
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Stage de recherche en énergies renouvelables et efficacité énergétique

École de Technologie Supérieure (ÉTS)

1100 R. Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
Université du Québec

Tuteur entreprise :

Adrian Ilinca

Professeur Chercheur (Génie Mécanique)

Tuteur académique :

Mindjid Maizia

Félix Saudemont

IUT (Option RESEAU)

2023-2024

Table des matière

Introduction.....	3
Objectifs du stage et problématique abordée	3
Importance des énergies renouvelables et du calcul de la charge des panneaux solaires et des éoliennes	3
I- Présentation et organisation du laboratoire.....	4
Présentation du laboratoire et de mon tuteur professionnel	4
Déroulement du stage, organisation	5
II- Contexte théorique.....	5
Apprentissage du logiciel RETScreen	5
Etude bibliographique de l'article scientifique (Dolatabadi et al., 2024)	8
III- Méthodologie du projet de stage	11
Protocole général de la mission de stage	11
Outils et instruments de recherche employés	12
IV- Description des travaux réalisés	13
Recherche et tri des données.....	13
Calculs effectués afin de compléter les données manquantes.....	18
Répertoriage des données.....	20
Analyse des données	21
Description des méthodes de calcul de charge existantes	22
Écriture des scripts et calculs	24
V- Résultats	24
Présentation des résultats obtenus.....	24
Analyse et interprétation des résultats.....	25
VI- Discussion.....	26
Comparaison des résultats avec les attentes initiales et la littérature existante.	26
Limites de l'étude et suggestions pour des recherches futures.....	27
Implications des résultats pour le domaine des énergies renouvelables.....	27
Conclusion	29
Résumé du stage et des résultats	29
Bilan personnel du stage	29
Annexes	31
Bibliographie	47

Introduction

Objectifs du stage et problématique abordée

Mon stage avait pour premier objectif de développer mes compétences dans la conception de projets d'énergies renouvelables à l'aide du logiciel RETScreen. Ce logiciel, reconnu pour son utilité dans l'évaluation de faisabilité des projets énergétiques, m'a permis d'apprendre à élaborer des plans détaillés pour des installations solaires et éoliennes. En parallèle, j'ai suivi des cours sur les éoliennes présentés par Monsieur Ilinca, approfondissant ainsi mes connaissances techniques dans ce domaine.

J'ai également approfondi mes compétences dans l'étude bibliographique et la compréhension d'un article scientifique, notamment en analysant de manière intense l'article de Monsieur Ilinca et ses collaborateurs (Dolatabadi et al., 2024), étant le principal sujet de mon stage. Mon objectif principal était de collecter et d'analyser des données de production éolienne, en utilisant Python comme principal outil d'analyse et de modélisation et d'appliquer ces données à l'élaboration d'une méthode de calcul de charge adaptée aux éoliennes.

La problématique centrale de mon stage consistait à résoudre les défis suivants : comment accéder efficacement aux données de production éolienne pertinentes et les analyser à l'aide de Python pour appliquer une méthode de calcul de charge aux éoliennes ?

Importance des énergies renouvelables et du calcul de la charge des panneaux solaires et des éoliennes

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne et solaire, sont essentielles pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la sécurité énergétique mondiale. Pour optimiser ces sources d'énergie, il est crucial de calculer la charge des éoliennes et des panneaux solaires, plutôt que de se fier uniquement à leur puissance nominale. La capacité nominale d'une unité photovoltaïque ne reflète pas précisément sa performance réelle (Dolatabadi et al., 2024). La charge effective, ou facteur de charge, représente le rapport entre l'énergie réellement produite par une installation sur une période donnée et la quantité d'énergie qu'elle pourrait produire à pleine capacité durant cette même période. Ce calcul est essentiel car il permet de comprendre la performance réelle des installations dans des conditions opérationnelles variées, tenant compte des variations climatiques et des pannes éventuelles. En calculant la charge effective, les planificateurs peuvent mieux prévoir la production d'énergie et optimiser les futures installations. Estimer la capacité réelle des installations éoliennes et solaires est crucial pour la planification des futures installations (Dolatabadi et al., 2024). De plus, l'impact des conditions climatiques sur la performance des installations est un aspect important. Comprendre l'influence des facteurs climatiques sur la production d'énergie renouvelable est essentiel pour une estimation précise de la capacité (Dolatabadi et al., 2024).

I- Présentation et organisation du laboratoire

Présentation du laboratoire et de mon tuteur professionnel



Figure 1 : Campus de l'École de technologie supérieure de Montréal (Source : <https://www.etudesuniversitaires.ca/universites-canadiennes/ecole-de-technologie-superieure/>)

Mon stage se déroule au sein du laboratoire de recherche du département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure (l'ÉTS, dont le campus est présenté en figure 1), sous la supervision du professeur Adrian Ilinca. C'est est professeur chercheur à l'ÉTS depuis plus d'un an et enseigne dans le département de génie mécanique. Il possède une formation solide avec un diplôme d'ingénieur de l'Université Politehnica de Bucarest et un doctorat de Polytechnique Montréal. Ses axes de recherche incluent le développement durable, l'économie circulaire, les systèmes intelligents et autonomes, ainsi que les capteurs et réseaux connectés. Ses expertises sont variées et couvrent des domaines tels que le développement de technologies pour la lutte contre les changements climatiques, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, les systèmes hybrides de production d'énergie, l'adaptation des technologies au climat froid, les technologies de captation de CO₂, le stockage d'énergie, l'efficacité énergétique, et l'optimisation à l'aide de l'intelligence artificielle et la dynamique des fluides numérique.

Parmi ses nombreuses publications, plusieurs se démarquent par leur pertinence et leur contribution significative au domaine des énergies renouvelables. Par exemple, l'article "Renewable energy and decarbonization in the Canadian mining industry: Opportunities and challenges" (2023) explore les possibilités et les défis de l'intégration des énergies renouvelables dans l'industrie minière canadienne. Un autre article, "Wind power plant planning and modeling" (2021) traite de la planification et de la modélisation des parcs éoliens. Ces publications ont attiré mon attention et m'ont inspiré à contacter Monsieur Ilinca pour réaliser ce stage.

Le professeur Ilinca enseigne également des cours sur les technologies des systèmes d'énergie éolienne. Il m'a proposé de participer à certains de ses cours, ce qui a été une expérience extrêmement enrichissante pour moi. Ces cours ont approfondi ma compréhension théorique des systèmes d'énergie éolienne et m'ont permis d'utiliser ces connaissances dans mon projet de stage.

Déroulement du stage, organisation

Dans le cadre de mon projet, je travaille principalement avec Monsieur Ilinca. Ses collaborateurs pour son précédent article n'étaient pas disponibles pour nous aider lors de ce projet, nous sommes donc essentiellement deux à travailler sur ce projet. Cette situation m'a permis de bénéficier d'une attention et d'un encadrement personnalisé de la part de Monsieur Ilinca.

À l'ETS, nous avons un campus assez grand, ce qui m'a permis de travailler la journée dans divers lieux, tels que la bibliothèque ou des salles réservables en ligne. Ces zones offraient un environnement adapté à la concentration et à la productivité. De plus, je pouvais y réaliser les appels avec Monsieur Ilinca. Nous nous appelions environ une fois par semaine afin qu'il puisse me donner mes missions et leurs directives, et moi, je lui présentais mes avancées. Entre temps, il m'a partagé un Drive commun où j'importais mes travaux pour qu'il puisse y accéder quand il le souhaite. Cela lui permettait de corriger mon travail et de me fournir des conseils précieux. En parallèle, je lui envoyais régulièrement des mails pour lui parler de mon avancée et lui poser des questions spécifiques.

Malgré le manque de collaborateurs, nous avons pu efficacement communiquer et résoudre les différents problèmes que nous avons rencontrés. Grâce à cette organisation, j'ai pu mener à bien mon projet en bénéficiant d'un suivi et d'un support continu.

II- Contexte théorique

Apprentissage du logiciel RETScreen



Figure 2 : Interface du logiciel RETScreen et ses sections de planification de projets énergétiques
(Source : RETScreen)

Dans le cadre de mon stage, Adrian Ilinca m'a fourni les accès au logiciel RETScreen et m'a conseillé de consacrer plusieurs jours à explorer ses fonctionnalités. Il m'a également recommandé de visionner des vidéos de formation et de réaliser des projets éoliens fictifs pour mieux comprendre l'ensemble du logiciel. Cet apprentissage avait pour but de me familiariser avec la planification et l'analyse des projets éoliens.

RETScreen est un outil puissant pour l'analyse de faisabilité des projets énergétiques. Il se divise en plusieurs sections comme celles présentes sur la figure 2. La première étape consiste à définir le **Lieu** du projet, où des données climatiques spécifiques au site sont intégrées pour évaluer les conditions de vent. Ensuite, la section **Énergie** permet d'estimer la production potentielle d'électricité en fonction des caractéristiques des éoliennes et des conditions de vent locales. La section **Coût** est

utilisée pour évaluer les investissements nécessaires et les coûts d'exploitation associés à l'installation des éoliennes. L'analyse des **Émissions** quantifie la réduction des gaz à effet de serre permise par le projet. Le **Risque financier** évalue la viabilité économique du projet, en prenant en compte divers scénarios financiers et variables économiques. La section **Performance** permet de suivre et de comparer les performances réelles des éoliennes avec les prévisions initiales, en utilisant des données de suivi. Enfin, la section **Rapport** compile toutes les informations en un document complet et professionnel, prêt à être présenté aux parties prenantes.

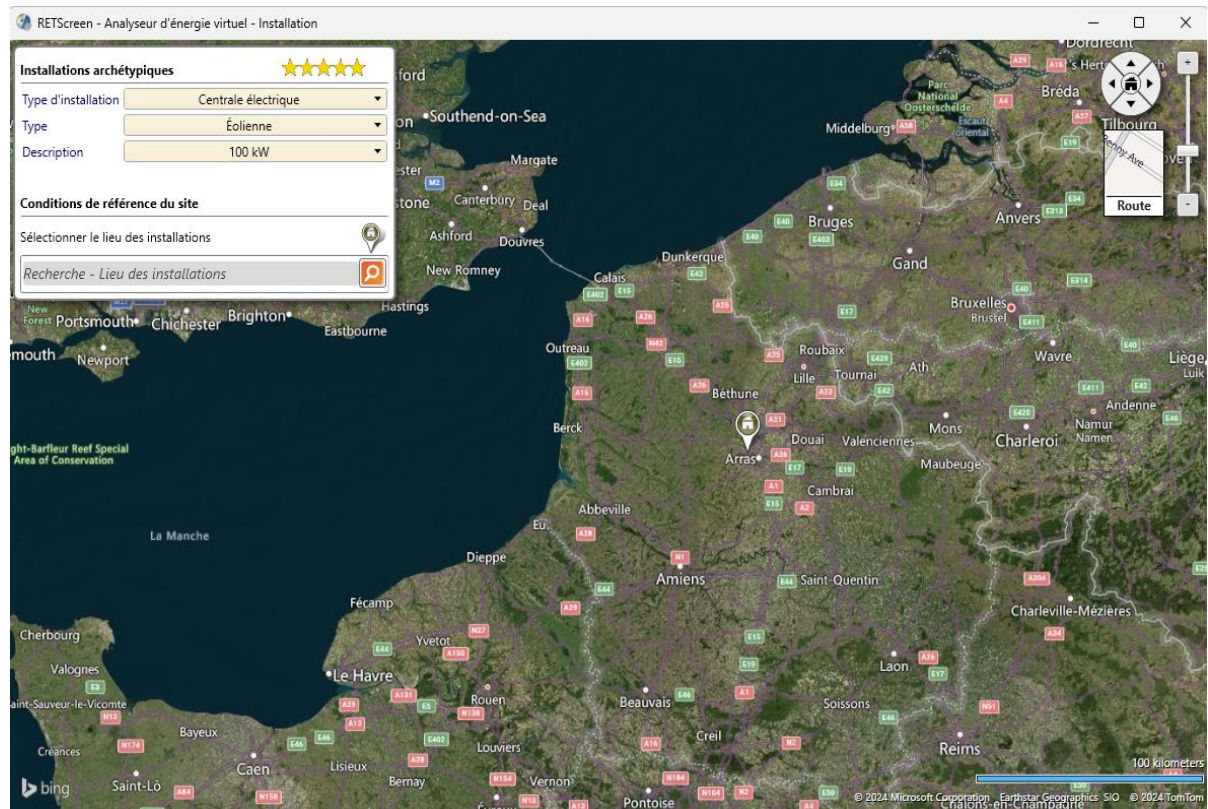


Figure 3 : Analyseur d'énergie virtuel de RETScreen (Source : RETScreen)

J'ai regardé de nombreuses vidéos de projets éoliens sur la chaîne YouTube "Apprentissage virtuel RETScreen" (Source : <https://www.youtube.com/@apprentissagevirtuelretscr3495>), ce qui m'a permis de comprendre toutes les sections du logiciel et d'approfondir mes connaissances sur les projets éoliens. D'après la figure 3, j'ai mis en place un projet en définissant la puissance nominale de l'installation et sa localisation. Après calcul dans RETScreen, j'ai exploré les différentes sections du projet, comme mentionné précédemment. Grâce aux vidéos, j'ai pu approfondir chaque paramètre présenté.

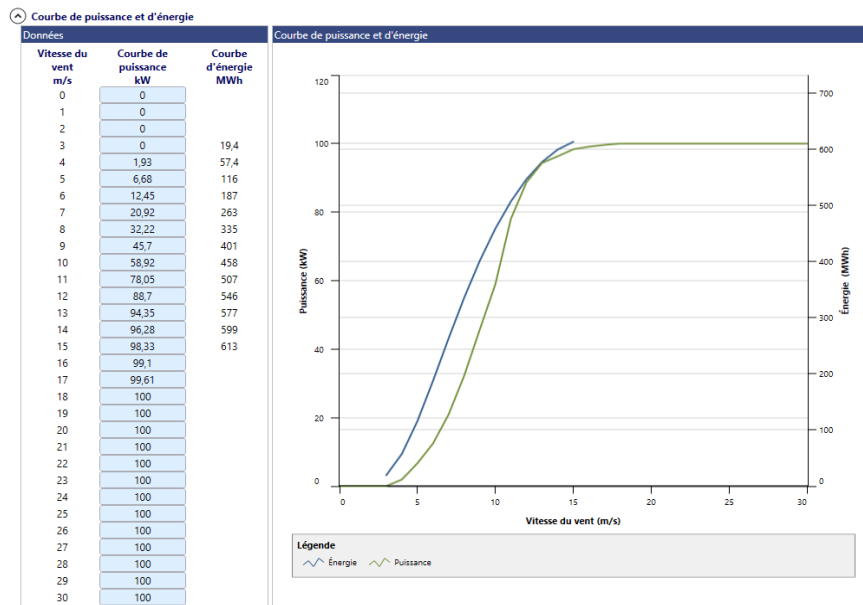


Figure 4 : Section Énergie d'un projet RETScreen (Source : RETScreen)

Premièrement, dans la section **Énergie**, on évalue les différents paramètres influençant la production : la vitesse du vent, la hauteur, la pression, et la température. Ces éléments sont essentiels pour déterminer la courbe de puissance et d'énergie de notre installation (figure 4). Cette section m'a permis de comprendre chaque paramètre et leur impact sur la production d'énergie.

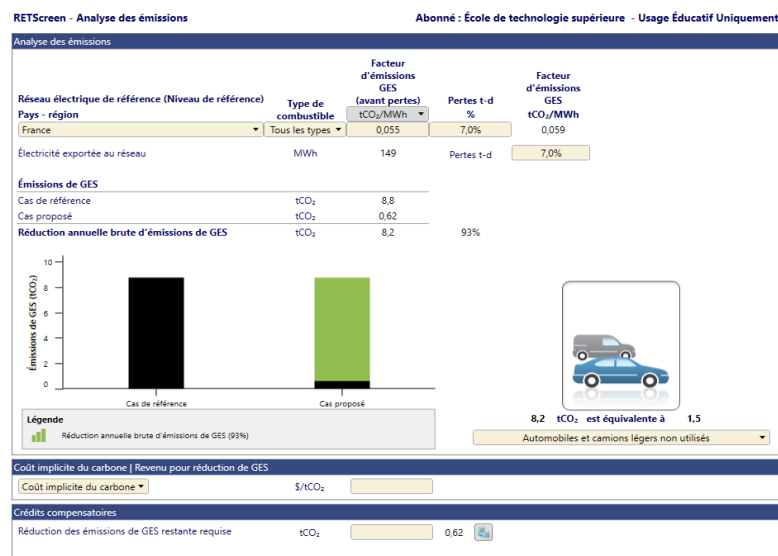


Figure 5 : Section Émission d'un projet RETScreen (Source : RETScreen)

Ensuite, la catégorie **Émission** est importante pour analyser l'impact environnemental du projet. J'ai appris à représenter les économies réalisées en termes d'émissions de CO₂ grâce aux outils du logiciel. La figure 5 de mon rapport montre comment RETScreen calcule et visualise les émissions des gaz à effet de serre, comparant les scénarios de référence et proposés, et mettant en évidence la réduction annuelle brute des émissions de GES. Cette section m'a permis de comprendre comment les projets éoliens peuvent contribuer à réduire l'empreinte carbone.

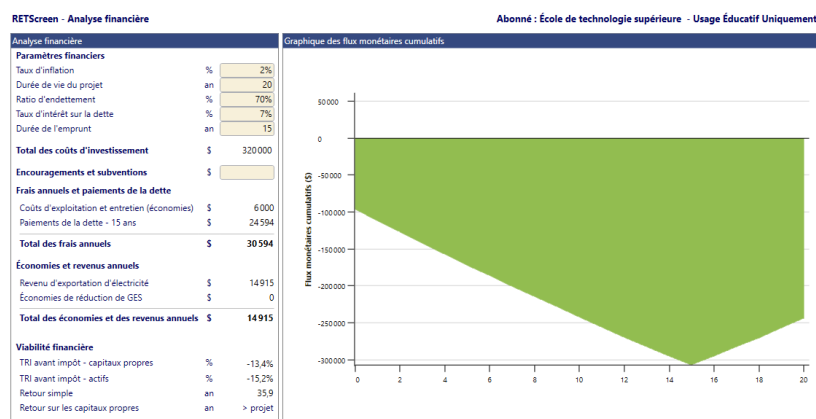


Figure 6 : Section Finance d'un projet RETScreen (Source : RETScreen)

La troisième et dernière section importante est la catégorie **Finance**, qui comprend le plus de paramètres à prendre en compte. Cette section m'a particulièrement aidé à comprendre les aspects financiers d'un projet d'énergie renouvelable. Elle couvre des éléments tels que le taux d'inflation, la durée de vie du projet, le ratio d'endettement, et le taux d'intérêt sur la dette. La figure 6 illustre la viabilité financière du projet, montrant les flux monétaires cumulatifs et le retour sur investissement. En modifiant les paramètres, j'ai pu analyser différentes hypothèses financières et comprendre leur impact sur la rentabilité du projet.

J'ai donc créé plusieurs projets à différents endroits afin d'étudier chaque paramètre et d'optimiser les résultats. Le logiciel permet également de générer des rapports plus ou moins détaillés pour présenter un projet, utilisés dans diverses instances.

Ce que le logiciel RETScreen m'a appris en général pour le début de mon stage est considérable. Il m'a permis de comprendre les aspects techniques, environnementaux mais surtout les aspects financiers des projets d'énergie renouvelable, surtout des projets éoliens. J'ai acquis des compétences précieuses dans l'analyse de données, la modélisation de projets, et la présentation de résultats, ce qui m'a donné une base solide pour la suite de mon stage et pour mes futurs projets professionnels.

Etude bibliographique de l'article scientifique (Dolatabadi et al., 2024)

J'ai entrepris ensuite l'étude approfondie d'un article rédigé par Adrian Ilinca et ses collaborateurs, intitulé "Enhancing Photovoltaic Farm Capacity Estimation: A Comprehensive Analysis with a Novel Approach" (Dolatabadi et al., 2024) publié en 2024 dans la revue "Energy Technology" qui est une contribution significative à l'étude des fermes photovoltaïques. Cet article propose une approche novatrice pour estimer la capacité des installations photovoltaïques, en se basant sur une analyse détaillée des paramètres influençant leur performance. Monsieur Ilinca m'a donné le choix entre deux articles, et j'ai opté pour celui-ci en raison de son contenu technique détaillé sur les panneaux solaires. Étant particulièrement intéressé par l'approfondissement de mes compétences dans le domaine des énergies renouvelables, j'ai estimé que ce sujet serait le plus pertinent pour ma formation. Cet article constituera le pilier central de mon stage.

À la suite de l'analyse approfondie de l'article, j'ai élaboré un résumé détaillé de l'article conformément au déroulé fourni par Monsieur Ilinca (Figure 7). Ce résumé, qui est disponible en annexe, présente les objectifs principaux de l'étude, la justification du travail de recherche, la

méthodologie employée ainsi que les retombées prévues et l'impact industriel du projet. Ce livrable a été réalisé afin de fournir une compréhension claire et concise de l'article avant d'entamer les étapes pratiques du projet, en assurant une base solide pour le développement ultérieur de mes travaux de stage.

➤ **RÉSUMÉ DU PROJET**

OBJECTIFS

Identifier le plus précisément l'objectif principal et les objectifs spécifiques de votre projet.

JUSTIFICATION

Mettre en contexte le problème scientifique ou technologique sur lequel portera votre projet.

MÉTHODOLOGIE

Énumérer les étapes qui permettront d'atteindre l'objectif principal de votre projet ainsi que les outils utilisés, les méthodes proposées pour la réalisation de chacune des étapes (ne vous limitez pas à une liste de tâches).

RETOMBÉES PRÉVUES ET IMPACT INDUSTRIEL

Indiquer la portée de votre contribution sur le plan scientifique, technologique, social, économique ou environnemental.

Figure 7 : Déroulé d'un résumé de projet (Auteur : Adrian Ilinca)

Pour l'analyse de l'article, j'ai tiré, relevé et compris les informations suivantes afin de réaliser un résumé pertinent : L'article aborde principalement les défis des méthodes actuelles d'évaluation de la valeur de capacité des installations photovoltaïques (PV). Il met en avant la nécessité d'une meilleure compréhension et d'une évaluation plus précise de cette valeur dans les systèmes d'alimentation PV. À cette fin, une nouvelle métrique, le Marginal Moving Average Limited Hours ELCC-Based Capacity Value (MMALH), a été développée. Cette métrique vise à diminuer la dépendance aux données étendues en utilisant une approche de moyenne mobile, permettant ainsi de capturer de manière plus précise les variations de la production PV.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont multiples. Tout d'abord, elle cherche à identifier et à surmonter les limitations des méthodes actuelles, qu'elles soient exactes ou approximatives, tout en calculant et classant les différents résultats à partir de ces méthodes (figure 8).

Scenario	Load	PV	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
1	RTS	Belgium	0.37	0.75	0.7	0.642	0.7371	0.934
2	RTS	Texas	1.18	2.03	1.95	1.5927	1.6035	1.7876
3	Belgium	Belgium	0.74	0.95	0.92	0.6827	0.7146	1.0342
4	ERCOT	Texas	2.13	2.07	1.91	2.4493	2.3137	2.059
5	ERCOT	California	2.3	1.88	1.8	2.4734	2.3653	2.1931

Figure 8 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour différents scénarios liés à différentes conditions de charge et de production pour une centrale photovoltaïque de 5 MW (Dolatabadi et al., 2024)

Ces méthodes sont souvent soit trop complexes, nécessitant une grande quantité de données, soit trop simplistes, ne reflétant pas fidèlement la variabilité de la production PV. Ces limitations peuvent entraîner des difficultés dans le dimensionnement et le positionnement stratégique des installations PV.

Pour démontrer la supériorité de la métrique MMALH, l'article propose une approche méthodique. Il débute par une explication détaillée des méthodes actuelles de calcul, suivie de

simulations de la valeur de capacité dans divers contextes géographiques et environnementaux. Ces simulations prennent en compte des variations de production et de demande, ainsi que des scénarios impliquant différentes capacités nominales des installations, charges de pointe et taux de pannes forcées (FOR). Une analyse comparative révèle les insuffisances des méthodes existantes, telles que les fluctuations inattendues des résultats et leur incapacité à capturer les périodes à haut risque.

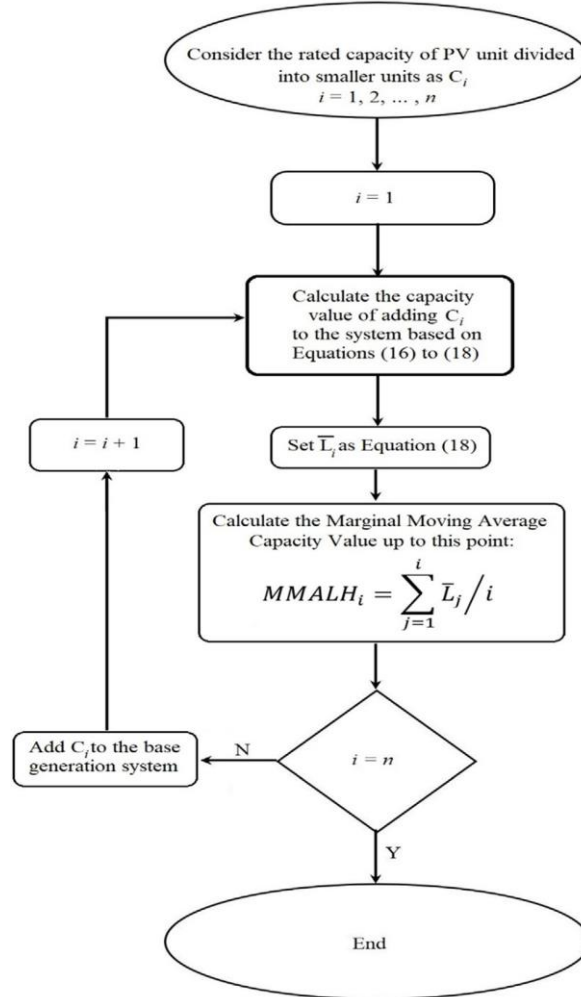


Figure 9 : Le diagramme de flux pour calculer la valeur de capacité marginale à heures limitées avec moyenne mobile (Dolatabadi et al., 2024)

La figure 9 illustre la nouvelle méthode proposée dans l'article, mettant en évidence les étapes clés de la métrique MMALH et son application pratique. La méthodologie MMALH se base sur deux concepts cruciaux. Premièrement, au lieu d'analyser toutes les heures de l'année, elle sélectionne stratégiquement six heures par jour représentant différentes conditions de demande et de production PV. Pour chacune de ces heures, elle estime les valeurs maximales, minimales et moyennes de la demande et de la production PV, ce qui améliore la précision des prévisions par rapport à une analyse horaire complète. Deuxièmement, la méthode MMALH calcule la valeur marginale de capacité en ajoutant progressivement des unités PV au système et en utilisant une méthode modifiée. Cette approche permet de capturer les variations de la valeur de capacité à chaque étape d'ajout, fournissant ainsi une représentation plus fidèle de l'impact des unités PV sur la fiabilité du système de génération. En résumé, la méthode MMALH permet une évaluation plus précise de la capacité des unités PV, facilitant ainsi une meilleure planification et exploitation des centrales photovoltaïques. Elle propose une solution pratique pour les opérateurs et planificateurs de systèmes en améliorant la précision des estimations et en optimisant l'intégration des unités PV dans le réseau électrique.

Enfin, l'article explore les avantages potentiels de la métrique MMALH dans la planification et l'exploitation des centrales photovoltaïques. En offrant une meilleure prise de décision pour le dimensionnement des installations PV, cette nouvelle approche pourrait maximiser leur valeur de capacité, réduire les coûts et optimiser les investissements dans les énergies renouvelables. D'un point de vue environnemental, l'application de la métrique MMALH contribuerait à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et à la lutte contre le changement climatique, tout en améliorant l'efficacité des centrales PV et en promouvant un avenir énergétique plus durable.

L'étude approfondie de cet article m'a permis de comprendre ce que signifie réellement la notion de charge, un concept qui m'a pris du temps à assimiler, mais que j'ai fini par maîtriser pleinement. J'ai également réalisé que les projets d'installation d'énergies renouvelables sont bien plus complexes qu'on ne le pense, impliquant une multitude de variables et de considérations techniques. En outre, j'ai appris plusieurs manières d'analyser des résultats et de présenter certaines simulations, ce qui est essentiel pour évaluer la performance des systèmes énergétiques. La méthodologie MMALH m'a enseigné l'importance de l'optimisation des processus de traitement des données pour obtenir des résultats plus précis et fiables. Ces connaissances théoriques et pratiques sont essentielles pour ma formation en énergies renouvelables et m'aident à aborder les défis techniques de manière plus stratégique et efficace pour la deuxième partie de mon stage.

III- Méthodologie du projet de stage

Protocole général de la mission de stage

Pour la mission centrale de mon stage, après l'étude bibliographique de l'article, Adrian Ilinca m'a expliqué en détail la mission que nous devons accomplir et les résultats attendus. L'objectif principal de ce projet est de reproduire les analyses effectuées dans l'article sur les panneaux photovoltaïques, mais cette fois-ci, en les appliquant aux éoliennes. En d'autres termes, nous devons trouver une amélioration de l'estimation de la capacité des parcs éoliens, en nous basant sur les méthodes et approches présentées dans l'article initial.

Monsieur Ilinca m'a d'abord demandé de rédiger un document de stage, récapitulant mon travail sur la deuxième partie de mon stage, que je devrai écrire au fur et à mesure de mon avancée. Ce document devra inclure la présentation des données nécessaires pour le projet, les données disponibles à l'heure actuelle, l'analyse des données (incluant les scripts utilisés), ainsi qu'une récapitulation de chaque méthode de calcul de charge présentée dans l'article. Cela inclut la présentation détaillée de chaque méthode, les données requises et la description des calculs associés. Ce document est disponible en annexe et est crucial pour mon stage, car il synthétise mon travail et facilite l'écriture des scripts par la suite.

Pour décrire véritablement le protocole afin d'atteindre l'objectif principal du stage, plusieurs étapes sont nécessaires. La première consiste à identifier et à collecter les données dont nous aurons besoin. Ces données sont de trois types principaux : la demande en électricité (Lt) d'une zone spécifique, la production en électricité (Gt) d'une zone et la production éolienne (Vt) de cette même zone. Les zones choisies seront suffisamment restreintes pour être représentatives d'un parc éolien, plutôt que d'une large région ou d'un pays entier, car cela ne serait pas représentatif. De plus, il serait préférable de sélectionner les mêmes zones que celles utilisées dans l'article scientifique sur les panneaux solaires, telles que le Texas (ERCOT) ou encore la Belgique. Nous nous concentrerons sur trois zones, comme cela a été fait dans l'article, pour mener à bien les simulations.

Une fois les données nécessaires identifiées, il fallut les télécharger, les organiser et les nettoyer. Cette étape inclut la classification des données, l'élimination des parasites et la mise en forme des données pour qu'elles soient prêtes à l'analyse. Ce processus de tri et de nettoyage est essentiel pour garantir la fiabilité des analyses.

Après avoir préparé les données, nous pourrions passer aux simulations et aux calculs. Il s'agira de développer des scripts et des modèles de calcul pour chaque méthode de calcul de charge présentée dans l'article. Comme indiqué dans le tableau de la figure 8, chaque méthode de calcul est différente et présente des résultats différents. Il sera donc nécessaire d'écrire un script distinct pour chacune de ces méthodes.

Adrian Ilinca m'a également conseillé de télécharger au préalable les données de production solaire. Cela nous permettra de vérifier nos résultats et de les comparer avec ceux de l'article sur les panneaux solaires. Cette étape de vérification est cruciale pour assurer la validité et la cohérence de notre approche et de nos résultats.

Enfin, nous reproduirons un tableau ressemblant à la figure 8 en effectuant les calculs pour différentes zones. Nous calculerons la charge éolienne en utilisant les six méthodes de calcul de charge et présenterons ces résultats sous forme de tableau. En résumant, le projet se déroulera en plusieurs phases : collecte et nettoyage des données, affichage des courbes de données, développement de scripts pour chaque méthode de calcul de charge, simulation des charges pour différentes combinaisons de données et formation d'un tableau récapitulant les différents résultats.

Outils et instruments de recherche employés

Pour mener à bien mes futures recherches de données dans le cadre de ce stage, j'utiliserai plusieurs outils et instruments de recherche. Tout d'abord, internet constituera une source essentielle d'information. Je consulterai divers sites internet et bases de données spécialisées dans le domaine de l'énergie et des énergies renouvelables, où je pourrai obtenir des données plus ou moins récentes. Ces sources en ligne incluent des bases de données ouvertes.

Pour l'analyse initiale et le tri des données, j'utiliserai Microsoft Excel. Cet outil me permettra de structurer les données collectées et de réaliser des tris préliminaires. Ensuite, j'emploierai l'application Notes pour répertorier et organiser les données de manière structurée en copiant celles d'Excel. Cet outil m'aidera à centraliser toutes les informations pertinentes, facilitant ainsi leur consultation et leur utilisation ultérieure avec Python.

Python sera l'outil principal pour le traitement avancé des données. J'utiliserai des bibliothèques spécialisées pour le tri et l'homogénéisation des données, Numpy pour les calculs numériques, et Matplotlib pour la visualisation des résultats. Grâce à Python, je pourrai automatiser les processus de traitement des données, développer des scripts pour modéliser les tendances des données, et effectuer tous les calculs nécessaires pour chaque méthode de calcul de charge, et de façon rapide et répétitive.

En combinant ces outils, je pourrai effectuer une recherche de données rigoureuse, une analyse approfondie, et des calculs précis pour répondre à la mission principale de mon stage.

IV- Description des travaux réalisés

Recherche et tri des données

Pour rappel, nous aurons besoin de trois types de données essentielles : la production globale d'une région (Gt), la demande ou charge d'une région (Lt), et enfin la production éolienne et solaire (Vt) de cette même région. Elles doivent être des variables horaires, représentatives d'une année complète, soit de 8760 heures. Ces trois variables sont cruciales car elles sont les éléments de base des calculs de charge dans l'article, nécessaires pour les six méthodes de calcul de charge. L'intégralité des méthodes repose uniquement sur ces trois types de données. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une recherche approfondie sur internet afin de trouver ces données spécifiques et de s'assurer qu'elles sont disponibles pour la même région.

Le début de mes recherches de données fut assez compliqué, car il est difficile de trouver la production horaire pour des parcs éoliens spécifiques. J'ai d'abord cherché auprès de grands groupes en France, mais je n'ai trouvé des informations détaillées que pour des parcs éoliens offshore. Adrian Ilinca m'a alors conseillé de suivre la méthode de leur article, en recherchant des données pour des régions plus restreintes comme la Belgique, où le parc éolien est bien défini. De même, il m'a suggéré d'examiner le Texas (ERCOT : Electric Reliability Council of Texas) car le parc éolien y est également assez concentré. Choisir des pays ou des régions de taille modeste permet de se rapprocher d'une configuration de parc éolien, ce qui est essentiel pour calculer la charge de manière utile pour de futures installations. Avec cette approche, il m'a été plus facile de trouver les données nécessaires, même si rassembler l'ensemble des trois types de données (production globale, demande, et production éolienne et solaire) pour une même zone restait un défi.

J'ai alors trouvé différentes zones qui semblent avoir le plus de données disponibles. Monsieur Ilinca m'avait conseillé le Texas (ERCOT) et le Québec (Hydro-Québec) après nos discussions sur les différentes zones mentionnées précédemment. Après mes recherches, j'ai identifié plusieurs régions pour lesquelles les trois variables nécessaires (production globale, demande, et production éolienne et solaire) étaient disponibles sur internet : le Texas, la province d'Alberta (AESO : Alberta Electric System Operator), ainsi que plusieurs pays d'Europe, dont la Belgique et le Luxembourg, qui sont des zones plus restreintes et donc particulièrement intéressantes. Les autres zones restreintes que j'ai examinées ne présentaient pas de données complètes, et enfin le Québec (dont il manquait juste la production éolienne, mais nous avons prévu de la calculer à partir des données de vitesse de vent).

Après avoir trouvé ces données et leurs bases de données sur internet, il est important de savoir lesquelles j'allais utiliser. De préférence, je comptais utiliser trois zones, comme dans l'article scientifique. Pour cela, Monsieur Ilinca m'a fourni une méthode afin de sélectionner les différentes zones qui me faciliteraient au mieux la tâche. Les étapes à suivre qu'il m'a envoyées sont les suivantes :

« 1. *Complétude et facilité d'avoir les données (directement disponibles ou peu de traitement);*
2. *Disponibilité des données solaires pour valider le processus à l'aide des résultats publiés dans l'article*

3. *Disponibilité des données éoliennes pour les données du point 2.*

Si les validations ne sont pas concluantes sur une région géographique, nous passons à une autre région géographique. »

Les différentes sources que j'ai identifiées sont mentionnées dans les titres des figures qui suivront, et les données sont disponibles en format Excel sur les sites que j'ai consultés. La recherche de ces données horaires précises a varié en difficulté selon les sites. Voici une description détaillée de chaque source pour les zones sélectionnées, ainsi que mon choix pour les trois zones que j'allais utiliser, en suivant les étapes présentées précédemment :

Texas (ERCOT)

Concernant la production éolienne et solaire au Texas (Vt), les données ont été assez faciles à trouver, mais le problème était que les données historiques n'étaient disponibles qu'heure par heure. Cela signifie que chaque fichier téléchargeable ne contenait qu'une heure de données à la fois. Pour obtenir une année complète de données, j'ai donc dû télécharger manuellement toutes les heures de l'année, ce qui a été un processus fastidieux. Une fois toutes les données téléchargées, j'ai fusionné chaque fichier Excel correspondant à chaque heure en un seul fichier Excel global, comme présenté dans la figure 10.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Nom de la Source	Date	Heure	Production Réelle du Texas (kW)	Production Réelle du Sud Houston (kW)	Production Réelle de l'Ouest (kW)	Production Réelle du Nord (kW)	Passage heure d'Hiver
1	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	1	21752.91	4318.38	15100.73	2333.8	N
2	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	2	21569.51	3685.25	15368.05	2516.21	N
3	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	3	21035.48	3544.24	14954.69	2536.55	N
4	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	4	20595.37	3571.74	14505.72	2517.91	N
5	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	5	20387.59	3295.9	14590.41	2501.28	N
6	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	6	20056.58	3049.63	14486.4	2520.55	N
7	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	7	19479.97	2726.14	14242.92	2510.91	N
8	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	8	17940.04	2288.57	13283.8	2367.67	N
9	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	9	16435.69	1826.29	12345.23	2264.17	N
10	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	10	13971.4	1933.53	10271.1	1767.77	N
11	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	11	10273.15	2962.39	6904.83	1305.93	N
12	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	12	9406.46	2336.22	6078.3	991.94	N
13	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	13	9701.34	2708.48	5946.21	1046.65	N
14	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	14	8283.2	2721.32	4600.52	961.36	N
15	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	15	7609.7	2771.16	3833.42	1005.12	N
16	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	16	8446.04	3070.75	4344.99	1030.3	N
17	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	17	9374.43	3693.1	4660.98	1020.35	N
18	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	18	10981.87	4430.8	5344.73	1206.34	N
19	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	19	16139.49	5204.23	8918.7	2016.56	N
20	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	20	20223.3	5608.28	12317.29	2297.73	N
21	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	21	21557.42	5716.97	13419.13	2421.32	N
22	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	22	22518.8	5856.5	14175.77	2486.53	N
23	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	23	23886.76	6305.16	15000.35	2581.25	N
24	cdr.00013028.00000000	01/01/2023	24	23563.64	6116.76	15050.59	2396.29	N

Figure 10 : Données de production éolienne (Vt) horaire en kW en 2023 au Texas (Source : <https://www.ercot.com/mp/data-products/data-product-details?id=NP4-732-CD>)

Pour la demande (Lt) du Texas, les données étaient beaucoup plus faciles à obtenir. Le tableau Excel se présente de manière claire et ordonnée, avec la demande totale du Texas répertoriée pour chaque heure. Chaque ligne du tableau correspond à une heure spécifique, ce qui simplifie grandement l'analyse et l'utilisation des données.

Cependant, la production générale (Gt) était la plus compliquée à gérer. Les données sont organisées de manière complexe dans l'Excel, avec une page distincte pour chaque mois de l'année. Les données sont présentées par intervalles de quinze minutes, affichées horizontalement, tandis que les dates sont présentées verticalement. De plus, les données ne montrent pas la production totale, mais plutôt chaque type de production individuellement, comme illustré dans la figure 11. Pour gagner du temps, j'ai décidé de trier ces données seulement si je choisis le Texas comme future zone de calcul.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	Date	Fuel	Settlement Type	Total	0:15	0:30	0:45	1:00	1:15	1:30	1:45	2:00	2:15	2:30	2:45	3:00	3:15	3:30	3:45	4:00
1	01/01/2023	Biomass	FINAL	399.4	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
2	01/01/2023	Coal	FINAL	106 976.0	921.6	893.1	881.6	863.9	855.5	854.0	847.0	845.3	844.2	853.5	840.2	840.7	847.5	842.7	844.6	848.5
3	01/01/2023	Gas	FINAL	19 409.2	164.3	162.0	158.9	158.2	156.4	152.6	147.9	147.8	146.9	146.3	145.7	145.8	145.0	144.5	144.0	142.6
4	01/01/2023	Gas-CC	FINAL	216 099.0	1 401.9	1 339.0	1 295.1	1 280.6	1 274.9	1 278.5	1 264.5	1 263.9	1 259.4	1 261.5	1 249.6	1 262.2	1 274.7	1 269.9	1 272.9	1 272.2
5	01/01/2023	Hydro	FINAL	259.7	4.1	6.0	6.0	5.9	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6	01/01/2023	Nuclear	FINAL	122 562.2	1 277.5	1 277.7	1 277.6	1 277.8	1 277.5	1 277.7	1 277.5	1 277.4	1 277.3	1 277.4	1 277.5	1 277.6	1 277.5	1 277.3	1 277.4	1 277.3
7	01/01/2023	Other	FINAL	1 607.4	1.4	6.5	6.9	5.0	10.9	3.8	8.1	10.3	4.1	13.7	4.4	22.7	8.9	4.8	3.4	4.0
8	01/01/2023	Solar	FINAL	46 505.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	01/01/2023	WLS	FINAL	-1 834.5	-29.8	-2.7	-6.1	-10.1	-11.2	-22.7	-17.7	-6.3	-18.4	-11.4	-17.0	-6.0	-11.3	-12.7	-21.7	-20.0
10	01/01/2023	Wind	FINAL	394 469.3	5 389.3	5 398.2	5 439.6	5 458.3	5 426.2	5 422.9	5 351.8	5 299.9	5 298.7	5 256.8	5 238.3	5 178.1	5 174.0	5 149.7	5 123.2	5 103.6
11	01/02/2023	Biomass	FINAL	368.6	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
12	01/02/2023	Coal	FINAL	110 342.1	889.4	882.4	868.7	860.8	859.5	854.0	848.5	849.0	846.1	848.3	843.6	841.9	846.1	846.4	845.2	843.4
13	01/02/2023	Gas	FINAL	17 529.0	120.8	119.8	120.3	120.2	119.6	122.4	123.6	123.8	124.7	124.7	123.6	122.9	123.8	123.0	122.8	122.8
14	01/02/2023	Gas-CC	FINAL	199 358.3	1 249.4	1 238.9	1 231.5	1 232.8	1 239.6	1 235.8	1 231.0	1 231.5	1 229.3	1 240.2	1 229.3	1 227.1	1 236.6	1 242.6	1 244.8	1 248.5
15	01/02/2023	Hydro	FINAL	308.7	3.7	5.7	5.8	5.7	1.4	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3
16	01/02/2023	Nuclear	FINAL	122 467.8	1 276.0	1 276.0	1 275.9	1 276.0	1 275.9	1 275.9	1 275.9	1 275.8	1 276.2	1 276.2	1 275.9	1 275.9	1 276.2	1 275.8	1 276.0	1 276.0
17	01/02/2023	Other	FINAL	1 793.9	2.0	4.9	13.5	19.9	2.3	4.0	1.7	2.2	3.1	11.1	4.0	0.1	20.9	12.7	3.9	4.2
18	01/02/2023	Solar	FINAL	37 035.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	01/02/2023	WLS	FINAL	-2 175.3	-38.3	-28.1	-16.0	-6.2	-16.4	-18.7	-26.9	-28.6	-20.8	-15.5	-15.3	-43.4	-32.4	-17.0	-18.6	-26.3
20	01/02/2023	Wind	FINAL	492 463.0	5 718.3	5 683.5	5 595.3	5 518.6	5 512.6	5 478.1	5 430.2	5 360.9	5 347.2	5 331.9	5 361.5	5 323.5	5 196.2	5 218.7	5 205.9	5 177.3

Figure 11 : Données de production par type de fuel en kW en 2023 au Texas (Source : <https://www.ercot.com/gridinfo/generation>)

En conclusion, bien que l'étape 1 du protocole de Monsieur Ilinca pour sélectionner cette zone géographique soit peu concluante en raison de la complexité des données, les étapes 2 et 3 sont respectées. J'attends donc de voir les données des autres zones géographiques avant de prendre une décision finale sur lesquelles utiliser.

Province d'Alberta (AESO)

Pour l'Alberta (province à l'ouest du Canada), les données de production éolienne et solaire (Vt) sont très bien ordonnées. Elles sont présentées de manière similaire à celles de la production éolienne et solaire (Vt) du Texas (figure 10), avec des données horaires et les résultats totaux par heure clairement indiqués. L'Excel a pu être téléchargé directement, facilitant ainsi l'analyse.

Cependant, les fichiers Excel pour la production générale (Gt) et la demande générale (Lt) se sont révélés beaucoup plus complexes à trier. Pour la production générale (Gt), les données sont regroupées dans une seule cellule, avec les différentes régions présentées verticalement, comme illustré dans la figure 12. Cette présentation rend le tri et l'analyse des données particulièrement difficiles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Date (MST),Date (MPT),Asset Short Name,Asset Name,Asset Grouping,Volume,Maximum Capability,System Capability,Fuel Type,Sub Fuel Type,Planning Area,Region												
2	2023-01-01 00:00:00,2023-01-01 00:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.58612011379665,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
3	2023-01-01 01:00:00,2023-01-01 01:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,81.33655123392741,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
4	2023-01-01 02:00:00,2023-01-01 02:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,81.49860935211181,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
5	2023-01-01 03:00:00,2023-01-01 03:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,81.88258220248753,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
6	2023-01-01 04:00:00,2023-01-01 04:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.03228690253364,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
7	2023-01-01 05:00:00,2023-01-01 05:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.52715068393283,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
8	2023-01-01 06:00:00,2023-01-01 06:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,84.80176169501411,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
9	2023-01-01 07:00:00,2023-01-01 07:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.83167001512315,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
10	2023-01-01 08:00:00,2023-01-01 08:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,84.3272167078654,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
11	2023-01-01 09:00:00,2023-01-01 09:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,83.37010240342882,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
12	2023-01-01 10:00:00,2023-01-01 10:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,81.94670404222276,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
13	2023-01-01 11:00:00,2023-01-01 11:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,81.57363051944309,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
14	2023-01-01 12:00:00,2023-01-01 12:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.19073320176867,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
15	2023-01-01 13:00:00,2023-01-01 13:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.10685450659858,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
16	2023-01-01 14:00:00,2023-01-01 14:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.08018454233806,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												
17	2023-01-01 15:00:00,2023-01-01 15:00:00,AFG1,AFG1 APF Athabasca,AFG1,82.44473320007324,131.0,67.0,OTHER,Wood/Refuse,27,Northeast												

Figure 12 : Données de production générale en MW en 2023 à Alberta (Source : <https://www.aeso.ca/market/market-and-system-reporting/data-requests/historical-generation-data/>)

De même, pour la demande générale, les données sont divisées par zones (AREA). Il était difficile de déterminer quelle AREA correspondait à quel endroit et de savoir si l'ensemble des données représentait la totalité de l'Alberta, comme illustré dans la figure 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	DT_MST	AREA13	AREA17	AREA18	AREA19	AREA20	AREA21	AREA22	AREA23	AREA24	AREA25	AREA26	AREA27	AREA28	AREA29	AREA30
2	#####	67,72888	6,0397	33,10275	60,07542	263,8163	76,63242	45,685	24,01168	76,7131	511,2293	258,0112	68,09343	65,49455	86,15157	116,2061
3	#####	67,35173	5,976805	32,51207	59,10025	266,5274	77,25336	46,272	23,6068	76,5355	508,2898	258,1097	67,76336	65,1933	85,99582	115,8082
4	#####	66,07366	6,011335	31,32705	58,67249	264,6605	77,59947	46,23188	22,83508	75,98536	515,3838	256,1174	69,61787	66,17676	86,03959	116,0949
5	#####	65,25181	6,032455	32,38234	59,07907	262,5986	77,55261	46,12536	22,49572	76,66322	507,7051	254,3597	70,24729	65,85219	87,51471	116,1503
6	#####	65,19992	6,05482	32,006	59,21664	264,4169	75,78417	45,20772	23,57656	76,75518	503,0577	255,3892	69,67759	66,09424	86,60424	115,3434
7	#####	65,55252	6,14632	31,76024	59,13944	264,4962	74,35761	45,09804	23,81812	75,62263	504,1655	238,7051	70,53022	66,23077	88,69206	114,2223
8	#####	67,8709	6,219745	33,06345	61,9664	271,1794	75,94203	45,34412	24,64264	74,79912	495,3331	232,1532	73,1934	68,84476	90,89281	114,6484
9	#####	69,79025	6,203815	35,78729	63,72082	281,5233	75,85752	44,47472	25,24172	74,70492	473,0568	176,6963	73,22912	64,93066	91,40975	114,6765
10	#####	70,71711	6,22903	36,07619	63,7297	285,4553	75,41136	43,69444	24,60232	73,59765	483,8435	163,6853	75,59616	65,25286	88,67877	112,2965
11	#####	72,47398	5,43022	37,65674	66,82885	283,0703	76,71381	43,00212	25,35064	73,47094	477,1591	144,9328	75,9477	69,73981	87,22375	115,9378
12	#####	72,86964	5,53642	38,00479	67,81653	287,9978	78,12303	44,79608	25,31116	73,93771	483,6614	144,5712	76,03317	71,43324	88,74347	118,3958
13	#####	72,01328	6,14008	38,03857	67,72913	289,9701	76,72074	44,5414	25,48728	73,58581	471,4964	145,8732	75,53274	72,10959	89,39563	117,2012
14	#####	71,6262	6,738055	38,04304	67,07565	291,1776	74,35998	45,14872	25,84452	72,40776	478,2445	158,2212	74,91126	71,51661	87,62456	116,2249
15	#####	72,74436	7,308055	37,68196	66,59327	288,5804	72,83874	44,98492	26,032	71,54106	476,307	155,1164	74,80863	71,10658	86,72268	115,2876

Figure 13 : Données de la demande en MW en 2023 à Alberta (Source : <https://www.aeso.ca/market/market-and-system-reporting/data-requests/historical-generation-data/>)

En conséquence, le tri de ces données s'annonçait très compliqué, et l'étape 1 du protocole pourrait être fortement compromise. Face à cela, j'ai décidé de poursuivre mes recherches pour trouver des données plus adaptées à mes besoins.

Belgique et Luxembourg

Pour la Belgique et le Luxembourg, les données s'annonçaient beaucoup plus simples à traiter et à obtenir que pour d'autres régions. J'ai découvert un site très utile ([entsoe](https://transparency.entsoe.eu)) qui présente de manière détaillée les données de production pour chaque type de source énergétique, ainsi que les données de la demande électrique, toutes les quinze minutes sur l'ensemble de l'année. Comme l'illustre la figure 14, ces données sont facilement accessibles pour chaque pays. En particulier, pour la Belgique et le Luxembourg, les données étaient complètes pour la production totale (Gt), englobant l'ensemble des moyens de production, ainsi que pour la demande (Lt) et les productions spécifiques éolienne et solaire (Vt).

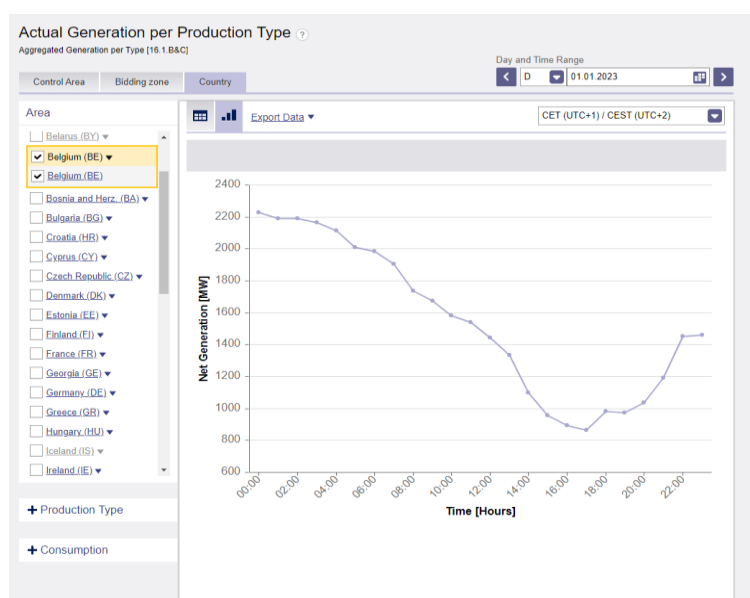


Figure 14 : Présentation du site entsoe et données de la production éolienne en MW au cours d'une journée en 2021 en Belgique (Source : <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>)

J'ai donc téléchargé ces données, et elles étaient remarquablement bien organisées dans les fichiers Excel, comme on peut le constater sur la figure 15. Le seul inconvénient résidait dans le fait que les données étaient représentées à un intervalle de quinze minutes, mais il serait relativement simple de les transformer en données horaires lors du futur traitement.

1	Total Load - Day Ahead / Actual		
2	Actual Total Load [6.1.A]		
3	Day-ahead Total Load Forecast [6.1.B]		
4	01.01.2021 00:00 - 01.01.2022 00:00 - CET/CEST		
5			
6	Belgium (BE)		
7	Time	Day-ahead Total Load Forecast	Actual Total Load
8		[MW]	[MW]
9	00:00 - 00:15	9242	9486
10	00:15 - 00:30	9152	9392
11	00:30 - 00:45	9062	9238
12	00:45 - 01:00	8856	9068
13	01:00 - 01:15	8717	8993
14	01:15 - 01:30	8642	8815
15	01:30 - 01:45	8525	8689
16	01:45 - 02:00	8402	8533
17	02:00 - 02:15	8291	8427
18	02:15 - 02:30	8187	8327
19	02:30 - 02:45	8135	8217
20	02:45 - 03:00	8031	8083
21	03:00 - 03:15	7940	7986
22	03:15 - 03:30	7836	7916
23	03:30 - 03:45	7801	7915
24	03:45 - 04:00	7731	7834
25	04:00 - 04:15	7664	7799
26	04:15 - 04:30	7608	7763
27	04:30 - 04:45	7625	7777
28	04:45 - 05:00	7618	7723
29	05:00 - 05:15	7595	7771
30	05:15 - 05:30	7562	7762

Figure 15 : Données de la demande en MW en 2021 en Belgique (Source : <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>)

Ainsi, les trois étapes du protocole établi pour ce projet ont été respectées, me permettant de choisir la Belgique et le Luxembourg comme bases pour l'analyse des données et les calculs futurs. Il me restait à examiner une dernière zone géographique pour compléter mon analyse : le Québec, en raison de la disponibilité et de la pertinence des données pour cette région d'après Monsieur Ilinca.

Hydro-Québec

Pour le Québec, Hydro-Québec propose directement sur son site des données de production et de demande. Bien que les données de production éolienne ne soient pas disponibles, les données de la production et de la demande couvrent la période de 2018 à 2021. Les informations sont présentées de manière variée et technique dans les fichiers Excel fournis. Hydro-Québec a pris soin de définir chaque terme utilisé sur son site, même si cela a été difficile pour la compréhension des données. J'ai donc consacré du temps à identifier les variables correspondant à la demande (Lt) et à la production totale (Gt). Après avoir étudié attentivement les définitions fournies, j'ai marqué en orange et souligné les deux variables les plus pertinentes, comme illustré sur la figure 16 sur l'Excel. Suite à la confirmation de Monsieur Ilinca, j'ai officiellement attribué ces variables à Gt et Lt. Il est à noter que l'Excel est très bien structuré, avec des données organisées heure par heure sans interruption.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Rang	Mois	Jour	Heure	BRD_RI (MWh) - Demande Lt	Achats long terme + Électricité interruptible (MWh) - Importations long terme	Achats court terme - Importation court terme	BRD_RI (HQP) (MWh)	Consommation des centrales (MWh)	Proxi pour évaluer le volume d'électricité mobilisée par le distributeur au titre d'électricité patrimoniale (MWh) - Production Gt (sans importation)	Volume d'électricité patrimoniale (bâtonnets affectés) (MWh)	Volume d'électricité mobilisée par le distributeur en dépassement de l'électricité patrimoniale (MWh)
1					1	2	3	4=1-2-3	5	6=4-5	7	8=6-7
2												
3	1	1	1	1	23 703	2 126	0	21 577	44	21 533	22 349	0
4	2	1	1	2	23 626	2 129	0	21 497	44	21 453	22 310	0
5	3	1	1	3	23 610	2 131	0	21 479	43	21 436	22 294	0
6	4	1	1	4	23 420	2 128	0	21 292	43	21 249	22 180	0
7	5	1	1	5	23 837	2 132	0	21 705	45	21 660	22 437	0
8	6	1	1	6	24 903	2 129	0	22 774	47	22 727	23 190	0
9	7	1	1	7	25 615	2 129	0	23 486	49	23 437	23 747	0
10	8	1	1	8	25 864	2 127	0	23 737	50	23 687	23 898	0
11	9	1	1	9	25 774	2 129	0	23 645	50	23 595	23 840	0
12	10	1	1	10	25 364	2 135	0	23 229	49	23 180	23 555	0
13	11	1	1	11	24 976	2 134	0	22 842	48	22 794	23 244	0
14	12	1	1	12	24 644	2 135	0	22 509	48	22 461	22 984	0
15	13	1	1	13	24 352	2 141	0	22 211	49	22 162	22 777	0
16	14	1	1	14	24 519	2 141	0	22 378	49	22 329	22 897	0
17	15	1	1	15	24 503	2 139	0	22 364	50	22 314	22 892	0
18	16	1	1	16	25 239	2 142	0	23 097	52	23 045	23 445	0
19	17	1	1	17	26 745	2 147	0	24 598	56	24 542	24 643	0
20	18	1	1	18	27 140	2 140	0	25 000	55	24 945	25 075	0

Figure 16 : Historique des données de production et de consommation d'électricité au Québec en MW en 2021 (Source : <https://www.hydroquebec.com/documents-donnees/donnees-ouvertes/historique-production-consommation/>)

Ainsi, l'étape 1 du protocole est parfaitement respectée pour Hydro-Québec. Cependant, les étapes 2 et 3 du protocole ne sont pas entièrement respectées, en raison de l'absence de données sur la production éolienne. En concertation avec Monsieur Ilinca, j'ai décidé de tout de même choisir cette zone, car le traitement des données pour le Texas et l'Alberta aurait nécessité un temps considérable par rapport au calcul de la production éolienne pour le Québec.

En conclusion, ma décision finale pour la poursuite de mon projet a été de sélectionner les trois zones suivantes : la Belgique, le Luxembourg et le Québec.

À travers ces recherches, j'ai pris conscience de la complexité à la collecte et à la gestion des données tout en sachant en que j'ai pu changer de région. Si il était indispensable de chercher les données pour une seule et même région, cela représenterait un défi supplémentaire. Cette expérience m'a permis de mesurer l'ampleur du travail de recherche de données nécessaires dans le cadre d'un projet de recherche.

Calculs effectués afin de compléter les données manquantes

Comme mentionné précédemment, nous n'avions pas accès aux données de production éolienne du Québec en ligne, il a donc fallu les estimer pour obtenir des valeurs approximatives. Étant donné que la production générale (Gt) et la demande (Lt) étaient de haute qualité, j'ai pu consacrer du temps au calcul des 8760 valeurs annuelles de production éolienne pour le Québec.

Pour ce faire, deux éléments étaient essentiels : la vitesse moyenne du vent et la capacité totale installée au Québec. Concernant la vitesse du vent, j'ai consulté le site du gouvernement du Canada (Source : [Gouvernement du Canada](#)), qui propose des données horaires pour l'année 2021. Comme l'illustre la figure 17, ce site permet de télécharger les données de vitesse du vent par mois. J'ai ainsi récupéré les fichiers Excel correspondants pour chaque mois de 2021, que j'ai ensuite

regroupés et triés, car les données étaient initialement désorganisées sur une seule ligne. Enfin, j'ai converti les valeurs en mètres par seconde (m/s) pour obtenir des données prêtes à l'emploi.

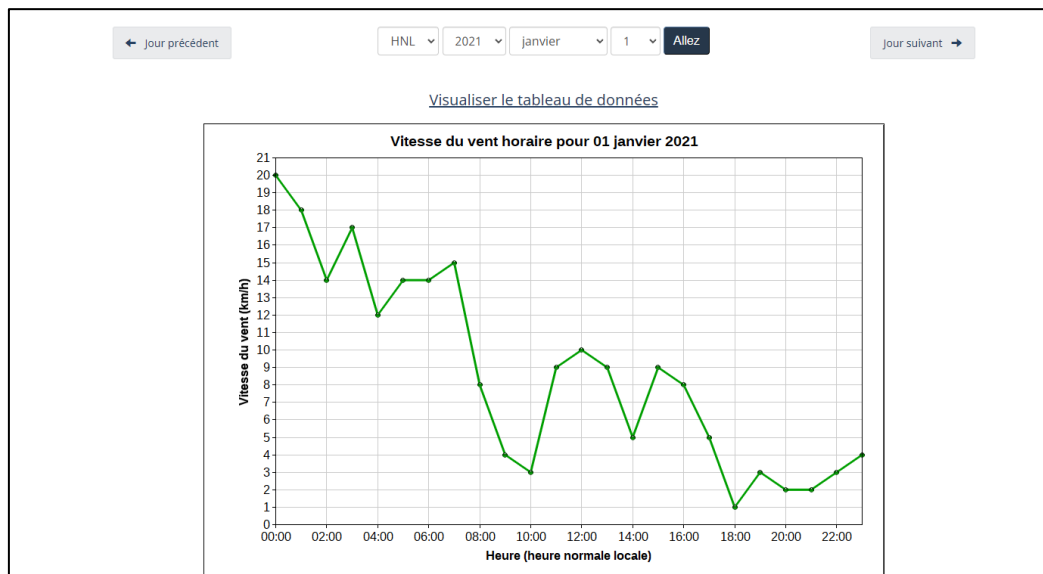


Figure 17 : Historique des données de vitesse du vent horaire au Québec en MW en 2021 sur une journée (Source : https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html)

Concernant la capacité installée, j'ai simplement cherché sur le site du gouvernement du Québec (Source : economie.gouv.qc.ca), et ils annoncent une capacité totale installée de 4000 MW. Avec ces deux informations, j'ai pu calculer la production éolienne horaire du Québec grâce à la formule :

$$P_t = n_e \times \eta \times 0,37 \times \frac{\pi}{4} \times V^3 \times D^2$$

Avec :

- P_t : La puissance totale produite par toutes les éoliennes (en Watts).
- n_e : Le nombre d'éoliennes.
- η : Le rendement global du système (on fixe 0,6 ici)
- 0,37 : Coefficient simplifié intégrant densité de l'air et coefficient de puissance moyen.
- $\frac{\pi}{4}$: Facteur pour calculer la surface de balayage du rotor.
- V^3 : La vitesse du vent élevée au cube, proportionnelle à la puissance.
- D^2 : Le diamètre du rotor au carré, déterminant la surface de balayage.

Effectivement, la formule inclut des paramètres tels que le nombre d'éoliennes et le diamètre des pales. Partant de la capacité installée, j'ai supposé que toutes les éoliennes étaient identiques, en utilisant des dimensions moyennes pour le Canada. Selon le site de la Régie de l'énergie du Canada (Source : Canada Energy Regulator) le diamètre moyen des pales est de 114 mètres, et la capacité

d'une éolienne est de 3,3 MW. En divisant la capacité totale par la capacité individuelle, j'ai estimé un nombre total de 1212 éoliennes, bien que ce chiffre est basé sur plusieurs hypothèses.

Une fois le diamètre et le nombre d'éoliennes hypothétiques déterminés pour le Québec, j'ai pu appliquer la formule en utilisant Excel pour intégrer les vitesses du vent. Cela m'a permis de calculer 8760 valeurs de production éolienne sur l'année, comme illustré dans la figure 18.

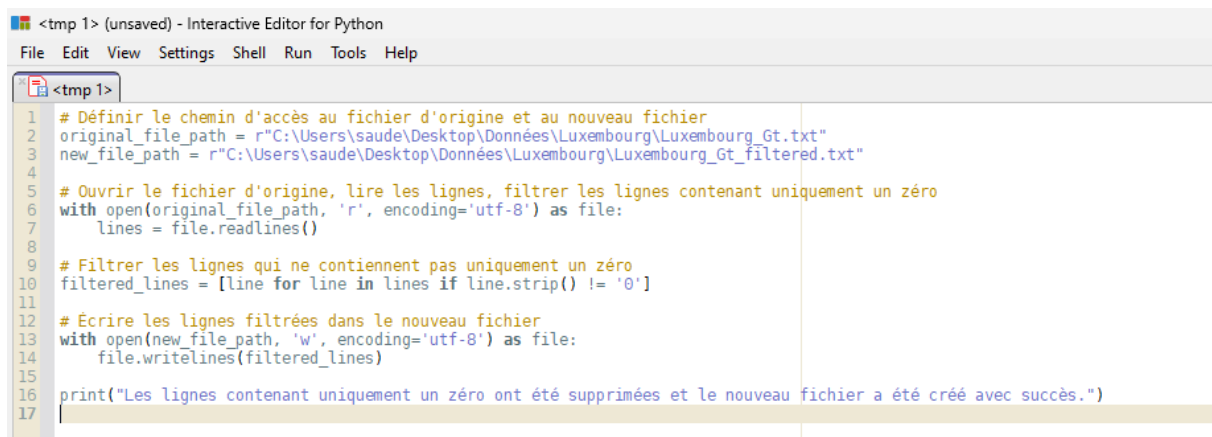
C2 : $=1212*0,6*0,37*(PI()/4)*B2^3*114^2*10^{(-6)}$			
	A	B	C
1	Vitesse du vent km/h	Vitesse du vent m/s	Puissance éolienne (MW)
2	20	5,56	470,91
3	18	5,00	343,29
4	14	3,89	161,52
5	17	4,72	289,20
6	12	3,33	101,72
7	14	3,89	161,52
8	14	3,89	161,52
9	15	4,17	198,67
10	8	2,22	30,14
11	4	1,11	3,77
12	3	0,83	1,59
13	9	2,50	42,91
14	10	2,78	58,86
15	9	2,50	42,91
16	5	1,39	7,36
17	9	2,50	42,91
18	8	2,22	30,14
19	5	1,39	7,36
20	1	0,28	0,06

Figure 18 : Données de vitesse du vent en km/h et m/s et de production éolienne en MW au Québec en 2021

Répertoire des données

Pour organiser les données, j'ai utilisé l'application Bloc-notes, qui permet de créer des fichiers au format .txt, un format que Python peut lire facilement. En effet, je trouve qu'un fichier texte est plus simple à manipuler qu'un fichier Excel lorsqu'il s'agit de traiter des données avec Python. La première étape a donc consisté à transférer les données de l'Excel vers un fichier texte. J'ai commencé par sélectionner toutes les colonnes, puis j'ai copié les données brutes dans des fichiers texte, en les disposant sous forme de lignes successives.

Cependant, les données n'étaient pas parfaitement triées et contenaient des éléments indésirables, comme des lignes vides (correspondant à des espaces dans Excel), des zéros parasites, ou encore des formats de nombres incorrects. Pour remédier à ces problèmes, j'ai utilisé Python pour nettoyer les données. Par exemple, la figure 19 montre un tri réalisé avec Python pour supprimer les zéros parasites des lignes concernant la production générale (Gt) du Luxembourg.



```
1 # Définir le chemin d'accès au fichier d'origine et au nouveau fichier
2 original_file_path = r"C:\Users\saude\Desktop\Données\Luxembourg\Luxembourg_Gt.txt"
3 new_file_path = r"C:\Users\saude\Desktop\Données\Luxembourg\Luxembourg_Gt_filtered.txt"
4
5 # Ouvrir le fichier d'origine, lire les lignes, filtrer les lignes contenant uniquement un zéro
6 with open(original_file_path, 'r', encoding='utf-8') as file:
7     lines = file.readlines()
8
9 # Filtrer les lignes qui ne contiennent pas uniquement un zéro
10 filtered_lines = [line for line in lines if line.strip() != '0']
11
12 # Écrire les lignes filtrées dans le nouveau fichier
13 with open(new_file_path, 'w', encoding='utf-8') as file:
14     file.writelines(filtered_lines)
15
16 print("Les lignes contenant uniquement un zéro ont été supprimées et le nouveau fichier a été créé avec succès.")
17
```

Figure 19 : Script Python permettant la suppression de zéros parasites du fichier .txt de la production générale (Gt) du Luxembourg

Un autre problème que j'ai résolu, comme mentionné précédemment dans la présentation des données, concernait la Belgique et le Luxembourg, où les données n'étaient pas fournies à l'heure, mais par tranche de quinze minutes. Pour pallier cela, j'ai écrit un script Python qui calcule la moyenne des quatre quarts d'heure de chaque heure, permettant ainsi d'obtenir des données horaires moyennes.

Une fois cette étape réalisée, il était essentiel de vérifier que chaque fichier texte contenait bien 8760 valeurs, afin d'assurer le bon déroulement des futurs calculs. Finalement, j'ai obtenu plusieurs fichiers .txt organisés avec toutes les valeurs, ligne par ligne, triées selon les indicateurs Gt, Lt et Vt (pour l'éolien ou le solaire), pour les trois zones étudiées : Belgique, Luxembourg et Québec.

Analyse des données

Après avoir répertorié les données, j'ai procédé à leur analyse en m'inspirant de la méthodologie utilisée dans l'article sur les panneaux solaires de Dolatabadi et al. (2024). Cette analyse consistait à tracer des courbes pour chaque variable, à savoir Gt, Lt et Vt, pour chaque zone étudiée, en s'appuyant sur les fichiers texte précédemment préparés. Chaque courbe représente les données horaires sur l'ensemble de l'année. Conformément aux recommandations de Monsieur Ilinca, il était crucial de mettre en évidence la séparation des saisons, voire des mois, afin de bien observer les tendances de production et de comparer ces résultats avec les données utilisées dans l'article. Cela permet également d'évaluer la fiabilité des données en vérifiant leur cohérence avec la réalité. La figure 20 illustre l'analyse que j'ai réalisée avec Python pour la demande Lt au Québec en 2021 (le code Python utilisé pour cette analyse est inclus en annexe).

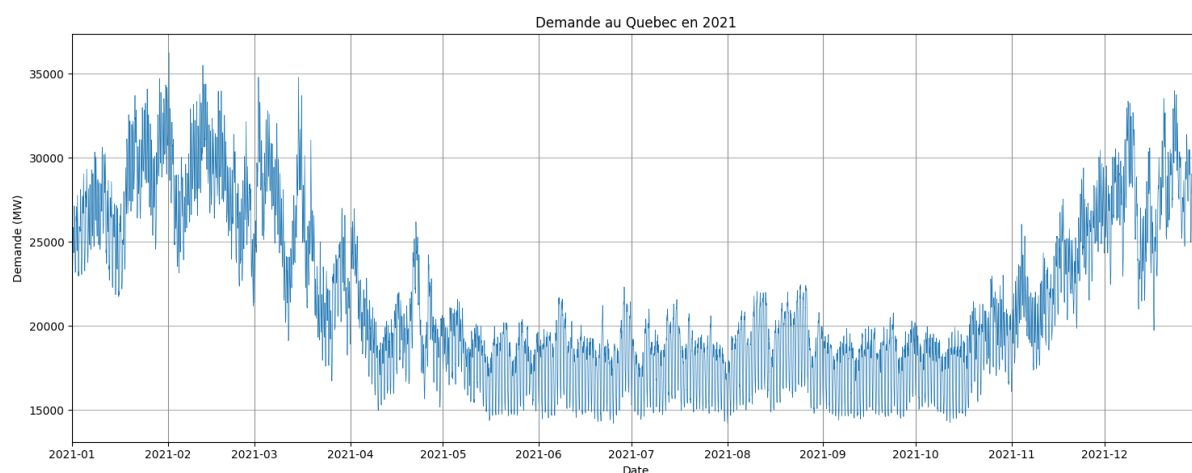


Figure 20 : Courbe de la demande en électricité en MW au Québec en 2021

Après avoir répété ces opérations pour chaque fichier texte et pour chaque variable de chaque zone, j'ai généré un total de neuf courbes correspondant à l'analyse des données. Toutes ces courbes sont présentées en annexe.

Cette expérience m'a appris qu'il est crucial de présenter l'analyse des données dans un article scientifique pour éclairer le contexte de la recherche aux lecteurs et garantir la transparence des données. Une analyse détaillée permet de mieux identifier les tendances et les éventuelles anomalies. J'ai également pris conscience de l'importance du temps nécessaire pour trier les données et des défis associés à leur répertoriage, soulignant que ce processus peut être complexe et exigeant.

Description des méthodes de calcul de charge existantes

Le calcul de la charge des éoliennes pour les trois zones sélectionnées a constitué l'étape la plus cruciale et la plus représentative de mon travail de stage. J'ai consacré beaucoup de temps à la lecture bibliographique pour bien comprendre les différentes méthodes de calcul avant de les appliquer. Pour clarifier ce qu'est la charge et comment la calculer, je vais d'abord définir ce concept, puis présenter la méthode de calcul la plus simple. La charge, dans ce contexte, se réfère à la capacité d'une éolienne à satisfaire la demande énergétique. Il existe six méthodes de calcul de la charge (Dolatabadi et al., 2024). Parmi celles-ci, trois sont des méthodes exactes, qui prennent en compte toutes les valeurs des trois variables principales (G_t , L_t , et V_t), et trois sont des méthodes approximatives, basées sur des simplifications de ces variables. Je vais donc détailler la première méthode exacte de calcul de la charge, appelée méthode ELCC (Equivalent Load-Carrying Capability), qui permet de déterminer la capacité équivalente de production des éoliennes.

La charge est une valeur fixe exprimée en mégawatts (MW). Lorsqu'on évalue une nouvelle installation éolienne ou un ensemble d'éoliennes existantes, il est essentiel de déterminer la demande qu'elles peuvent satisfaire. Par exemple, une éolienne avec une capacité nominale de 5 MW ne produit pas nécessairement 5 MW en permanence. Ce chiffre représente simplement la production maximale à un instant donné. La production éolienne varie en fonction des conditions de vent, d'où l'importance du concept de charge, qui reflète plus fidèlement la production réelle des éoliennes.

Le principe de la charge est de déterminer combien de capacité supplémentaire de demande peut être satisfaite à tout instant par l'ajout d'une nouvelle capacité éolienne. Les six méthodes de

calcul de la charge disponibles utilisent des procédés variés. La méthode ELCC (Equivalent Load-Carrying Capability) est l'une des plus simples et aide à comprendre ce concept de charge.

La méthode ELCC (Equivalent Load-Carrying Capability) permet d'évaluer l'augmentation admissible de la charge dans un système électrique sans altérer la valeur de la LOLE (Loss of Load Expectation) lorsque l'on ajoute une nouvelle unité de production, comme une éolienne. La LOLE mesure la probabilité que la production soit insuffisante pour satisfaire la demande à certains moments de l'année. Pour calculer la LOLE, il faut déterminer, pour chaque instant, si la production est suffisante pour répondre à la demande. Si la production ne satisfait pas la demande, on ajoute 1 à la LOLE, sinon, on ajoute 0.

Les données nécessaires pour réaliser ces calculs sont les suivantes :

- Profil de charge (L_t)
- Capacité de génération (G_t)
- Production éolienne (V_t)
- Probabilités de perte de charge (p_t) : Les probabilités que la capacité de production soit inférieure à la demande pour chaque heure (égales à 0 ou 1).

Ces données permettent de calculer l'impact d'ajout de nouvelles unités de production sur la capacité à répondre à la demande, en assurant que la LOLE reste constante.

Voici l'explication détaillée de cette méthode et le déroulé des calculs et afin de calculer la charge $\bar{L}$:

- Calcul initial de la LOLE sans la production éolienne :

$$\varepsilon = \sum_{t \in T} p_t = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t < L_t\} \quad (1)$$

→ T est l'ensemble des heures de la période étudiée

- Calcul de la LOLE avec la production éolienne :

$$\varepsilon^{\text{ELCC}} = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t + V_t < L_t + \bar{L}\} \quad (2)$$

→ $\bar{L}$ est la **charge constante** ajoutée au profil de charge pour équilibrer l'ajout de V_t .

- Condition pour déterminer la charge de l'installation éolienne

$$\varepsilon^{\text{ELCC}} = \varepsilon \quad (3)$$

Cette dernière équation (3) est résolue de manière itérative pour trouver la valeur de $\bar{L}$ qui satisfait la condition souhaitée. Autrement dit, on ajuste $\bar{L}$ jusqu'à ce que la LOLE du système avec les éoliennes soit équivalente à celle du système sans éoliennes.

Les autres méthodes de calcul de la charge diffèrent par leur complexité et leurs approches par rapport à la méthode ELCC. Toutes ces méthodes sont détaillées dans l'article de Monsieur Ilinca et ses collaborateurs (Dolatabadi et al., 2024). Elles sont également résumées dans le document de travail de stage, qui est disponible en annexe.

Écriture des scripts et calculs

Dans la dernière phase de mon stage, j'ai appliqué les méthodes de calcul de la charge aux données que j'avais collectées afin de présenter et critiquer les résultats. Pour ce faire, j'ai utilisé Python, en rédigeant un script pour chaque méthode, soit un total de six scripts. J'ai donc consacré du temps à tester ces scripts, à identifier les erreurs et incohérences, et à simplifier le code pour qu'il soit clair et lisible pour les autres.

Étant donné que j'ai déjà détaillé une méthode, il n'est pas nécessaire de reproduire son script en langage informatique. C'est pourquoi l'ensemble des six scripts est présenté en annexe.

Pour Monsieur Ilinca et moi, ces scripts ont constitué le livrable le plus crucial de mon travail de stage, car ils permettent de calculer et de présenter les résultats de la charge, ce qui est la finalité de notre étude. Ils m'ont permis non seulement de renforcer mes compétences en Python, mais aussi de développer un esprit critique sur la logique et la fiabilité des scripts. J'ai également pris conscience de l'ampleur du travail nécessaire derrière les calculs et les résultats, une dimension souvent sous-estimée lorsque l'on lit un article scientifique. Le travail préalable à la présentation des résultats est beaucoup plus important que je ne l'imaginais, et cette expérience m'a offert une meilleure compréhension de cet aspect.

V- Résultats

Présentation des résultats obtenus.

Après avoir écrit et exécuté les scripts pour chaque zone, j'ai obtenu six résultats différents de charge pour la Belgique, le Luxembourg et le Québec. Pour présenter ces résultats, j'ai opté pour une méthode similaire à celle utilisée dans l'article sur les panneaux solaires (Dolatabadi et al., 2024), c'est-à-dire sous forme de tableaux. Cependant, contrairement à cet article, qui présente des combinaisons de demande et de production pour différentes zones en considérant une nouvelle installation d'éoliennes (de 5 MW dans leur étude), notre projet porte sur des installations déjà existantes. J'ai donc décidé de créer trois tableaux distincts, chacun correspondant à une zone spécifique. Chaque tableau présente la capacité nominale installée pour chaque zone (obtenue à partir des sites gouvernementaux ou des bases de données énergétiques) ainsi que les six résultats des calculs de charge. Ces tableaux sont illustrés en figures 21, 22, et 23.

Avant cela, j'ai également réalisé un tableau supplémentaire (figure 24) montrant les résultats pour une production solaire en Belgique. Cette démarche a permis de comparer les résultats obtenus avec ceux de l'article sur les panneaux solaires et de vérifier la fiabilité des scripts, comme

recommandé par Monsieur Ilinca. En effet, l'article ne présente que la Belgique, où la production et la demande proviennent de la même zone, ce qui permet des comparaisons directes.

Capacité installée [MW]	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity Factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
2764	218,7	236,4	224,7	228,8	442,8	391

Figure 21 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour un parc éolien de 2764 MW en Belgique en 2021

Capacité installée [MW]	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity Factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
136	71,8	202,2	101,1	35,2	35,1	69,9

Figure 22 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour un parc éolien de 172,1 MW au Luxembourg en 2021

Capacité installée [MW]	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity Factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
4000	4882,5	1791,6	1702	138,7	174,7	919,7

Figure 23 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour un parc éolien de 4000 MW au Québec en 2021

Capacité installée [MW]	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity Factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
5000	195	215,2	204,5	301,1	478,6	311,6

Figure 24 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour une centrale photovoltaïque de 5000 MW en Belgique en 2021

Analyse et interprétation des résultats.

Pour interpréter nos résultats, il est crucial de les comparer à ceux de l'article dont nous nous inspirons. Tout d'abord, pour vérifier si les ordres de grandeur sont cohérents, nous avons comparé notre tableau en figure 24 avec celui en figure 25 de l'article. Ce dernier présente une centrale photovoltaïque de 5 MW, avec les ordres de grandeur des résultats de calcul de charge mis en évidence en orange. J'ai calculé la moyenne de la part des charge calculée par rapport à la capacité installée que nous devrions obtenir en moyenne. Cette estimation a donné une part moyenne de 16,8%, indiquant que la capacité calculée en Belgique, selon les méthodes de calcul, représente environ 16,8% de la capacité nominale.

Pour nos propres résultats, présentés dans la figure 24, la part moyenne obtenue est de 5,6%. Bien que les ordres de grandeur montrent un certain écart, les résultats restent raisonnables et cohérents. Les différences peuvent être expliquées par le manque d'informations complètes par rapport aux données et calculs de l'article. Étant donné que les conditions ne sont pas exactement identiques, il est logique que les chiffres ne se ressemblent pas parfaitement, mais l'écart reste assez faible et les résultats sont globalement cohérents.

Scenario	Load	PV	ELCC [MW]	ECP [MW]	EFP [MW]	Capacity factor [MW]	Garver [MW]	Z [MW]
1	RTS	Belgium	0.37	0.75	0.7	0.642	0.7371	0.934
2	RTS	Texas	1.18	2.03	1.95	1.5927	1.6035	1.7876
3	Belgium	Belgium	0.74	0.95	0.92	0.6827	0.7146	1.0342
4	ERCOT	Texas	2.13	2.07	1.91	2.4493	2.3137	2.059
5	ERCOT	California	2.3	1.88	1.8	2.4734	2.3653	2.1931

Figure 25 : Résultats de la mise en œuvre de différentes méthodes d'évaluation de la capacité pour différents scénarios liés à différentes conditions de charge et de production pour une centrale photovoltaïque de 5 MW, avec la Belgique mise en avant (Source : Article Dolatabadi et al., 2024)

En ce qui concerne la cohérence des méthodes, nous observons que pour les trois méthodes exactes (ELCC, ECP, et EFP), les variations entre les résultats de la figure 24 et ceux de la figure 25 sont très similaires, ce qui indique que les scripts que j'ai réalisés sont probablement corrects. En revanche, pour les méthodes d'approximation (CF, Garver, et Z), les valeurs obtenues sont anormalement élevées et ne suivent pas les mêmes variations que celles de la figure 25. Il est compréhensible que ces méthodes d'approximation présentent des résultats différents, étant donné que les données et les méthodes de calcul ne sont pas exactement les mêmes que celles utilisées dans l'article.

En examinant les résultats pour les éoliennes, présentés dans les figures 21 à 23, il est clair que la plupart des méthodes montrent un comportement similaire, bien que certaines méthodes présentent des variations moins cohérentes. Les résultats se situent généralement entre 5% et 50% de la capacité installée. Cependant, certaines valeurs sont aberrantes, comme celles de la méthode ECP pour le Luxembourg et de la méthode ELCC pour le Québec, qui excèdent la capacité installée, ce qui est physiquement impossible. Ces anomalies suggèrent que des ajustements ou des vérifications supplémentaires sont nécessaires pour garantir la validité des résultats.

En observant les résultats, bien que les comportements des méthodes semblent similaires, il est important de nuancer cette observation. En effet, dans tous les tableaux, il n'y a pas de logique exacte quant à la comparaison des valeurs entre les différentes méthodes. Ces légères divergences proviennent des techniques de calcul distinctes employées par chaque méthode.

À partir de ces calculs, j'ai pris conscience de l'impact significatif de la méthode choisie. Les résultats peuvent varier considérablement même lorsqu'on utilise la même base de données, soulignant l'importance cruciale de sélectionner la méthode appropriée pour des calculs d'installation précis.

VI- Discussion

Comparaison des résultats avec les attentes initiales et la littérature existante.

Les résultats sont globalement concluants selon Monsieur Ilinca et moi-même, malgré certaines incohérences et divergences notables. Cette analyse constitue une solide base pour une éventuelle continuation du projet, en particulier en ce qui concerne l'amélioration des méthodes de calcul et la validation des scripts. La réussite de cette étude en autonomie, sans une forte analyse extérieure, est particulièrement encourageante. Les scripts développés et les données collectées présentent un potentiel significatif pour renouveler l'étude sur les éoliennes.

Ces valeurs divergentes, ainsi que les ordres de grandeur parfois erronés (certains résultats s'écartant jusqu'à 50 %), ou encore les comportements des résultats des différentes méthodes qui ne se ressemblent pas complètement, ont une explication. Plusieurs sources possibles peuvent expliquer cela :

- Des erreurs dans les scripts ou les données. Il est crucial de vérifier la qualité des données utilisées et l'exactitude des scripts. Une mauvaise qualité des données ou une erreur légère dans les scripts peuvent être à l'origine des incohérences observées. Il serait utile de comparer les données avec une source plus fiable et de réévaluer les scripts plus en profondeur pour identifier et corriger les erreurs.
- Des sources de données différentes. Les divergences peuvent également provenir du fait que les données utilisées ne proviennent pas des mêmes sources que celles utilisées dans l'article sur les panneaux solaires. Ces points doivent être examinés pour améliorer la précision des analyses et obtenir des résultats plus cohérents avec les études précédentes.
- Des constantes non spécifiées, comme alpha et gamma dans la méthode Z. Ces constantes n'étant pas fournies, j'ai dû attribuer des valeurs par moi-même sans indication claire. Il serait utile d'obtenir davantage d'informations ou d'assistance sur ces paramètres, car j'ai observé que les résultats varient considérablement en fonction des valeurs choisies. D'où l'importance d'avoir des directives précises pour ces constantes, car elles ont un impact significatif sur les résultats.
- Des différences entre la capacité totale et les valeurs horaires. Une source potentielle d'erreur d'ordre de grandeur pourrait être la différence entre la capacité totale et les données horaires. La plupart des sources fournissent des données horaires sans spécifier la capacité installée associée. Il est important de déterminer si la capacité totale doit être basée sur les installations en fin 2021, fin 2020, ou si elle doit se baser sur les augmentations au cours de l'année, car les projets peuvent évoluer.

Limites de l'étude et suggestions pour des recherches futures.

Tout d'abord, avoir des parcs éoliens isolés est plus pertinent que d'étudier une grande zone comme un pays entier, car cela correspond mieux à des projets spécifiques. Cette étude est surtout adaptée pour des futures installations. Se concentrer sur des projets de taille plus petite peut offrir des résultats plus significatifs.

Comparer les résultats avec une installation spécifique, comme une installation de 5 MW, permettrait d'aligner davantage le cadre de l'étude avec celui de l'article de référence.

De plus, obtenir plus de collaborations, d'aide extérieure et de détails sur les données et méthodes utilisées dans l'article, tels que les années correspondantes, les sources, et les détails des scripts, serait très bénéfique.

Enfin, il est important de continuer l'étude en vérifiant minutieusement les scripts et les données, en effectuant d'autres simulations et en créant de nouvelles courbes. Cela inclut également l'utilisation de la méthode MMALH pour affiner les calculs. C'est-à-dire de continuer comme dans l'article afin d'aboutir à la véritable finalité du projet.

Implications des résultats pour le domaine des énergies renouvelables.

La méthode utilisée pour calculer la charge d'une future installation d'éoliennes ou de panneaux solaires est cruciale, comme je l'ai réalisé au cours de mon stage. L'article souligne

l'importance de rechercher une méthode plus fiable, qui soit moins dépendante des données spécifiques et plus exacte. En testant et en observant les résultats, on constate que la charge peut varier considérablement en fonction de la méthode choisie. Dans le cadre d'un projet éolien, par exemple, il est essentiel de sélectionner la méthode de calcul de charge avec précaution. Une méthode inappropriée pourrait tromper et conduire à une surestimation ou sous-estimation de la capacité de l'installation. Cela pourrait entraîner des problèmes tels que des pertes de charge ou une sous-exploitation des capacités, et donc ne pas utiliser pleinement le potentiel de notre installation.

Conclusion

Résumé du stage et des résultats

Mon stage s'est déroulé en plusieurs étapes structurées. J'ai commencé par un apprentissage approfondi des outils nécessaires, notamment RETScreen et les principes fondamentaux des éoliennes, suivis d'une étude détaillée de l'article scientifique de référence sur la nouvelle méthode de calcul de charge des panneaux solaires. La phase suivante a consisté à rédiger un document bibliographique pour organiser et présenter le travail réalisé à propos de l'étude bibliographique mais aussi de la recherche de données. Ensuite, j'ai recherché et trié les données nécessaires, écrit des scripts pour effectuer les calculs, puis analysé et présenté les résultats obtenus avec une interprétation critique.

Les résultats que j'ai produits démontrent un potentiel significatif mais présentent aussi certaines variations. Les méthodes exactes de calcul de la charge ont montré des résultats cohérents dans l'ensemble, ce qui valide la robustesse des scripts que j'ai développés. En revanche, les méthodes approximatives ont révélé quelques écarts, soulignant une sensibilité accrue aux choix méthodologiques et à la qualité des données. Ces résultats m'ont fait prendre conscience de la nécessité d'une sélection minutieuse des méthodes et d'une validation rigoureuse des données pour obtenir des prévisions fiables dans le cadre d'un futur projet éolien ou photovoltaïque.

Toutefois, certains aspects auraient pu être améliorés. Les résultats ont montré des incohérences, notamment des valeurs aberrantes et quelques divergences entre les méthodes. Ces écarts indiquent qu'il est essentiel de perfectionner les scripts et d'affiner les données pour améliorer la précision des calculs. De plus, une analyse plus approfondie, un travail plus précis auraient pu aider à rectifier les anomalies observées. Ce retour d'expérience souligne l'importance de la rigueur dans le choix des méthodes et la qualité des données pour obtenir des résultats pertinents et fiables.

Il est enfin temps de transmettre mon travail à d'autres chercheurs, qui pourront utiliser mes données et les scripts que j'ai développés pour poursuivre ce projet. Ils auront l'opportunité de continuer l'analyse et peut-être écrire un nouvel article scientifique, cette fois-ci axé sur la méthode de calcul de charge appliquée aux éoliennes.

Bilan personnel du stage

Au cours de ce stage, j'ai acquis des compétences essentielles pour une carrière en ingénierie des énergies renouvelables et en gestion de projets énergétiques. J'ai appris à utiliser RETScreen pour évaluer la viabilité des projets énergétiques, une compétence fondamentale pour analyser et optimiser les systèmes de production d'énergie renouvelable. La recherche, la gestion des données et la rédaction de scripts en Python m'ont permis de développer une approche rigoureuse et analytique, indispensable pour concevoir des solutions énergétiques efficaces et innovantes. Ces compétences sont particulièrement pertinentes pour le domaine de l'aménagement urbain et des énergies renouvelables. En tant qu'ingénieur en énergie renouvelable, je devrai être capable de concevoir et de gérer des projets intégrant des technologies telles que l'éolien et le solaire, tout en évaluant leur impact environnemental et économique. La capacité à analyser et à interpréter des données complexes me permettra de prendre des décisions éclairées et de recommander des solutions optimales pour intégrer les énergies renouvelables dans les infrastructures urbaines.

J'ai constaté que le travail derrière les articles scientifiques est bien plus conséquent que ce que l'on imagine. La quantité de travail nécessaire pour la recherche de données, leur tri et la rédaction

des scripts dépasse souvent ce que l'on perçoit en lisant les publications. Cette expérience m'a également sensibilisé à l'importance des résultats obtenus et aux implications de ces résultats dans les projets éoliens. Grâce à l'apprentissage de RETScreen et aux calculs réalisés, j'ai pris pleinement conscience de l'ampleur d'un projet éolien et des défis associés à sa mise en œuvre.

J'ai aussi particulièrement apprécié le travail en autonomie, qui m'a permis d'apprendre à apprendre de manière approfondie et de découvrir des aspects que je n'avais jamais explorés auparavant. Cependant, le manque de collaboration a été un point faible. Étant donné que nous étions seulement deux avec Monsieur Ilinca, qui m'a beaucoup soutenu et consacré du temps pour résoudre certains problèmes, il aurait été bénéfique d'avoir la présence d'autres collaborateurs ou stagiaires. Leur apport aurait probablement permis de faire avancer le projet plus rapidement et de manière plus efficace.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Ilinca pour m'avoir sélectionné en tant que stagiaire et pour l'opportunité de vivre cette expérience enrichissante. Son soutien à distance, son suivi attentif de mon travail, et son engagement ont été déterminants pour la réussite de mon stage.

Annexes

• Résumé de l'article (Dolatabadi et al., 2024) :

Proposition de projet

-

« Enhancing Photovoltaic Farm Capacity Estimation: A Comprehensive Analysis with a Novel Approach »

Sayed Hamid Hosseini Dolatabadi, Alireza Soleimani, Mazdak Maghanaki, and Adrian Ilinca

L'objectif principal de ce projet est de surmonter les limites des méthodes actuelles afin d'évaluer au mieux la valeur de capacité des installations photovoltaïques (PV). Ce projet implique une meilleure compréhension et évaluation de la valeur de capacité dans les systèmes d'alimentation PV, mais aussi le développement d'une nouvelle métrique, Marginal Moving Average Limited Hours ELCC-Based Capacity Value (MMALH), qui réduit la dépendance aux données étendues et en intégrant une approche de moyenne mobile tout en capturant avec précision le comportement variable de la production PV. Les objectifs spécifiques du projet sont de mettre en lumière et de surmonter les déficiences des méthodes exactes et approximatives actuelles, dans l'évaluation de la valeur de capacité des unités photovoltaïques et ensuite démontrer la supériorité de cette métrique en termes de fiabilité, d'adéquation et de sécurité des systèmes photovoltaïques sur le long terme.

Les défis techniques et scientifiques dans la planification et l'exploitation des centrales photovoltaïques résident principalement dans la difficulté d'évaluer avec précision la valeur de capacité marginale, un paramètre essentiel pour l'expansion et l'intégration efficace de l'énergie solaire dans le réseau électrique. Les méthodes actuelles sont soit trop complexes et nécessitent une grande quantité de données, soit elles sont trop simplistes et ne reflètent pas fidèlement la production variable des PV. Ces lacunes causent des difficultés dans le positionnement stratégique et le dimensionnement des installations PV, influençant la fiabilité et l'adéquation du système énergétique. La nécessité de trouver une nouvelle métrique telle que MMALH vise à combler ces lacunes et à améliorer la prévision de la production PV et de comprendre au mieux l'impact des nouvelles unités PV sur le système existant, sans complexifier les calculs.

Pour atteindre les objectifs de cette étude et démontrer la supériorité de la nouvelle métrique, elle suivra un plan méthodique. Initialement, une explication détaillée des méthodes de calcul précises et approximatives sera fournie. Des simulations calculant la valeur de capacité seront ensuite réalisées dans divers contextes géographiques et environnementaux, prenant en compte des variations de production et de demande. Les simulations envisagées prendront en compte une gamme de scénarios impliquant des variations de variables clés, notamment la capacité nominale des installations, les charges de pointe, ainsi que le taux de pannes forcées (FOR). Une analyse comparative de toutes les méthodes existantes mettra en évidence leurs insuffisances, comme les fluctuations inattendues des résultats, leur échec à capturer les périodes à haut risque, et leur dépendance aux données horaires pour les méthodes exactes. Puis, la nouvelle métrique MMALH sera introduite, expliquant sa méthodologie innovante qui sélectionne des heures représentatives pour calculer une moyenne mobile marginale de la capacité lors de l'ajout de nouvelles unités. Cette métrique sera évaluée à travers les mêmes scénarios de simulation pour en démontrer l'efficacité supérieure, en surmontant les limites établies. Enfin, l'étude explorera l'influence potentielle de cette nouvelle métrique sur la performance des systèmes PV, leur capacité à répondre à la demande et leur impact environnemental.

Si la métrique MMALH était appliquée, elle pourrait offrir des avantages significatifs pour la planification et l'exploitation des centrales photovoltaïques. Cette méthode permettrait une meilleure prise de décisions concernant le dimensionnement des installations PV. D'un point de vue industriel, cela pourrait conduire à un positionnement et un dimensionnement plus efficaces des centrales, maximisant ainsi leur valeur de capacité. Économiquement, une telle approche pourrait réduire les coûts et optimiser les investissements dans les énergies renouvelables. D'un point de vue environnemental, cette recherche est un pas de plus vers la réduction de notre dépendance aux énergies fossiles et, par conséquent, vers la lutte contre le changement climatique. En améliorant l'efficacité des centrales PV, nous contribuons activement à un avenir énergétique plus durable et à une meilleure qualité de vie sur la planète.

• Document de travail de stage :

Travail de stage

-

Amélioration de l'estimation de la capacité des parcs éoliens

Données dont on aura besoin :

- Pour les énergies renouvelables, nous aurons besoin des données de production horaire éolienne pour 3 zones géographiques différentes mais aussi la production solaire afin de vérifier nos résultats avec l'article sur les panneaux solaires.
- Nous aurons besoin aussi de la demande Lt et de la production générale Gt horaires des 3 zones.

Données dont nous disposons :

- Données ERCOT (Electric Reliability Council of Texas) de la production horaire éolienne au cours de l'année 2023, de l'Ouest, du Nord et de l'ensemble du Texas, et aussi du Sud de Houston (Source : <https://www.ercot.com/mp/data-products/data-product-details?id=NP4-732-CD>).
- Données AESO (Alberta Electric System Operator) de la production horaire éolienne au cours des années 2016-2020 dans l'ensemble de l'Alberta (Source : <https://www.aeso.ca/market/market-and-system-reporting/data-requests/historical-generation-data/>).
- Données de la production horaire éolienne pour la Belgique et le Luxembourg au cours des années 2016 à aujourd'hui dans l'ensemble de leur territoire (Source : <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>).
- Données du Québec (Hydro-Québec) de la production horaire éolienne au cours des années 2018-2021, de l'Ouest, du Nord et de l'ensemble du Texas, et aussi du Sud de Houston (Source : <https://www.hydroquebec.com/documents-donnees/donnees-ouvertes/historique-production-consommation/>).

Analyse des données :

```
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime, timedelta

chemin_fichier = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'

production_MW = []

with open(chemin_fichier, 'r') as fichier:
    for ligne in fichier:
        production = float(ligne.strip()) # Convertir la ligne en float
        production_MW.append(production) # Convertir en MW

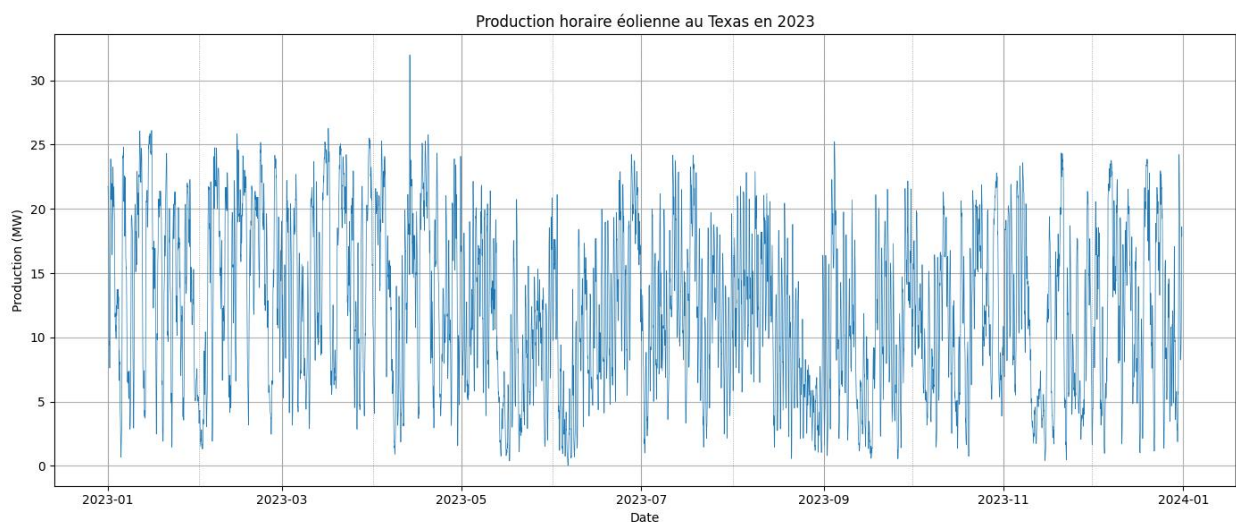
date_debut = datetime(2021, 1, 1)
dates = [date_debut + timedelta(hours=i) for i in range(len(production_MW))]

plt.figure(figsize=(15, 6))
plt.plot(dates, production_MW, linestyle='-', linewidth=0.5)
plt.title('Production horaire en Belgique en 2021')
plt.xlabel('Date')
plt.ylabel('Production (MW)')

for mois in range(1, 13):
    debut_mois = datetime(2021, mois, 1)
    plt.axvline(x=debut_mois, color='gray', linestyle='-', linewidth=0.5)

plt.xlim(dates[0], dates[-1])

plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```



Synthèse des méthodes exactes existantes

Méthode ELCC

La méthode ELCC (Effective Load Carrying Capability) permet de déterminer l'augmentation admissible de la charge dans un système électrique sans changer la valeur de la LOLE (Loss of Load Expectation) lorsqu'une nouvelle unité de production, comme une unité éolienne (E) est ajoutée. Cela se fait en ajustant le profil de charge pour refléter la variabilité de la production de l'unité éolienne et en calculant la nouvelle valeur de LOLE pour le système.

Données nécessaires

- Profil de charge (L_t) : La demande en puissance (kW) pour chaque heure de la période étudiée.
- Capacité de génération (G_t) : La capacité totale de production disponible (kW) pour chaque heure de la période étudiée.
- Production Éolienne (V_t) : La production d'énergie de l'unité E (kW) pour chaque heure de la période étudiée.
- Probabilités de perte de charge (p_t) : Probabilités que la capacité de production soit inférieure à la demande sans l'unité E pour chaque heure.

Calculs

- Calcul initial de la LOLE sans l'unité E :

$$\varepsilon = \sum_{t \in T} p_t = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t < L_t\} \quad (1)$$

- T est l'ensemble des heures de la période étudiée.

- Calcul de la LOLE avec l'unité E ajoutée :

$$\varepsilon^{\text{ELCC}} = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t + V_t < L_t + \bar{L}\} \quad (2)$$

- $\bar{L}$ est la **charge constante** ajoutée au profil de charge pour équilibrer l'ajout de l'unité E.

- Condition pour déterminer la capacité de l'unité E :

$$\varepsilon^{\text{ELCC}} = \varepsilon \quad (3)$$

Cette équation est résolue de manière itérative pour trouver la valeur de $\bar{L}$ qui satisfait cette condition. En d'autres termes, on ajuste $\bar{L}$ jusqu'à ce que la LOLE du système avec l'unité E soit égale à la LOLE du système sans l'unité E.

Méthode ECP

La méthode ECP (Equivalent Conventional Power) permet de déterminer la capacité d'une unité de production conventionnelle avec un taux de panne forcée (FOR) défini qui, si elle était remplacée par une nouvelle unité de production, ne changerait pas la valeur de la LOLE (Loss of Load Expectation)

Données nécessaires

- Profil de charge (L_t) : La demande en puissance (kW) pour chaque heure de la période étudiée.
- Capacité de génération (G_t) : La capacité totale de production disponible (kW) pour chaque heure de la période étudiée.
- Production éolienne (V_t) : La production d'énergie de l'unité E (kW) pour chaque heure de la période étudiée.

Calculs

- Calcul de la LOLE avec l'ajout de l'unité E :

$$\epsilon^{PV} = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t + V_t < L_t\} \quad (4)$$

- T est l'ensemble des heures de la période étudiée.

- Calcul de la LOLE avec l'unité de référence :

$$\epsilon^B = \sum_{t \in T} \text{Prob}\{G_t + B_t < L_t\} \quad (5)$$

- B_t est l'unité de référence avec un taux de panne forcée de 5 %.

- Condition pour déterminer la capacité de l'unité E :

$$\epsilon^{PV} = \epsilon^B \quad (6)$$

Cette équation est résolue de manière itérative pour trouver la valeur de B_t qui satisfait cette condition. En d'autres termes, on ajuste B_t jusqu'à ce que la LOLE du système avec l'unité E soit égale à la LOLE du système sans l'unité E. La valeur de la capacité de l'unité E basée sur la mesure ECP est égale à la capacité nominale de l'unité de référence.

Méthode EFP

Cette méthode est la même que la méthode ECP mais avec un FOR de 0%.

Synthèse des méthodes d'approximations existantes

Approximation CF

La méthode d'Approximation du Facteur de Capacité (CF) estime la capacité d'une unité E en utilisant son facteur de capacité moyen pendant les intervalles à haut risque.

Données nécessaires :

- V_t : Production de l'unité E à l'heure t
- L_t : Demande de charge à l'heure t
- p_t : Probabilité de perte de charge (LOLP) à l'heure t
- T' : Sous-ensemble d'intervalles où la charge du système est élevée

Calculs

On identifie le sous-ensemble T' des heures où la charge du système est élevée et calculer p_t pour ces intervalles.

• Calcul des coefficients de pondération :

$$w_t = \frac{p_t}{\sum_{\tau \in T'} p_\tau} \quad (7)$$

On calcule les coefficients de pondération pour toutes les heures d'étude. Ces coefficients pondèrent chaque heure en fonction de la LOLP.

• Calcul du facteur de capacité pondéré :

$$\sum_{\tau \in T'} w_\tau V_\tau \quad (8)$$

On utilise les coefficients de pondération pour calculer la **capacité de l'unité E** en prenant en compte sa production pendant les heures à haut risque.

Approximation Garver

La méthode d'Approximation Garver fournit une estimation de la fonction de probabilité de perte de charge (LOLP) en l'approximant par une fonction exponentielle avec deux paramètres, β et γ .

Données nécessaires :

- V_t : Production de l'unité photovoltaïque (PV) à l'heure t
- L_t : Demande de charge à l'heure t
- β et γ : Paramètres de l'approximation exponentielle de Garver
- T : Ensemble des intervalles d'étude

Calculs

On commence par calculer la valeur de LOLE pour le système sans l'unité PV en utilisant l'approximation de Garver.

Calcul de la LOLE sans PV :

$$\varepsilon \approx \sum_{t \in T} \beta \cdot \exp\left(-\frac{\bar{G} - L_t}{\gamma}\right) \quad (9)$$

Ensuite, si l'unité PV est ajoutée au système de génération et une charge constante est également ajoutée à tout le profil de charge, la valeur de LOLE avec l'approximation de Garver est obtenue de la manière suivante :

Calcul de la LOLE avec PV :

$$\varepsilon^{\text{ELCC}} \approx \sum_{t \in T} \beta \cdot \exp\left(-\frac{\bar{G} + V_t - L_t - \bar{L}}{\gamma}\right) \quad (10)$$

Comme mentionné dans la méthode basée sur l'ELCC, la valeur de la capacité de l'unité PV correspond à une valeur fixe de charge de sorte que la valeur de la LOLE ne change pas. La valeur de la charge fixe est calculée à partir des Équations (9) et (10) en les égalisant, comme indiqué ci-dessous :

Calcul de la charge fixe :

$$\bar{L} = \gamma \cdot \log\left(\frac{\sum_{t \in T} \exp\left(\frac{L_t}{\gamma}\right)}{\sum_{t \in T} \exp\left(\frac{L_t - V_t}{\gamma}\right)}\right) \quad (11)$$

En conséquence, la valeur de la capacité d'une unité de centrale photovoltaïque est égale à la valeur de charge calculée dans l'Équation (11).

Approximation Z

La méthode d'Approximation Z se concentre sur la différence entre la capacité de production disponible et la charge (valeur de réserve) pendant les heures de pointe sans considérer l'unité de centrale photovoltaïque (PV).

Données nécessaires :

- V_t : Production de l'unité photovoltaïque (PV) à l'heure t
- L_t : Demande de charge à l'heure t
- G_t : Capacité de production à l'heure t
- μ_S : Moyenne de la valeur de réserve S_t

- σ_S : Écart-type de la valeur de réserve S_t
- μ_{PV} : Moyenne de la production de l'unité PV
- σ_{PV} : Écart-type de la production de l'unité PV
- Z : Indicateur d'adéquation de la capacité du système

Calculs

On commence par définir le paramètre de réserve S_t comme suit :

Définition de la réserve :

$$S_t = G_t - L_t \quad (12)$$

Dans un système électrique complexe avec plusieurs unités de production, il est supposé que la variable S_t suit une distribution gaussienne. La relation entre la moyenne (μ_S) et la variabilité (σ_S) de S_t sert d'indicateur d'adéquation de la capacité du système, noté Z :

Calcul de Z :

$$Z = -\frac{\mu_S}{\sigma_S} \quad (13)$$

Lorsque la capacité de production est augmentée ou que des charges supplémentaires sont ajoutées au système électrique, les valeurs de moyenne et de variance peuvent changer, mais on observe toujours une distribution gaussienne où Z reste inchangé. Par conséquent, la capacité d'une unité PV correspond à la charge qui doit être ajoutée au système pour maintenir une valeur constante de Z .

Maintien de Z constant :

Avec l'ajout d'une unité PV et d'une charge constante au système, les valeurs de moyenne et d'écart-type de S_t changent respectivement en $\mu_S + \mu_{PV} - \bar{L}$ et $\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{PV}^2}$. Pour maintenir Z constant, l'équation suivante doit être vérifiée :

$$-\frac{\mu_S}{\sigma_S} = -\frac{\mu_S + \mu_{PV} - \bar{L}}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{PV}^2}} \quad (14)$$

En résolvant cette équation, on obtient :

Calcul de la charge fixe :

$$\bar{L} = \mu_{PV} + Z \left(\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{PV}^2} - \sigma_S \right) \quad (15)$$

En conséquence, la capacité d'une unité de centrale photovoltaïque correspond à la charge calculée dans l'Équation (15). Il est important de noter que cette méthode suppose que la distribution de St reste gaussienne même avec l'intégration des unités PV. Cette approche est applicable pour des systèmes électriques avec des niveaux relativement faibles de pénétration des unités PV ou, dans de rares cas, lorsqu'une seule unité PV est introduite dans un système de production principalement composé d'unités de centrales traditionnelles.

• Script Python de l'analyse des données (exemple avec la demande Lt du Québec) :

```
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime, timedelta

chemin_fichier = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\HydroQuebec\HydroQuebec_Lt.txt'

production_MW = []

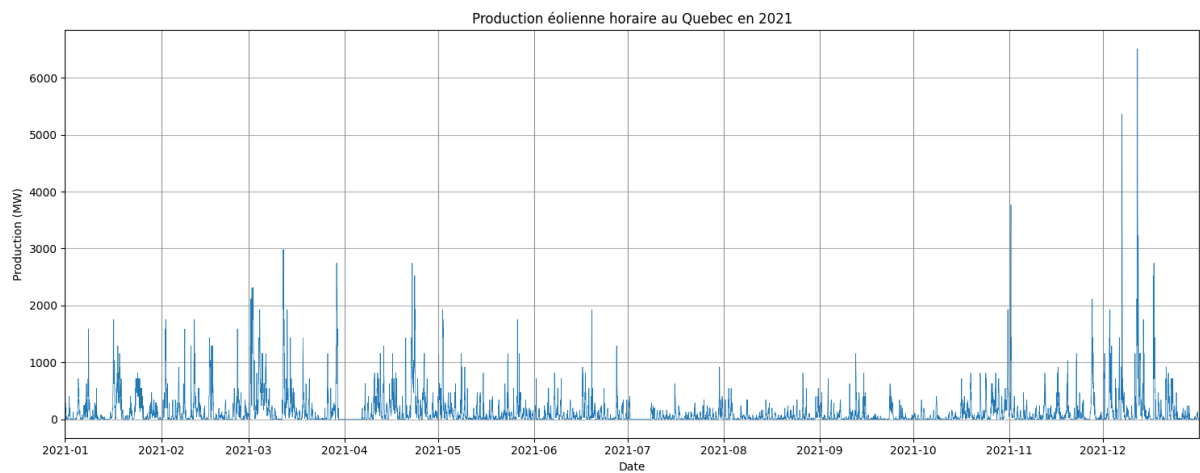
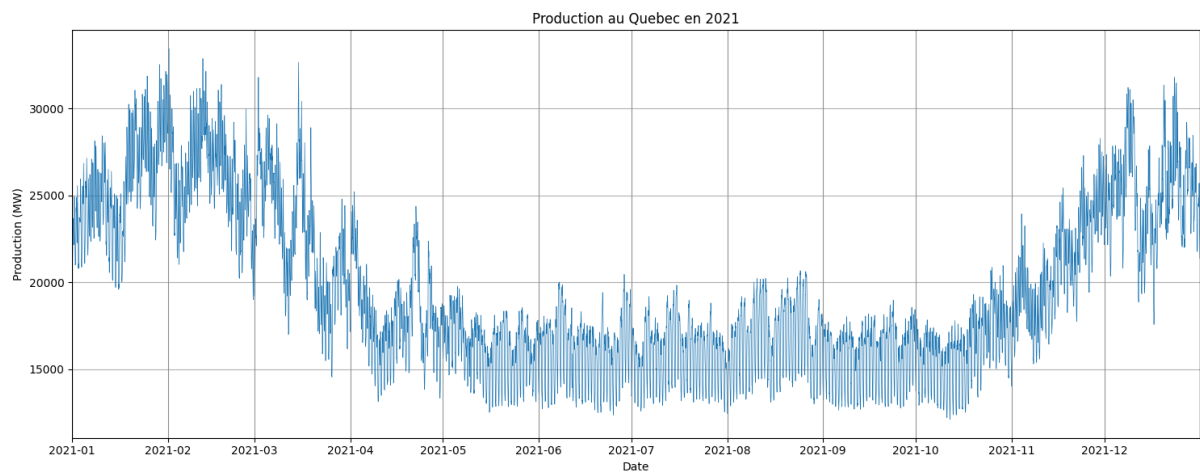
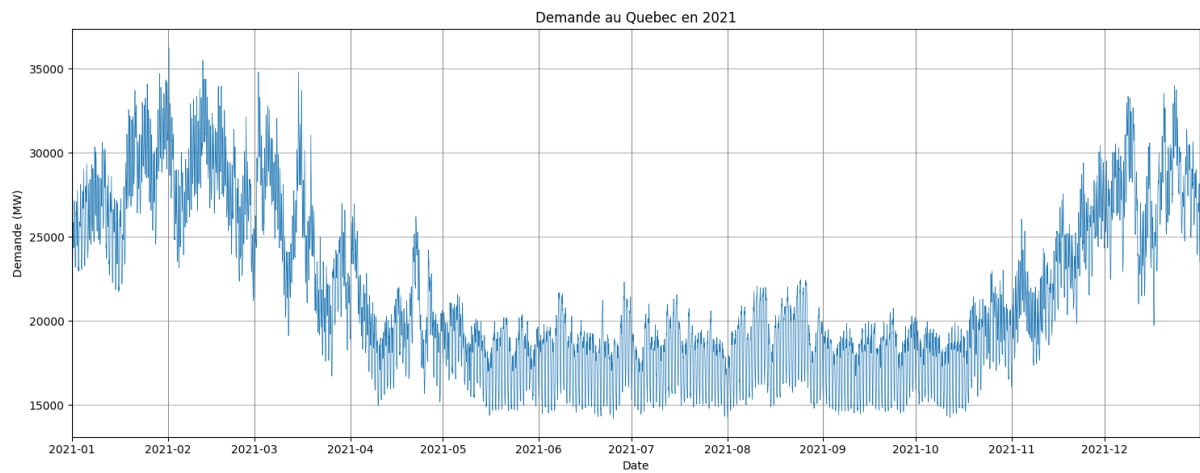
# Lecture des données
with open(chemin_fichier, 'r') as fichier:
    for ligne in fichier:
        production = float(ligne.strip()) # Convertir la ligne en float
        production_MW.append(production) # Convertir en MW

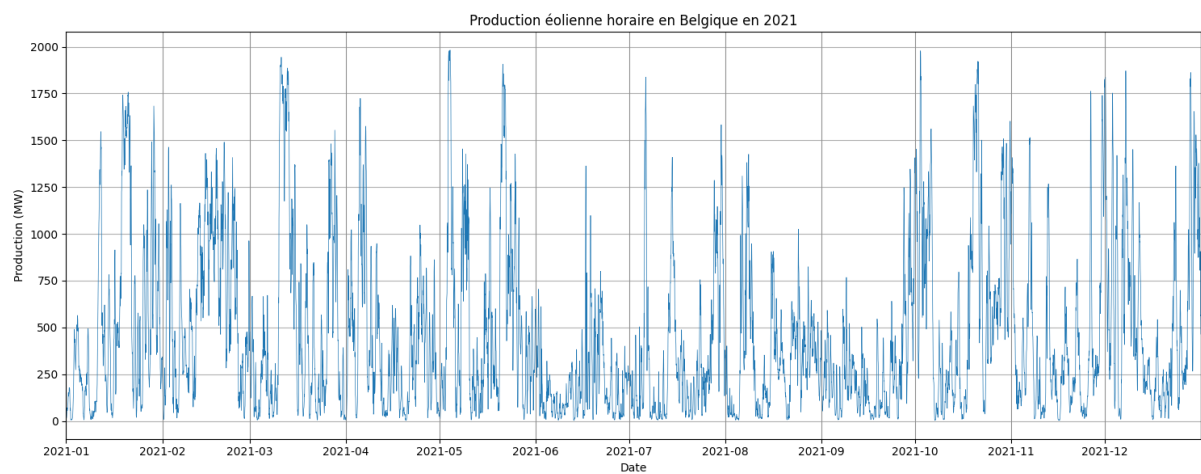
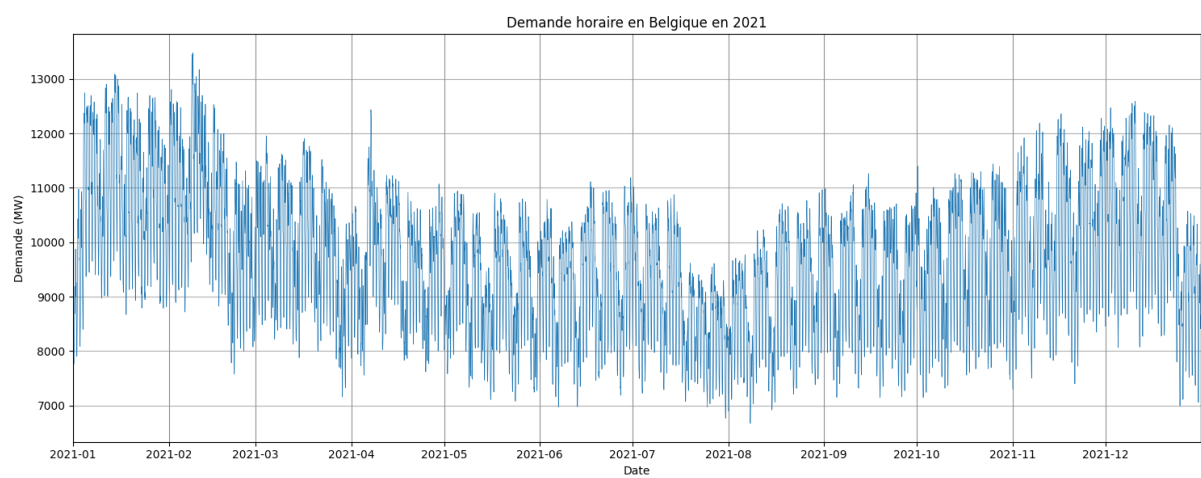
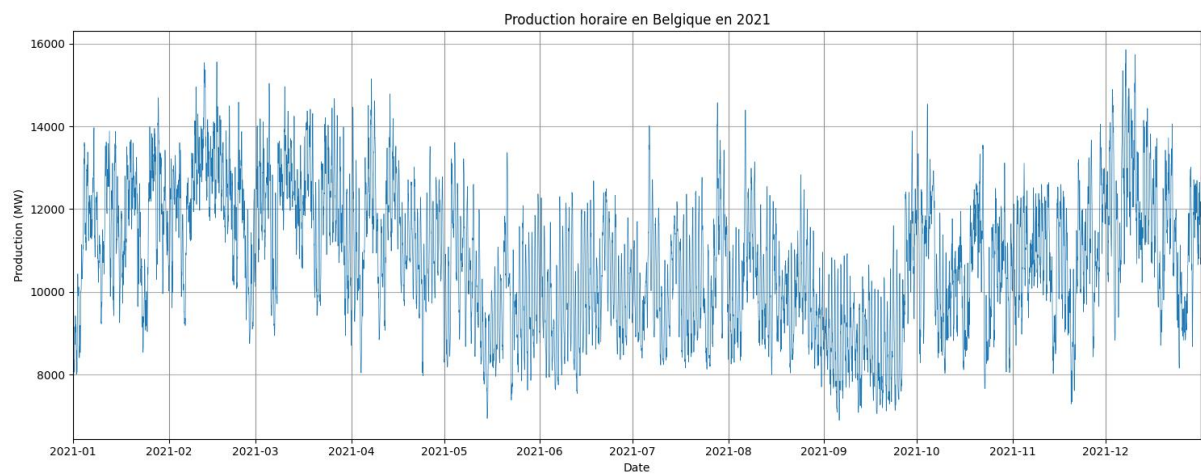
# Liste de dates commençant le 1er janvier 2021
date_debut = datetime(2021, 1, 1)
dates = [date_debut + timedelta(hours=i) for i in range(len(production_MW))]

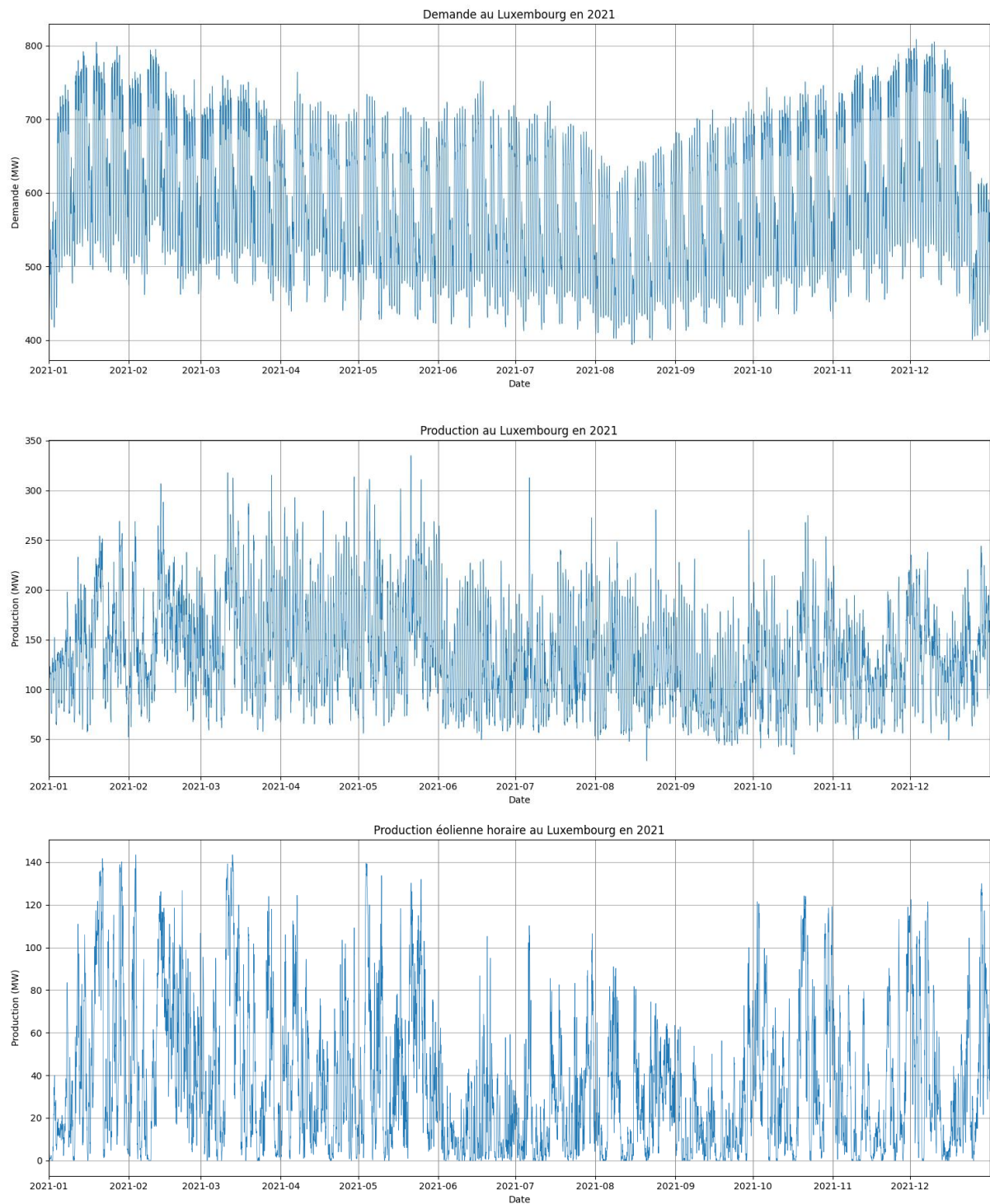
# Courbe de production
plt.figure(figsize=(15, 6))
plt.plot(dates, production_MW, linestyle='-', linewidth=0.5)
plt.title('Demande au Quebec en 2021')
plt.xlabel('Date')
plt.ylabel('Demande (MW)')

# Axes pour chaque début de mois
for mois in range(1, 13):
    debut_mois = datetime(2021, mois, 1)
    plt.axvline(x=debut_mois, color='gray', linestyle='-', linewidth=0.5)
    plt.xlim(dates[0], dates[-1])
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

• Présentation des 9 courbes issues de l'analyse de toutes les données répertoriées :







• Script Python de la méthode ELCC :

```
import numpy as np
```

```
path_Gt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
```

```
path_Lt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
```

```
path_Vt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'
```

```

with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()

    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

def lolp_sans_vt(Gt,Lt):
    return np.sum(Gt<Lt)

def lolp_avec_vt(Gt,Lt,Vt,L):
    return np.sum(Gt+Vt<Lt+L)

def trouver_L(Gt,Lt,Vt):
    Lmax=max(Belgique_Vt)
    Lmin=0
    L=(Lmin+Lmax)/2
    iterations_max=100
    for iteration in range(iterations_max):
        if lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt,L) > lolp_sans_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt):
            Lmax=L
            L=(Lmin+L)/2
        elif lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt,L) < lolp_sans_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt):
            Lmin=L
            L=(Lmax+L)/2
    return L

trouver_L(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt)

```

• Script Python de la méthode ECP :

```

import numpy as np
path_Gt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
path_Lt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
path_Vt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'
with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

def lolp_avec_vt(Gt,Lt,Vt):
    return np.sum(Gt+Vt<Lt)

def lolp_avec_bt(Gt,Lt,Bt):
    return np.sum(Gt+Bt<Lt)

```

```

def trouver_bt(Gt,Lt,Vt,FOR):
    Btmax=max(Belgique_Lt)
    Btmin=0
    Bt=(Btmin+Btmax)/2
    iterations_max=100
    for iteration in range(iterations_max):
        if lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt) > lolp_avec_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Bt*(1-FOR)):
            Btmax=Bt
            Bt=(Btmin+Bt)/2
        elif lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt) < lolp_avec_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Bt*(1-FOR)):
            Btmin=Bt
            Bt=(Btmax+Bt)/2
    return Bt

trouver_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt,0.05)

```

• Script Python de la méthode EFP :

```

import numpy as np

path_Gt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
path_Lt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
path_Vt = r'C:\Users\sau\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'

with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

def lolp_avec_vt(Gt,Lt,Vt):
    return np.sum(Gt+Vt<Lt)

def lolp_avec_bt(Gt,Lt,Bt):
    return np.sum(Gt+Bt<Lt)

def trouver_bt(Gt,Lt,Vt,FOR):
    Btmax=max(Belgique_Lt)
    Btmin=0
    Bt=(Btmin+Btmax)/2
    iterations_max=100
    for iteration in range(iterations_max):
        if lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt) > lolp_avec_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Bt*(1-FOR)):
            Btmax=Bt
            Bt=(Btmin+Bt)/2
        elif lolp_avec_vt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt) < lolp_avec_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Bt*(1-FOR)):
            Btmin=Bt
            Bt=(Btmax+Bt)/2
    return Bt

```

```
trouver_bt(Belgique_Gt,Belgique_Lt,Belgique_Vt,0)
```

• Script Python de la méthode CF :

```
import numpy as np

path_Gt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
path_Lt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
path_Vt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'

with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

LOLP=[]
T0=[]
Vt0=[]

for t in range(len(Belgique_Gt)):
    if Belgique_Gt[t]>Belgique_Lt[t]:
        LOLP.append(0)
    else:
        LOLP.append(1)

for i in range(len(LOLP)):
    if LOLP[i]==1:
        T0.append(i)

for t0 in T0:
    Vt0.append(Belgique_Vt[t0])

CF=(1/len(T0))*sum(Vt0)

print(CF)
```

• Script Python de la méthode Garver :

```
import numpy as np

path_Gt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
path_Lt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
path_Vt = r'C:\Users\saude\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'

with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])
```

```

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

beta = 0.1 # Paramètre ajusté selon les résultats sur système.
gamma = 5000 # Paramètre ajusté selon les résultats sur système.

LOLE_sans_PV = sum([beta * np.exp((Belgique_Lt[t] - Belgique_Gt[t]) / gamma) for t in
range(len(Belgique_Gt))])

LOLE_avec_PV = sum([beta * np.exp((Belgique_Lt[t] - Belgique_Gt[t] - Belgique_Vt[t]) / gamma) for t in
range(len(Belgique_Gt))])

L = gamma * np.log(sum([np.exp(Belgique_Lt[t] / gamma) for t in range(len(Belgique_Lt))]) /
sum([np.exp((Belgique_Lt[t] - Belgique_Vt[t]) / gamma) for t in range(len(Belgique_Lt))]))

print(f"LOLE sans PV: {LOLE_sans_PV}")
print(f"LOLE avec PV: {LOLE_avec_PV}")
print(f"Capacité équivalente de la charge (ELCC): {L}")

```

• Script Python de la méthode Z :

```

import numpy as np

path_Gt = r'C:\Users\sauade\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Gt.txt'
path_Lt = r'C:\Users\sauade\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Lt.txt'
path_Vt = r'C:\Users\sauade\Desktop\Données\Belgique\Belgique_Vt_eolien.txt'

with open(path_Gt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Gt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Lt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Lt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

with open(path_Vt, 'r') as fichier:
    lignes = fichier.readlines()
    Belgique_Vt = np.array([float(ligne.strip()) for ligne in lignes])

St = Belgique_Gt - Belgique_Lt

mu_S = np.mean(St)
sigma_S = np.std(St)
Z = -mu_S / sigma_S

mu_PV = np.mean(Belgique_Vt)
sigma_PV = np.std(Belgique_Vt)

L = mu_PV + Z * (np.sqrt(sigma_S**2 + sigma_PV**2) - sigma_S)
print(f"Capacité équivalente de la charge (ELCC) selon méthode Z: {L}")

```

Bibliographie

Dolatabadi, S. H. H., Soleimani, A., Maghanaki, M., & Ilinca, A. (2024). Enhancing Photovoltaic Farm Capacity Estimation : A Comprehensive Analysis with a Novel Approach. *Energy Technology*, 12(4).

Issa, M., Ilinca, A., Rousse, D. R., Boulon, L., & Groleau, P. (2023). Renewable Energy and Decarbonization in the Canadian Mining Industry : Opportunities and Challenges. *Energies*, 16(19), 6967. <https://doi.org/10.3390/en16196967>

Montoya, L. T. C., Hayyani, M. Y., Issa, M., Ilinca, A., Ibrahim, H., & Rezkallah, M. (2021). Wind power plant planning and modeling. Dans *Elsevier eBooks* (p. 259-312). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821724-5.00012-x>



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Félix Saudemont

2023-2024

Application des Méthodes de Charge des Panneaux Photovoltaïques aux Éoliennes : Apprentissage de logiciels, lecture scientifique, recherche de données, analyse et simulation de données

Résumé :

Mon stage au laboratoire de recherche du département de génie mécanique, sous la supervision du professeur Adrian Ilinca, a été une immersion complète dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. J'ai acquis des compétences techniques essentielles en utilisant divers logiciels spécialisés pour l'analyse et la simulation de systèmes énergétiques. En parallèle, j'ai approfondi mes connaissances théoriques en lisant intensivement, notamment un article scientifique du professeur Ilinca intitulé "Enhancing Photovoltaic Farm Capacity Estimation: A Comprehensive Analysis" (Dolatabadi et al., 2024), sur la mesure de la charge effective des panneaux photovoltaïques. J'ai appliqué ces connaissances en élaborant un projet de recherche basé sur les travaux du laboratoire, impliquant la collecte et l'analyse de données ainsi que plusieurs simulations, en utilisant les mêmes principes pour évaluer les performances des éoliennes. Cette expérience m'a permis de développer mes compétences en méthodologie scientifique, en rédaction technique et en présentation de résultats de recherche.

My internship at the Mechanical Engineering Department's research laboratory, under the supervision of Professor Adrian Ilinca, was a complete immersion into renewable energy and energy efficiency. I acquired essential technical skills by using various specialized software for the analysis and simulation of energy systems. Simultaneously, I deepened my theoretical knowledge through intensive reading, particularly of a scientific paper by Professor Ilinca titled "Enhancing Photovoltaic Farm Capacity Estimation: A Comprehensive Analysis" (Dolatabadi et al., 2024), on the measurement of effective load of photovoltaic panels. I applied this knowledge by developing a research project based on the laboratory's work, involving data collection and analysis as well as several simulations, applying the same principles to evaluate the performance of wind turbines. This experience allowed me to develop my skills in scientific methodology, technical writing, and research presentation.

Mots Clés : Énergies renouvelables, efficacité énergétique, logiciels spécialisés, simulation, analyse, systèmes énergétiques, éolienne, photovoltaïque, charge effective, collecte de données, script Python, projet de recherche, laboratoire, simulation énergétique.

ÉTS : 1100 R. Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3

Tuteur entreprise : Adrian Ilinca

Professeur Chercheur (Génie Mécanique)

Tuteur académique : Mindjid Maizia