes principales sont selon la commission européenne [5] :

- La combustion de charbon, de pétrole et de gaz qui génère du dioxyde de carbone et du protoxyde d'azote.
- La déforestation qui entraîne une perte de l'effet de régulation climatique des arbres, qui absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Lorsqu'ils sont abattus, le carbone stocké dans les arbres est libéré dans l'atmosphère, contribuant à l'effet de serre.
- L'expansion de l'élevage qui entraîne la production de grandes quantités de méthane par les bovins et les ovins lors de leur digestion.
- Les engrais contenant de l'azote qui produisent des émissions de protoxyde d'azote.
- Les gaz fluorés qui sont émis par les équipements et par les produits qui les utilisent. Ils ont un potentiel de réchauffement bien plus élevé que celui du CO₂, pouvant atteindre jusqu'à 23 000 fois celui-ci.

1.2 Le GIEC et les scénarios SSP

La référence en matière de changement climatique est le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Le GIEC a été créé en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Il est l'organe des Nations Unies chargé de l'évaluation

objective de la recherche scientifique sur le changement climatique. Il se compose de trois groupes de travail qui traitent trois volets différents du changement climatique. Le premier se concentre sur les fondements scientifiques du système climatique et du changement climatique. Le deuxième traite des conséquences du changement climatique, des stratégies d'adaptation et de la vulnérabilité des systèmes naturels et humains. Le troisième se consacre à l'étude des moyens d'atténuer le changement climatique en essayant de réduire et de stabiliser les émissions de gaz à effet de serre [6].

Le rôle du GIEC est de fournir aux gouvernements et à la société des informations scientifiques qui leur permettent d'élaborer des politiques climatiques. Pour ce faire, il passe par la rédaction de rapports d'évaluation (AR) complets qui synthétisent les connaissances actuelles sur la climatologie, les répercussions socio-économiques et les stratégies d'adaptation au changement climatique. Depuis sa création, le GIEC a émis 6 AR, le dernier date de 2023. En plus des AR, le GIEC produit également des rapports spéciaux sur certains thèmes plus précis comme par exemple un rapport qui traite la « Conséquence d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C », des rapports méthodologiques pour guider les pays, ainsi que des rapport de synthèse [6].

L'avenir climatique étant incertain et fortement dépendant des comportements et des efforts fournis par la population mondiale, dans ses études et ses résultats, le GIEC envisage et étudie plusieurs scénarios. Ces scénarios appelés SSP (Shared Socio-economic Pathways) sont des trajectoires d'émissions de GES qui en fonction de leur quantité induisent un certain forçage radiatif³ et donc un réchauffement, associé à des hypothèses de développements socio-économiques.

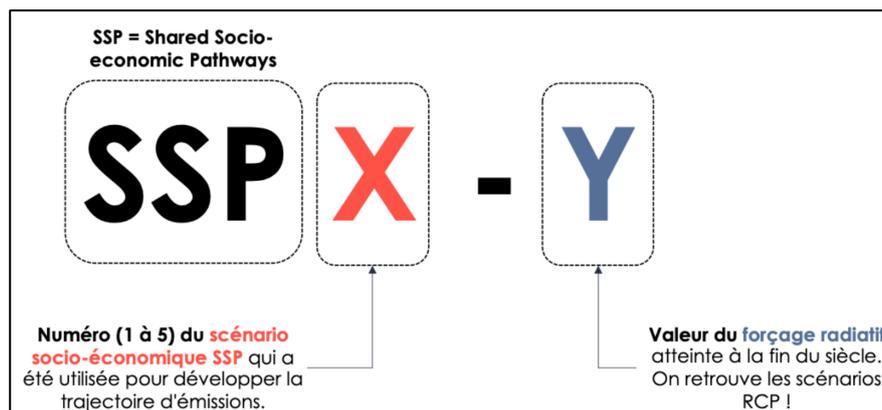


Figure 3 : Écriture et signification des SSP (Shared Socio-economic Pathways) [7]

Comme indiqué sur la figure 3, le premier chiffre après le SSP représente le scénario socio-économique envisagé [7] :

- Les SSP1 et SSP5 présentent des perspectives relativement positives pour le développement humain, avec des investissements importants dans l'éducation et la santé, une croissance économique rapide et des institutions efficaces. Cependant, le SSP5 suppose une économie fortement dépendante des combustibles fossiles, tandis que le SSP1 prévoit une transition croissante vers des pratiques durables.
- Les SSP3 et SSP4 décrivent des perspectives de développement plus sombres, avec peu d'investissements dans l'éducation ou la santé, une croissance démographique rapide et des inégalités croissantes. Dans le SSP3, l'accent est mis sur la sécurité régionale, tandis que le SSP4 met en avant de grandes inégalités au sein et entre les pays, conduisant à des sociétés hautement vulnérables au changement climatique.

³ La différence entre l'énergie radiative reçue et émise par un système climatique, causée par des changements dans les facteurs externes tels que les gaz à effet de serre. Un forçage radiatif positif contribue au réchauffement climatique, tandis qu'un forçage radiatif négatif peut entraîner un refroidissement.

- Le scénario SSP2 représente une trajectoire intermédiaire dans laquelle les tendances se poursuivent sans déviations significatives.

Les deux chiffres qui suivent représentent le forçage radiatif (en W/m^2) qui est défini comme la différence de flux radiatifs émis au sommet de l'atmosphère lorsqu'un seul paramètre de la configuration climatique est changé, toutes choses restant égales par ailleurs [8]. Dans ce cas-ci, le paramètre qui est changé est la concentration de GES induit par les activités anthropiques. Ce forçage radiatif peut être ramené à une augmentation de la température, plus couramment utilisée dans les médias. Un forçage radiatif de $4,5 W/m^2$, induit à l'horizon 2100 un réchauffement global de $2,7^\circ C$ par rapport à la période préindustrielle⁴ [7].

Ces scénarios donnent lieu aux courbes d'émission de GES et d'augmentation de la température en fonction du temps représentées sur la figure 4. Les cinq scénarios ont été retenus par le GIEC pour représenter et résumer les différentes trajectoires possibles que peut prendre le changement climatique en fonction des émissions de GES.

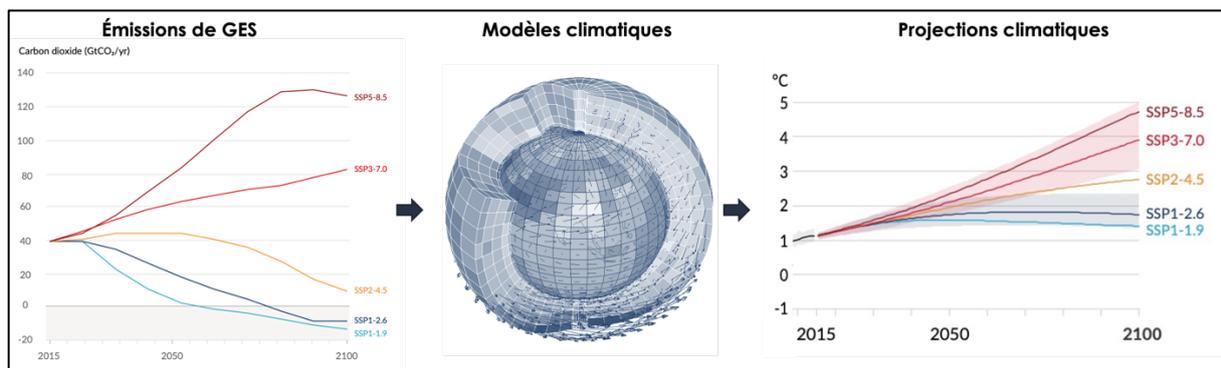


Figure 4 : Projection climatique à l'horizon 2100 et les émissions de GES associées [7]

1.3 Disparités entre pays dans la responsabilité et les effets perçus du changement climatique

Le changement climatique est un sujet qui concerne l'ensemble de la planète, mais certaines régions du globe seront bien plus impactées que d'autres, indépendamment des émissions de GES de ces régions. Effectivement, un pays qui émet beaucoup de GES ne va pas subir pour autant un changement climatique plus important. A l'inverse certains pays sont bien plus exposés au changement climatique alors qu'ils ne sont responsables que de très peu d'émissions. Il y a donc une grande part d'inégalité et d'injustice dans le changement climatique. Et le problème est d'autant plus complexe du fait que c'est un problème mondial. Il y a donc d'un côté les pays industrialisés qui historiquement sont responsables de la majorité des émissions de GES mais qui tendent à réduire ces émissions. Et d'un autre côté, il y a les pays en développement qui émettent de plus en plus de GES mais pour qui il est tout à fait normal de continuer leur croissance et leur développement économique.

1.3.1 Émissions

Lorsque l'on parle des émissions de gaz à effet de serre d'un pays, ces émissions sont généralement rapportées au nombre d'habitants du pays et en tonne (t) équivalent CO_2 . La moyenne mondiale était de $4,3 t \text{ équ}CO_2$ par habitant en 2020 avec de grande différence entre pays [9].

Du point de vue des émissions de GES, la Belgique, en 2021, se situait encore bien au-dessus de la moyenne mondiale et de la moyenne européenne de $7,9 t \text{ équ}CO_2$ par habitant, avec un

⁴ Fait référence à la période antérieure à l'existence de machines et d'outils permettant d'effectuer des tâches en masse.

score de 10 t équCO₂ par habitant [10]. En Belgique, le principal gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO₂), qui représentait 85,9% des émissions totales de GES en 2022. Le méthane (CH₄) constituait 7,4 %, l'oxyde nitreux (N₂O) 4,3%, et les gaz fluorés 2,3%. Une tendance à la baisse est observée pour chacun de ces gaz. Les émissions de CO₂ ont diminué de 26 % par rapport à 1990, tandis que celles du CH₄, du N₂O et des gaz fluorés ont respectivement chuté de 40,6%, 49,8% et 34,4% au cours de la même période. Le graphique ci-dessous reprend les émissions par secteur en Belgique, en 2022. La majorité des émissions provient de l'industrie (46,3%), suivie par le transport (23,4%), le chauffage des bâtiments (17,4%), etc. [11].

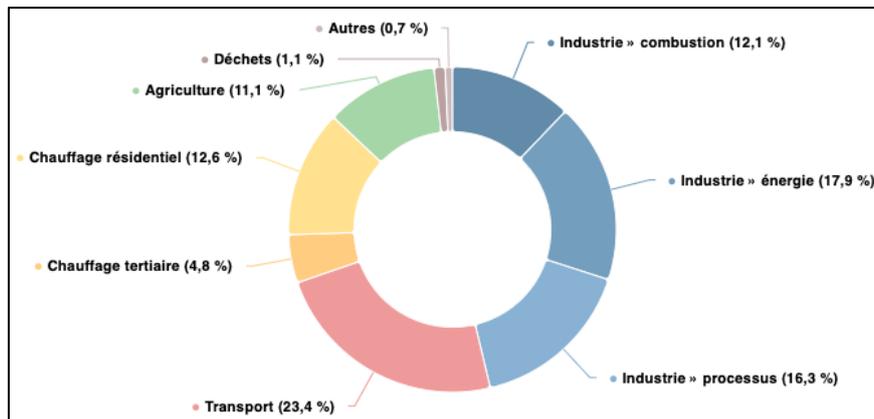


Figure 5 : Répartition des émissions de GES par secteur d'activité en Belgique en 2022 [11]

1.3.2 Effets perçus

Le changement climatique n'affecte pas de la même manière toutes les régions du monde ni toutes les populations.

En ce qui concerne les effets physiques, il est le plus souvent question de l'augmentation des températures, représentée par les trois premières cartes de la figure 6. Pour cet effet, ce sont les pôles qui connaîtront le plus grand réchauffement. En revanche, à l'équateur, la différence est moins importante, mais dans des régions où il fait déjà très chaud, un réchauffement même plus faible aura des conséquences plus importantes sur la vie. De plus, la température n'est pas le seul effet physique à prévoir, il faut aussi prendre en compte la modification dans les précipitations représentée par les trois dernières cartes de la figure 6, la montée des eaux et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes [12]. La Belgique ne figure pas parmi les pays les plus impactés par ces changements physiques, comme le montrent les cartes ci-dessous.

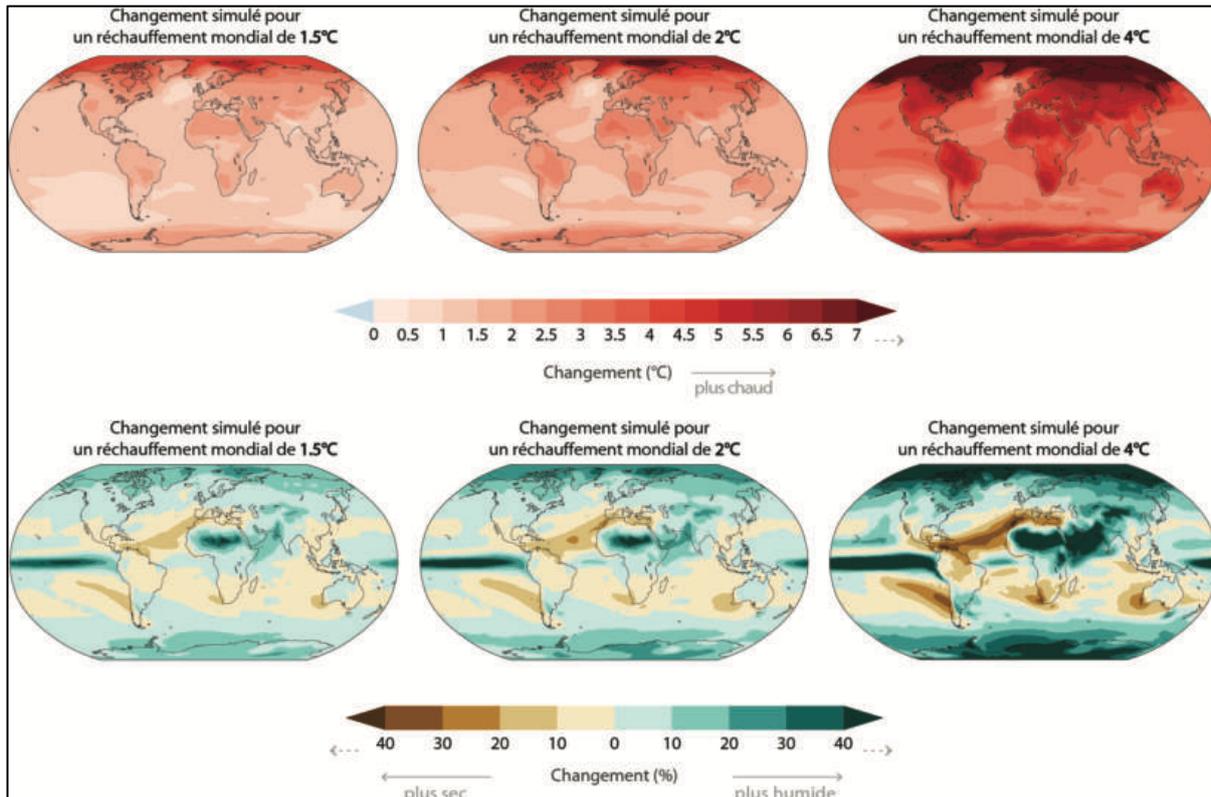


Figure 6 : Cartographie des variations de température et de précipitations pour trois scénarios SSP et à l'horizon 2100 [13]

Pour ce qui est de l'impact socio-économique, il dépend fortement de la vulnérabilité. De manière générale, les pays et les individus les plus modestes sont les plus vulnérables. Ils sont plus exposés aux changements et disposent de moins bons moyens d'adaptation [12]. La vulnérabilité, au sens large du terme, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène sur les éléments à risque. Cette palette d'éléments à risque varie suivant la nature de l'aléa. L'aléa, quant à lui, désigne la probabilité d'occurrence d'un phénomène, il est fonction de l'intensité du phénomène et de sa fréquence [14].

Encore une fois, la Belgique et ses habitants ne sont pas parmi les plus vulnérables. Sur la carte ci-dessous, les pays et leurs populations sont classés par groupes de 30 en fonction de leur vulnérabilité, avec les moins vulnérables en vert et les plus vulnérables en rouge.

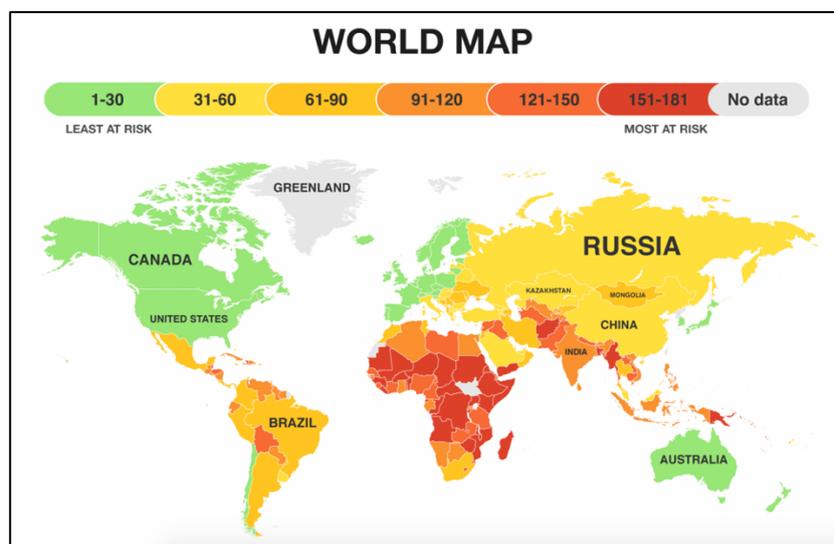


Figure 7 : Carte de la vulnérabilité au CC des différents pays du monde et de leur population [15]

1.4 Étude climat Université de Liège

Pour pouvoir étudier le changement climatique (CC), il est primordial de disposer de données météorologiques prévisionnelles à long terme pour la zone à étudier. Pour la Belgique, plusieurs chercheurs du laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège ont généré et diffusé ce type de données météorologiques prévisionnelles. L'objectif de ces données est de fournir des informations météorologiques aux chercheurs qui souhaitent étudier ou évaluer les effets du changement climatique en Belgique sur les bâtiments, les énergies renouvelables ou tous autres projets pour lesquels ces données peuvent être utiles.

Ces données sont produites à partir du modèle climatique MAR (Modèle Atmosphérique Régional), version 3.11.4 (Kittel, 2021). Le rôle principal de MAR est de réduire l'échelle des modèles mondiaux ou des données de réanalyse pour produire des sorties météorologiques avec une résolution spatiale et temporelle plus fine. Initialement développé pour les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, MAR a été avec succès adapté aux régions tempérées comme la Belgique. Comme représenté sur la figure 8, le modèle MAR (cadre noir) doit être contraint par un modèle de réanalyse ou un modèle global (cadre orange supérieur) ainsi que par des données statiques (cadre orange inférieur). Le résultat de la simulation MAR fournit des variables météorologiques en deux ou trois dimensions (cadre jaune) [16].

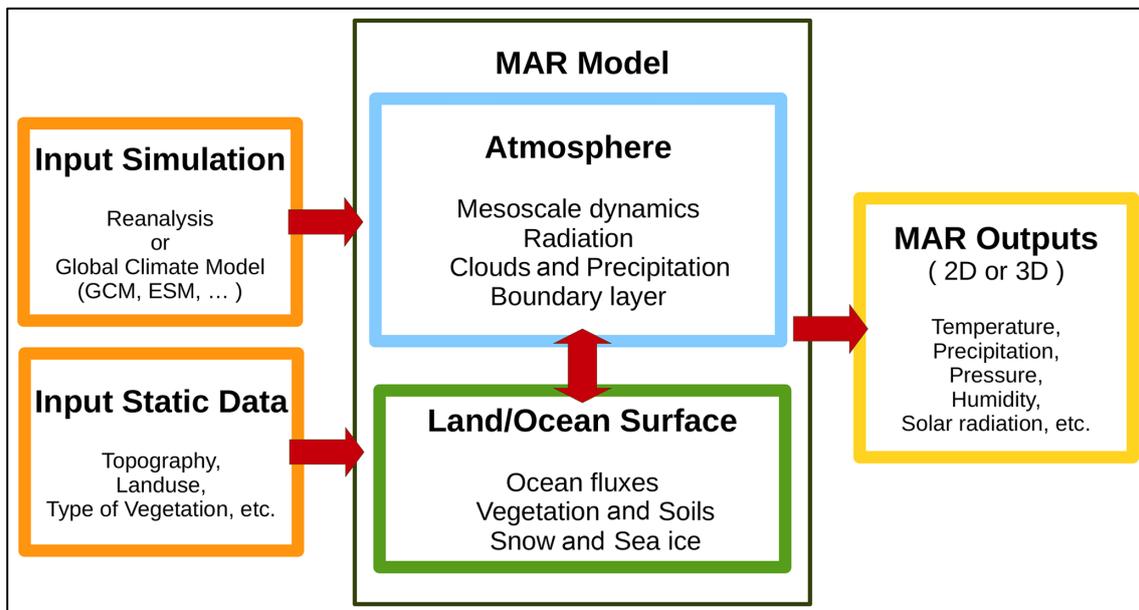


Figure 8 : Fonctionnement schématique du modèle climatique MAR [16]

Les données générées sont disponibles sur plusieurs périodes, en fonction de différents scénarios SSP, comprenant des données représentant des années météorologiques typiques (TMY) ainsi que des années météorologiques extrêmes (XMY). L'ensemble de ces données est généré selon la méthodologie proposée dans la norme⁵ ISO15927-4, permettant la reconstruction des années typiques et extrêmes, tout en conservant la variabilité plausible des données météorologiques. Ne pouvant pas se permettre de modéliser tous les scénarios SSP, le modèle retenu pour la création de ces données est le SSP5-8.5. Les deux autres scénarios disponibles dans la base de données météorologiques, à savoir le SSP2-4.5 et le SSP3-7.0, sont dérivés du scénario SSP5-8.5. Cette méthode peut donc entraîner quelques erreurs, en particulier dans les deux derniers scénarios [16].

⁵ Une norme ISO pour « International Organization for Standardization » est reconnue comme une référence et élaborée par des experts en normes internationales.

2 Météorologie

Étant donné que ce travail porte principalement sur la production photovoltaïque et éolienne, cette partie ne s'attarde que sur deux composantes météorologiques, à savoir l'ensoleillement et le vent. Toutes les autres composantes telles que la température et les précipitations sont également importantes, mais dans une moindre mesure que les deux composantes précédemment nommées.

2.1 L'ensoleillement

2.1.1 Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie principale sur Terre, elle est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse, ce qui signifie que l'hydroélectricité, l'éolien et la biomasse sont des dérivés de l'énergie solaire. Les énergies fossiles sont elles aussi liées à la photosynthèse et donc issues de l'énergie solaire.

L'ensoleillement, au même titre que les autres sources d'énergies renouvelables, est très variable temporellement et géographiquement. La source de cette énergie solaire est un énorme réacteur à fusion nucléaire qui se trouve à 149 597 870 kilomètres de la Terre, le soleil [17]. Au cours sa réaction de transformation d'hydrogène en hélium, il émet une quantité astronomique d'énergie dans l'espace, sa puissance est estimée à 63 500 kW/m². Une infime partie de cette énergie arrive jusqu'à la surface de la Terre à hauteur de 1 367 W/m² à l'extérieur de l'atmosphère. Une partie de ce rayonnement solaire arrive à la surface de la Terre avec une puissance de 1 000 W/m² [18].

La quantité de cette énergie reçue annuellement est plus ou moins constante, mais varie fortement d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre et d'un endroit à l'autre. Cette quantité varie en fonction de la rotation de la Terre sur elle-même et de sa rotation autour du soleil. Une autre variable importante est la couverture nuageuse qui en fonction de sa densité reflète une quantité plus ou moins importante de ce rayonnement en raison de son pouvoir réfléchissant élevé aussi appelé l'albédo⁶. Cela influence directement la puissance solaire reçue au niveau du sol, comme le montre la figure 9 [18].

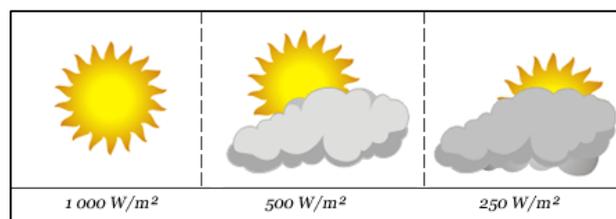


Figure 9 : Puissance solaire perçue au sol en fonction de la couverture nuageuse [18]

2.1.1.1 Notions solaires

Les cycles solaires :

Une notion importante lorsqu'il s'agit d'énergie solaire et de changement climatique est le cycle solaire. Les taches solaires sont des indicateurs de l'activité solaire, observées pour la première fois en 1610 par des astronomes tels que Galilée, Harriot, Johannes Fabricius et Christoph Scheiner. Elles correspondent à des zones sombres sur la surface du Soleil, caractérisées par une forte concentration de champ magnétique. Le nombre de taches solaires varie selon un cycle de 11 ans, c'est le cycle solaire. Pendant le minimum solaire, le nombre de taches est faible voire nul, il augmente ensuite progressivement pour atteindre un maximum

⁶ Désigne la capacité d'une surface à réfléchir la lumière, exprimée par le rapport entre le flux d'énergie lumineuse réfléchi et le flux d'énergie lumineuse incidente.

environ 5 à 7 ans après le minimum, puis diminue à nouveau jusqu'au prochain minimum. Nous sommes actuellement dans le cycle solaire 25, approchant du maximum solaire comme le montre la figure 10 [19].

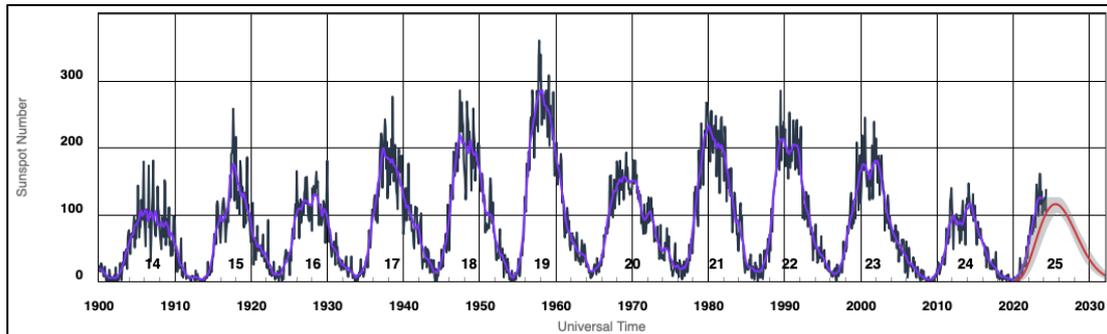


Figure 10 : Cycles solaires et nombre de taches solaires dans le temps [20]

Le spectre solaire :

Le spectre solaire est la répartition de l'énergie solaire reçue par la Terre en fonction des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique émis par le Soleil. Environ 46% de cette énergie se trouve dans le spectre visible, c'est-à-dire des longueurs d'onde de 0,4 microns à 0,7 microns. Environ 49% se compose de longueurs d'onde supérieures à 0,7 microns, donc dans l'infrarouge (IR), tandis que le reste se trouve dans des longueurs d'onde inférieures à 0,4 microns, donc dans l'ultraviolet (UV) [18].

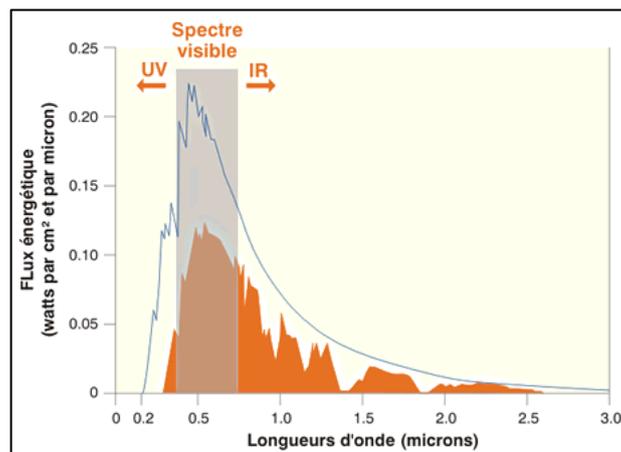


Figure 11 : Spectre solaire (rayonnement électromagnétique) [18]

Rayonnement direct, diffus et réfléchi :

- Direct, provenant directement du Soleil. Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.
- Diffus, correspondant au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.
- Réfléchi, correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albédo".

Puissance solaire : éclairement valeur instantanée W/m^2

Energie solaire : irradiation valeur intégrée $kWh/durée, m^2$

2.1.2 L'ensoleillement en Belgique

Le soleil nous apporte annuellement et en moyenne une énergie de 1000 kWh/m² en Belgique. De cette énergie, 75% nous parvient du 15 avril au 15 octobre, tandis que les 25% restants sont répartis du 15 octobre au 15 avril. Si on prend comme ordre de grandeur que 1 litre de mazout équivaut à 10 kWh [21], chaque année le soleil nous apporte l'équivalent de 100 litres de mazout par mètre carré. Comme le montre la figure 12, même à l'échelle de la Belgique, les disparités géographiques peuvent être très importantes, avec une valeur supérieure de 10% à la côte par rapport à la valeur de référence qui est la station météo de Uccle et une valeur inférieure de 5% à 7% dans l'ouest du pays [18].

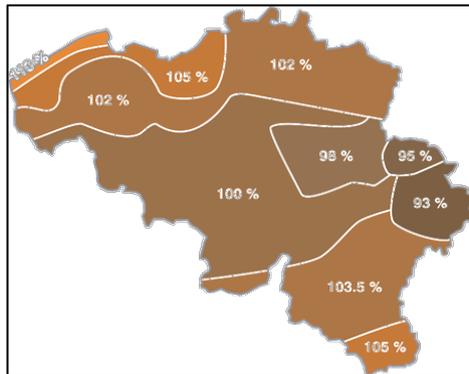


Figure 12 : Variation de l'ensoleillement par rapport à la station météo de Uccle [18]

2.1.3 Historique belge

Pour aborder l'ensoleillement, une mesure couramment utilisée est la durée d'insolation⁷, exprimée en heures de soleil par an. Cette donnée est enregistrée dans certaines stations météorologiques, dont celle d'Uccle qui conserve un historique de ces données depuis 1887, comme le montre graphiquement la figure 13. La durée d'insolation est étroitement liée à la couverture nuageuse et peut varier considérablement d'une année à l'autre. Sur le graphique ci-dessous, cette variabilité est observable, avec des durées d'insolation plutôt élevées entre 1920 et 1960, ainsi que de 2000 à aujourd'hui. D'autres périodes sont plutôt caractérisées par une insolation plus faible, notamment la période antérieure à 1920 et celle de 1960 à 2000 [22].

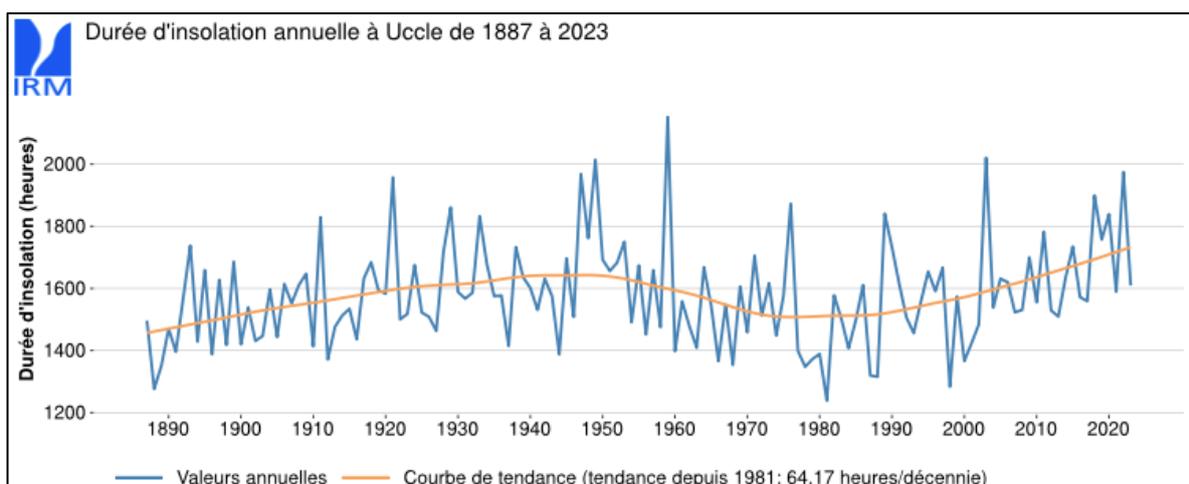


Figure 13 : Historique de la durée d'insolation en Belgique de 1887-2023 [22]

⁷ Exposition à la lumière solaire ou à une source lumineuse.

Le rayonnement solaire global, exprimé en kWh/m², est quant à lui mesuré uniquement depuis 1951 à la station météo d'Uccle, comme le montre graphiquement la figure 14. Il est également très variable géographiquement et suit les mêmes tendances que la durée d'insolation. Pour représenter ces variations temporelles et spatiales, la figure 15 présente quatre années différentes ainsi que leur rayonnement solaire respectif [22].

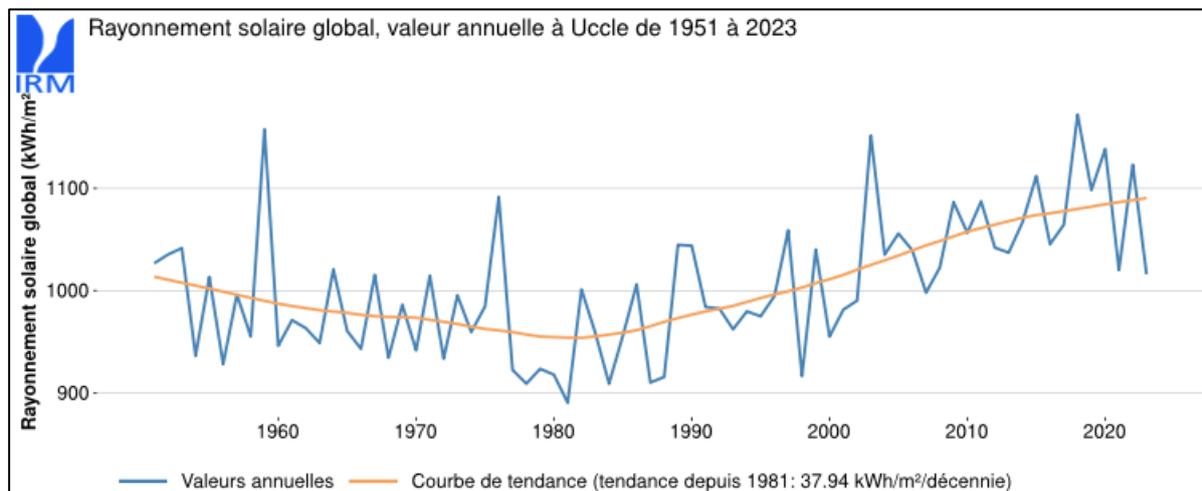


Figure 14 : Historique du rayonnement solaire global en Belgique [22]

Depuis les années 1980, les efforts visant à réduire les émissions de polluants ont contribué, au moins en partie, à l'amélioration de la qualité de l'air dans nos régions. Cette amélioration semble avoir entraîné une augmentation de l'énergie solaire atteignant la surface de la Terre [23]. Une réduction de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère permet à plus de rayonnement solaire d'atteindre la surface terrestre, soit directement, soit en raison de la diminution des noyaux de condensation nécessaires à la formation des nuages [22].

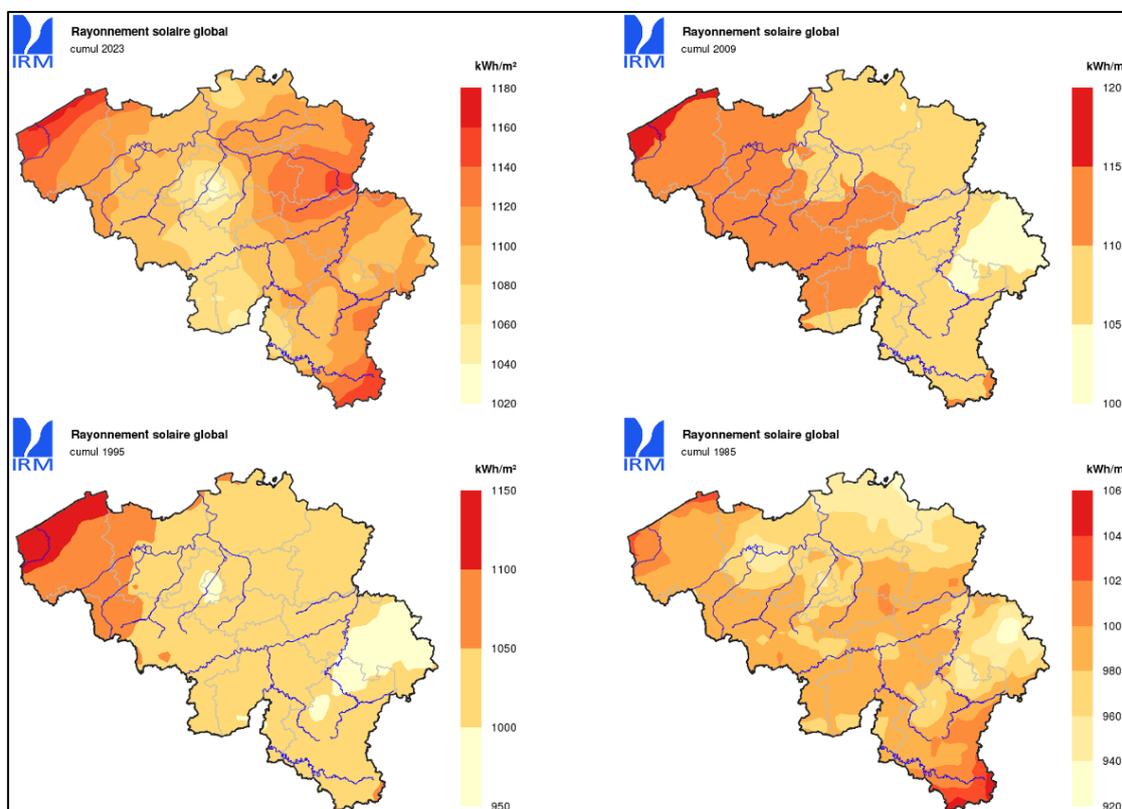


Figure 15 : Rayonnement global en Belgique en 2023 / 2009 / 1995 / 1985 [24]

2.2 Le vent

2.2.1 Introduction

Comme mentionné précédemment, c'est l'énergie solaire qui est à l'origine du vent. En effet, celui-ci résulte principalement des différences de température engendrées par les disparités dans l'énergie solaire incidente à la surface de la Terre. Ainsi, l'air dans les régions tropicales est plus chaud près de la surface que dans les régions polaires, ce qui génère des courants de convection dans l'atmosphère. Ces courants sont le résultat d'une variation de densité et de pression, constituant ainsi la principale origine des vents.

A l'échelle planétaire le vent est une force résultante de 5 autres forces à savoir :

1. La force gravitationnelle. Elle dépend de la masse de l'air et agit perpendiculairement à la surface terrestre. En général, elle est largement compensée par les forces des gradients de pression, qui agissent vers le haut.
2. La force des gradients de pression. Cette force résulte du changement de pression sur une distance donnée, principalement dans un plan horizontal, mais inclut également une composante verticale. Elle compense généralement la force gravitationnelle exercée sur l'air. La différence de pression provient souvent d'une répartition inégale de la chaleur solaire sur la surface terrestre.
3. La force de Coriolis. Cette force est engendrée par les différences de vitesse de rotation de la Terre lorsque l'on se déplace de l'équateur vers les pôles. Elle est une force apparente et n'intervient que lorsqu'il y a un déplacement de l'air.
4. La force centrifuge. Lorsque le vent se déplace de manière circulaire, par exemple dans un anticyclone ou un cyclone, il subit une force dirigée du centre de la rotation vers l'extérieur. Cette force est négligeable à petite échelle.
5. La force de friction. Elle résulte du frottement du vent sur la surface rugueuse de la Terre.

A une échelle plus locale, le vent est encore influencé ou même créé à partir de phénomènes de plus petite ampleur et à plus petite échelle.

Les vents thermiques sont un ensemble de phénomènes liés aux variations de température par exemple entre la terre et la mer, ainsi qu'aux différences de refroidissement entre ces deux surfaces pendant le jour et la nuit.

Les brises marines, par exemple, sont parmi les vents thermiques les plus familiers. Ils résultent de la différence de température entre la terre et la mer, avec des variations plus prononcées pendant la journée. Ces vents agissent en conjonction avec les variations de pression régionale pour créer des zones de pression plus localisées.

Dans les régions montagneuses, les vents catabatiques sont un autre type de vent thermique. Ils se forment lorsque l'air descend des collines de manière plus intense que dans les brises de montagne. Sous l'effet du foehn, ou föhn, lorsque l'air est chaud, ces vents sont parfois appelés vents alpins, prenant des noms régionaux tels que Chinook ou Santa Ana. En revanche, lorsqu'il fait froid ou frais, on les appelle des vents de drainage. Ces vents peuvent être particulièrement puissants dans les régions montagneuses abruptes avec des plateaux enneigés et des glaciers.

Les vents de gravité, également associés aux zones montagneuses, se forment en raison de processus différents, impliquant des vagues de gravité stationnaires qui génèrent une force d'impulsion vers le bas et apportent un flux d'air chaud des couches supérieures à la surface.

Les vents de fosse, un autre phénomène observé dans les zones montagneuses, se produisent en raison de fortes différences de pression de part et d'autre d'une caractéristique topographique. Ces vents sortent alors de ces zones avec une grande intensité, semblable à un débit sortant d'une cheminée sous pression.

Enfin, le courant de nuit est un phénomène distinct affectant les Grandes Plaines des États-Unis, descendant ensuite vers le Colorado et le Texas. Il génère des vents plus forts et plus verticaux dans la couche d'atmosphère où les éoliennes opèrent la nuit. Un phénomène similaire a également été observé en Chine [25][26].

2.2.2 Le vent en Belgique

En Belgique, les vents prédominants proviennent du sud-ouest. La vitesse moyenne du vent, qui varie de 6 à 7 m/s à la côte, diminue à 2 à 4 m/s dans les vallées des hautes terres belges et en Gaume (hauteur de référence pour les mesures de vent : 10m au-dessus du sol). Environ tous les deux ans, la vitesse maximale du vent dépasse les 35 m/s à la côte et les 23 à 30 m/s à l'intérieur des terres. Cette diminution de la vitesse du vent à l'intérieur du pays est principalement attribuable au frottement avec le sol, ce qui engendre une augmentation de la turbulence. Les vitesses de vent moyennes en Belgique sont représentées sur la figure 16. Comme expliqué précédemment, avec des maximums le long de la côte (en rouge) et des minimums dans certaines zones plus vallonnées des terres (en bleu) [27][28].

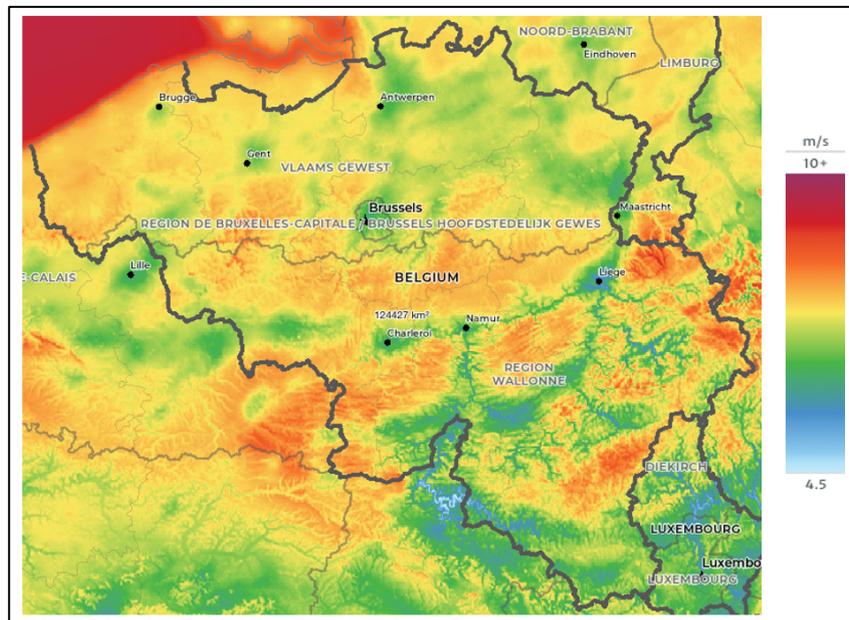


Figure 16 : Carte des vitesses de vent moyennes en Belgique à 100m [29]

Sur le graphique ci-dessous, une année de données de vent typique à l'aéroport de Bruxelles illustre la variabilité saisonnière des vitesses de vent moyennes, montrant des moyennes plus élevées en hiver et moins élevées en été.

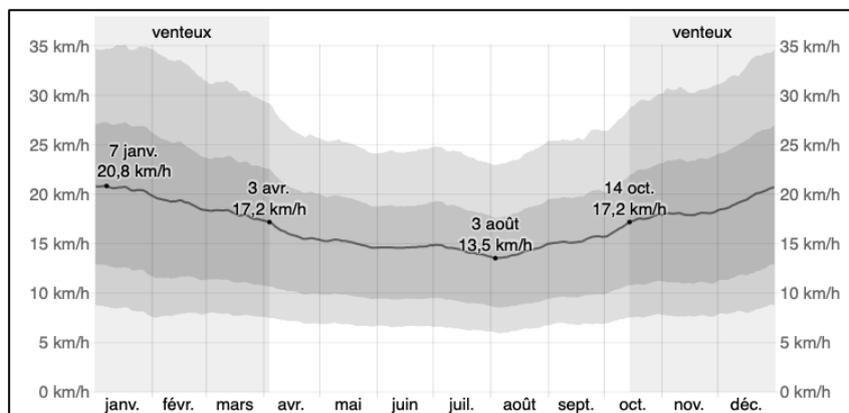


Figure 17 : Année de vent typique à l'aéroport de Bruxelles à 10m du sol [30]

2.2.3 Historique

L'historique des données de vent est généralement exprimé par une vitesse de vent moyenne annuelle en m/s. Cependant, contrairement à l'ensoleillement, dont les données historiques sont relativement fiables, les données de vent doivent être considérées avec beaucoup plus de précaution. En effet, la mesure du vent est directement influencée par l'environnement changeant du capteur, tel que les arbres ou les bâtiments. De plus, cette mesure est également affectée par la rugosité et la topographie de la région environnante, qui ont considérablement changé depuis 1900. Les changements de technologie des anémomètres au fil du temps peuvent également être une source d'erreur dans la continuité des données collectées [22].

Il est donc nécessaire d'examiner et d'interpréter le graphique ci-dessous avec prudence, car il représente l'historique des vitesses de vent moyennes à Uccle depuis 1892. La tendance à observer est un maintien de la vitesse moyenne jusqu'aux années 1950, suivie d'une décroissance continue jusqu'à aujourd'hui.

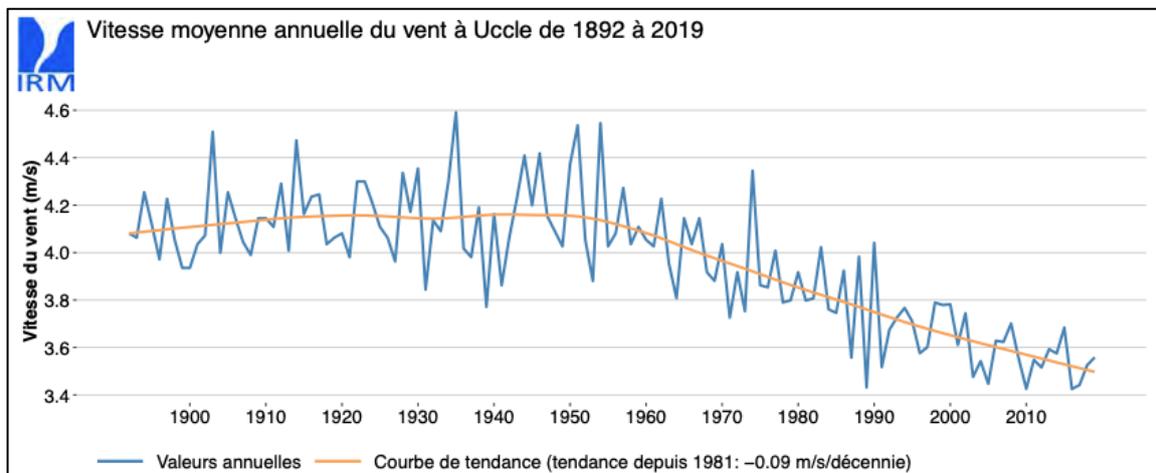


Figure 18 : Historique du vent moyen à Uccle à 10m du sol [22]

Ces données peuvent être recoupées avec les données historiques de l'aéroport de Bruxelles, qui dispose d'enregistrements depuis 1960. Ces données sont plus fiables car peu de changements notables ont été apportés à l'aéroport depuis 1960. Elles confirment donc la tendance à la baisse observée depuis 1960 sur le graphique d'Uccle.

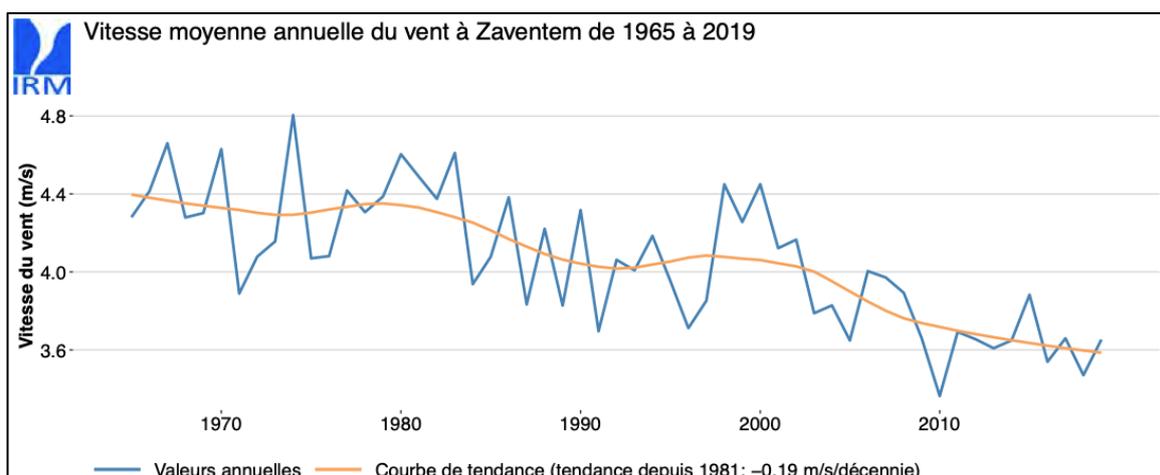


Figure 19 : Historique des vitesses de vent à Zaventem à 10m du sol [22]

3 Les énergies renouvelables

3.1 Politiques et objectifs énergies renouvelables

3.1.1 Paquet sur le climat et l'énergie 2030

Ce paquet d'objectif a été adopté en 2014 lors d'un Conseil européen qui s'est accordé sur les objectifs suivants à l'horizon 2030.

- L'Union européenne (UE) s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % par rapport à 1990 sur son territoire, avec des objectifs spécifiques pour les secteurs relevant du système d'échange de quotas d'émission (ETS) et d'autres secteurs.
- Elle vise à atteindre un objectif contraignant d'au moins 32 % pour la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale d'ici 2030, avec la possibilité de révision en 2023.
- Un objectif indicatif de réduction d'au moins 32,5 % dans l'utilisation globale de l'énergie d'ici 2030 a également été établi, pouvant être réévalué à la hausse en 2023.
- L'UE s'est également fixé un objectif d'interconnexion de 15 % dans le secteur de l'électricité, visant à renforcer les connexions entre les réseaux électriques des États membres.

Ces objectifs ont par la suite été revus à la hausse en 2020 puis en 2023 avec un objectif de réduction des émissions de GES de 55% en 2030, toujours par rapport à 1990 [31][32].

3.1.2 Pacte vert européen

Lors de la COP25 à Madrid en 2019, la Commission européenne a mis en place le pacte vert pour l'Europe aussi appelé « european green deal ». L'objectif de ce pacte est de rendre le continent européen climatiquement neutre avec un objectif d'émissions nettes de gaz à effet de serre nulle d'ici 2050. Sur la figure 20, les principaux objectifs et axes de travail du pacte vert sont mis en évidence [31].

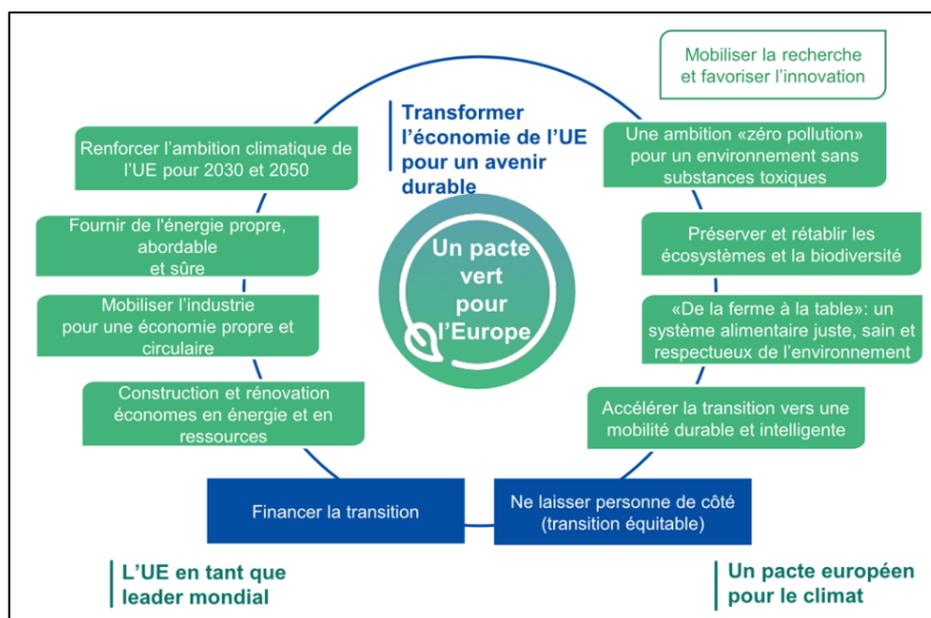


Figure 20 : Objectifs et axes de travail du pacte vert européen [31]

Pour atteindre ses objectifs, les mesures prises sont notamment [31] :

- L'élaboration de la loi européenne sur le climat.
- Le relèvement des ambitions climatiques à l'horizon 2030 avec comme nouvel objectif une réduction de 50-55% par rapport aux émissions de gaz à effet de serre de 1990.
- La révision de toutes les directives pertinentes en matière de climat.
- L'élaboration du plan d'investissement pour une Europe durable.

3.1.3 Une UE climatiquement neutre en 2050

En 2019 cet objectif de neutralité climatique de l'Union européenne d'ici 2050 a été confirmé par le Conseil conformément aux objectifs de l'Accord de Paris⁸. Ce processus a débuté avec la publication par la Commission européenne de sa vision stratégique pour une UE climatiquement neutre, "Une planète propre pour tous", le 28 novembre 2018, accompagnée d'une analyse détaillée des voies menant à la neutralité climatique couvrant tous les secteurs et domaines politiques clés.

Conformément à l'Accord de Paris, toutes les parties étaient invitées à communiquer, avant fin 2020, leur stratégie à long terme de développement à faible émission de gaz à effet de serre. En mars 2020, l'UE a soumis sa stratégie à long terme à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques⁹ (CCNUCC), élaborée sur la base de la décision du Conseil européen. De plus, tous les États membres sont tenus d'élaborer des stratégies à long terme dans le cadre du règlement européen sur la gouvernance de l'union de l'énergie et de l'action pour le climat [31].

3.2 État des lieux en Belgique

Pour respecter ses engagements climatiques, la Belgique, comme de nombreux autres pays, investit massivement dans le développement des énergies renouvelables. En effet, pour l'année 2023, la somme annuelle de la production photovoltaïque et éolienne représente 21,5 TWh, ce qui équivaut à 28,2% de la consommation électrique belge. La part de production d'énergie renouvelable ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre, comme le montre la figure 21, qui représente le mix de production d'électricité belge en 2023 et 2024.



Figure 21 : Production d'électricité en 2023 et 2022 [33]

Les énergies renouvelables sont intermittentes¹⁰, ce qui rend leur contribution au mix énergétique belge très variable. Par exemple, en juillet 2023, 35% de la consommation belge a été couverte par la production photovoltaïque et éolienne. Le 29 mai 2023, un autre record

⁸ L'Accord de Paris est un traité international juridiquement contraignant sur les changements climatiques. Il a été adopté par 196 Parties lors de la COP 21.

⁹ Est l'une des trois conventions adoptées au Sommet de la Terre de Rio, en 1992, avec la Convention sur la diversité biologique et la Convention sur la lutte contre la désertification.

¹⁰ Qui est discontinu et reprend par intervalles. Qualifie par exemple une source qui coule de temps en temps.

a été battu à l'échelle quart-horaire¹¹, avec une couverture de 93% de la consommation belge pendant 15 minutes par le photovoltaïque et l'éolien.

En raison de l'augmentation de la puissance photovoltaïque et éolienne installée, ainsi que des conditions météorologiques plutôt favorables, la production photovoltaïque a augmenté de 12%, l'éolien offshore de 20,6% et l'éolien onshore de 43% par rapport à 2022.

Il est à noter que les prix de l'électricité est resté historiquement élevés, ce qui a causé une diminution de la consommation d'électricité en 2023 de 3,5% par rapport à 2022. Cependant, pour les années à venir, une très forte augmentation de la consommation est prévue en raison de l'électrification de nombreux processus industriels, du parc automobile et des systèmes de chauffage. Une augmentation de 50% est projetée par Elia¹² d'ici 2032.

En ce qui concerne la sollicitation du réseau, elle est fortement en baisse en raison de la diminution de la consommation générale, mais aussi grâce à l'augmentation de l'autoconsommation des prosumers¹³. Cette diminution de la sollicitation et de la consommation est bien visible sur le graphique ci-dessous, mis en ligne par Elia. La courbe bleue représente la consommation totale de la Belgique, qui est en baisse depuis 2015, et la courbe orange représente le flux d'énergie fourni aux Belges via le réseau haute tension d'Elia. La courbe orange diminue plus rapidement grâce à l'augmentation du nombre et de la puissance des installations chez les prosumers. Le delta correspond à l'énergie produite et autoconsommée au sein des réseaux basse tension de Ores, Luminus, etc [33][34].

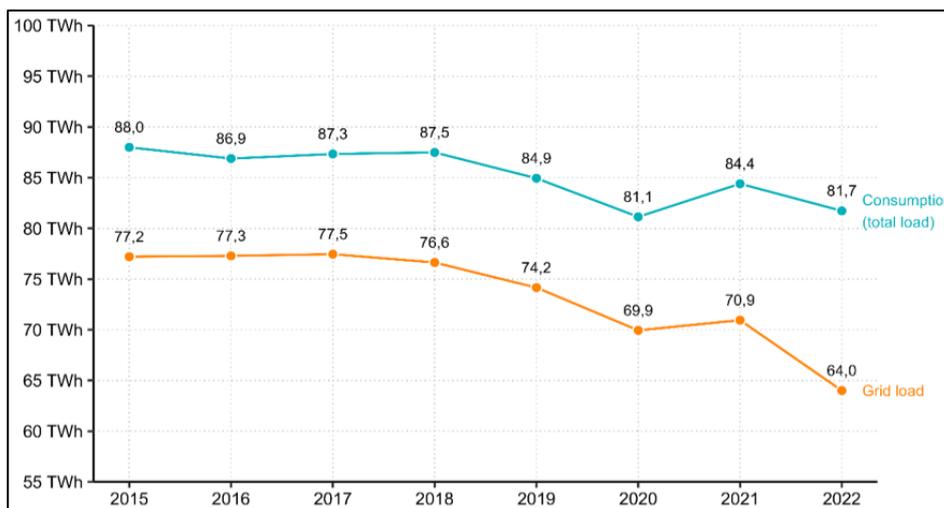


Figure 22 : Consommation totale et sollicitation du réseau belge [35]

3.3 Solaire photovoltaïque

3.3.1 Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Il a observé qu'un courant était généré lorsqu'un matériau semi-conducteur était exposé aux rayons solaires, induisant ainsi une tension aux bornes du matériau. Cependant, ce n'est qu'en 1883 que cette découverte a été exploitée pour la première fois afin de produire une cellule photovoltaïque, l'élément de base d'un panneau solaire. Cette avancée a été réalisée par l'Américain Charles Fritts, qui a réussi à enduire une plaque de sélénium de fines couches d'or. Cependant, ce projet a été limité en raison du coût élevé des matériaux utilisés et du faible rendement de la cellule, d'environ 1%.

¹¹ Intervalle de temps d'un quart d'heure, notion souvent utilisée par les fournisseurs et producteurs d'électricité.

¹² Elia est une entreprise qui gère le réseau belge de haute tension et est responsable du transport d'électricité dans tout le pays.

¹³ Un prosumer est un individu qui à la fois consomme et produit dans ce cas-ci de l'électricité.

D'autres progrès ont été réalisés par la suite, mais aucun n'a égalé le succès de la technologie développée en 1954 par Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller. Ces chercheurs américains, travaillant pour les laboratoires Bell, ont conçu un panneau solaire affichant un rendement de 6%. Leurs cellules étaient principalement composées de silicium dopé, dont l'intérêt avait été découvert en 1939 par Russell Ohl. Cette innovation a ouvert la voie au développement de nombreuses applications.

La filière photovoltaïque a finalement connu un essor significatif grâce aux recherches spatiales et aux efforts visant à améliorer l'approvisionnement énergétique des satellites [36].

3.3.2 Cartographie des ressources

Avant d'aborder les ressources disponibles sur Terre, il est crucial de faire la distinction entre les ressources et les ressources exploitables. Les ressources désignent le potentiel total d'énergie disponible, tandis que les ressources exploitables représentent la partie de cette ressource renouvelable ou non qui peut être utilisée de manière efficace et rentable sur le plan technique, économique et social pour produire de l'énergie.

La carte ci-dessous présente la répartition des ressources solaires exploitables sur Terre. Les zones non exploitables sont grisées. Ces zones grises ne reçoivent soit pas suffisamment d'énergie solaire, soit le terrain ne permet pas l'installation de panneaux solaires, ou encore ces zones se trouvent être très éloignées de la civilisation et donc des consommateurs d'électricité. Ces zones sont principalement les pôles, les grandes forêts primaires et les déserts. Parmi les zones exploitables, certaines reçoivent annuellement plus d'énergie solaire (rouge/orange) que d'autres (bleu/vert).

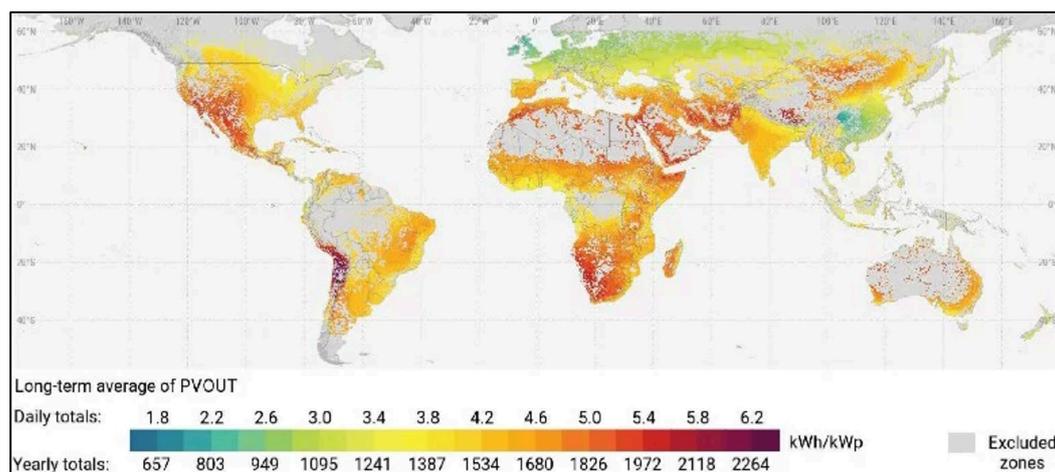


Figure 23 : Carte de l'énergie solaire exploitable reçue annuellement sur une surface horizontale [37]

3.3.3 Fonctionnement

Une installation photovoltaïque (PV) se compose de plusieurs panneaux, eux-mêmes composés de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elle pour fournir un courant continu de tension et d'intensité exploitable. Ces cellules sont des semi-conducteurs, généralement à base de silicium qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique en utilisant l'effet photoélectrique. Le nom de cette technologie renouvelable vient du nom du phénomène qui la rend possible à savoir l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque se produit lorsqu'un photon de lumière est absorbé par un matériau semi-conducteur¹⁴ dopé¹⁵, « p », déficitaire en électron (positif) et, « n », excédentaire en électron (négatif), formant une jonction « p-n ». Sous l'effet du dopage, généralement réalisé avec du phosphore pour la couche n et du bore pour la couche p, un champ électrique

¹⁴ Est un matériau avec une conductivité électrique intermédiaire entre les conducteurs et les isolants

¹⁵ Est un processus où des impuretés sont ajoutées au semi-conducteur pour modifier ses propriétés électriques

permanent est présent dans le matériau. Lorsqu'un photon incident interagit avec les électrons du matériau, il transfère son énergie à l'électron, le libérant ainsi de la bande de valence et créant un courant électrique. Les électrodes situées sur les faces supérieures (-) et inférieures (+) de la cellule recueillent ensuite les électrons pour produire un courant électrique utilisable. La composition et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sont illustrés par la figure 24 [36][38].

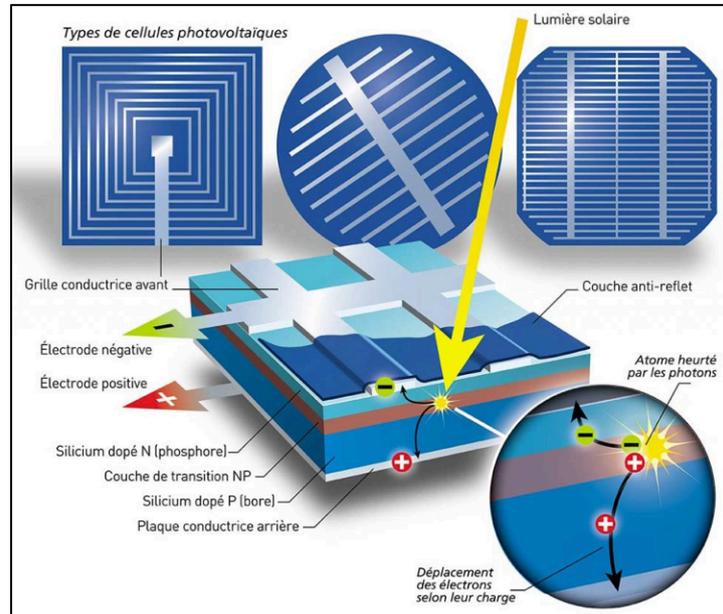


Figure 24 : Composition et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [39]

3.3.4 Notions photovoltaïques

- Courbe caractéristique et MPPT [37]

Le maximum power point tracker (MPPT) est un dispositif qui fait en sorte que les cellules photovoltaïques délivrent une puissance maximum. Cette puissance est fonction de l'intensité I en ampère et de la tension V en volt suivant la relation $P=V*I$. Deux autres points caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit I_{cc} qui correspond à une tension V nulle et le point de circuit ouvert V_{co} qui correspond à un courant I nul. La figure 25 représente la courbe tension-courant d'une cellule photovoltaïque (en rouge) ainsi que la courbe de puissance de sortie en fonction de la tension et du courant (en bleu). Le point MPP désigne le point de fonctionnement tension-courant pour lequel la puissance de sortie est maximale.

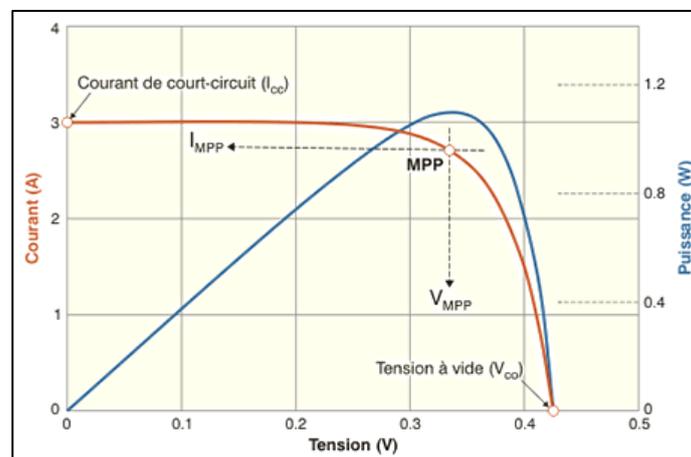


Figure 25 : Courbe caractéristique tension-courant photovoltaïque [40]

- Rendement et types de pertes [38]

Il existe un rendement théorique maximum pour une cellule photovoltaïque qui est de 27% pour une cellule au silicium (Si) et de 31% pour une cellule à l'arséniure de gallium (GaAs). Ce rendement théorique ne peut être atteint dans la réalité à cause de 8 facteurs de réduction du rendement.

Pertes de bande interdite. L'écart d'énergie de la bande interdite représente l'énergie requise pour qu'un électron passe de la bande de valence, où il est lié près d'un noyau atomique, à la bande de conduction, où il devient libre de se déplacer dans le cristal et de contribuer à la conductivité électrique en tant que porteur de charge [41].

1. Perte liée aux photons trop faibles
2. Perte liée aux photons inutilement énergétiques

Pertes optiques

3. Présence du contact métallique avant
4. Réflexion de la lumière incidente
5. Photons non absorbés car épaisseur trop faible

Pertes électriques

6. Recombinaison des paires électron-trous
7. Facteur de tension
8. Facteur de remplissage

- Le Watt-crête [38]

Le Watt-crête (Wc) est l'unité la plus couramment utilisée pour parler de la puissance d'un panneau photovoltaïque. Elle correspond à une puissance de 1 Watt dans des conditions de test standardisées de référence à savoir, une température de 25°C et une irradiation solaire de 1000 W/m² selon un spectre solaire standard. Un kWc dans des conditions d'installation optimale en Belgique produit +/- 950 kWh/an [42].

Pour calculer la puissance réelle d'un panneau ou d'une installation, il est possible d'utiliser la formule ci-dessous [43] :

$$P_{PV} = \frac{G}{G_r} P_0 [1 + \mu_{P_0} (T_{cell} - T_r)]$$

Avec :	P_{PV}	Puissance photovoltaïque en [W]
	G	Rayonnement solaire en [W/m ²]
	G_r	Rayonnement solaire de référence 1000 [W/m ²]
	P_0	Puissance de référence en [W] / Puissance crête en [Wc]
	μ_{P_0}	Coefficient de rendement lié à la température en [%/°C]
	T_{cell}	Température de la cellule en [°C]
	T_r	Température de référence en [°C]

$$T_{cell} = \alpha T_{ambient} + b G + c u_{wind} + d$$

Avec :	u_{wind}	Vitesse du vent [m/s]
	a, b, c, d	Données constructeur

3.3.5 Variations envisageables dans la production d'énergie solaire

Il est clair que le changement climatique ne va avoir aucun effet sur le soleil ni sur l'énergie reçue à l'extérieur de l'atmosphère. Par contre l'énergie solaire reçue au niveau du sol peut être affecté par toutes sortes de paramètres météorologiques ou encore par la composition de l'atmosphère même. Les variations qui pourraient impacter la production photovoltaïque sont les suivantes [44] :

1. Changements de la température moyenne

Une augmentation de la température globale aurait un impact négatif sur l'efficacité des cellules et donc sur la puissance de sortie. L'efficacité des modules photovoltaïques diminue d'environ 0,5 % pour chaque augmentation de température de 1°C.

Une augmentation de la température pourrait également réduire la capacité des conducteurs souterrains en augmentant la température du sol. En effet, à mesure que la température ambiante augmente, le rendement de l'élément conducteur tend à diminuer. Cela est dû à l'augmentation de la résistivité¹⁶ électrique de l'élément conducteur avec la température.

2. Changements de l'irradiation solaire et de la couverture nuageuse

Ces changements affecteraient directement la puissance de sortie des producteurs d'énergie solaire. Une augmentation de la couverture nuageuse impacte négativement le rayonnement direct. L'énergie solaire concentrée serait plus affectée car elle ne peut pas valoriser le rayonnement diffus. Les panneaux photovoltaïques le seraient un peu moins étant donné qu'ils valorisent aussi bien le rayonnement direct que diffus.

3. Changements de la saleté, de la poussière, de la neige, des particules atmosphériques et autres

Une augmentation de ces variables réduirait la production d'énergie, mais à l'inverse une diminution dans certaines zones du monde pourrait augmenter la production. Lorsqu'un module photovoltaïque est recouvert de poussière ou de neige, il n'est plus en mesure de capter correctement le rayonnement solaire. De même, la composition de l'atmosphère influence la quantité de rayonnement solaire qui atteint le capteur en réfléchissant, en absorbant ou en diffusant le rayonnement solaire.

4. Vitesse du vent

Les changements de la vitesse du vent en surface peuvent affecter la production photovoltaïque de plusieurs façons. Premièrement, les vents forts peuvent causer des dommages matériels en déplaçant des débris de grande taille. Des vents plus fréquents et plus intenses peuvent également entraîner une accumulation supplémentaire de saleté, ce qui influence négativement la production solaire et nécessite un nettoyage plus fréquent. Cependant, une interaction positive est possible, la production photovoltaïque peut bénéficier des vents en surface en refroidissant les modules, ce qui augmente leur efficacité et leur puissance de sortie.

5. Précipitations

Une augmentation des précipitations emporterait la poussière, ce qui serait bénéfique pour la production. Cependant, des précipitations plus fréquentes s'accompagnent souvent d'une couverture nuageuse plus fréquente, ce qui réduirait l'efficacité (moins de rayonnement solaire). De plus, la disponibilité et les ressources en eau, influencées par les précipitations, peuvent également affecter l'énergie solaire concentrée qui utilise l'eau comme fluide caloporteur.

6. Événements météorologiques extrêmes

Les événements météorologiques extrêmes peuvent endommager les panneaux solaires de diverses manières. Les incendies et les vents violents peuvent affecter l'infrastructure. De plus, le dépôt de sable et de poussière causé par des vents extrêmes peut entraîner une diminution de la production de des panneaux solaires. Les grêlons sont également une menace potentielle, pouvant causer des dommages aux panneaux solaires. En outre, les vagues de chaleur peuvent réduire la puissance de sortie photovoltaïque raison de l'augmentation de la température, et elles peuvent également causer des dommages potentiels aux matériaux constituant les panneaux solaires.

¹⁶ Représente la capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique.

3.4 L'éolien

3.4.1 Historique

L'exploitation du vent remonte à des temps anciens. Jusqu'à 400 avant J.-C., lorsque les Perses utilisaient des moulins à vent pour moudre le grain. Ces moulins à axe vertical étaient équipés de parois perforées permettant à l'air de pénétrer à l'intérieur. Au XIIe siècle, les premiers moulins à vent font leur apparition en Europe, utilisés par les paysans pour diverses tâches telles que le broyage des céréales, l'extraction d'huile et l'irrigation des cultures.

En 1885, Ernest Bollée popularise le terme "éolienne" pour désigner ces machines. Deux ans plus tard, en 1887, la première éolienne destinée à produire de l'électricité est érigée à Cleveland. Avec ses 144 pales et un diamètre de 17 mètres, elle avait une capacité de 12 kW.

Paul la Cour apporte des améliorations significatives à ce concept en menant des recherches approfondies en aérodynamique. Ses travaux révèlent que les éoliennes à rotation rapide et à nombre de pales réduit sont plus efficaces pour produire de l'électricité.

La première éolienne moderne, conçue par Johannes Juul, voit le jour en 1956 au Danemark. Cette éolienne tripale, contrôlée par décrochage aérodynamique, est équipée d'un système d'orientation électromécanique et d'une génératrice asynchrone, capable de délivrer une puissance de 200 kW.

L'intérêt pour l'énergie éolienne s'intensifie considérablement à la suite des chocs pétroliers de 1971, 1979 et 2008. Cela se traduit par une croissance exponentielle de la puissance et de la taille des éoliennes, avec le développement de grands parcs éoliens tant sur terre que en mer [36].

3.4.2 Cartographie des ressources

Ci-dessous, sont cartographiées les ressources éoliennes mondiales grâce à la vitesse moyenne du vent à 100 mètres de hauteur. Les côtes sont généralement les endroits avec les moyennes de vent les plus élevées (couleur rouge/orange), en raison de l'absence de relief et d'obstacles. Tandis que toute la zone autour de l'équateur présente des moyennes de vitesse de vent bien moins élevées (couleur bleu/vert).

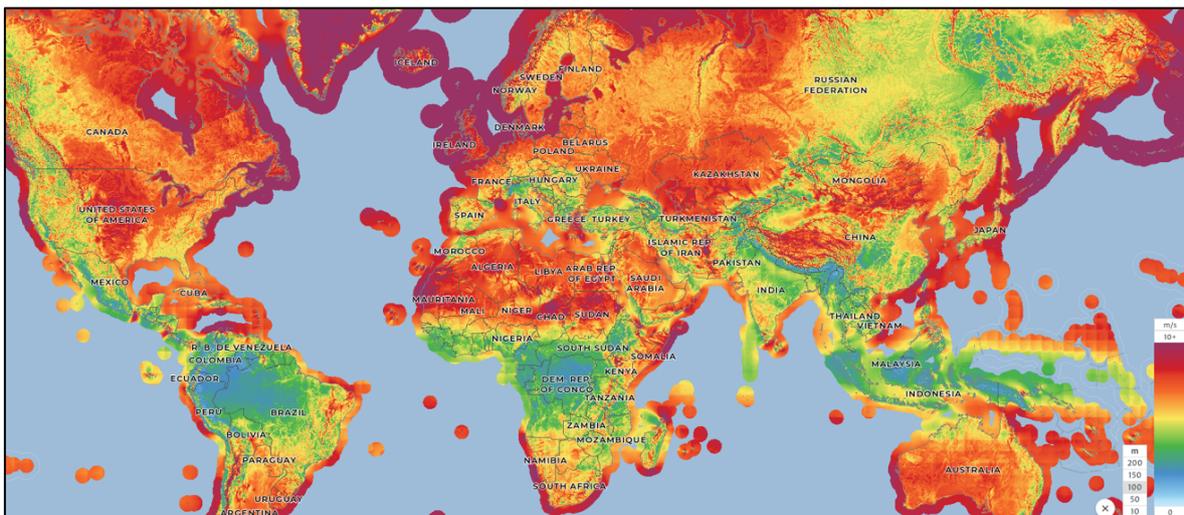


Figure 26 : Cartographie des vitesses de vent moyennes à 100m [29]

3.4.3 Fonctionnement

Il existe deux principaux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical, différenciées par l'orientation de leurs axes de rotation. Les éoliennes à axe horizontal

ont leur rotor disposé horizontalement, tandis que les éoliennes à axe vertical ont leur rotor disposé verticalement.

Le fonctionnement d'une éolienne est relativement simple et similaire, quel que soit son type. Initialement, le vent fait tourner les pales de l'éolienne, également appelées rotor, pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite, le mouvement du rotor entraîne un arbre de transmission, qui à son tour met en rotation une génératrice. Cette génératrice peut être de type asynchrone ou synchrone, les génératrices synchrones ne nécessitent pas de multiplicateur de vitesse et peuvent ainsi atteindre des rendements supérieurs. C'est à travers ce processus que l'éolienne produit de l'électricité à partir de l'énergie du vent [36].

Comme illustré sur le schéma d'une éolienne à axe horizontal ci-dessous, d'autres éléments, tels que le mat et le socle, composent la structure de ce générateur d'énergie renouvelable. On retrouve également un système de freinage pour ralentir ou arrêter la rotation des pales. Enfin, un transformateur de courant est nécessaire pour rendre l'électricité produite compatible avec l'injection sur le réseau auquel l'éolienne ou le parc éolien est connecté.

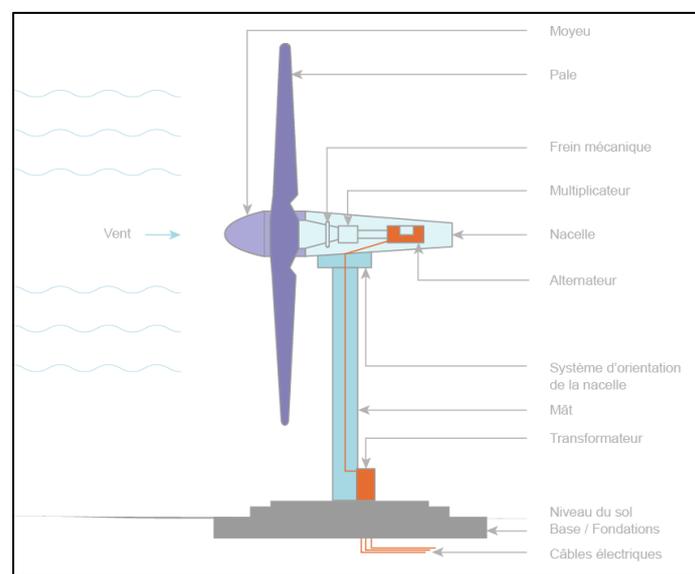


Figure 27 : Composition d'une éolienne tri-pale à axe horizontal [45]

3.4.4 Notions éoliennes

- Distribution de Weibull [46]

La distribution du vent est essentielle car elle varie selon la hauteur et le temps, influençant ainsi le rendement des éoliennes. Les variations de vitesse, notamment les turbulences, peuvent affecter la durabilité des éoliennes. La distribution de Weibull illustre ces variations en se basant sur des mesures de vitesse moyenne prises régulièrement. Elle est représentée par une courbe de densité de probabilité, où l'aire sous la courbe entre deux vitesses indique la probabilité du vent soufflant à ces vitesses. Le facteur de forme, k , détermine la variabilité du vent : un faible k indique une grande variabilité, tandis qu'un k proche de 3 correspond à une vitesse constante, favorable à l'exploitation éolienne. Dans la formule ci-dessous, le facteur d'échelle de Weibull, exprimé en m/s, est noté A et permet d'exprimer la distribution d'une vitesse caractéristique, proportionnelle à la vitesse moyenne du vent. Le U représente quant à lui la vitesse du vent, également en m/s.

$$p(U) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{U}{A}\right)^{k-1} \exp[-(U/A)^k]$$

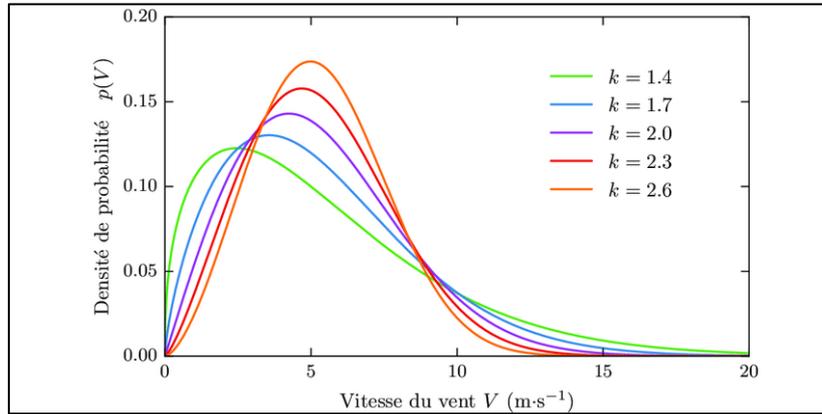


Figure 28 : Explication graphique du facteur k de la distribution de Weibull [47]

o Profil des vent [43][46]

À proximité du sol, le vent est significativement ralenti par les obstacles et les reliefs du terrain. À une certaine hauteur, généralement dans les couches géostrophiques (environ 5 km au-dessus du sol), le vent n'est plus influencé par la surface terrestre. Entre ces deux niveaux, la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur, phénomène connu sous le nom de cisaillement vertical du vent. L'image ci-dessous représente l'évolution de la vitesse du vent en fonction de la hauteur et du terrain. Le profil de vent avec le terrain le moins rugueux atteint une vitesse de vent de 10 m/s dans l'exemple, à une hauteur inférieure aux deux autres terrains plus rugueux.

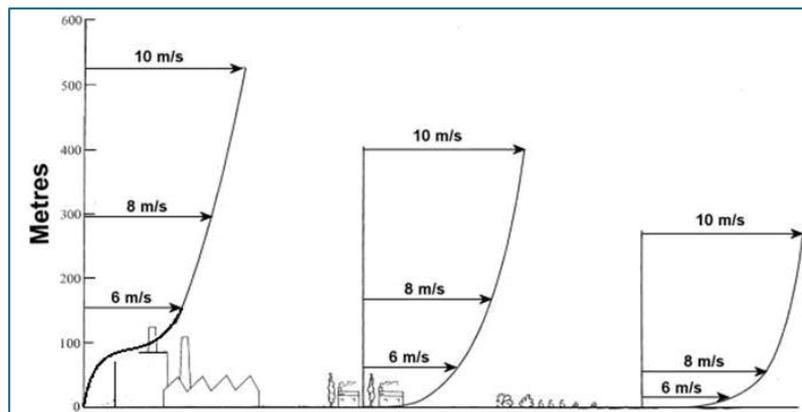


Figure 29 : Profil logarithmique de vent en fonction du terrain [48]

Lorsque le terrain est plat et que la stratification atmosphérique est neutre, le profil logarithmique du vent offre une bonne approximation du cisaillement vertical et peut être calculé avec la formule ci-dessous :

$$u_h = u_r \left(\frac{\ln \frac{Z_h}{Z_0}}{\ln \frac{Z_r}{Z_0}} \right)$$

- Avec :
- u_h Vitesse de vent à hauteur de nacelle [m/s]
 - u_r Vitesse de vent à hauteur de référence [m/s]
 - Z_h Hauteur de nacelle en [m]
 - Z_r Hauteur de référence en [m]
 - Z_0 Rugosité de sol

$$u_h = u_r \left(\frac{Zh}{Zr} \right)^\alpha$$

Avec : α Rugosité du terrain

- Théorie de Betz [49]

La théorie de Betz, établie par le physicien allemand Albert Betz, démontre que dans des conditions idéales où une éolienne ne génère aucune force de traînée, elle peut récupérer au maximum 16/27 de la puissance du vent, ce qui équivaut à environ 60%.

- Puissance du vent fonction de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air [43]

La puissance récupérée par une éolienne est très sensible à la vitesse du vent, mais également à la masse volumique de l'air, bien que dans une moindre mesure. En effet, dans la formule de la puissance éolienne ci-dessous, on constate qu'elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Ainsi, une petite variation dans la vitesse entraîne des variations significatives de la puissance.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho_{air} u_h^3$$

Avec : WPD Puissance du vent en [W/m²]
 ρ_{air} Masse volumique de l'air en [kg/m³]
 u_r Vitesse de vent à hauteur de nacelle [m/s]

$$\rho = \frac{P M}{R T}$$

Avec : P Pression en [Pa]
 M Masse molaire en [kg/mol]
 R Constante des gaz parfait 8,3144621 en [J/K.mol]
 T Température en [K]

3.4.5 Variations envisageables

Contrairement à l'énergie solaire, le changement climatique affecte directement l'énergie éolienne à la source. En effet, là où le changement climatique n'a aucun effet direct sur l'activité solaire, il a un impact direct sur certains phénomènes à l'origine des vents. Ces phénomènes, peuvent être impactés de manière différente, aussi bien positivement que négativement, en fonction de la région dans laquelle on se trouve [44].

1. Changements de la vitesse du vent

Les changements de vitesse du vent peuvent affecter le nombre d'heures de fonctionnement, car les éoliennes ne peuvent pas fonctionner avec des vents très forts ou très faibles. La puissance, et donc par extension la production, est fortement affectée par la vitesse du vent, car l'énergie du vent est fonction du cube de sa vitesse, comme illustré par la formule de puissance WPD dans le chapitre 3.4.4. La figure 30 illustre la puissance récupérée par une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Dans la phase I, le vent n'est pas assez fort pour que l'éolienne produise et dans la phase IV, il est trop puissant. Entre les deux, on retrouve la plage de fonctionnement.

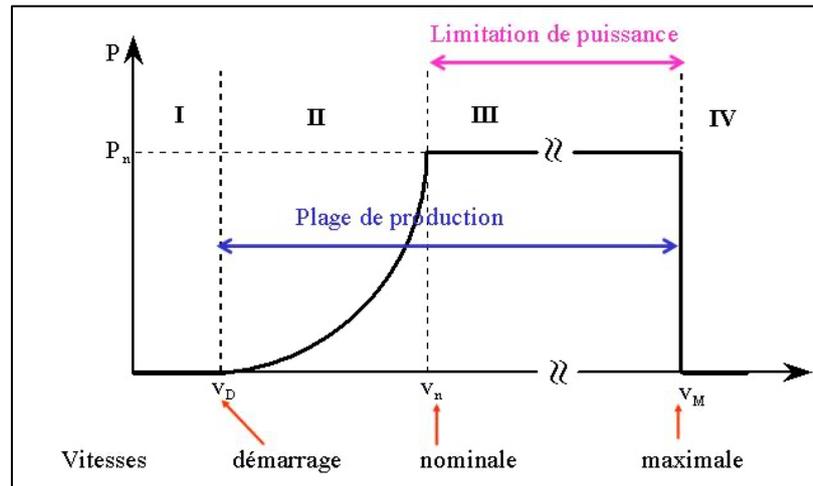


Figure 30 : Courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent [50]

2. Changements dans la distribution quotidienne ou saisonnière du vent

Toute variation dans la distribution des vents peut affecter la concordance entre l'entrée d'énergie éolienne sur le réseau et la demande. Ces variations peuvent mettre en péril ou augmenter la rentabilité des installations.

3. Changements de température

Les impacts liés aux variations de température sont nombreux et divers :

- L'augmentation des températures atmosphériques, attendue dans le cadre du changement climatique, entraînera une légère baisse de la densité de l'air, affectant ainsi la production d'énergie éolienne. La formule de la densité de l'air (loi des gaz parfaits), présentée dans le chapitre 3.4.4, illustre le lien entre la température et la densité d'un gaz.
- Une hausse de la température peut également entraîner une augmentation des coûts opérationnels¹⁷ et compromettre l'efficacité des équipements utilisés.
- La fonte des glaces et la dérive des glaces de mer peuvent causer des dommages aux fondations des éoliennes en mer, en particulier dans les régions polaires, perturbant ainsi les opérations des parcs éoliens situés dans ces zones.
- Les variations dans les périodes de froid extrême peuvent affecter la production d'énergie éolienne, notamment en provoquant le givrage des pales de turbine, ce qui peut réduire les performances et la durabilité des éoliennes.
- Les températures extrêmement basses ou élevées peuvent également avoir des conséquences sur différents composants des parcs éoliens comme par exemple l'efficacité des conducteurs d'électricité.
- Les changements dans les conditions du pergélisol peuvent également avoir un impact sur la construction et la réparation des routes menant à certains parcs éoliens, ajoutant ainsi des défis supplémentaires à leur maintenance et à leur exploitation.

4. Hausse du niveau de la mer

La montée du niveau de la mer pourrait endommager les fondations des éoliennes en mer dans les zones côtières ainsi que les éoliennes à terre dans les endroits côtiers.

5. Événements météorologiques extrêmes

¹⁷ Les coûts opérationnels, aussi appelés frais de fonctionnement, sont les charges incorporables liées aux opérations d'exploitation de l'outil de production. Il peut s'agir, par exemple, des coûts en personnel ou de l'entretien du matériel.

Tout événement extrême peut endommager l'infrastructure et en compliquer l'accès. À cet égard, les ouragans ou les tempêtes peuvent causer des dommages aux parcs et affecter la durée de vie des éoliennes.

La conception des turbines sera affectée par l'intensité des turbulences attendues, le cisaillement du vent et les conditions de vent transitoires telles que les changements de vitesse ou de direction du vent.

Pendant des vitesses de vent extrêmement élevées ou faibles, les parcs éoliens ne sont pas en mesure de fonctionner ou doivent être arrêtés pour des raisons de sécurité.

6. Autres

Les circulations à grande échelle et les schémas saisonniers tels que El Niño/Oscillation australe¹⁸ peuvent affecter le vent.

Les changements dans l'activité des vagues peuvent affecter les conditions structurelles des parcs offshore.

3.5 Hydroélectricité et biomasse

L'hydroélectricité et la biomasse ne sont pas étudiées dans ce travail, car cela aurait ajouté une charge de travail supplémentaire significative, rendant le projet beaucoup plus long et complexe et compromettant sa finalisation et sa qualité. Il est néanmoins intéressant d'en parler brièvement afin d'ouvrir la voie vers un travail similaire à celui réalisé dans ce mémoire sur ces deux énergies renouvelables.

Sans entrer dans les détails, les deux sous-chapitres ci-dessous introduiront, de manière similaire à ce qui a été présenté pour l'énergie solaire et l'éolien, les variations envisageables de l'hydroélectricité et de la biomasse induites par le changement climatique.

3.5.1 Hydroélectricité

1. Changement dans les schémas de précipitations

Les modifications des schémas annuels ou saisonniers peuvent influencer les débits des rivières et les niveaux d'eau, affectant ainsi la production. Une réduction du débit peut être néfaste, mais une augmentation peut également avoir des répercussions sur les conditions opérationnelles en fonction de la capacité de l'installation.

Les changements de précipitations et de température peuvent affecter le niveau d'humidité du sol, qui assure une fonction de stockage et régule les écoulements vers les rivières.

La sédimentation due à l'érosion peut affecter les propriétés du sol et réduire la production d'énergie.

2. Inondations et pluies intenses

Les inondations peuvent endommager les infrastructures et augmenter le besoin de déverser de l'eau. Elles peuvent également constituer un risque significatif pour la sécurité des barrages. De plus les inondations peuvent transporter des débris et endommager les barrages et les turbines.

3. Température de l'air

¹⁸ L'El Niño-oscillation australe (ENSO) figure parmi les principales sources de variabilité climatique annuelle à l'échelle mondiale, juste après la relation Terre-Soleil qui régit les saisons. Les phases El Niño et La Niña sont liées à des schémas de précipitations et de températures distincts, pouvant conduire à des événements climatiques extrêmes comme les inondations et les sécheresses. Ce phénomène majeur se caractérise par des fluctuations de la température dans l'océan Pacifique équatorial.

Une température de l'air plus élevée augmenterait l'évaporation de surface, réduisant le stockage d'eau et la production d'énergie.

La fonte des glaces peut modifier l'apport saisonnier d'eau aux centrales qui dépendent des chutes de neige ou des glaciers et poser des risques pour la sécurité. Cependant, cela pourrait entraîner des gains précoces pour certaines centrales.

Une augmentation de la température pourrait augmenter les coûts opérationnels et affecter l'efficacité de l'équipement. En particulier, cela peut affecter les performances des vannes et causer des contraintes mécaniques supplémentaire.

4. Autres

L'oscillation australe El Niño affecte les précipitations et a des répercussions sur la production dans certaines régions d'Amérique, de la péninsule ibérique, d'Asie et du Pacifique. L'Afrique australe pourrait également être impactée.

La performance des vannes peut être affectée par une augmentation de la teneur en sédiments dans l'eau et des matériaux en suspension.

Les glissements de terrain augmentent le niveau de sédiments dans l'eau, ce qui peut causer d'autres problèmes, notamment dans les zones à forte activité agricole.

L'intensification et la fréquence accrue des tempêtes et des événements météorologiques extrêmes peuvent affecter les centrales.

Les conflits avec d'autres utilisations (notamment l'irrigation) peuvent affecter la disponibilité de l'eau.

[44]

3.5.2 Biomasse

La génération de biomasse est souvent négligée lors de l'étude des impacts du changement climatique sur les énergies renouvelables, car elle est généralement intégrée dans les impacts sur l'agriculture et la foresterie. Par conséquent, il existe peu d'estimations spécifiques sur la manière dont le changement climatique pourrait influencer la production de biomasse pour la génération d'électricité à l'échelle mondiale. On peut supposer que la plupart des effets seront observés dans le secteur de l'agriculture et de la foresterie, plutôt que dans celui des déchets ou de l'élevage. Les cultures destinées à l'alimentation humaine sont particulièrement vulnérables aux impacts climatiques, avec généralement plus d'impacts négatifs que positifs. Les études sur les cultures énergétiques sont souvent régionales et variables en fonction des types de cultures et des zones étudiées. Malgré les incertitudes entourant les effets du dioxyde de carbone, de l'azote et des températures élevées, ainsi que la difficulté de quantifier les impacts des événements météorologiques extrêmes sur les systèmes de culture, certaines études indiquent une augmentation globale de la disponibilité des cultures énergétiques si les agriculteurs peuvent tirer parti de la fertilisation au CO₂. En revanche, une diminution est prévue dans la plupart des régions sans ce bénéfice. Les impacts spécifiques varient selon les régions, avec une augmentation prévue des cultures énergétiques en Europe centrale et du Nord, mais une diminution dans la région méditerranéenne. Les prévisions pour les forêts boréales sont généralement positives malgré la possibilité d'événements météorologiques extrêmes. Au niveau local, des impacts négatifs sont envisagés pour certaines cultures énergétiques en Allemagne. Les impacts sur la canne à sucre varient selon les régions, avec des prédictions négatives à moyen terme pour certains endroits et des augmentations de la production au Brésil. Les résultats suggèrent également que les cultures énergétiques aux États-Unis pourraient bénéficier du changement climatique, bien que des risques liés aux températures élevées soient également identifiés [44].

4 Problématique

4.1 Introduction de la question de recherche

L'objectif de ce travail est d'établir un lien entre les différents sujets abordés précédemment, à savoir le changement climatique et les conditions météorologiques qui y sont associées, et la production ainsi que le développement des énergies renouvelables. Étant donné que les données météorologiques prévisionnelles et les différents scénarios de développement humain et d'émissions de gaz à effet de serre (SSP) sont relativement récents, peu de travaux de ce genre ont été réalisés jusqu'à présent.

Ce travail repose sur des modèles de simulation et de prévisions qui comportent naturellement une part d'incertitude et d'erreur. Le logiciel de simulation utilisé est TRNSYS, et les données météorologiques prévisionnelles proviennent des recherches de Sébastien Doutreloup, membre du « Laboratory of Climatology and Topoclimatology, Department de Geography, UR SPHERES, University of Liège ». Les données et les résultats obtenus ont été recoupés autant que possible avec d'autres sources de données météorologiques, telles que l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) et Weather Spark. Pour renforcer la fiabilité des résultats des simulations, certains articles scientifiques traitant d'un sujet similaire ont été utilisés. Des données historiques et futures, tant de production que de puissance d'énergie renouvelable installée, trouvées sur les sites d'Elia, d'Energie Commune, ou encore dans le rapport européen sur l'état des énergies renouvelables, ont également été utilisées.

L'objectif de cette étude est de fournir une estimation des variations à envisager en Belgique en vue d'élaborer un plan de développement cohérent.

4.2 Littérature

En vue de valider ou de nuancer les résultats obtenus dans ce travail, cette partie a pour but d'exposer les résultats obtenus par d'autres études qui traitent du même sujet. Dans l'ensemble, ces études ne tiennent pas compte de la puissance installée, le sujet porte plutôt sur les « ressources » d'ER à travers le monde.

4.2.1 Forecasting the inevitable: A review on the impacts of climate change on renewable energy resources [43]

Ce document est une publication scientifique qui vise à centraliser un maximum d'études qui ont été réalisées sur l'effet du changement climatique sur la production d'énergie renouvelable. Il vise à répondre à 3 questions de recherche principales :

- Quelles sont les méthodes utilisées pour étudier les effets du changement climatique sur la production d'énergie renouvelable et la décarbonisation de l'approvisionnement énergétique (c'est-à-dire quels modèles et quelles données climatiques) ?

Les études recensées dans ce travail ont été réalisées pour un tiers à l'aide d'un logiciel de modélisation et de simulation dynamique et les deux tiers restants ont été réalisés en appliquant des équations de puissance aux données météorologiques à l'aide de logiciels tels que MATLAB ou similaires.

Quant à la provenance des données météorologiques, la moitié des études utilise des données météorologiques mondiales à résolution spatiale plus faible, mais couvrant une vaste région, tandis que l'autre moitié utilise des données météorologiques régionales, couvrant une région moins étendue mais avec une résolution spatiale plus élevée.

- Quelles régions ont été couvertes par des études de projection d'énergie renouvelable ou de décarbonisation ?

Plus de la moitié des études recensées concernent le continent européen ou l'un de ses pays, tandis que le reste des études se divise entre l'Asie et le reste du monde, comme l'illustre la carte du monde ci-dessous avec le nombre d'études réalisées par pays.

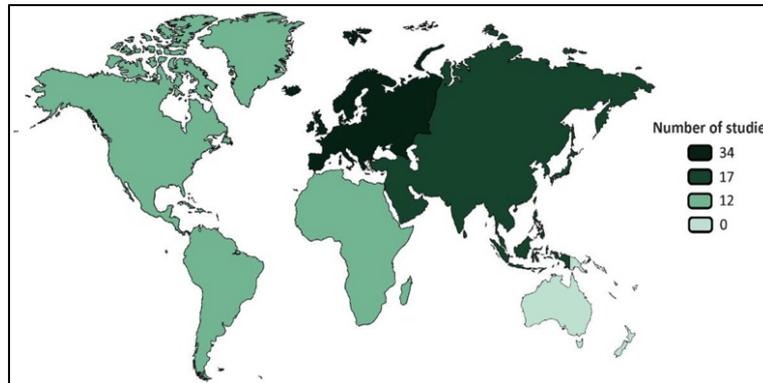


Figure 31 : Répartition géographique des études existantes sur l'effet du CC sur la production des ER [43]

- Quels sont les principaux impacts du changement climatique sur les ressources en énergie renouvelable, notamment l'éolien, le solaire et l'hydroélectricité ?

Pour ce qui est de l'éolien, la conclusion est qu'il y aura des variations extrêmement importantes aussi bien positives que négatives à travers le monde. En raison du nombre d'études réalisées (« n= » dans les graphiques), les résultats les plus fiables sont ceux du continent européen, qui laissent entrevoir une diminution de la production pour la plupart. Les résultats montrent des variations aussi bien à court terme (d'ici à 2030) qu'à long terme (de 2070 à 2100), mais c'est sur le long terme que ces variations seront les plus importantes.

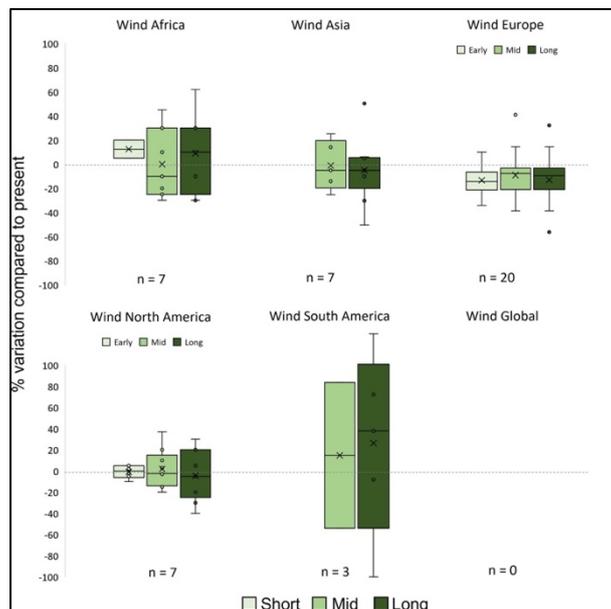


Figure 32 : Recensement des résultats obtenus en pourcentage de variation comparée au présent pour la production éolienne des différentes études et des différents continents [43]

Pour ce qui est du solaire photovoltaïque, la première chose qui est mise en évidence est que le nombre d'études traitant de cette source d'énergie renouvelable est bien moins important. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces installations sont généralement de petite ampleur et représentent un investissement moindre. Les résultats montrent que les variations sont assez faibles aussi bien à court terme qu'à long terme. En Europe, les résultats moyens tendent à prédire une légère baisse de production, même si un nombre plus faible d'études prédit une augmentation de production.

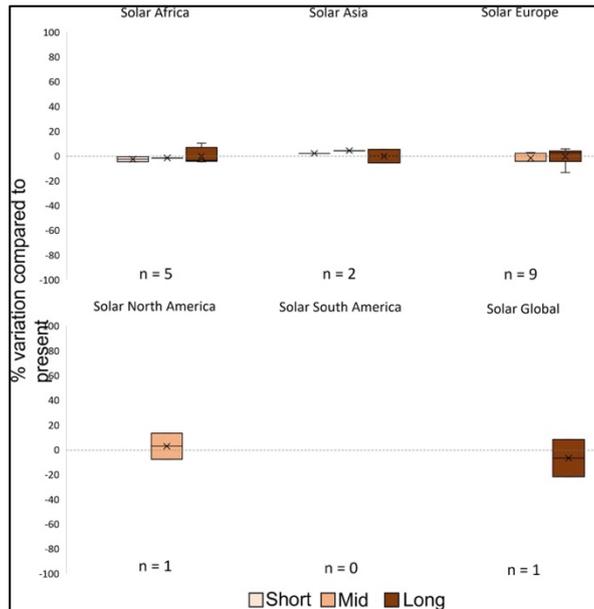


Figure 33 : Recensement des résultats obtenus pour la production photovoltaïque en pourcentage de variation comparée au présent des différentes études et des différents continents [43]

Pour ce qui est de l'hydroélectricité, les résultats vont tous dans le même sens et prédisent une diminution de la production partout dans le monde sauf en Afrique (attention seulement deux études n=2). Ces changements sont principalement causés par la perturbation dans le modèle de précipitations et l'augmentation de la température.

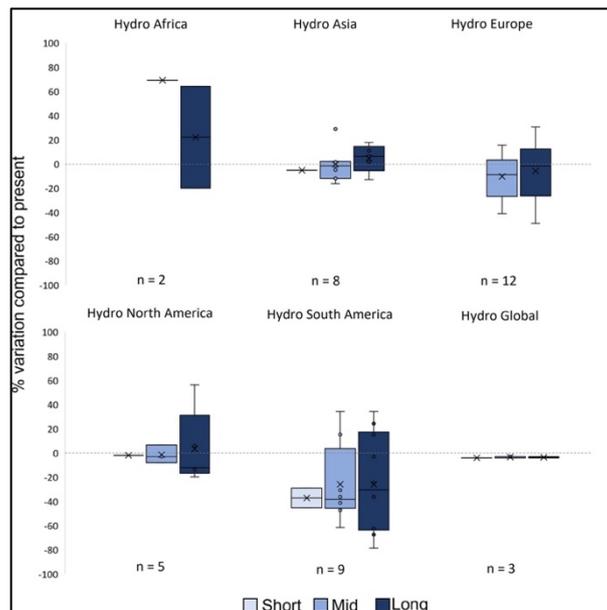


Figure 34 : Recensement des résultats obtenus pour la production hydroélectrique en pourcentage de variation comparée au présent des différentes études et des différents continents [43]

4.2.2 Climate change impacts on renewable energy supply [51]

Ce document est une publication scientifique d'une étude à l'échelle mondiale de l'impact du changement climatique sur les ER qui devrait jouer un rôle majeur dans la production d'énergie dans le futur. Cette étude se base sur deux scénarios de changement climatique et étudie 8 technologies, le photovoltaïque à grande échelle et en toiture, énergie solaire concentrée, éolien terrestre et offshore, bioénergie de première génération et lignocellulosique, et énergie hydroélectrique.

Les résultats de cette étude montrent que les variations dans la production des ER diffèrent dans le monde avec des augmentations de production dans certaines parties et pour certaines ER tandis que d'autres parties du monde subissent une perte de production pour certaines ER.

Si on considère les tendances moyennes, les prédictions sont une diminution de la production éolienne globale, une légère augmentation de la production photovoltaïque globale (champs solaire, installation en toiture et centrale à concentration solaire CSP), une augmentation de la production hydroélectrique et pour finir une très grosse augmentation de la production de biomasse. Les résultats ci-dessous montrent la différence entre la période actuelle et la période 2070-2100 sur base d'un scénario SSP2-RCP6.0. Ces tendances sont illustrées par la figure 35, qui répertorie les différentes parties du monde étudiées en ordonnée et les technologies étudiées en abscisse. Les augmentations de production sont représentées par des couleurs bleutées, tandis que les diminutions sont représentées par des couleurs rougeâtres. Lorsqu'un point se trouve dans la case, l'étude montre des variations supérieures à 10%, ce qui est jugé significatif.

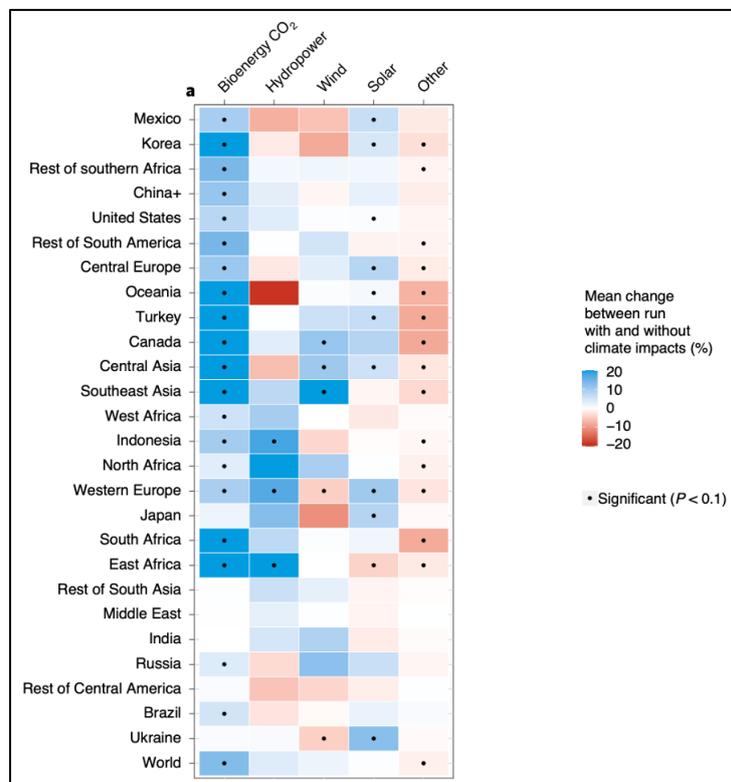


Figure 35 : Impact du CC sur la production d'ER par région [51]

Les quatre premières cartes présentées ci-dessous représentent quatre variables météorologiques qui ont un impact majeur sur la production photovoltaïque, le solaire concentré, l'éolien et l'hydroélectricité. La carte (a) montre la variation de rayonnement, la carte (b) la température, la carte (c) le vent et la carte (d) l'écoulement des eaux.

Les quatre cartes suivantes montrent l'effet que ces variations auront sur la production d'énergie photovoltaïque (a), le solaire concentré (b), l'éolien (c) et l'hydroélectrique (d).

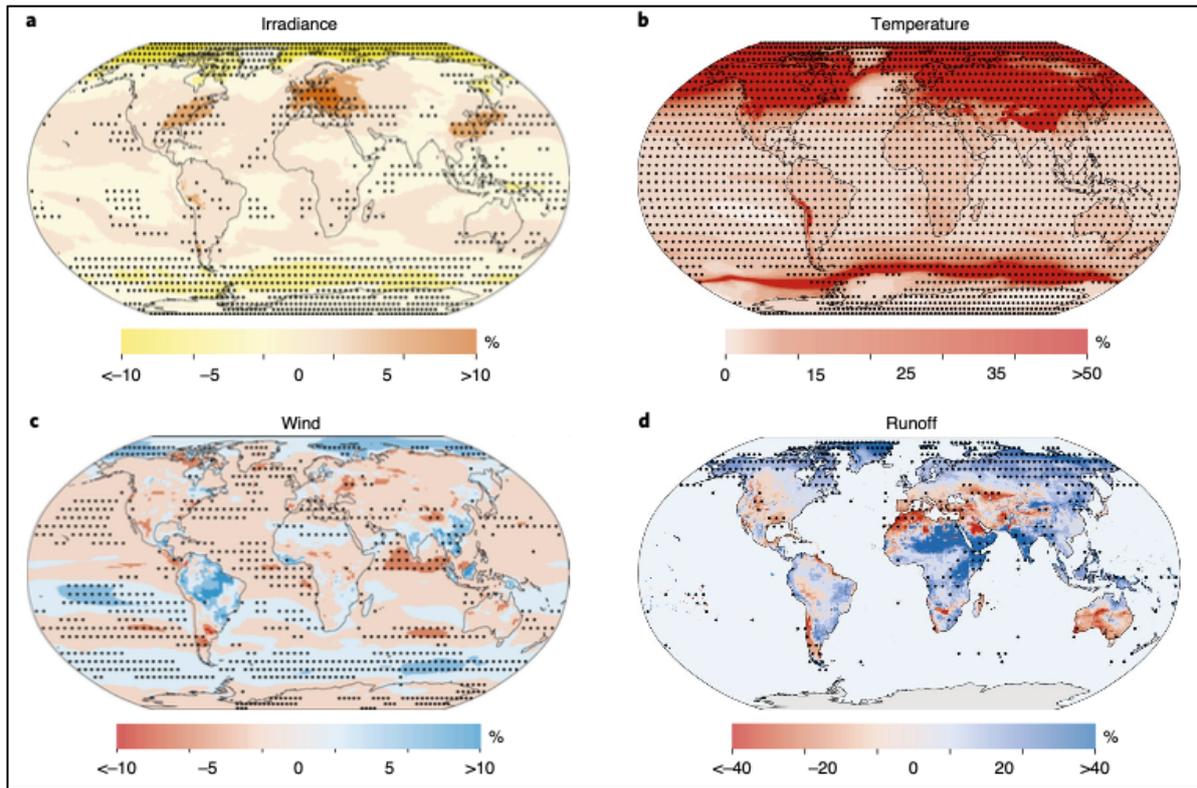


Figure 36 : Variation des conditions météo principales affectant la production d'ER. Rayonnement incident solaire (a), température (b), vent (c), la quantité d'eau qui rejoint les cours d'eau (d) [51]

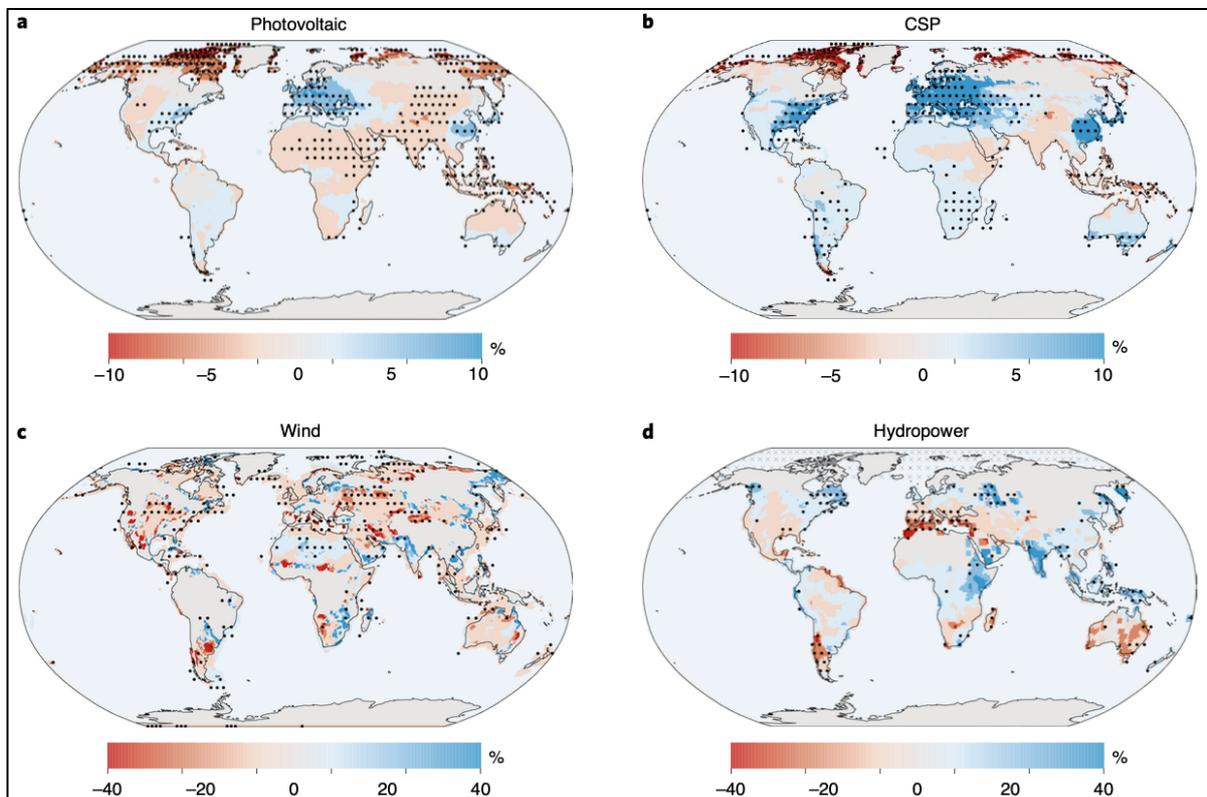


Figure 37 : Variation de la production photovoltaïque (a), centrale solaire à concentration (b), éolien (c), hydroélectricité (d) [51]

4.2.3 Évolution du potentiel énergétique éolien et solaire en Belgique [52]

Cette présentation porte exclusivement sur la production photovoltaïque et éolienne en Belgique et a été réalisée par Xavier Fettweis et Sébastien Doutreloup. Elle se base sur des données provenant du modèle MAR. Les deux points de conclusion de cette présentation sont les suivants :

- Diminution (probablement sous-estimée) du rendement des éoliennes.
- Augmentation du rendement des panneaux solaires (mais attention aux surchauffes) car moins de nuages (principalement en été).

4.2.4 Conclusion de ces différentes études

Toutes ces études s'accordent à dire que la variation dans la production photovoltaïque est minimale. Si variation il y a, celle-ci devrait être généralement positive en Europe et donc en Belgique. Ces différentes études s'accordent également à dire que dans le secteur de l'éolien en Europe, aussi bien onshore qu'offshore, les variations à prévoir sont négatives et dans des proportions bien plus significatives que pour le photovoltaïque.

Même si la biomasse et l'hydroélectricité ne sont pas l'objet de ce travail, il est quand même intéressant de noter les résultats de ces études à ce sujet. Pour l'hydroélectricité, il semble que la tendance soit à la diminution, même si ce n'est pas le cas dans toute l'Europe. Pour ce qui est de la biomasse sous nos latitudes, il semblerait que la tendance soit une nette augmentation dans la production de biomasse et donc dans toutes les transformations énergétiques qui peuvent en découler.

5 Méthodologie

5.1 Méthodologie

La première étape pour générer les résultats qui seront exposés ultérieurement dans ce travail consiste au traitement des données météorologiques. Les données sont disponibles sous forme de fichier .CSV mais ne sont pas directement compatibles avec TRNSYS. Une des possibilités pour retravailler ce fichier .CSV et le rendre compatible avec TRNSYS est d'utiliser Excel. Pour cela, il suffit d'effectuer un import de fichier. Une fois dans Excel, il faut modifier les paramètres du séparateur décimal par défaut, qui est la virgule, et le remplacer par un point. Cette étape est importante car le séparateur décimal dans TRNSYS est le point. Une fois les données importées dans le bon format, il n'est pas nécessaire de conserver l'intégralité des données, mais seulement celles qui seront utilisées comme entrées (input) dans les simulations. Ces données comprennent le temps, la vitesse du vent en m/s, la température sèche de l'air en °C, la pression atmosphérique en Pa, le rayonnement direct et le rayonnement diffus en kJ/m^2 , heure par heure, pour une année complète (8 760 heures). Pour le rayonnement, une conversion d'unité est nécessaire pour passer de Wh/m^2 dans les données météorologiques initiales à kJ/m^2 , qui est l'unité du rayonnement solaire dans TRNSYS. Une fois ces manipulations réalisées, un fichier texte (.txt) est généré à partir d'Excel et prêt à être importé. Cette procédure doit donc être appliquée à toutes les années météorologiques qui vont être étudiées.

La deuxième étape consiste à importer le fichier texte dans le logiciel de simulation TRNSYS. L'ensemble de l'environnement de simulation est préalablement configuré et sera expliqué par la suite dans un sous-chapitre dédié. Une simulation a été réalisée par fichier météo, ce qui peut représenter un certain travail. Pour obtenir les résultats de cette étude, plus de 150 simulations ont été réalisées. L'environnement de simulation doit donc être lié au fichier météo en format texte grâce à un lecteur de donnée externe. Une fois la simulation terminée (le temps de calcul du logiciel pour une année complète est de +/- 5 secondes), TRNSYS génère, grâce à un exportateur de données, un fichier texte avec les résultats souhaités. Dans ce travail, ces résultats se composent de l'heure de production photovoltaïque en kWh et de la production éolienne en MWh, heure par heure pour une année complète.

La troisième étape de ce travail consiste à traiter les résultats de la simulation et à analyser conjointement les données météo dans Excel. Pour ce faire, il faut importer le fichier texte contenant les résultats (output) de la simulation dans un nouveau classeur Excel afin de générer les graphiques qui figurent dans la suite de ce travail.

5.2 Données météorologiques

5.2.1 Fichiers météorologiques

Comme expliqué précédemment (chap. 1.4), les données prévisionnelles météorologiques proviennent du laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège. Au total, 7 128 fichiers météo différents sont disponibles, chacun correspondant à des périodes, des lieux et des scénarios différents [16]. Les données météo mises à disposition se divisent comme suit (les données en rouge sont celles qui ont été utilisées dans les simulations) :

Douze villes belges différentes

1	Anvers	5	Charleroi	9	Liège
2	Arlon	6	Gand	10	Mons
3	Bruges	7	Hasselt	11	Namur
4	Bruxelles	8	Louvain	12	Ostende

Trois types de données différentes par ville

- 1 Année météorologique typique TMY
- 2 Année météorologique extrême XMY
- 3 Année avec la plus longue vague de chaleur HWE

Onze périodes par type

- | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 Hist. 1981-2000 | 5 Hist. 2006-2020 | 9 Pré. 2061-2080 |
| 2 Hist. 1991-2005 | 6 Pré. 2021-2040 | 10 Pré. 2081-2100 |
| 3 Hist. 2001-2020 | 7 Pré. 2035-2050 | 11 Pré. 2085-2100 |
| 4 Hist. 2005-2020 | 8 Pré. 2041-2060 | |

Trois scénarios SSP par période

- | | | |
|------------|------------|------------|
| 1 SSP2-4.5 | 2 SSP3-7.0 | 3 SSP5-8.5 |
|------------|------------|------------|

Trois versions du modèle MAR

- | | | |
|-----------|-----------|-----------|
| 1 MAR-BCC | 2 MAR-MPI | 3 MAR-MIR |
|-----------|-----------|-----------|

Deux paramètres déterminants par modèle

- 1 Basé sur le rayonnement solaire incident SWD
- 2 Basé sur la température TT

Le premier choix opéré dans la sélection des données météorologiques était de déterminer les villes à étudier. Dans ce cas précis, dans le but de représenter au mieux l'ensemble du territoire belge, les villes d'Arlon, Bruxelles, Hasselt, Mons et Ostende ont été sélectionnées. Ensuite, il a été décidé d'étudier à la fois les années météorologiquement typiques (TMY) et extrêmes (XMY), en excluant cependant les années avec les vagues de chaleur les plus longues (HWE). Par la suite, des périodes représentatives de 20 ans ont été choisies pour couvrir la période de 1981 à 2100, avec des données historiques pour la période 1981-2020 et des prévisions météorologiques de 2021 à 2100. Pour chaque donnée météorologique prévisionnelle, les trois scénarios SSP ont été étudiés. Le modèle MAR sélectionné est le MAR-BCC, basé sur le modèle ESM (Earth System Model) développé par le Beijing Climate Center (BCC). Le paramètre déterminant choisi pour déterminer si une année est typique ou extrême est la température (TT).

5.2.2 Données et unités

Pour chaque fichier météo, les données disponibles sont reprises dans le tableau ci-dessous avec leurs unités et la hauteur au-dessus du sol à laquelle ces valeurs sont valables [16].

Nom de la variable météorologique	Hauteur de la mesure	Unité
Température sèche de l'air	2 m au-dessus du sol	°C
Humidité relative	2 m au-dessus du sol	%
Rayonnement horizontale globale	au niveau du sol	W / m ²
Rayonnement diffus	au niveau du sol	W / m ²
Rayonnement direct	au niveau du sol	W / m ²

Vitesse de vent	10 m au-dessus du sol	m / s
Direction du vent	10 m au-dessus du sol	Degré nord
Température du point de rosée	2 m au-dessus du sol	°C
Pression atmosphérique	au niveau du sol	Pa
Couverture nuageuse	toute la troposphère	Octa
Température du ciel	toute la troposphère	K
Humidité spécifique	2 m au-dessus du sol	Kg H ₂ O / Kg Air
Précipitations	au niveau du sol	mm

Tableau 1 : Données et unités météo des fichiers utilisés pour les simulations

5.3 Simulation TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation tool) est un logiciel de simulation dynamique utilisé principalement pour l'étude des systèmes énergétiques des bâtiments, mais pas exclusivement. Sa modularité permet aux utilisateurs d'étudier une grande diversité de sujets différents. Il résout des équations algébriques et différentielles de manière programmée et modulaire, ce qui permet de décomposer les problèmes complexes en une somme de petits problèmes. Le logiciel propose une bibliothèque de composants courants dans les systèmes énergétiques, ainsi que des utilitaires permettant de créer et de modifier des modèles, des interfaces visuelles, des outils de calcul de la lumière du jour et bien d'autres encore. En somme, TRNSYS offre une large gamme de fonctionnalités pour la modélisation et la simulation de systèmes énergétiques [53].

5.3.1 Environnement de simulation

L'environnement de simulation qui a été créé dans TRNSYS pour générer la plupart des résultats qui seront exposés par la suite est celui représenté sur l'image ci-dessous (figure 38). Dans cet environnement, on retrouve de gauche à droite, tout d'abord l'élément « **Type9c** », qui est un lecteur de données externe. Dans ce cas-ci, le type 9 sert à importer les données météorologiques qui ont été retravaillées précédemment dans Excel pour correspondre aux besoins de la simulation. Ensuite, le « **Type 103b** » représente et simule le fonctionnement d'un ou plusieurs panneaux photovoltaïques. Il reçoit les données météorologiques importées par le type 9, d'où le lien qui les relie. Juste en dessous, le « **Type 90** » est l'élément qui représente le fonctionnement d'une ou de plusieurs éoliennes, qui, comme pour le type 103b, reçoit des données météorologiques du type 9. L'élément suivant est le « **Type 24** », qui est un intégrateur. Il reçoit des données de puissance photovoltaïque et éolienne heure par heure et les intègre pour avoir la production cumulée à chaque instant. La dernière donnée est la production cumulée d'une année complète, soit 8 760 heures. Le composant suivant est « **Equa** », un composant utilitaire qui permet de créer ses propres équations ou calculs. Dans ce cas-ci, il permet de transformer les données qui sortent de l'intégrateur, qui sont en Wh, en les divisant par 1 000 pour le photovoltaïque afin de travailler la production en kWh et en les divisant par 1 000 000 pour la production éolienne afin de travailler en MWh. Pour finir, le « **Type 65d** », qui permet d'afficher les résultats de simulation sous forme de graphique, et le « **Type25c** », qui permet d'exporter les résultats sous format texte. Les résultats exportés comprennent l'heure, la production photovoltaïque cumulée à chaque heure en kWh et la production éolienne cumulée à chaque heure en MWh. Pour plus de détails sur les « types » TRNSYS utilisés, voir l'annexe 1.

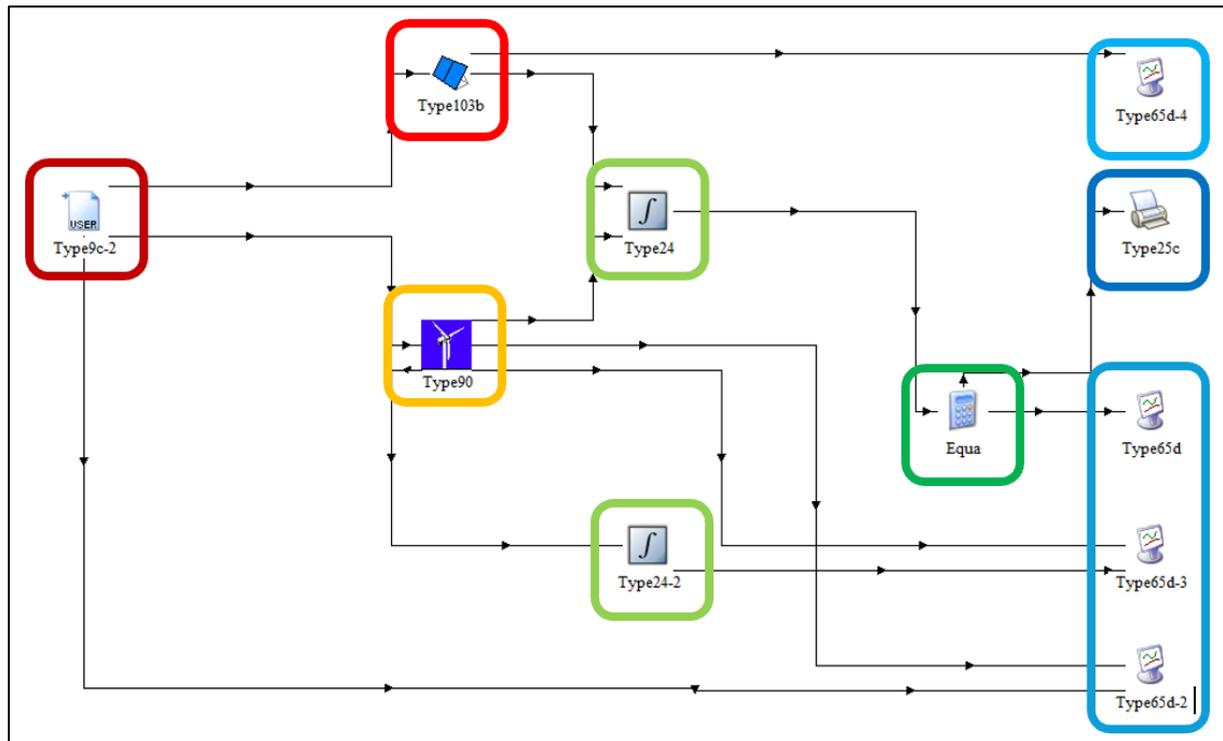


Figure 38 : Capture d'écran de l'environnement de simulation TRNSYS

5.3.2 Paramètres du Type 103b TRNSYS (panneau photovoltaïque)

Dans le catalogue de composants TRNSYS, il y a deux catégories de panneaux photovoltaïques, à savoir des modèles détaillés et des modèles de base. Celui qui a été choisi pour cette simulation est le modèle de base avec MPPT, car les données météo ne permettaient pas de fournir les informations nécessaires au calcul des modèles détaillés.

Les paramètres du module photovoltaïque n'ont pas été modifiés et sont restés ceux par défaut (1 panneau = 100 Wc). Il est vrai que le panneau qui est encodé par défaut dans TRNSYS est d'une puissance bien inférieure à ceux utilisés actuellement, mais dans le cadre de ce travail, cela n'a aucun impact sur l'étude. En effet, cette étude s'intéresse principalement aux variations de production, peu importe la puissance de l'installation photovoltaïque.

Les 6 inputs nécessaires pour le calcul sont :

- | | |
|----------------------------------------------------|--------------------|
| 1. Température ambiante | °C |
| 2. Rayonnement solaire direct | kJ/hr.m^2 |
| 3. Rayonnement solaire diffus | kJ/hr.m^2 |
| 4. Rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol | kJ/hr.m^2 |
| 5. Inclinaison des PV | ° |
| 6. Angle d'incidence du rayonnement solaire direct | ° |

Trois de ces paramètres sont disponibles dans les données météorologiques prévisionnelles qui sont utilisées (inputs 1, 2, 3). En revanche, en ce qui concerne le rayonnement réfléchi par le sol, il ne fait pas partie des données météorologiques, cet input 4 sera donc égal à 0 à chaque instant. Quant à l'inclinaison et à l'angle d'incidence, étant donné que seul le delta de production sur différentes périodes est intéressant pour cette étude, ces paramètres sont fixés à 0, ce qui équivaut à un panneau à l'horizontal. La production délivrée par le modèle TRNSYS s'apparente donc à celle d'une installation solaire idéale, sans considérer certaines pertes dont

les plus impactantes sont celles à l'onduleur¹⁹, soit une production avoisinant les 1 093 kWh/kWc en Wallonie. Ceci représente un gain de 25% par rapport à la production moyenne d'une installation réelle qui se situe aux alentours de 900 kWh/kWc [54].

5.3.3 Paramètres du Type 90 TRNSYS (éolienne)

Dans le catalogue de composants TRNSYS, il n'y a qu'un seul type de composant pour simuler le fonctionnement d'une éolienne. Il n'y avait donc pas de choix à faire à ce niveau. La même réflexion et le même choix ont été faits que pour les paramètres du panneau photovoltaïque. Les paramètres par défaut ont donc été gardés (une éolienne = 2 MW) pour étudier les deltas dans la production sur différentes périodes et différents scénarios.

Les 5 inputs nécessaires pour le calcul sont :

- | | |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 1. Signal de contrôle (Éolienne On ou Éolienne Off) | - |
| 2. Vitesse de vent | m/s |
| 3. Température ambiante | °C |
| 4. Rugosité du terrain | - |
| 5. Pression atmosphérique | Pa |

Trois de ces paramètres sont disponibles dans les données météorologiques prévisionnelles qui sont utilisées (inputs 2, 3, 5). En ce qui concerne le signal de contrôle, le paramètre est fixé sur "On", ce qui signifie que dès que les conditions sont réunies pour produire, l'éolienne produit. La rugosité du terrain (α) est fixée à une valeur de 0,14. Ce choix est sans grande importance pour cette étude, tant que la valeur est identique pour chaque simulation. Cette valeur correspond à un terrain dégagé recouvert d'herbe [55].

Type de terrain	α
Eau libre	0.10
Terrain lisse, plat, couvert d'herbe	0.15
Cultures en rangs	0.20
Buissons bas avec quelques arbres	0.20
Forêts denses	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain vallonné, montagneux	0.25

5.3.4 Validation du modèle

Selon les données de puissance et de production disponibles en ligne, voici les productions moyennes éoliennes et photovoltaïques des 10 dernières années :

- 1 MW éolien onshore a produit en moyenne 1 823 MWh/an [56]
- 100 Wc photovoltaïque ont produit en moyenne 88,07 kWh/an [57]

Les résultats des simulations réalisées pour cette étude seront exposés en détail ultérieurement. Pour le moment, et afin de valider le modèle de simulation, voici les moyennes de production pour la période 2001-2020 :

- 1 MW éolien onshore produit en moyenne 1 209 MWh/an
- 100Wc photovoltaïque produisent 108,06 kWh/an

¹⁹ Les onduleurs convertissent l'électricité continue (CC) des panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisable. Deux types de pertes peuvent réduire leur efficacité : les pertes par écrêtage et les pertes de conversion. Les pertes par écrêtage se produisent lorsque la puissance CC dépasse la capacité de l'onduleur, souvent lors des jours très ensoleillés, entraînant la perte de l'excès d'énergie non convertie. Les pertes de conversion résultent des inefficacités intrinsèques de l'onduleur lors de la transformation de CC en CA, une partie de l'énergie étant dissipée sous forme de chaleur.

Puissance	Données historiques	Simulations
1 MW Eol	1 823 MWh	1 209 MWh
100 Wc PV	88,07 kWh	108,06 kWh

Tableau 2 : Comparaison simulation vs réalité

Ces résultats peuvent sembler invalider l'environnement des simulations qui ont été réalisées, mais en réalité, ces différences sont facilement justifiables. Pour l'éolien, la valeur obtenue avec les données de production historique est bien plus élevée car elle correspond aux données réelles des 10 dernières années, avec des éoliennes plus performantes et des nacelles à des hauteurs plus importantes que celles utilisées dans les simulations. De plus, dans la réalité, les éoliennes sont installées dans des endroits identifiés comme ayant un bon potentiel de production (vent fréquent et favorable à la production éolienne), ce qui n'est pas forcément le cas des stations météorologiques. Pour le photovoltaïque, la différence peut s'expliquer par le fait que, dans le modèle de simulation, un certain nombre de pertes ne sont pas prises en compte, comme par exemple les pertes à l'onduleur expliquées au chapitre 5.3.2 ou encore les pertes dans le câblage.

Le modèle peut donc être validé d'autant plus que, pour rappel, l'objectif de ce modèle est d'étudier les variations de production et non de chiffrer avec exactitude les quantités d'énergie produites.

6 Présentation des résultats

Les résultats qui sont exposés ci-dessous sont pour chaque localité composés de six séries de données, à savoir les trois scénarios d'année météorologique typique (TMY) pour les scénarios SSP 2-4.5 / 3-7.0 / 5-8.5 et les trois scénarios d'année météorologique extrême (XMY) pour les scénarios SSP 2-4.5 / 3-7.0 / 5-8.5.

6.1 Production ville par ville

Les graphiques ci-dessous, aussi bien pour la production annuelle photovoltaïque (chapitre 6.1.1) qu'éolienne (chapitre 6.1.2), se composent de 6 courbes différentes en trait continu. Ces courbes continues relient les points obtenus pour la production de chaque période. Pour chacune de ces courbes, une courbe de tendance linéaire est affichée en pointillé. Cette dernière permet de voir si la tendance est plutôt montante ou descendante, ce qui peut être difficile à voir en raison de la grande variabilité des résultats. La légende des graphiques qui suivront dans cette section est la suivante :

 TMY SSP245	 TMY SSP370	 TMY SSP585	 XMY SSP245
 XMY SSP370	 XMY SSP585	 Linéaire (TMY SSP245)	 Linéaire (TMY SSP370)
 Linéaire (TMY SSP585)	 Linéaire (XMY SSP245)	 Linéaire (XMY SSP370)	 Linéaire (XMY SSP585)

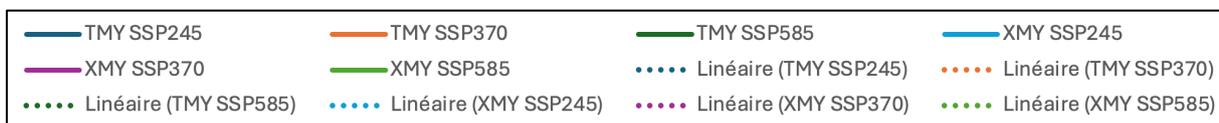
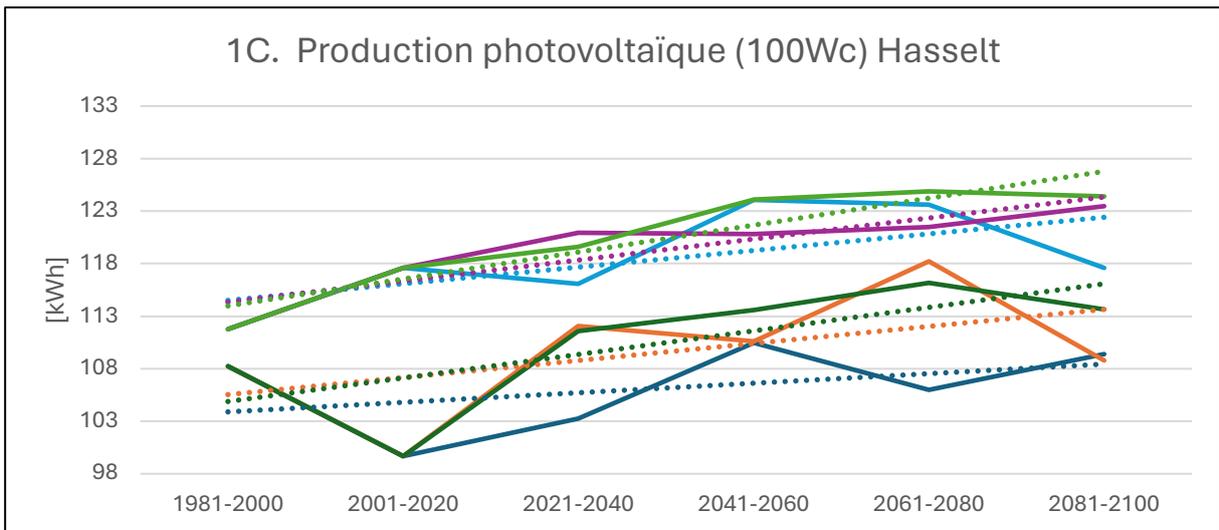
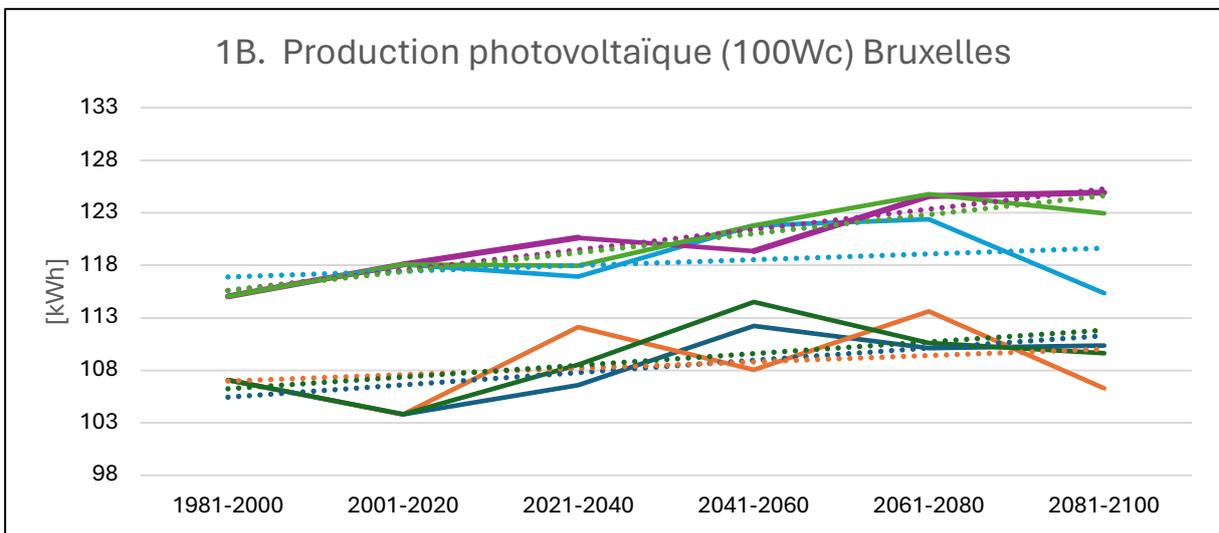
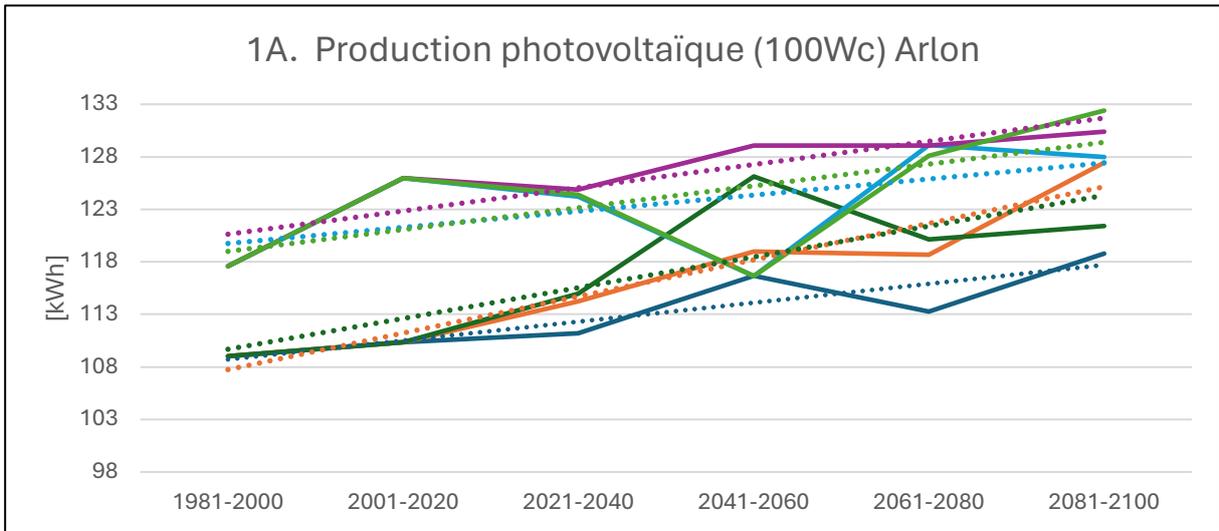
Figure 39 : Légende des graphiques des chapitres 6.1.1 et 6.1.2

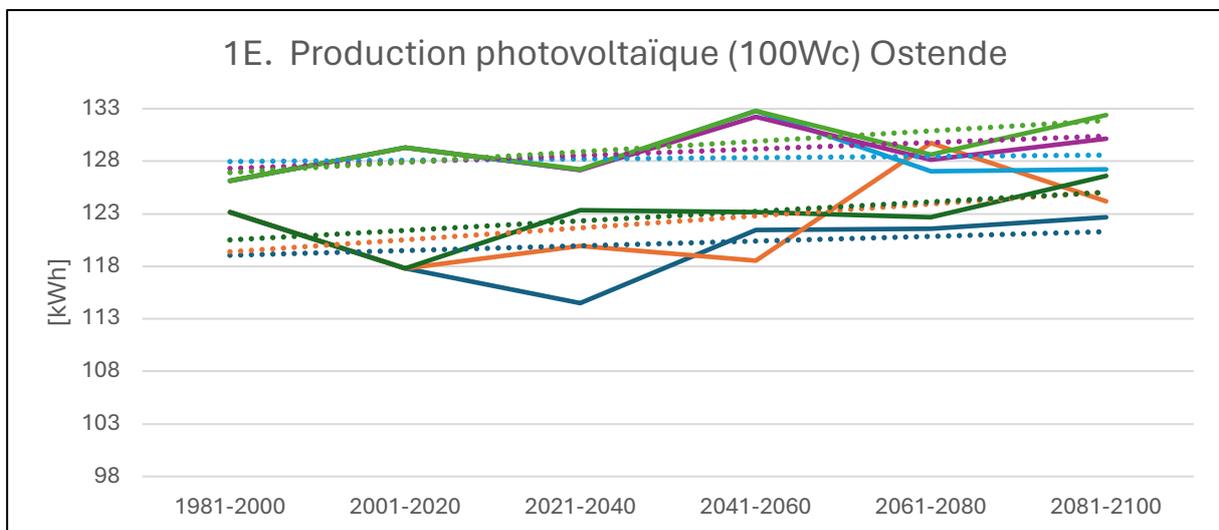
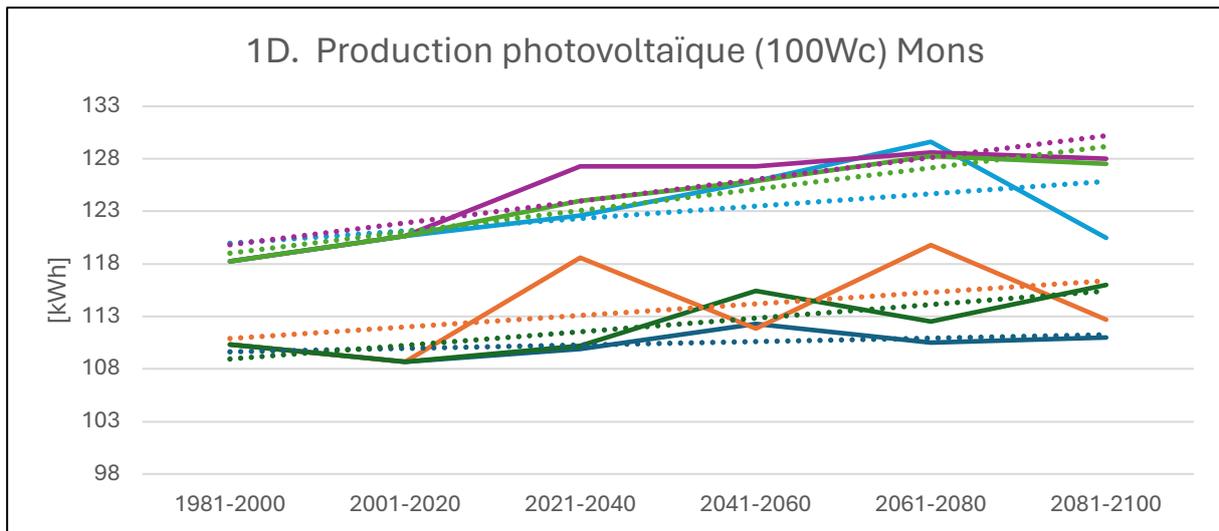
Pour rappel, les villes retenues pour cette étude sont celles représentées sur la carte ci-dessous. L'objectif derrière le choix de ces 5 villes est de couvrir l'ensemble du territoire belge et de pouvoir réaliser une moyenne représentative de l'évolution de la production généralisée en Belgique.



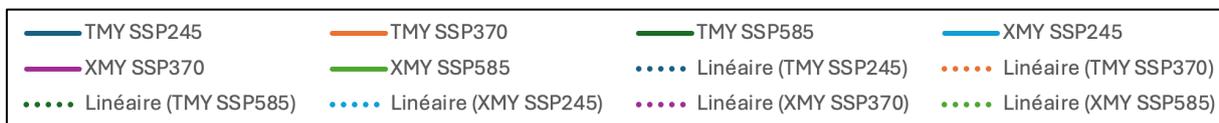
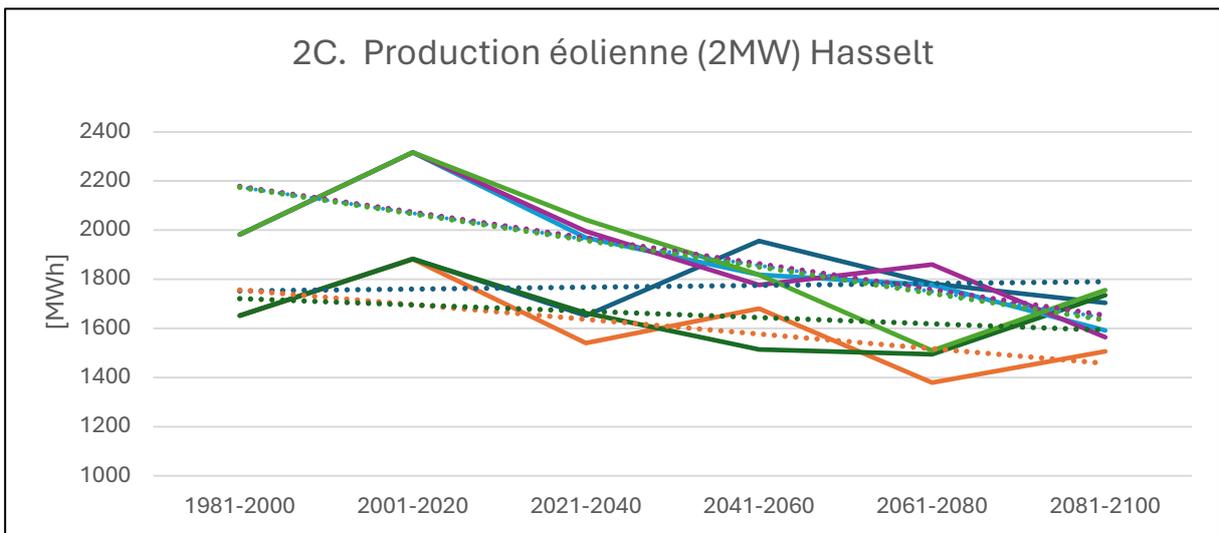
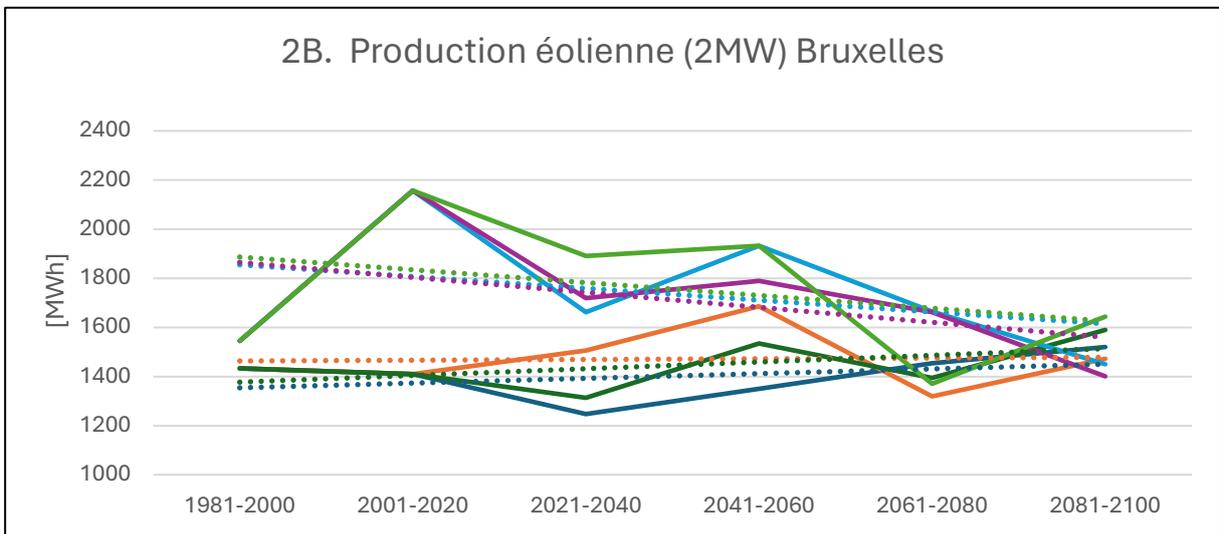
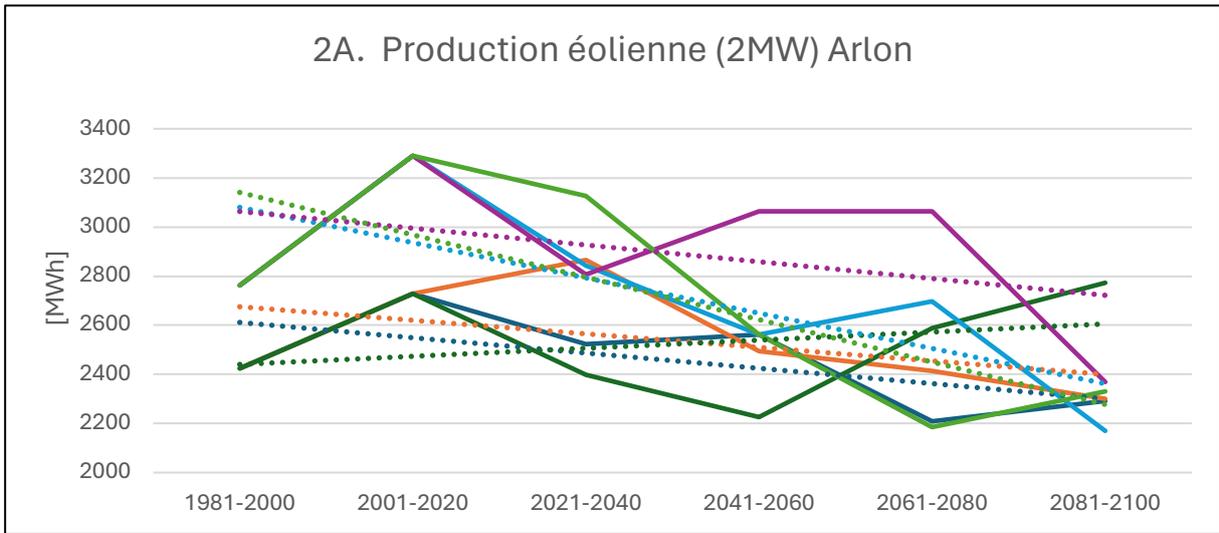
Figure 40 : Carte de Belgique avec les 5 villes étudiées [58]

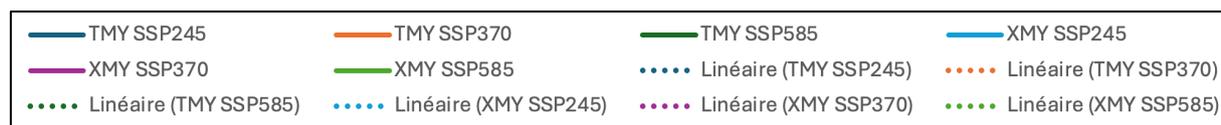
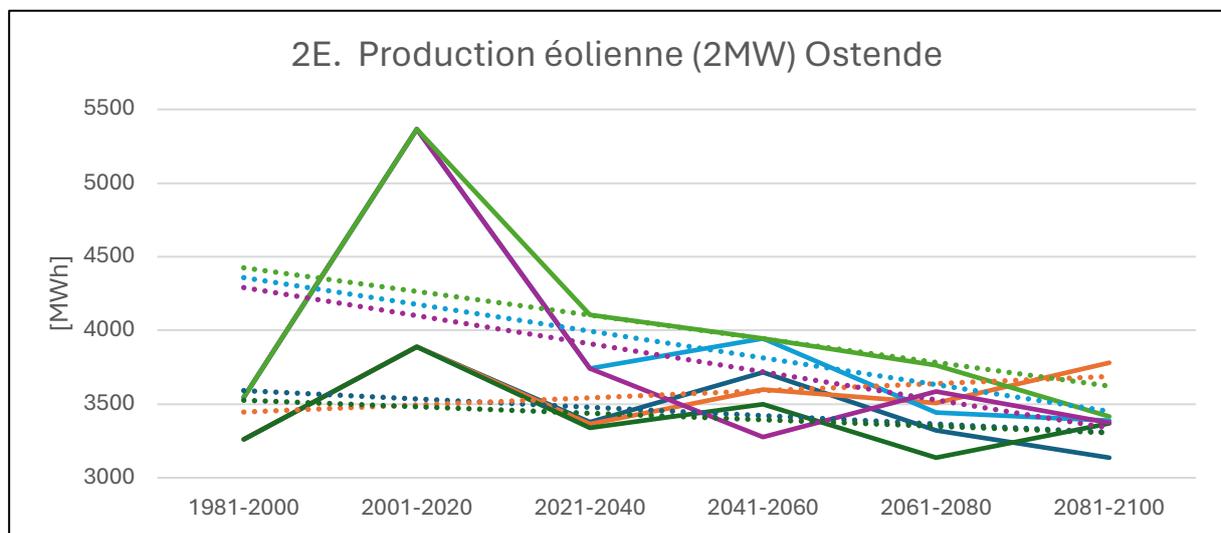
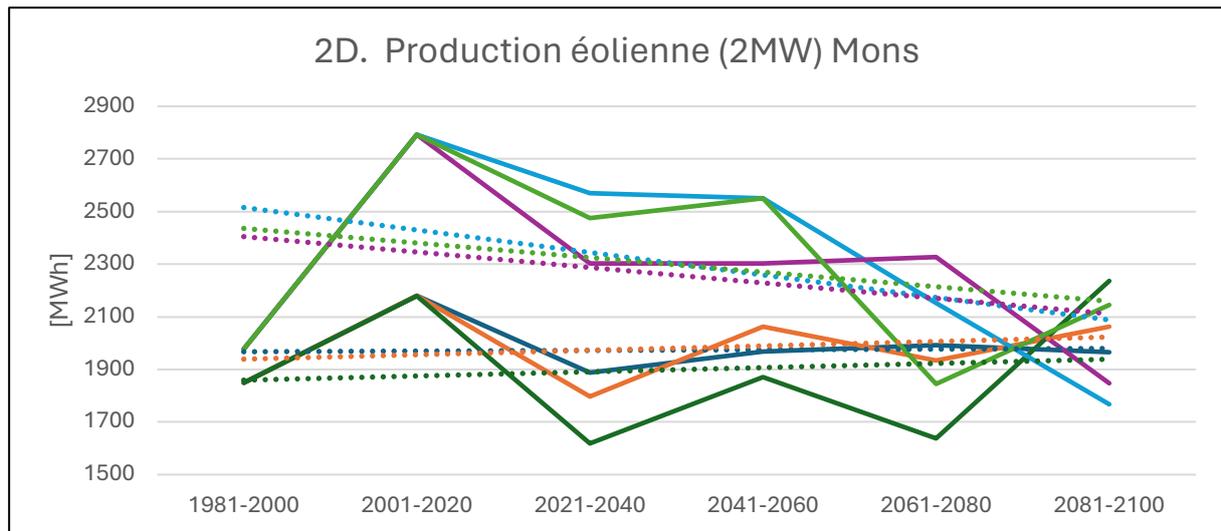
6.1.1 Production photovoltaïque





6.1.2 Production éolienne





6.2 Production moyenne en Belgique

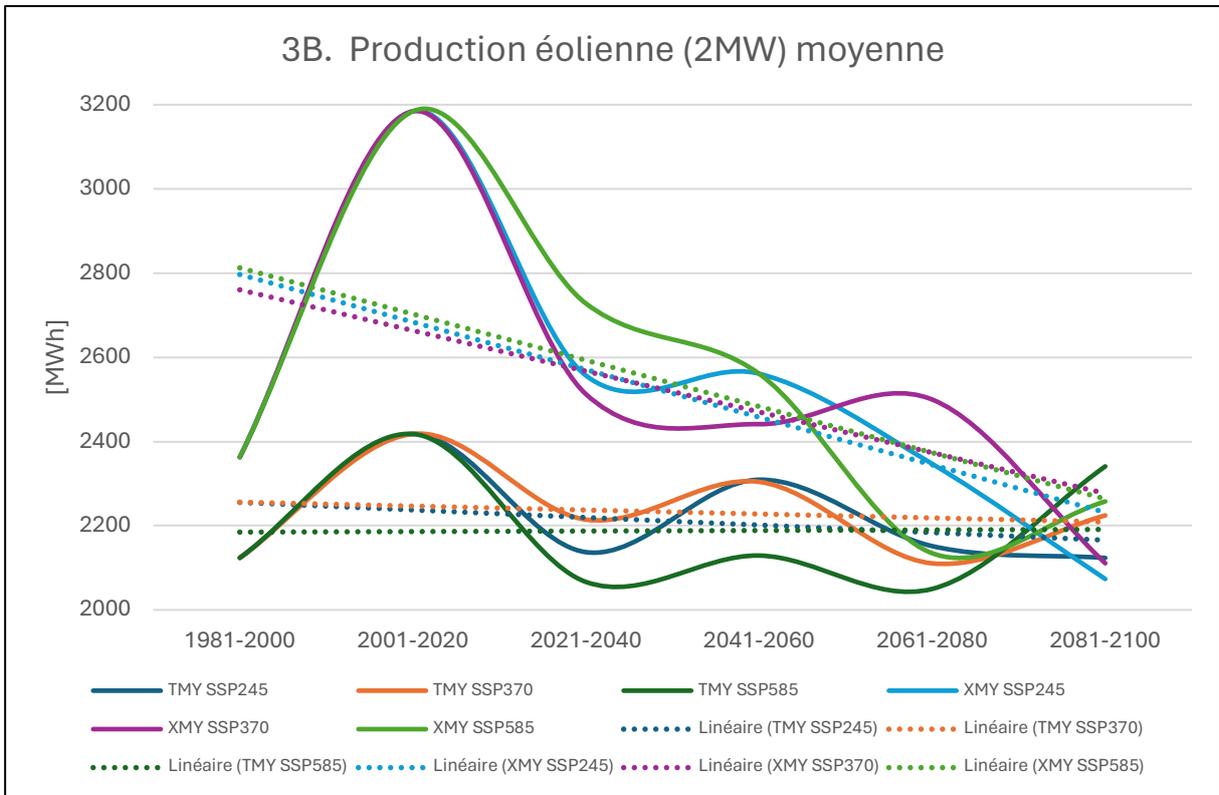
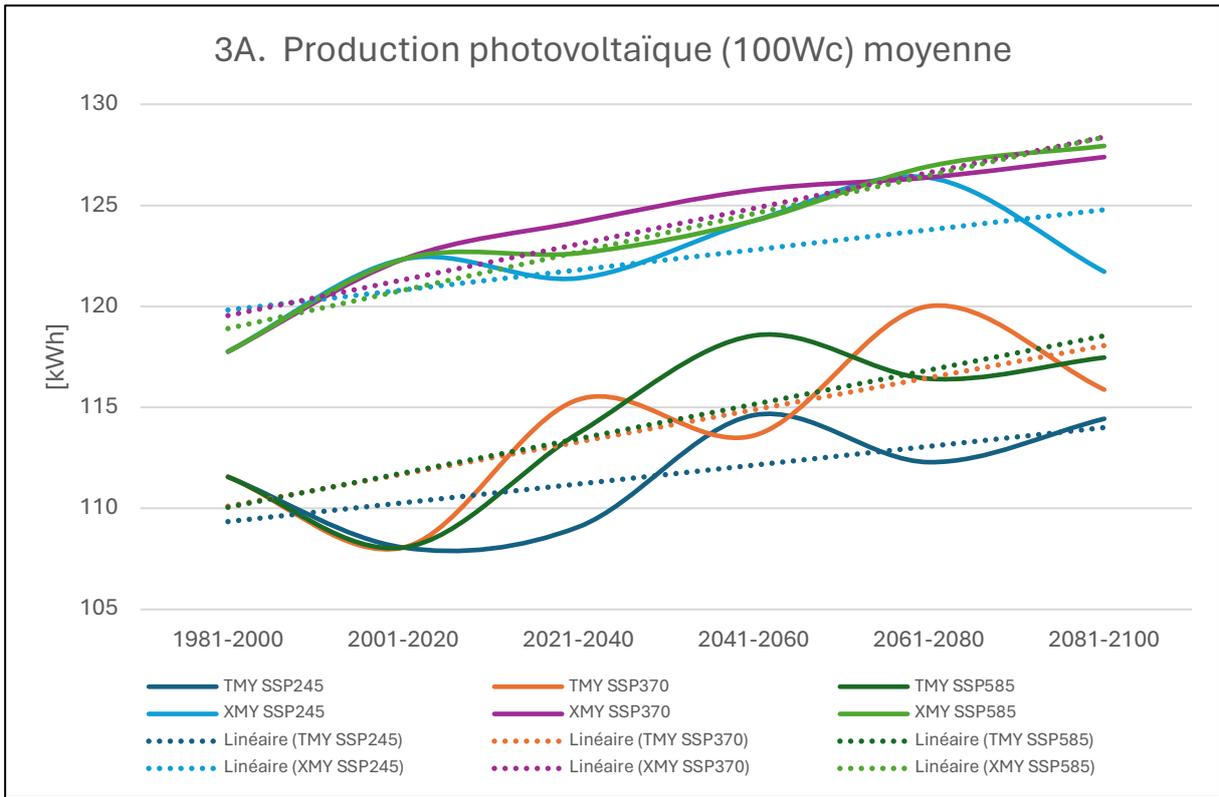
Dans ce chapitre, les graphiques ci-dessous, représentant les variations moyennes en Belgique, ont été réalisés sur base des données des 5 villes belges nommées et exposées précédemment.

Le premier sous-chapitre 6.2.1 reprend simplement les moyennes des 5 villes.

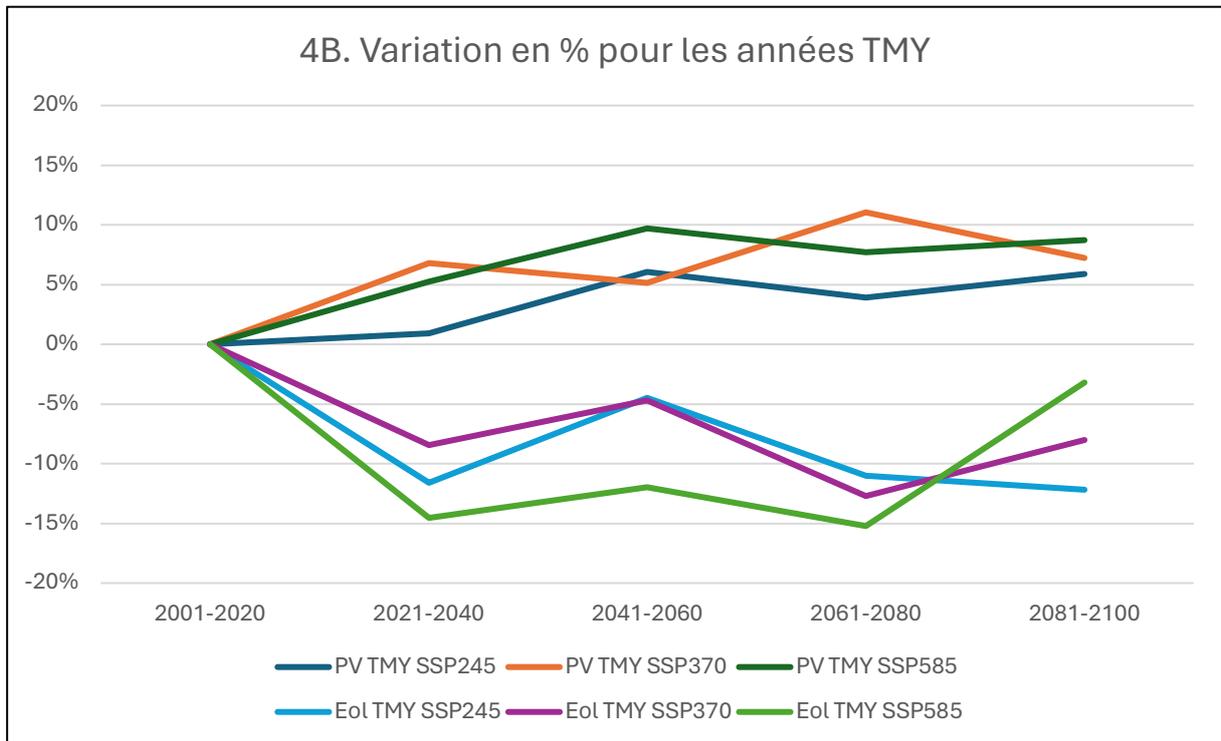
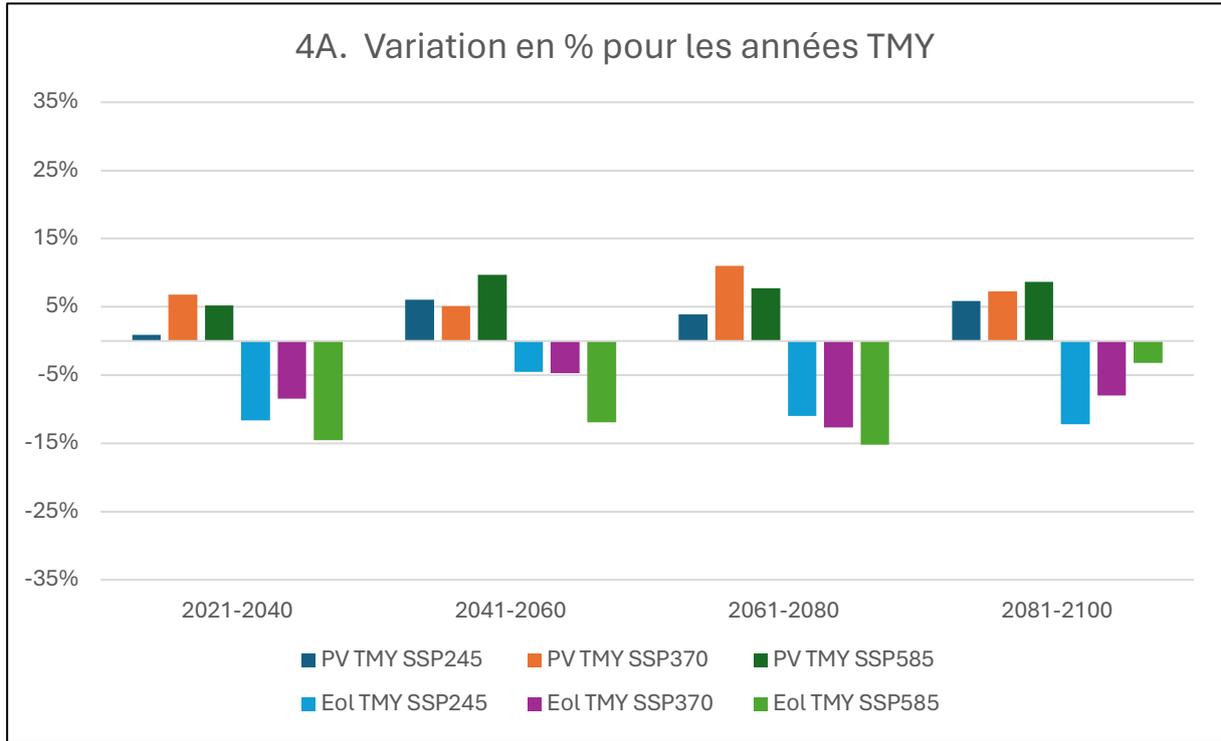
Pour exprimer les variations moyennes en pourcentage dans le sous-chapitre 6.2.2, le choix a été fait de prendre comme période de référence 2001-2020 car les données de cette période semblent être plus fiables et correspondent mieux à la période vécue actuellement.

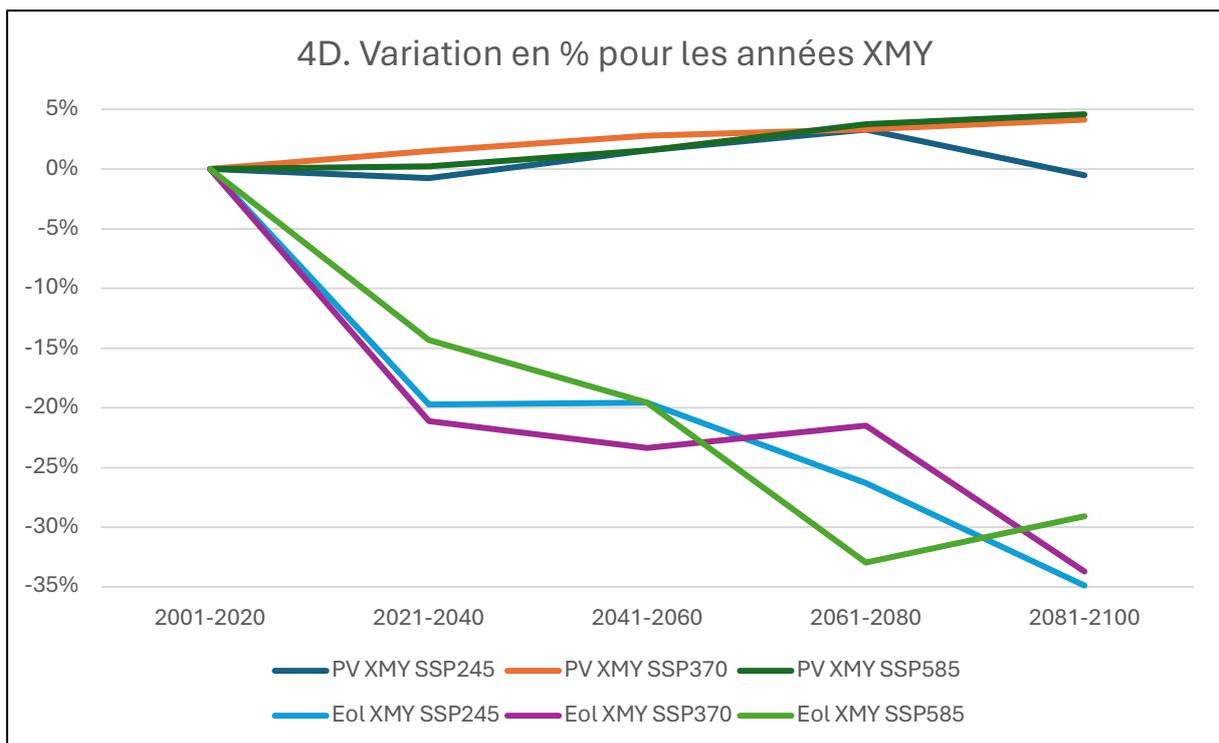
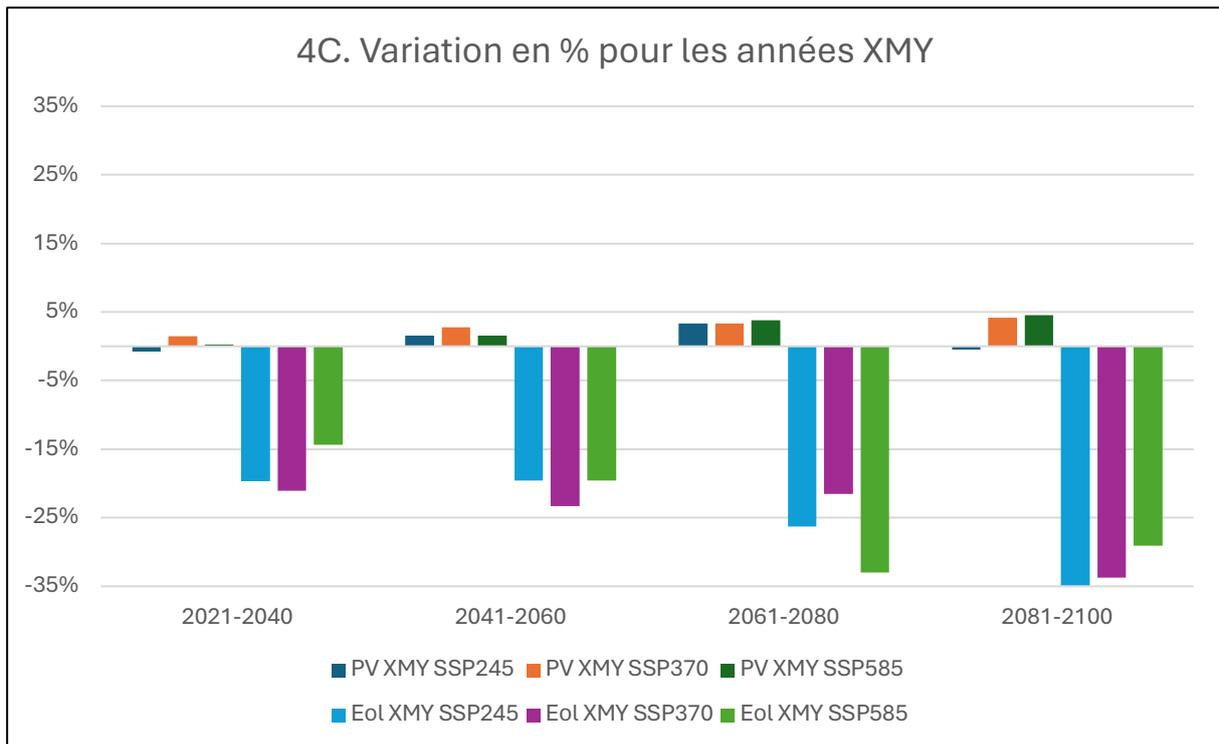
Dans les chapitres suivants, les légendes varient de graphique en graphique, il ne faut donc plus se fier à une seule légende commune comme pour le chapitre précédent.

6.2.1 Production photovoltaïque et éolienne moyenne en Belgique



6.2.2 Variation de la production photovoltaïque et éolienne moyenne en Belgique





7 Analyse et interprétation des résultats

Dans le but de confirmer ou de nuancer les résultats de cette étude, plusieurs recherches bibliographiques ont été entreprises et ont été présentées précédemment (chapitre 4.2). Les conclusions tirées de ces recherches bibliographiques confirment les résultats obtenus par simulation et exposés précédemment (chapitre 6), ainsi que les analyses qui suivent (chapitre 7.1 et 7.2).

7.1 Analyse des résultats

7.1.1 Variabilité de la production

- Différences entre régions

La première analyse qui peut être faite sur la base des résultats graphiques exposés précédemment est la grande variabilité de production même sur un aussi petit territoire que la Belgique. La région la plus propice à la production photovoltaïque (graph. 1E) et éolienne (graph. 2E) est Ostende et donc plus généralement la côte. Les régions parmi celles étudiées qui semblent être les moins favorables à la production photovoltaïque et éolienne sont Bruxelles (graph. 1B et 2B) et Hasselt (graph. 1C et 2C) au centre du pays. Entre les deux, on retrouve Arlon (graph. 1A et 2A) et Mons (graph. 1D et 2D) avec des productions inférieures à Ostende et supérieures à Bruxelles et Hasselt. Ces analyses peuvent être regardées conjointement avec les cartes de rayonnement et de vent moyen en Belgique dans l'introduction. Pour le rayonnement (figure 12), la carte confirme que le centre du pays reçoit moins d'énergie solaire que la côte ou les Ardennes. De même, la carte des vitesses moyennes du vent en Belgique (figure 16) recoupe également les constatations exposées précédemment. Elle met également en évidence l'influence des grandes villes comme Bruxelles sur les vitesses de vent, même à 100m de hauteur. Ce qu'il est aussi possible de mettre en évidence est qu'en Ardennes, en raison de la forte rugosité et du dénivelé du terrain, d'un endroit à l'autre, les vitesses de vent moyennes peuvent être bien différentes. Il est important de garder à l'esprit l'influence du terrain et des villes à proximité des stations météorologiques lors de l'analyse des productions éoliennes.

- Différences entre années extrêmes (XMY) et années typiques (TMY)

La deuxième chose qui peut être analysée est une grande variabilité de production d'une année à l'autre. Par exemple, la différence entre une année météorologiquement extrême et une année typique peut causer des différences de production très significatives. De manière générale, les années extrêmes restent plus propices à la production d'énergie éolienne et solaire, du moins pour les périodes actuelles.

- Différences entre les périodes

Ensuite, pour un endroit donné, les variations de production d'une période à l'autre peuvent aussi être très importantes. Premièrement entre les données historiques des périodes 1981-2000 et 2001-2020. Ceci signifie que même sans effets trop importants du changement climatique, la production est amenée à varier. Ce qu'il est également possible de voir sur ces graphiques, c'est que la production va être amenée à varier dans les années à venir, parfois à la hausse mais également à la baisse. Rares sont les graphiques sur lesquels une courbe est constamment à la hausse ou constamment à la baisse.

7.1.2 Analyse des tendances

- Augmentation de la production photovoltaïque

Les tendances de l'évolution de la production photovoltaïque sont unanimes pour les 5 villes étudiées ainsi que pour les trois scénarios SSP. Ce qui est à prévoir dans les années à venir est une augmentation de la productibilité photovoltaïque. Ceci est illustré par le graphique 3A qui représente la moyenne des 5 villes avec les tendances en pointillé pour chaque scénario.

- Diminution de la production éolienne

Comme pour le photovoltaïque, les tendances de l'évolution de la production éolienne vont toutes dans le même sens. Ce qui est à prévoir à l'avenir est une diminution de la productibilité éolienne. Ceci est illustré par le graphique 3B qui représente la moyenne des 5 villes avec les tendances en pointillé pour chaque scénario.

- Proportion des variations

Les premiers graphiques exposés peuvent être trompeurs quant aux proportions de ces variations. Pour illustrer la proportion des variations, les graphiques 4A, 4B, 4C et 4D ont été produits. Ils modélisent les variations non plus en énergie produite, mais en pourcentage de variation, avec comme référence la période 2001-2020 (point 0 sur les graphiques). Ce qui est mis en évidence sur ces graphiques, c'est que l'augmentation de la productibilité photovoltaïque est relativement faible comparée à la variation de la productibilité éolienne. Ceci est valable pour les trois scénarios ainsi que pour les années typiques et extrêmes.

- Année typique vs extrême

Les variations ne sont pas non plus identiques pour les scénarios typiques et extrêmes. Pour le photovoltaïque, les années extrêmes présentent une augmentation bien moins importante que les années typiques. Pour ce qui est de la production éolienne, le constat est que la diminution est moindre pour les années typiques que pour les années extrêmes.

- Croisement / rapprochement des XMY et TMY

Un point important à remarquer sur les séries de graphiques 1 et 2 est le rapprochement au cours du temps des années XMY et TMY. Si, pour les données historiques, les années XMY sont clairement favorables à la production renouvelable, cet écart se réduit au fur et à mesure des périodes. Pour l'éolien, la décroissance rapide des années XMY fait que dans la période 2081-2100, les courbes se croisent. Les années typiques deviennent donc plus favorables à la production éolienne que les années extrêmes. Pour le photovoltaïque, c'est l'augmentation plus rapide de la production des années typiques qui fait qu'un rapprochement, voire un croisement des courbes, se produit dans la période 2081-2100.

- Analyse des SSP

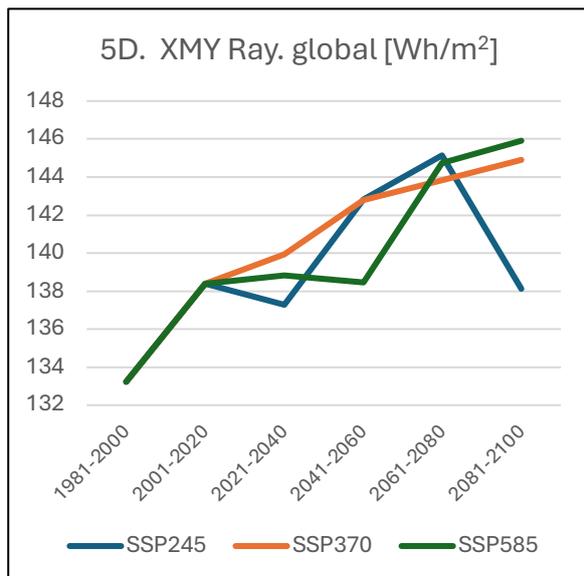
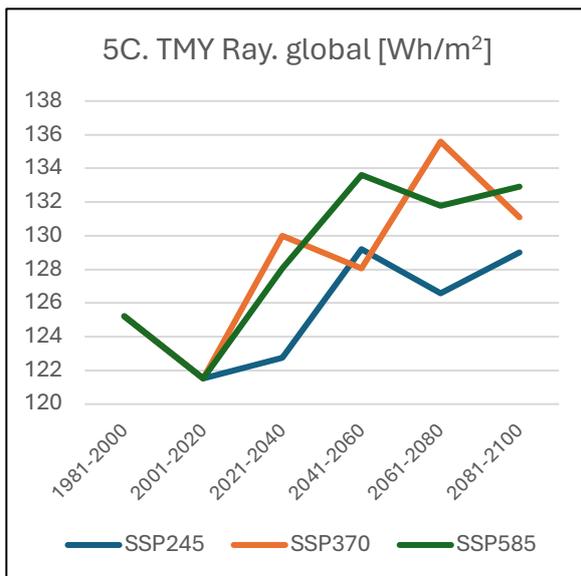
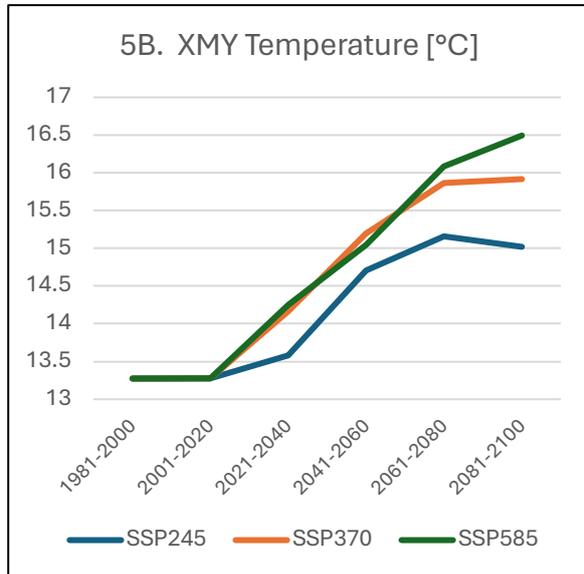
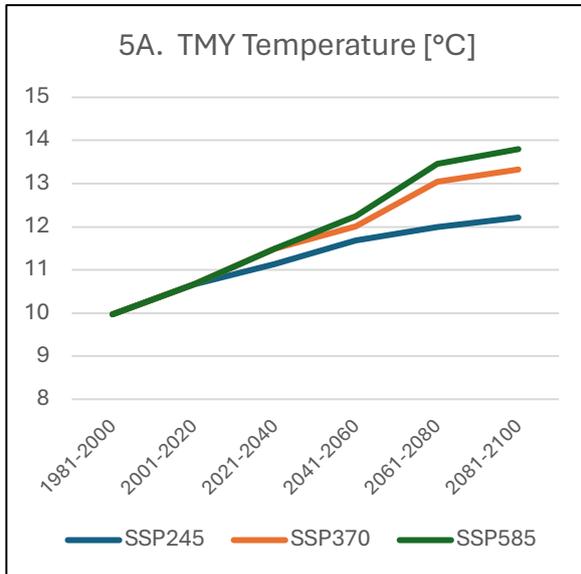
Ce qui peut être remarqué lorsque les courbes et les tendances sont examinées en fonction des scénarios SSP, c'est qu'en général, plus le scénario dispose d'un forçage radiatif important, plus les variations vont être importantes. À l'inverse, les scénarios avec un forçage radiatif plus faible présentent en général moins de variations.

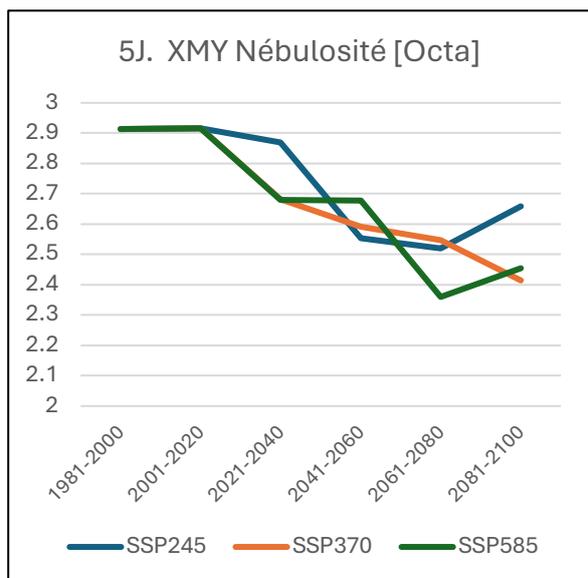
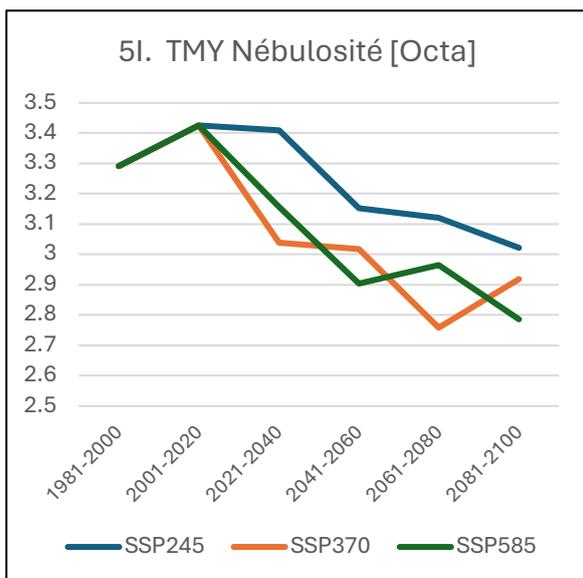
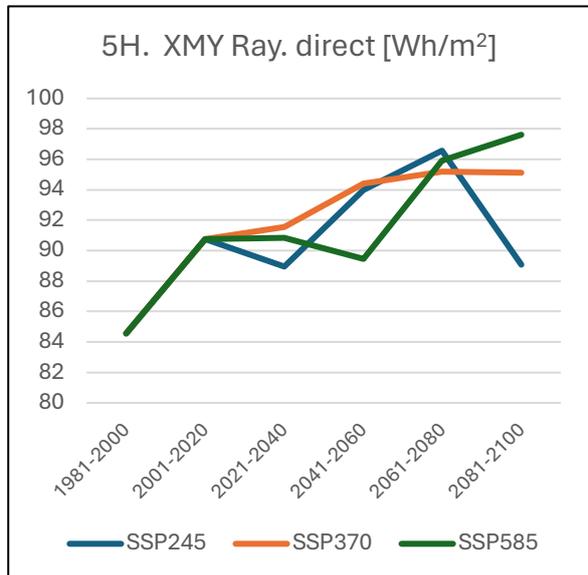
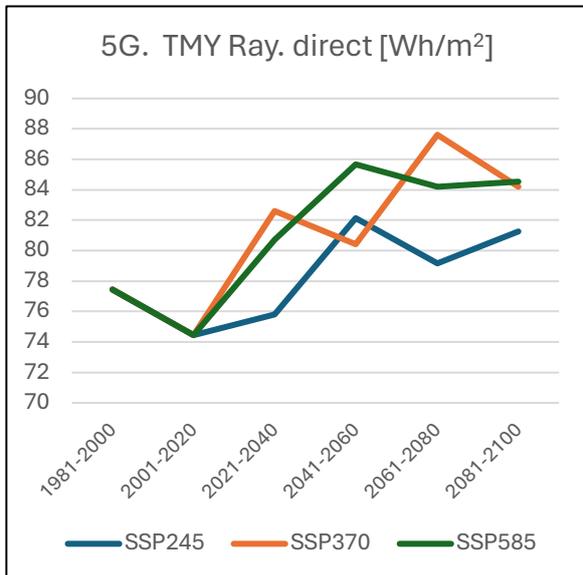
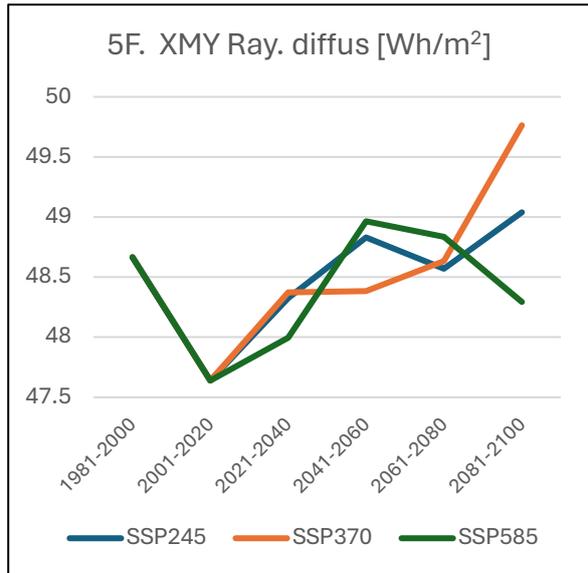
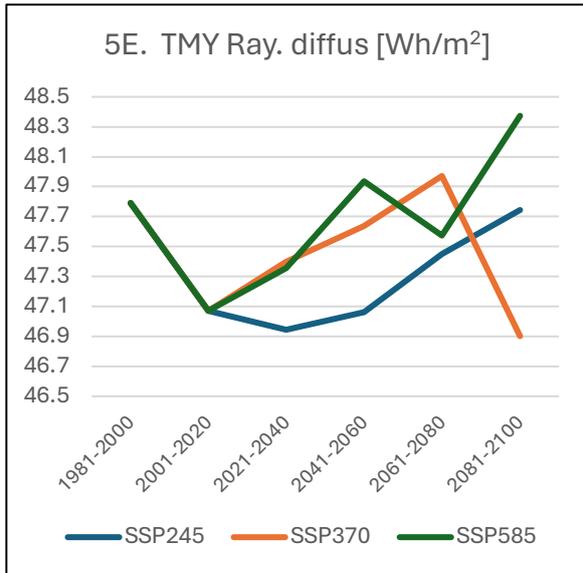
7.2 Analyse des données météo

Pour mieux comprendre pourquoi la productibilité photovoltaïque et éolienne varie et dans quelle mesure, il est intéressant d'étudier les données météorologiques qui ont été utilisées pour réaliser les simulations ayant conduit aux résultats précédemment exposés. Pour ce faire, les séries de graphiques météo 5 et 6 ont été réalisées. La série 5 reprend les variables météorologiques qui influencent la production photovoltaïque dans le modèle de simulation TRNSYS choisi, comme expliqué au chapitre 5.3.2. Il en va de même pour la série 6, qui

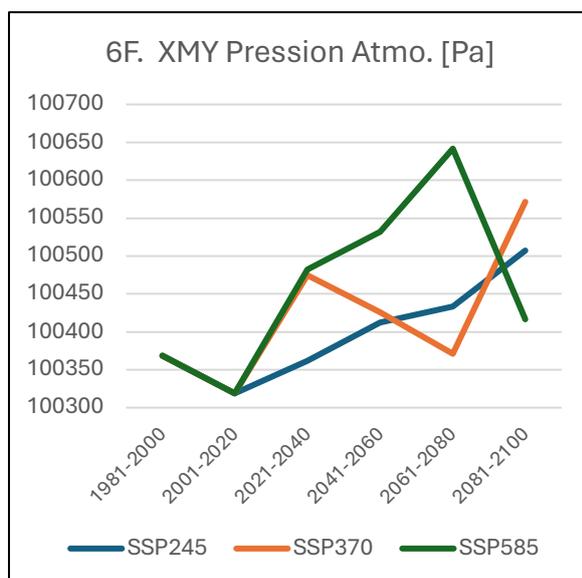
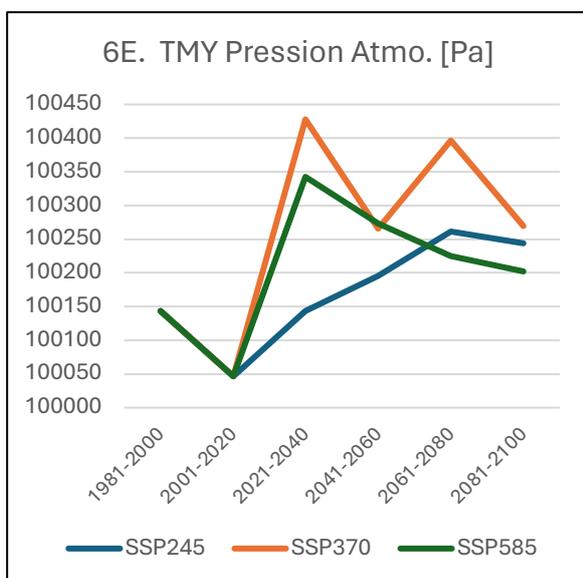
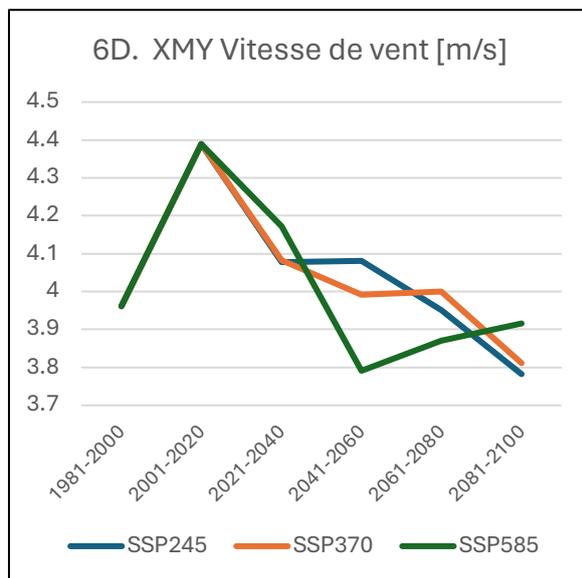
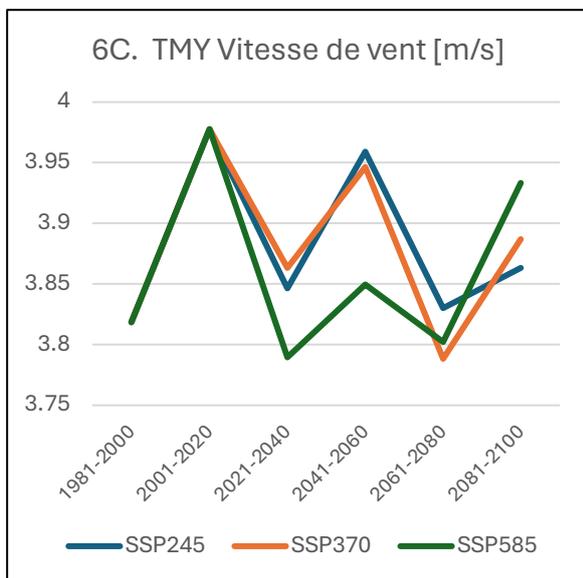
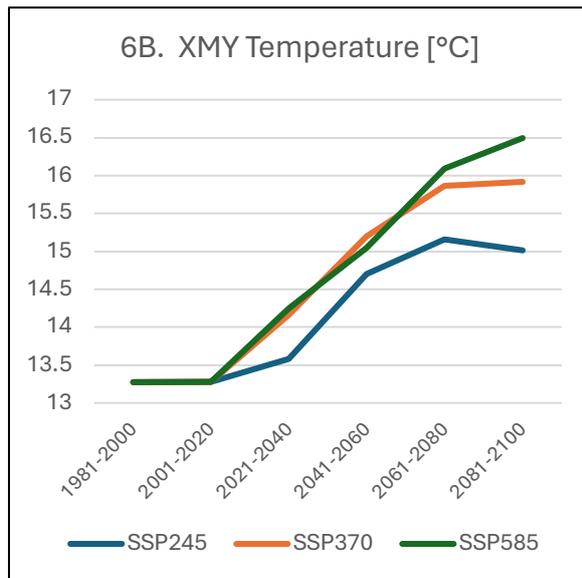
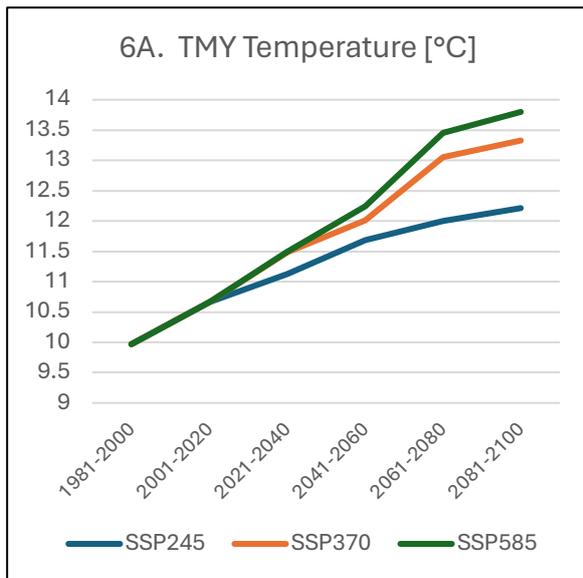
reprend les variables intervenant dans le modèle éolien choisi et expliqué dans le chapitre 5.3.3.

7.2.1 Photovoltaïque





7.2.2 Éolien



7.2.3 Analyse croisée de production et des données météo

Pour la production photovoltaïque (voir formules chapitre 3.3.4)

- La température (graph. 5A et 5B) augmente au fil du temps, ce qui influence négativement la production.
- Le rayonnement global au niveau du sol (graph. 5C et 5D) est en augmentation, ce qui influence positivement la production. En regardant les graphiques de 5E à 5H, on peut remarquer que c'est principalement le rayonnement direct qui augmente, tandis que le rayonnement diffus n'augmente que très légèrement. La raison principale de cette augmentation est la couverture nuageuse qui diminue au cours du temps (graph. 5I et 5J).

Pour la production éolienne (voir formules chapitre 3.4.4)

- La température (graph. 6A et 6B) est en augmentation, ce qui influence la masse volumique de l'air et donc la puissance du vent et a un effet négatif sur la production éolienne.
- La vitesse du vent moyen tend également vers une légère diminution (graph. 6C et 6D), ce qui naturellement influence négativement la production éolienne.
- La pression atmosphérique augmente (graph. 6E et 6F), ce qui influence la masse volumique de l'air et a un effet positif sur la production éolienne.

7.3 Mise à l'échelle belge 2023

Pour rendre les résultats des simulations plus parlants, ce chapitre sera consacré au chiffrage des variations à l'échelle belge.

Pour commencer, que représentent ces variations en termes d'énergie produite en plus ou en moins pour l'ensemble du territoire belge ? La production d'énergie offshore est exclue de cette étude car les changements des conditions météorologiques ne sont pas repris dans les prévisions météo mises à disposition par l'université de Liège. Pour ce faire, partons de la puissance installée fin 2023 en Belgique, à savoir 9 897,49 MWc pour le photovoltaïque et 3 247,11 MW pour l'éolien [56][57]. Dans le tableau ci-dessous sont représentées les quantités d'énergie que ces puissances produiraient dans chaque période et en fonction de chaque scénario.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)
2001-2020	8.72	8.72	8.72	5 919.18	5 919.18	5 919.18
2021-2040	8.80	9.31	9.17	5 231.76	5 421.00	5 058.57
2041-2060	9.24	9.16	9.56	5 653.16	5 640.67	5 212.04
2061-2080	9.06	9.68	9.39	5 267.06	5 166.76	5 018.06
2081-2100	9.23	9.35	9.47	5 198.19	5 445.36	5 730.62

Tableau 3 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue énergie pour les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)
2001-2020	8.72	8.72	8.72	5 919.18	5 919.18	5 919.18
2021-2040	8.65	8.85	8.74	4 752.05	4 669.81	5 070.17
2041-2060	8.85	8.96	8.85	4 760.44	4 537.63	4 760.44
2061-2080	9.00	9.01	9.04	4 362.42	4 646.45	3 967.94
2081-2100	8.67	9.08	9.12	3 854.00	3 923.54	4 196.45

Tableau 4 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue énergie pour les scénarios XMY

A titre de comparaison ;

- Un ménage moyen consomme 3 500 kWh/an [59]
- Une voiture électrique consomme en moyenne 1 700 kWh pour faire 100 000 km [60]
- Un réacteur nucléaire (de 900 MW) produit en moyenne 6 000 GWh/an [61]
- La Belgique a consommé 79,01 TWh en 2022 [62]

Le tableau ci-dessous représente les pertes ou les gains en euros que représentent ces variations pour les fournisseurs/producteurs à puissance inchangée [63] et à un tarif de 67€ par MWh, soit le prix de vente moyen auquel un producteur a vendu de l'électricité en Belgique en mars 2024.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)
2001-2020	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
2021-2040	5 514 €	39 572 €	30 611 €	-46 056 982 €	-33 377 870 €	-57 660 544 €
2041-2060	35 396 €	29 946 €	56 684 €	-17 823 102 €	-18 659 939 €	-47 378 140 €
2061-2080	22 829 €	64 550 €	45 148 €	-43 691 797 €	-50 412 146 €	-60 375 224 €
2081-2100	34 433 €	42 237 €	50 809 €	-48 306 429 €	-31 745 687 €	-12 633 622 €

Tableau 5 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue économique pour les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)
2001-2020	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
2021-2040	-4 482 €	8 810 €	1 433 €	-78 197 678 €	-83 707 500 €	-56 883 320 €
2041-2060	9 074 €	16 303 €	9 074 €	-77 635 657 €	-92 563 773 €	-77 635 657 €
2061-2080	19 266 €	19 332 €	21 946 €	-104 303 058 €	-85 272 897 €	-130 733 303 €
2081-2100	-2 941 €	24 136 €	26 760 €	-138 366 845 €	-133 707 454 €	-115 422 936 €

Tableau 6 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue économique pour les scénarios XMY

Une autre façon de représenter ces variations est de les chiffrer en nombre de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes à installer en plus (en positif) ou en moins (en négatif) pour compenser les variations à puissance inchangée. Pour les panneaux photovoltaïques, on

parlera en nombre de panneaux de 400 Wc [64], ce qui correspond à la puissance des panneaux installés actuellement. Pour le nombre d'éoliennes, on parlera en nombre d'éoliennes de 5 MW [65], ce qui correspond également à la puissance des machines les plus puissantes installées actuellement.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol
2001-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2040	-233 632	-1 676 599	-1 296 922	75	55	94
2041-2060	-1 499 684	-1 268 781	-2 401 608	29	31	78
2061-2080	-967 246	-2 734 878	-1 912 845	72	83	99
2081-2100	-1 458 862	-1 789 505	-2 152 713	79	52	21

Tableau 7 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol
2001-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2040	189 878	-373 259	-60 725	128	137	93
2041-2060	-384 470	-690 713	-384 470	127	152	127
2061-2080	-816 252	-819 071	-929 823	171	140	214
2081-2100	124 623	-1 022 617	-1 133 760	227	219	189

Tableau 8 : Mise à l'échelle belge 2023 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios XMY

L'ensemble des tableaux ci-dessous démontre que l'augmentation de la production photovoltaïque ne compensera en aucun cas la perte de production éolienne, que ce soit d'un point de vue énergétique ou financier. Cette tendance est observable pour les années types et s'accroît pour les années extrêmes.

7.4 Mise à l'échelle belge 2050

Il est difficile de prévoir le développement des énergies renouvelables d'ici 2050, comme le passé l'a démontré. Les changements dans le prix de l'électricité, dans les politiques et dans la situation sanitaire peuvent induire de grosses variations dans le développement des ER. Cependant, certains documents tentent de prévoir plusieurs scénarios de développement d'ici 2050, notamment un document publié par Elia. Trois scénarios de développement sont disponibles, celui qui a été choisi est le scénario moyen. Ce scénario prédit une augmentation d'environ 300% par rapport à la puissance installée en 2023, ce qui avoisinerait les 40 GWc pour le photovoltaïque et 8 GW pour l'éolien onshore [63]. L'interprétation et la structure des tableaux est identique à ceux de 2023 mais les calculs ont été réalisés avec les puissances installées prévues par le scénario moyen de Elia en 2050. Les deux premiers tableaux ci-dessous montrent ce que ces puissances produiraient en fonction de la période et du scénario, à puissance inchangée.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)
2001-2020	35.23	35.23	35.23	14 583.25	14 583.25	14 583.25
2021-2040	35.56	37.61	37.07	12 889.64	5 421.00	5 058.57
2041-2060	37.36	37.03	38.65	13 927.86	5 640.67	5 212.04
2061-2080	36.60	39.12	37.95	12 976.62	5 166.76	5 018.06
2081-2100	37.30	37.78	38.29	12 806.93	5 445.36	5 730.62

Tableau 9 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue énergie pour les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)	(GWh)
2001-2020	35.23	35.23	35.23	14 583.25	14 583.25	14 583.25
2021-2040	34.96	35.76	35.31	11 707.76	11 505.15	12 491.54
2041-2060	35.77	36.21	35.77	11 728.43	11 179.49	11 728.43
2061-2080	36.39	36.39	36.55	10 747.81	11 447.59	9 775.92
2081-2100	35.05	36.68	36.84	9 495.22	9 666.55	10 338.91

Tableau 10 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue énergie pour les scénarios XMY

Pour le calcul de l'impact économique, le prix de l'électricité est identique à la section précédente, soit 67€ du MWh, car il est impossible de prévoir le prix de l'électricité en 2050.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)
2001-2020	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
2021-2040	22 286 €	159 927 €	123 710 €	-113 471 934 €	-33 377 870 €	-57 660 544 €
2041-2060	143 051 €	121 026 €	229 084 €	-43 911 297 €	-18 659 939 €	-47 378 140 €
2061-2080	92 263 €	260 874 €	182 462 €	-107 644 759 €	-50 412 146 €	-60 375 224 €
2081-2100	139 157 €	170 697 €	205 342 €	-119 013 963 €	-31 745 687 €	-12 633 622 €

Tableau 11: Mise à l'échelle belge 2050 point de vue économique pour les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)	(€/an)
2001-2020	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
2021-2040	-18 112 €	35 604 €	5 792 €	-192 657 909 €	-206 232 618 €	-140 145 101 €
2041-2060	36 674 €	65 885 €	36 674 €	-191 273 242 €	-228 052 079 €	-191 273 242 €
2061-2080	77 860 €	78 129 €	88 694 €	-256 974 498 €	-210 089 333 €	-322 091 468 €
2081-2100	-11 888 €	97 545 €	108 147 €	-340 898 448 €	-329 418 971 €	-284 370 867 €

Tableau 12 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue économique pour les scénarios XMY

Finalement, voici le nombre de panneaux de 400 Wc et d'éoliennes de 5 MW nécessaires, en plus ou en moins, pour compenser les variations.

TMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol
2001-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2040	-94 4208	-6 775 855	-5 241 418	186	135	233
2041-2060	-6 060 867	-5 127 689	-9 705 927	72	75	191
2061-2080	-3 909 055	-11 052 814	-7 730 627	176	203	244
2081-2100	-5 895 886	-7 232 158	-8 700 038	195	128	51

Tableau 13 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios TMY

XMY	Photovoltaïque			Éolienne		
	SSP245	SSP 370	SSP 585	SSP245	SSP 370	SSP 585
Unité	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr de PV	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol	Nbr d'Eol
2001-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2040	76 7378	-1 508 500	-245 417	315	338	229
2041-2060	-1 553 809	-2 791 467	-1 553 809	313	373	313
2061-2080	-3 298 822	-3 310 219	-3 757 814	421	344	527
2081-2100	503 655	-4 132 834	-4 582 011	558	539	466

Tableau 14 : Mise à l'échelle belge 2050 point de vue nombre de panneaux et d'éoliennes à installer pour compenser les scénarios XMY

8 Conclusion

À la lumière des résultats exposés dans ce travail, il apparaît clairement que la productibilité des énergies renouvelables est appelée à fluctuer dans les années à venir. En ce qui concerne la production éolienne terrestre, une diminution de production de l'ordre de 10 à 20 pourcents est à prévoir. Cette perspective est particulièrement préoccupante étant donné que la Belgique mise principalement sur l'énergie éolienne pour atteindre ses objectifs de neutralité climatique. Parallèlement, en ce qui concerne la production photovoltaïque, la Belgique devrait observer une augmentation de production de quelques pourcents seulement, loin de compenser la perte de production photovoltaïque.

Le lien entre le réchauffement climatique et les énergies renouvelables est complexe et bidirectionnel. Bien que l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique belge semble bénéfique pour atténuer le changement climatique, il existe également une relation inverse où le changement climatique impacte la production d'énergie renouvelable. Cette relation doit être prise en compte dans le développement des politiques énergétiques afin d'assurer leur cohérence.

De plus, cette relation jouera un rôle crucial dans un sujet sensible : celui du prix de l'énergie. Nul ne peut prévoir avec certitude le prix de l'énergie l'année prochaine et encore moins en 2050 ou en 2100, mais l'investissement supplémentaire et la perte de production engendrés par le changement climatique dans le secteur des énergies renouvelables, joueront un rôle crucial dans l'évolution du prix de l'énergie. Si cette étude s'avère être une prédiction correcte de l'avenir, les résultats exposés antérieurement devraient entraîner une augmentation du prix de l'électricité à rendement et coût des installations égaux.

Cette étude a été réalisée de la manière la plus précise et complète possible, mais elle comporte une grande part d'incertitude.

Premièrement, elle se base sur des données météorologiques prévisionnelles à long terme, ce qui est reconnu comme étant un sujet extrêmement complexe. Une prédiction trop éloignée de la réalité de ces données entraînerait une erreur dans les prédictions réalisées dans ce document.

De plus, les résultats exposés, tels que l'évolution de la production sur l'ensemble du territoire belge, sont le fruit d'une moyenne de cinq villes jugées significatives. Si cette moyenne ne s'avère pas être significative, elle pourrait également entraîner une erreur dans les résultats.

Pour conclure, le sujet pourrait être approfondi et détaillé de bien des manières. Pour mieux refléter le comportement des énergies renouvelables en Belgique, il serait intéressant de réaliser des études à une échelle plus fine, par exemple au niveau provincial ou régional, avec un plus grand nombre de simulations dans des endroits différents. Et pour être totalement exhaustif, il faudrait également intégrer la production et le développement des parcs éoliens offshore que la Belgique a déjà et ambitionne de développer davantage dans les années à venir. Une démarche similaire pourrait également être envisagée pour étudier la production de biomasse et d'hydroélectricité, bien que TRNSYS ne semble pas être l'outil le plus adapté pour étudier ces deux technologies.

Bibliographie

- [1] U. Nations, « En quoi consistent les changements climatiques ? | Nations Unies », United Nations. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-climate-change>
- [2] « Changement climatique : les gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement climatique », Thèmes | Parlement européen. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20230316STO77629/les-gaz-a-effet-de-serre-a-l-origine-du-rechauffement-climatique>
- [3] « Effet de serre », Klimaat | Climat. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://climat.be/changements-climatiques/causes/effet-de-serre>
- [4] N. US Department of Commerce, « Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases ». Consulté le: 10 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- [5] « Les causes du changement climatique - Commission européenne ». Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fr
- [6] « Rapports du GIEC », Klimaat | Climat. Consulté le: 13 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec>
- [7] « Les scénarios SSP | Carbone 4 ». Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://carbone4.com/fr/publication-scenarios-ssp-adaptation>
- [8] Y. Nyffenegger-Péré *et al.*, « Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo », *Entropie*, vol. 3, n° 3, 2022, doi: 10.21494/ISTE.OP.2022.0898.
- [9] « World Bank Open Data », World Bank Open Data. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.worldbank.org>
- [10] A. Olivier, « Infographies : les émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne », *Touteurope.eu*. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.touteurope.eu/environnement/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-l-union-europeenne/>
- [11] « Émissions par gaz », Klimaat | Climat. Consulté le: 16 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-gaz>
- [12] C. Guivarch et N. Taconet, « Inégalités mondiales et changement climatique », *Revue de l'OFCE*, vol. 165, n° 1, p. 35-70, 2020, doi: 10.3917/reof.165.0035.
- [13] J.-N. Geist, « Quel climat pour demain ? Synthèse vulgarisée du dernier rapport du GIEC », *The Shift Project*. Consulté le: 9 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theshiftproject.org/article/climat-synthese-vulgarisee-giec-wg1-shifte/>
- [14] P. Ozer, « Chapitre 5. Les risques naturels », in *Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise*, De Boeck Supérieur, 2012, p. 77-99. doi: 10.3917/dbu.brune.2012.01.0077.
- [15] « Quels sont les pays les plus menacés par le réchauffement climatique ? - [Jeu de cartes] », 8e étage. Consulté le: 9 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://8e-etage.fr/2018/02/01/quels-pays-sont-les-plus-menaces-par-le-rechauffement-climatique-jeu-de-cartes/>
- [16] S. Doutreloup *et al.*, « Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: typical and extreme meteorological year and heatwaves », *Earth System Science Data*, vol. 14, n° 7, p. 3039-3051, juill. 2022, doi: 10.5194/essd-14-3039-2022.
- [17] « L'Unité Astronomique ou la distance Terre-Soleil ». Consulté le: 10 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.reflexions.uliege.be/cms/c_43752/fr/l-unite-astronomique-ou-la-distance-

terre-soleil

- [18] « Ensoleillement », Energie Plus Le Site. Consulté le: 17 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>
- [19] « Le cycle solaire ». Consulté le: 10 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://sesp.esep.pro/fr/pages_etoile-planete/cycle.html
- [20] « Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center ». Consulté le: 16 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [21] « Consommation : litres de fioul, tonnes de gaz propane », Primagaz. Consulté le: 13 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.primagaz.fr/guide-choisir-energie/comparer-gaz-propane/fioul-gaz-propane/comparer-litre-tonne-kwh>
- [22] « RapportClimatique-2020.pdf ». Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.meteo.be/resources/misc/climate_report/RapportClimatique-2020.pdf
- [23] M. Journée, R. Müller, et C. Bertrand, « Solar resource assessment in the Benelux by merging Meteosat-derived climate data and ground measurements », *Solar Energy*, vol. 86, n° 12, p. 3561-3574, déc. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.06.023.
- [24] « IRM - Cartes climatologiques », KMI. Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/cartes-climatologiques>
- [25] B. Hurley, « D'où vient le vent ? », janv. 2012.
- [26] « IRM - Qu'est ce qui est à l'origine du vent? », KMI. Consulté le: 17 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteo.be/fr/infos/faq/phenomenes-meteorologiques/qu-est-ce-qui-est-a-l-origine-du-vent>
- [27] « IRM - Paramètres », KMI. Consulté le: 17 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteo.be/fr/unpublish/climat-general-en-belgique/parametres>
- [28] « Vent », Energie Plus Le Site. Consulté le: 17 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/vent/>
- [29] « Global Wind Atlas ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://globalwindatlas.info>
- [30] « Climat, météo par mois, température moyenne pour Aéroport de Bruxelles (Belgique) - Weather Spark ». Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.weatherspark.com/y/147989/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-A%C3%A9roport-de-Bruxelles-Belgique-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e#Figures-WindSpeed>
- [31] « Loi sur le climat », Klimaat | Climat. Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://climat.be/politique-climatique/europeenne/loi-sur-le-climat>
- [32] « Cadre d'action en matière de climat et d'énergie d'ici à 2030 - Commission européenne ». Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_fr
- [33] « 20240108_Mix-electrique-2023-pour-la-Belgique_FR.pdf ».
- [34] « Statistiques », Energie Commune. Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energiecommune.be/statistique/>
- [35] « F2537EN.pdf ». Consulté le: 10 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Publications/Studies/F2537EN.pdf>
- [36] F. Comble, « Maison autonome, déconnectée du réseau électrique », 2020.
- [37] « Qu'est-ce que l'énergie solaire: exploitation thermique, photovoltaïque, thermodynamique ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>

- [38] P. Andre, « Objectifs du cours “Energie Solaire” ».
- [39] « Cellules photovoltaïques : l'innovation au service de la performance | Choisir.com ». Consulté le: 22 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-source-inepuisable-dinnovations>
- [40] « Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques », Energie Plus Le Site. Consulté le: 22 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/>
- [41] « Bande interdite », *Wikipédia*. 12 janvier 2024. Consulté le: 22 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bande_interdite&oldid=211435092
- [42] « Prédimensionner l'installation [photovoltaïque] », Energie Plus Le Site. Consulté le: 22 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaïque/predimensionner-l-installation/>
- [43] M. A. Russo, D. Carvalho, N. Martins, et A. Monteiro, « Forecasting the inevitable: A review on the impacts of climate change on renewable energy resources », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102283, août 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102283.
- [44] K. Solaun et E. Cerdá, « Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, p. 109415, déc. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109415.
- [45] « Éolienne : composition, éléments et schéma d'une éolienne ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-constituants-dune-eolienne>
- [46] « Windenergie-Daten der Schweiz ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://wind-data.ch/tools/index.php>
- [47] « Figure 1.4-Exemples de distributions de Weibull pour le paramètre... », ResearchGate. Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Exemples-de-distributions-de-Weibull-pour-le-parametre-dechelle-A-6-ms-1-et_fig2_286462919
- [48] « Gradient de vent au sol - Visualisation - Etudes de cas ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.parapentiste.info/forum/techniques-de-base-du-pilotage/gradient-de-vent-au-sol-visualisation-etudes-de-cas-t45967.0.html>
- [49] « Rendement des éoliennes », Energie Plus Le Site. Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>
- [50] admin-ik, « Énergie éolienne : De son gisement à ses aérogénérateurs », Encyclopédie de l'énergie. Consulté le: 15 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-energie.org/en/energie-eolienne-de-son-gisement-a-ses-aerogenerateurs/>
- [51] D. E. H. J. Gernaat, H. S. De Boer, V. Daioglou, S. G. Yalew, C. Müller, et D. P. Van Vuuren, « Climate change impacts on renewable energy supply », *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, n° 2, p. 119-125, févr. 2021, doi: 10.1038/s41558-020-00949-9.
- [52] X. Fettweis, « Evolution du potentiel énergétique éolien et solaire en Belgique ».
- [53] « Welcome | TRNSYS : Transient System Simulation Tool ». Consulté le: 29 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.trnsys.com/>
- [54] « Importance de l'orientation et des types de structures ». Consulté le: 7 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/orientation-structure.html#>
- [55] « Wind Shear ». Consulté le: 29 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.engineeringtoolbox.com/wind-shear-d_1215.html
- [56] « Observatoire éolien », Energie Commune. Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur:

<https://energiecommune.be/statistique/observatoire-eolien/>

[57] « Observatoire Photovoltaïque », Energie Commune. Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energiecommune.be/statistique/observatoire-photovoltaique/>

[58] E. Universalis, « Belgique : carte administrative - Média », Encyclopædia Universalis. Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/media/belgique-carte-administrative-at002003/>

[59] « Origines et conséquences : comprendre notre consommation d'électricité | TotalEnergies Belgique ». Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://totalenergies.be/fr/particuliers/blog/ma-consommation/la-consommation-moyenne-dun-menage-et-la-mienne-comment-me-situer>

[60] « Combien consomme une voiture électrique ? - Renault ». Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.renault.fr/faq-electrique/consommation-vehicule-electrique.html#>

[61] « Le nucléaire en chiffres | EDF FR ». Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/le-nucleaire-en-chiffres>

[62] « Statistiques électricité », FEBEG Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières. Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

[63] « tableaubord202403.pdf ». Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Prices/Dashboard/tableaubord202403.pdf>

[64] « Fabrication Photovoltaïque | Evocells à Marche-en-Famenne », Evocells. Consulté le: 8 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://evocells.be/fr/fabrication-photovoltaique-evocells/>

[65] L. Bauer, « Gamesa G128-5.0MW - 5,00 MW - Éolienne ». Consulté le: 8 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/767-gamesa-g128-5.0mw>

Annexes

1. Tableau des « type » TRNSYS

Type 24
<p>Ce composant intègre une série de grandeurs sur une période de temps donnée. Chaque intégrateur de quantité peut avoir jusqu'à, mais pas plus de 500 entrées. Le Type24 peut être réinitialisé périodiquement tout au long de la simulation, soit après un nombre spécifié d'heures, soit après chaque mois de l'année. Avec la sortie de TRNSYS 16, le Type24 a été étendu de sorte que le temps entre les réinitialisations puisse être compté par rapport à l'heure de début de la simulation ou en temps absolu. Par exemple, avec un temps de réinitialisation d'une heure, une réinitialisation de temps relatif et une heure de début de simulation de 0,5, l'intégrateur se réinitialisera aux instants 1,5, 2,5, 3,5, 4,5, etc. Avec un temps de réinitialisation d'une heure, une réinitialisation de temps absolu et une heure de début de simulation de 0,5, l'intégrateur Type24 se réinitialisera aux instants 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, etc. Ainsi, la première période d'intégration ne serait pas une heure complète.</p>
Type 9
<p>Ce composant sert à lire des données à intervalles de temps réguliers à partir d'un fichier de données, à les convertir dans un système d'unités désiré, et à les rendre disponibles pour d'autres composants TRNSYS en tant que fonctions de forçage variables dans le temps. Ce composant est très généraliste et peut lire différents types de fichiers. Les données d'une ligne à l'autre doivent être à des intervalles de temps constants.</p>
Type 103b
<p>Ce composant est approprié pour modéliser les performances électriques des panneaux photovoltaïques mono et polycristallins. Il n'est pas approprié pour modéliser les performances électriques des matrices de cellules photovoltaïques minces. Il peut être utilisé dans l'un des deux modes en fonction de la façon dont le premier paramètre est défini. Lorsque le paramètre de mode MPPT est réglé sur 0, le réseau photovoltaïque est supposé être directement connecté à une tension de charge et/ou à une batterie. La tension de fonctionnement du réseau photovoltaïque/charge est une entrée du modèle photovoltaïque. Lorsque le paramètre de mode MPPT est réglé sur 1, l'ensemble est supposé être connecté à sa charge via un suiveur de point de puissance maximale. Dans ce cas, la tension de charge n'est pas nécessaire en entrée.</p>
Type 90
<p>Le Type 90 est un modèle mathématique pour un système de conversion d'énergie éolienne (WECS). Le modèle calcule la puissance de sortie d'un WECS en fonction d'une caractéristique puissance versus vitesse du vent (fournie sous forme de tableau dans un fichier externe). L'impact des changements de densité de l'air et de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur est également modélisé. Les principales équations utilisées dans ce modèle sont basées sur le travail de (Quinlan, 2000 ; Quinlan et al., 1996).</p>
Type 65d
<p>Le composant graphique en ligne est utilisé pour afficher des variables système sélectionnées au fur et à mesure de la progression de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations précieuses sur les variables et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas</p>

comme prévu. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Dans cette instance du traceur en ligne Type65, aucun fichier de données de sortie n'est généré.

Type 25c

Le composant d'impression est utilisé pour imprimer des variables système sélectionnées à des intervalles de temps spécifiés (pairs). Dans ce mode, les descripteurs d'unités (kJ/hr, degC, W, etc.) ne sont PAS imprimés dans le fichier de sortie avec chaque en-tête de colonne. La sortie peut être imprimée à des intervalles de temps pairs à partir de l'heure de début de la simulation ou peut être imprimée en temps absolu. Si l'impression relative est choisie avec un intervalle d'impression d'une heure et que la simulation commence à l'heure 0,5, les valeurs seront imprimées.