
Mise à jour de la carte définissant les zones favorables à l'installation du grand éolien en Wallonie

Auteur : Craighero, Veronica

Promoteur(s) : Lejeune, Philippe

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15379>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**Mise à jour de la carte définissant les zones favorables à l'installation
du grand éolien en Wallonie**

VERONICA CRAIGHERO

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): PR. PHILIPPE LEJEUNE

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**Mise à jour de la carte définissant les zones favorables à l'installation
du grand éolien en Wallonie**

VERONICA CRAIGHERO

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): PR. PHILIPPE LEJEUNE

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail:

- Le Professeur Philippe Lejeune pour m'avoir guidé durant le travail et m'avoir proposé ce sujet
- Ir. Sonya Chaoui, Maïté Mawet et Nicolas Meerts qui m'ont grandement aidé entre autres pour l'obtention de données
- Ma famille qui a été là pour moi pendant cette période mais également durant mes 6 années d'études. Et surtout ma maman qui a relu maintes fois mon travail et surtout qui a toujours répondu à mes milliards de questions et m'a conseillée pendant cette période
- Mes amies au Luxembourg : Anne, Jenni, Kim, Shanshan et Srijana
- Mes anciennes amies de Gembloux : Chloé, Élodie, Louise, Marion et Nebila
- Mes bons amis et cokoteurs : Camille, Gaëlle et Lucas

Résumé

Titre : Mise à jour de la carte définissant les zones favorables à l'installation du grand éolien en Wallonie.

Le changement climatique est en partie dû à l'utilisation de combustibles fossiles et conduit à l'apparition de phénomènes climatiques extrêmes plus fréquents. Afin de contrer ces effets négatifs, et maintenir une production d'énergie suffisante pour permettre un développement continu de l'humanité, l'installation d'énergies renouvelables est actuellement l'unique solution.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité. Elle contribue à réduire les pollutions atmosphériques et procure des avantages sociaux et économiques. Des inconvénients existent quant à son installation, notamment leur impact sur la faune, leur impact sonore et leur impact visuel.

Pour diminuer la consommation de combustibles fossiles le Plan National Intégré Énergie Climat Belge prévoit que 37% de la consommation finale brute soit issue d'énergie renouvelable en Wallonie d'ici 2030, dont 46% d'énergie éolienne. Pour atteindre cet objectif, il faut atteindre une production éolienne de 4600 GWh/an en 2030.

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de vérifier si ce but est atteignable en créant un outil permettant de mettre à jour la cartographie des zones favorables à l'installation du grand éolien en Wallonie de 2013. Cette mise à jour a été faite pour trois scénarios de base correspondant à trois modèles éoliens différents. Ceci a permis de déterminer que le productible augmente en parallèle à la hauteur des éoliennes, contrairement aux surfaces disponibles. Il est préférable d'installer en plus petit nombre des éoliennes plus grandes et plus puissantes, plutôt que plusieurs petites et moins performantes. En diminuant le nombre de mâts, leurs inconvénients sont également réduits. Le productible électrique potentiel plus élevé (3958 GWh/an) est obtenu pour le modèle considérant des éoliennes de 180 m de hauteur totale et de puissance nominale égale à 5,6 MW. Cet outil a également été utilisé afin d'analyser l'influence de la distance à l'habitat sur le productible. Cette analyse a permis de déterminer que la distance actuelle quant à l'habitat en zone habitation du plan de secteur est suffisante mais que la distance à l'habitat dispersé devrait être modifiée pour ne pas être une valeur fixe. La distance qui semble être le meilleur compromis entre la production et la qualité de vie est la distance de trois fois la hauteur totale de l'éolienne.

Pour améliorer la véracité des résultats, il faut entre autres des données d'entrées plus à jour et précises, aussi le repowering et la proximité aux réseaux électriques à haute tension pourraient être pris en compte dans le futur.

Et enfin, un objectif supplémentaire du travail est de proposer une méthode d'évaluation de la visibilité des éoliennes, qui permettrait dans le futur de mieux prédire l'impact visuel des parcs. La méthode proposée conduit à des résultats satisfaisants.

La Wallonie est largement capable d'atteindre son objectif d'ici 2030, la seule limite est le temps d'obtention de permis, la réalisation de l'étude d'incidences et d'installation.

Abstract

Title : Update of the map defining the zones favorable to the installation of large wind power in Wallonia.

Climate change is partly due to the use of fossil fuels and leads to more frequent extreme weather events. To counteract these negative effects and maintain the sufficient energy production necessary for the continued development of humanity, the installation of renewable energy is currently the only solution. Wind energy is a renewable energy that transforms the kinetic energy of the wind into electricity. It contributes to reduce air pollution and provides social and economic benefits. There are disadvantages to installing wind turbines, including their wildlife, noise and visual impact.

In order to reduce the consumption of fossil fuels, the 'Plan National Intégré Énergie Climat Belge' foresees that 37% of the gross final consumption should come from renewable energy in Wallonia by the end of 2030, of which 46% should come from wind energy. To attain this objective, a wind power production of 4600 GWh/year must be reached in 2030.

The main objective of this thesis is to verify if this goal is achievable by creating a tool that can update the map of favorable areas for the installation of large wind turbines in Wallonia from 2013. This update was done for three different basic scenarios which correspond to three different wind turbine models. This allowed us to see that the potential electricity production increases in parallel with the height of the turbines, the available surfaces on the other hand decrease with the height. It is therefore better to install fewer larger and more efficient wind turbines, rather than more small and less powerful ones. Reducing the number of turbines also reduces their disadvantages. The highest potential yield (3958 GWh/year) is obtained for the model considering wind turbines of a total height of 180 m and of nominal power equal to 5.6 MW. This tool was also used to analyze the influence of the distance to residential areas on the yield. This analysis determined that the current distance to residential areas in the 'Plan de secteur' is sufficient, but that the distance to scattered settlements should be modified so that it is not a fixed value. The distance that seems to be the best compromise between production and quality of life is the distance that equals three times the total height of the wind turbine.

To improve the veracity of the map, more up-to-date and accurate input data is needed, also repowering and proximity to high-voltage power grids could be considered in the future.

Finally, an additional objective of this work is to propose a method for assessing the visibility of wind turbines, which would allow to better predict the visual impact of the farms in the future. The proposed method leads to satisfactory results.

Wallonia is largely capable of achieving its objective by 2030, the only limit is the time to obtain permits, realize the impact study and the installation.

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1.	Changement climatique et transition énergétique	1
1.2.	Énergie éolienne	2
1.2.1.	Avantages	3
1.2.2.	Inconvénients	4
1.2.2.1.	Impact sonore	5
1.2.2.2.	Impact visuel	6
1.3.	Développement de l'éolien en Wallonie	7
1.4.	Objectifs de l'étude	10
2.	Matériel et méthode	11
2.1.	Introduction	11
2.2.	Cartographie des zones favorables	12
2.2.1.	Introduction	12
2.2.2.	Création des cartes de contraintes	13
2.2.2.1.	Carte des principales infrastructures de communication	14
2.2.2.2.	Catégorie Biodiversité	14
2.2.2.3.	Catégorie Sécurité des infrastructures	14
2.2.2.4.	Zone forêt résineuse	14
2.2.2.5.	Habitation hors zone d'habitation du plan de secteur	14
2.2.2.6.	Catégorie Spéciale	15
a)	Contrainte liée aux éoliennes existantes	15
b)	Contrainte potentiel vent	15
2.2.3.	Carte des zones favorables	16
2.2.4.	Délimitation des sites potentiels et agglomération en clusters	17
2.3.	Estimation du productible	18
2.3.1.	Simulation de l'implantation de mâts	18
a.	Vérification du code de simulation de mâts	18
2.3.2.	Respect des critères paysagers pour les mâts simulés	19
b.	Critère d'encerclement	20
c.	Critère d'interdistance	20
d.	Vérification du code des critères paysagers	21
e.	Analyse de la localisation des mâts potentiels	21
f.	Analyse de l'impact visuel des mâts potentiels	21

2.3.3.	Calcul du productible potentiel	23
2.4.	Influence de la distance à l'habitat et à l'habitat dispersé	24
2.4.1.	Influence de la distance à l'habitat	24
2.4.2.	Influence de la distance à l'habitat dispersé	24
2.5.	Proposition d'une méthode pour évaluer l'impact visuel des parcs éoliens	25
3.	Résultats	30
3.1.	Cartographie des zones favorables en 2022.....	30
3.1.1.	Mise à jour de la cartographie.....	30
3.1.1.1.	Cartes des zones favorables	30
3.1.1.2.	Simulation des éoliennes.....	32
3.1.1.3.	Éoliennes potentielles.....	32
3.1.1.4.	Localisation des éoliennes dans les zones d'affectation du sol du PDS	33
3.1.1.5.	Comparaison de la localisation des éoliennes potentielles et existantes	34
3.1.1.6.	Calcul de productible	34
3.2.	Analyse de l'influence de la distance à l'habitat et à l'habitat dispersé	35
3.2.1.	Analyse de la distance à l'habitat.....	35
3.2.2.	Analyse de la distance à l'habitat dispersé	36
3.3.	Évaluation de l'impact visuel des parcs éoliens	37
4.	Discussion.....	38
4.1.	Carte des zones favorables.....	38
	Influence de la distance à l'habitat du PDS et à l'habitat dispersé	40
4.2.	Impact visuel.....	41
5.	Conclusion et perspectives	42
6.	Bibliographie	44
7.	Annexe	47

Définitions

Nom	Définition
Analyse viewshed	Un algorithme de calcul qui délimite un cône de vue, c'est-à-dire la zone visible à partir d'un emplacement donné. (source : https://en.wikipedia.org/wiki/Viewshed_analysis (01/08/2022))
Bridage	Limiter la puissance d'un moteur. (source : https://dictionnaire.lerobert.com/definition/brider (02/08/2022))
Elia	Le gestionnaire du réseau de transport (GRT) d'électricité à haute tension en Belgique. (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Elia_(entreprise) (01/08/2022))
Éolienne offshore	Éolienne en mer.
Éolienne onshore	Éolienne sur le continent.
Éolienne potentielle	Éolienne simulée qui vérifie les contraintes paysagères.
Éolienne simulée	Éolienne qui pourrait être installée dans une zone favorable mais qui n'a pas encore vérifié les contraintes paysagères.
Gaz à effet de serre	Des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent ainsi à l'effet de serre. Certains de ces gaz sont naturellement présents dans l'atmosphère, d'autres sont issus des industries. (source: https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre (01/08/2022))
Hauteur totale	La hauteur maximale d'une éolienne (hauteur du mât avec la longueur d'une pale).
Moyeu	La partie centrale d'une pièce technique tournante. (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Moyeu (01/08/2022))
Raster	Type d'image informatique basé sur une grille de pixels. (source : https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/raster)
Site potentiel	Ensemble de zones favorables pouvant être constitué de plusieurs polygones de surface supérieure à 1 ha et de distance minimale de 660 m.
Taux de charge	L'énergie produite sur une année rapportée à l'énergie fournie par les éoliennes qui tourneraient en continu à leur puissance maximale (DGO4, 2022).
Transition énergétique	Processus qui consiste à remplacer les énergies conventionnelles par des énergies renouvelables (Guan, 2020).
Zone favorable	Zone qui est favorable à l'installation d'éoliennes selon les critères énoncés dans le CoDT (2022), le CDR (2013) et le dossier méthodologique de 2013 (Lejeune et al., 2013).

Abréviations

BRP	Balance Responsable Parties
CDR	Cadre de référence pour l'implantation d'éoliennes en région wallonne
CoDT	Code du développement du territoire
EIE	Étude d'incidences environnementales
FEBEG	Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières
GES	Gaz à effet de serre
Htot	Hauteur totale
LOS	Line of sight
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
OMS	Organisation mondiale de la santé
PADR	Points d'adresse
PDS	Plan de secteur
PIC	Principales infrastructures de communication
POV	Points de vue

1. Introduction

1.1. Changement climatique et transition énergétique

Les phénomènes climatiques extrêmes se multiplient depuis quelques années : sécheresses extrêmes, vagues de chaleur et autres phénomènes surviennent de façon plus récurrente et bien plus intense que dans le passé (Alphan, 2021). En cause, le changement climatique, qui est provoqué en partie par l'exploitation de combustibles fossiles (Saidur et al., 2011). Ceux-ci ont été la principale source de production d'énergie pendant plusieurs années (Koch et al., 2019) et ils ont permis de répondre à l'augmentation rapide de la demande d'énergie (Tercan, 2021). Cependant, ils ont un effet négatif sur l'environnement naturel et la santé humaine (Tercan, 2021).

Il a été constaté dans la littérature que les émissions de dioxyde de carbone, d'oxyde d'azote et de dioxyde de soufre sont responsables des pluies acides et du réchauffement climatique. Ce dernier est notamment à l'origine de l'effet de serre, de l'élévation du niveau de la mer et de la fluctuation des conditions météorologiques. De plus, les impacts de la production d'énergie conventionnelle (thermique ou nucléaire) sont lents à apparaître, long termes et impossibles à minimiser (Saidur et al., 2011).

Les trois principaux piliers de la consommation d'énergie mondialement sont : le chauffage (ou refroidissement), le transport et l'électricité. En 2018, la production d'électricité a augmenté de 4% (23000 TWh) au niveau mondial (Guan, 2020).

Le besoin en énergie est à la base du développement mondial en termes de croissance de l'économie nationale et de soutien au progrès technologique et industriel (Tercan, 2021). La demande mondiale d'énergie est prévue de doubler pendant ce siècle (Minelli et al., 2014), notamment à cause d'une augmentation de la population mondiale, de l'expansion des zones urbaines et de l'industrialisation rapide qui accélère la consommation d'énergie (Tercan, 2021).

Environ 80% de la population mondiale vit dans des pays importateurs nets de combustibles fossiles. Ceux-ci sont vulnérables face à une hausse des prix qui peut alors conduire à une précarité énergétique et à une perte de compétitivité industrielle (IRENA, 2022).

Compte tenu de la diminution de la disponibilité des combustibles fossiles (Danese et al., 2011, Tercan, 2021), de la hausse des prix de ces combustibles (Danese et al., 2011), des préoccupations en matière de sécurité énergétique (Lee et al., 2020), ainsi qu'une accélération des effets du changement climatique, une transition vers une énergie 100 % renouvelable est cruciale afin de protéger notre avenir commun (Tercan, 2021).

Afin de contrer tous ces effets négatifs et maintenir une production d'énergie assez élevée pour permettre un développement continu de l'humanité, les énergies renouvelables semblent être l'unique solution possible, car le nucléaire a obtenu une image trop négative ces dernières années (ex. après l'accident de Fukushima l'Allemagne a décidé d'arrêter tout nucléaire avant 2022) (Guan, 2020).

Dans le cadre de l'Accord de Paris de 2015, 186 pays ont accepté de réduire leurs émissions de GES et de contenir l'augmentation de la température moyenne mondiale endéans la limite de 1,5°C voire 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, et ce, d'ici 2050 (IRENA, 2022, Guan, 2020).

Pour atteindre ces objectifs, la transition énergétique est essentielle (Guan, 2020) et doit être accélérée pour assurer la sécurité énergétique à long terme, la stabilité des prix et la résilience nationale (IRENA, 2022). Cette transition peut être achevée en augmentant significativement la production et l'utilisation directe d'électricité issue des énergies renouvelables et en améliorant l'efficacité énergétique (IRENA, 2022). Pour arriver à limiter la température moyenne mondiale endéans 1,5°C, il faut arriver à des émissions nettes nulles d'ici 2050, ce qui correspond à une réduction de près de 37 Gt d'émissions annuelles. Pour atteindre cet objectif, une augmentation du pourcentage d'électricité produite par énergie renouvelable de 65% d'ici 2030 est nécessaire (IRENA, 2022).

L'électricité produite à partir de sources renouvelables est actuellement l'option la moins chère dans la plupart des régions (réduction du coût nivelé moyen pondéré mondial de l'électricité produite de 68% pour l'énergie solaire, 56% pour l'éolien terrestre (onshore)) (IRENA, 2022).

Les technologies solaires et éoliennes ont consolidé leur domination au fil du temps. En effet, au cours de la dernière décennie, la capacité électrique installée des énergies renouvelables a augmenté de 130 %, contre 24% pour les énergies non renouvelables. En 2021, la capacité d'électricité renouvelable installée mondialement était de 3065 GW (dont 843 GW provenant d'énergie solaire et 769 GW d'énergie éolienne). D'autres technologies d'énergie renouvelable ont également connu une croissance rapide au cours de la dernière décennie (IRENA, 2022).

La récente augmentation des prix des combustibles fossiles améliore encore plus les perspectives économiques des énergies renouvelables (IRENA, 2022).

1.2. Énergie éolienne

L'énergie éolienne, qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité (Ejdemo et al., 2015), est une énergie inépuisable qui peut être collectée tant sur le continent que sur l'océan (Saidur et al., 2011). D'après IRENA (2022), d'ici 2030, l'énergie éolienne sera une des principales sources d'énergie et couvrira 24% des besoins totaux en électricité au niveau mondial.

Les éoliennes onshore installées à grande échelle sont des éoliennes avec une puissance nominale théorique supérieure à 1 MW; celles-ci sont comprises dans le terme grand éolien (GW, 2013). Elles sont dimensionnées pour exploiter une certaine classe de vent (SPW, 2022). Leur structure principale est constituée de multiples éléments (figure 1), comme expliqué ci-dessous.

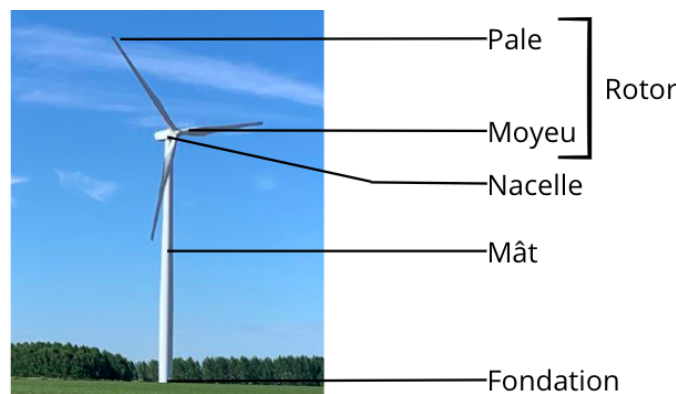


Figure 1 : Schéma représentant une éolienne à trois pales classique (Crédit photo : Veronica Craighero).

La fondation, constituée par un socle en béton armé coulé sur place, est nécessaire pour empêcher l'éolienne de tomber. La forme et les dimensions de la fondation dépendent de la taille de l'éolienne (Guan, 2020).

Le mât est la tour tubulaire qui supporte la nacelle et le rotor (Guan, 2020). L'accès à la nacelle pour la maintenance est assuré par une échelle présente à l'intérieur (ADEME, 2001).

La nacelle se trouve en haut du mât. Elle est munie entre autres d'instruments de mesure de vent (anémomètre et girouette) (ADEME, 2001). La girouette permet d'orienter l'éolienne face au vent afin d'en optimiser l'efficacité; l'anémomètre, quant à lui, permet de détecter les conditions extrêmes de vent (ADEME, 2001).

Le rotor est composé de trois pales fixées au moyeu, et il permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (ADEME, 2001). Chaque pale est équipée d'un paratonnerre et d'un système d'orientation indépendant (moteur électrique) qui permet de réguler la vitesse de rotation en changeant l'angle de prise au vent et d'arrêter l'éolienne (par exemple en cas de tempête) en mettant les pales dans le sens du vent (ADEME, 2001). Pour arrêter totalement le rotor, un système de freins est présent (ADEME, 2001). Quand le vent est suffisant et que l'éolienne peut produire assez d'électricité, l'éolienne sera alors couplée au réseau électrique (ADEME, 2001). Afin de produire un courant alternatif de fréquence constante, la vitesse de rotation doit rester constante tout au long de la période de production (ADEME, 2001).

1.2.1. Avantages

L'énergie éolienne est la source d'énergie (par rapport aux sources conventionnelles et renouvelables) la plus compétitive au monde (Lee et al., 2020) et son développement est l'un des plus rapides parmi les ressources renouvelables (Tercan, 2021).

C'est une énergie, qui peut être qualifiée de « propre » par rapport aux énergies fossiles et aux autres énergies renouvelables (Koch et al., 2019, Saidur et al., 2011). En effet, la construction, le transport, la mise en place et le démantèlement d'éoliennes produisent des émissions de GES, mais son fonctionnement ne nécessite pas de combustible fossile, et ne produit donc pas de GES (DGO4, 2022). Contrairement à d'autres sources d'énergies, l'empreinte CO₂ d'une éolienne est compensée après moins d'un an de fonctionnement. En remplaçant une production d'énergie conventionnelle équivalente, elle évitera des émissions GES durant le reste de son cycle de vie (DGO4, 2022), ce qui contribue à réduire les pollutions atmosphériques (Saidur et al., 2011; Möller, 2010). En effet, un système de 6 kW permet d'économiser 2,5 à 5 tonnes de CO₂ par an (Saidur et al., 2011). D'ici 2050, elle pourrait contribuer pour un quart (près de 6,3 gigatonnes) aux réductions annuelles d'émissions de CO₂ nécessaires pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris (Guan, 2020).

La majorité des matériaux constituant une éolienne sont recyclables (DGO4, 2022). Même pour les composites en fibre de verre ou fibre de carbone, dont sont composées les hélices, qui sont difficiles à recycler, des innovations existent qui permettent par exemple à la fibre de verre d'être utilisée dans la fabrication de ciment (DGO4, 2022).

En outre, les éoliennes apportent une plus grande sécurité d'approvisionnement en électricité et offrent généralement une protection contre les hausses des prix de celle-ci, ce qui procure des avantages sociaux et économiques (Saidur et al., 2011).

1.2.2. Inconvénients

La densité énergétique des parcs éoliens, c'est-à-dire l'énergie produite par unité de surface, est beaucoup plus faible que dans le cas des centrales électriques fossiles. L'énergie éolienne est donc une grande consommatrice d'espace ce qui entraîne des conflits avec les autres utilisations de cette ressource limitée (Masurowski et al., 2016).

Il est admis que les éoliennes ont un impact direct et indirect sur la faune (Saidur et al., 2011; Tercan, 2021). L'impact direct consiste dans la collisions des oiseaux et chiroptères avec les éoliennes (Saidur et al., 2011; Masurowski et al., 2016, Tercan, 2021), tandis que les impacts indirects correspondent à la perturbation et détérioration de l'habitat (Saidur et al., 2011; Tercan, 2021) ainsi que l'érosion des sols potentielle, la déforestation et la fragmentation des terres (Tercan, 2021). Il est estimé que pour 1 MW de puissance installée il faut au moins 6 ha de fondation (Guan, 2020).

Cependant, les chercheurs et les industries travaillent constamment pour réduire ces impacts environnementaux (Saidur et al., 2011). En outre, il convient de souligner que les éoliennes sont une cause de mortalité de l'avifaune marginale (< 1%) en regard d'autres causes (collision avec des fenêtres, des voitures, des lignes à haute tension) qui représentent plus de 91 % des décès recensés (SPW, 2022).

L'Agence fédérale allemande pour la conservation de la nature et d'importantes ONG demandent que les parcs éoliens soient limités aux forêts exploitées commercialement qui présentent une faible diversité biologique afin d'éviter une pression supplémentaire sur l'écosystème (Bunzel et al., 2019). Les éoliennes sont compatibles avec la production de bois et représentent un revenu supplémentaire pour les propriétaires forestiers (Bunzel et al., 2019).

Cependant, des recherches supplémentaires quant aux risques associés des éoliennes sur l'écosystème forestier sont nécessaires, car les connaissances des impacts sont encore très limitées (Bunzel et al., 2019).

La glace qui peut se former sur les hélices peut avoir une masse comprise entre 0,1 et 1 kg, et peut présenter un danger public car elle peut être projetée jusqu'à 100 m (Rideout et al., 2010).

Les éoliennes plus récentes sont dotées de moyens pour combattre cette formation de glace¹. Les éoliennes *Enercon* par exemple sont équipées d'un système de détection de givre: si l'éolienne détecte du givre, elle se met en arrêt et commence le processus de dégivrage¹. Pour réduire ce temps de dégivrage, certaines éoliennes possèdent un dispositif de chauffage des pales¹.

La plupart des éoliennes sont conçues pour résister à des températures allant jusqu'à -40°C, mais le stress dû au froid peut provoquer la fissuration ou la déformation des composants, interférer avec l'équipement électrique ou endommager les pièces mobiles de la boîte de vitesses (Rideout et al., 2010). La surveillance attentive est donc essentielle pour éviter une défaillance (Rideout et al., 2010).

Sous certaines conditions climatiques spécifiques et dans un rayon de 10 fois le diamètre du rotor, les hélices pourraient théoriquement provoquer des ombres à effet stroboscopiques (Guan, 2020). Néanmoins, la vitesse de rotation du grand éolien est trop faible pour induire des crises d'épilepsie (Smedley et al., 2009). Toutefois, une peinture non réfléchive pourrait réduire d'avantage ce risque (Harding et al., 2008, Rideout et al., 2010).

¹ <https://www.enercon.de/technologie/anlagenfeatures/> (11/07/2022)

Les éoliennes produisent des champs électriques et magnétiques. Cependant, ceux-ci sont négligeables même au pied des éoliennes (où la source est la plus élevée) pour des éoliennes d'une hauteur de mât supérieure à 100 m (DGO4, 2022).

Afin d'augmenter le nombre d'éoliennes installables, le réseau à haute tension doit être renforcé en installant des nouvelles lignes et des transformateurs (DGO4, 2022). Les '*smart grids*' peuvent être utilisés de façon automatique et à distance pour permettre une gestion efficace du réseau électrique et pouvoir optimiser l'équilibre entre l'offre et la demande (DGO4, 2022). La décharge du stockage dans le réseau a lieu lorsque la demande est élevée et la production renouvelable faible (IRENA, 2022); à l'inverse, la production peut être interrompue quand la demande est faible (DGO4, 2022). De cette manière, le stockage de l'électricité permet de réduire le prix du système et évite d'investir dans des centrales de pointe inutiles et coûteuses (IRENA, 2022).

Les accumulateurs d'énergies renouvelables qui aident à compenser les variations du réseau peuvent, entre autres, être constitués d'anciennes batteries de véhicules électriques².

1.2.2.1. Impact sonore

Le bruit des éoliennes peut être réparti en deux sources principales (Katinas et al., 2016, Raman et al., 2016). D'une part, le bruit mécanique qui est provoqué par les pièces mobiles à l'intérieur de la cabine (Katinas et al., 2016). Il peut être atténué en utilisant des barrières acoustiques et des systèmes d'isolation des vibrations à l'intérieur de la nacelle (Raman et al., 2016). D'autre part, le bruit aérodynamique qui est dû aux changements de courant d'air, qui se produisent en raison de l'écoulement de l'air sur les pales du rotor (Katinas et al., 2016). Ce bruit peut être à large bande et tonal (Katinas et al., 2016). Pour réduire ce bruit il est possible par exemple d'avoir une forme de pale plus aérodynamique et d'ajouter un bord dentelé (Raman et al., 2016) ce dernier permet une réduction de 7 à 8 dB (DGO4, 2022). L'augmentation de la hauteur des mâts permet également une réduction du bruit au niveau du sol (DGO4, 2022).

Le '*swooshing*', est perçu comme étant le bruit le plus gênant, il peut être réduit en ajustant la qualité du bruit aérodynamique produit par les pales ou en alternative, la vitesse de rotation des éoliennes peut être réduite afin d'amener la fréquence de modulation à une gamme moins gênante (Raman et al., 2016). Enfin, il est aussi possible d'utiliser un bruit généré activement pour augmenter la fréquence de modulation à une gamme moins gênante (Raman et al., 2016).

L'OMS recommande, lors de l'estimation de l'impact environnemental de l'éolien, d'évaluer l'impact sonore à basse, moyenne et haute fréquence, car même si l'ouïe humaine ne perçoit pas les basses et hautes fréquences, elles peuvent provoquer une sensation d'inconfort et peuvent nuire à la santé humaine (Katinas et al., 2016). Cependant, l'impact sonore des éoliennes ne nuit pas à la santé selon l'OMS (SPW, 2022). Le seuil des niveaux sonores acceptables se situe dans la fourchette de 35-45 dB(A) (Raman et al., 2016). Les éoliennes sont généralement construites dans une zone ouverte, ce qui crée des bonnes conditions pour la dispersion du bruit (Katinas et al., 2016). Le bruit peut être réduit en construisant des structures et en plantant diverses plantes (Katinas et al., 2016). Cependant à partir d'une distance de 300 m le bruit des éoliennes est indépendant de la vitesse du vent et à partir de 350 m une éolienne n'est pas plus bruyante qu'un réfrigérateur de cuisine (Saidur et al., 2011).

² <https://www.bmw.com/fr/innovation/cycle-de-vie-batterie-pour-vehicule-electrique-bmw.html> (03/07/2022)

1.2.2.2. Impact visuel

Un inconvénient majeur des éoliennes est leur impact visuel.

Ce n'est que depuis 2014 que la directive '*Environmental Impact Assessment*' adoptée par l'Union Européenne a reconnu qu'afin de mieux préserver le patrimoine historique et culturel et le paysage, l'impact visuel des projets doit être abordé dans les études d'impact environnementaux (Palmer, 2019).

L'identité du paysage régional est en constante évolution dû aux nombreuses révolutions énergétiques qui conduisent à des changements importants dans l'apparence du paysage (Guan, 2020).

Différents facteurs sont à prendre en compte lors d'une évaluation de l'impact visuel, tels que la distance par rapport aux éoliennes, la taille, le nombre, la couleur, les conditions météorologiques, mais aussi le temps pendant lequel la population a été exposée à la vue des éoliennes (Danese et al., 2011). Le mouvement des éoliennes impacte également leur perception, car si elles sont en mouvement elles sont perçues comme étant 10-20% plus larges en taille; cependant les personnes voient les éoliennes statiques comme une perte d'énergie (Guan, 2020). L'augmentation de la taille des pales entraîne une diminution de la vitesse de rotation, ce qui réduit l'effet '*eye-catcher*' des éoliennes en mouvement (Guan, 2020). Des études quant à la relation entre l'impact visuel et la vitesse de rotation des pales n'ont pas été réalisées jusqu'à présent (Guan, 2020).

Jensen et al. (2014) ont constaté qu'au Danemark les prix des habitations diminuaient de 3% si une éolienne était visible. Gibbons (2015) a constaté qu'au Royaume-Uni la visibilité d'éoliennes à moins de 2 km provoque une diminution des prix des habitations de 5% alors qu'entre 2 et 4 km la réduction était de 2% pour atteindre 0% au-dessus des 4 km. La quantification des coûts externes découlant de l'impact visuel des parcs installés permettrait aux décideurs politiques d'avoir des informations quant au compromis entre les avantages techniques et les impacts économiques créés (Koch et al, 2019).

Les premiers mâts ont été installés dans des zones ayant un moindre impact sur la population (Koch et al, 2019), car uniquement des règles de distances étaient considérées (Möller, 2010) et il y avait beaucoup d'espace disponible. Des restrictions pour leur implantation (buffer, zones où on ne peut pas bâtir) ont commencé à apparaître dans les années 1990 (Möller, 2010).

Actuellement, les impacts de l'implantation des éoliennes sur la population sont toujours plus importants à cause de la croissance significative de l'énergie éolienne (Koch et al., 2019). De plus, les nouvelles éoliennes sont plus hautes et les anciennes éoliennes vont être remplacées par des nouveaux modèles plus hauts et plus performants dans le processus appelé repowering (Guan, 2020). Ce qui rend la détermination d'où pouvoir installer des éoliennes un problème toujours plus complexe, car cela implique une analyse combinée de plusieurs critères tout en minimisant les impacts environnementaux (Tercan, 2021).

L'impact visuel étant très subjectif plusieurs méthodes existent pour faciliter la prise de décision en la rendant plus objective. Par exemple, l'analyse viewshed (calcul des cônes de vue), qui identifie chaque cellule visible depuis un ou plusieurs points d'observation (Danese et al., 2011). Grâce aux logiciels SIG, le calcul de viewshed ou la visibilité d'un ou plusieurs objets en utilisant une représentation raster de MNT ou MNS est possible (Möller, 2006). De nombreux paramètres comme la résolution du raster, l'échelle de l'étude et la représentation de la surface du paysage influencent la qualité de ces analyses (Möller, 2010).

L'analyse de visibilité peut inclure des facteurs tels que la nature du paysage local, le nombre de turbines, leur taille, leur distance, leur design, etc. (Bishop, 2019).

Une simulation visuelle consistant en la création de parcs virtuels pour montrer aux gens l'impact potentiel d'un nouveau parc, est également un type de méthode largement utilisé (Bishop, 2019).

Le SIG et l'évaluation de la visibilité peuvent aider à déterminer les zones affectées et le degré probable de l'impact visuel (Saidur et al., 2011).

D'après Sklenicka et Zouhar (2017), les prédicteurs les plus importants de l'impact visuel sont, dans l'ordre, le pourcentage de zone industrielle, le pourcentage de couverture forestière, la densité de l'infrastructure technique, le nombre de points de repère en altitude et la variation de l'altitude.

La méthode de Ioannidis et al. (2022), dénommée l'analyse de la zone de visibilité théorique inversée, se base sur des analyses viewshed inversées et permet de déplacer le centre d'intérêt sur les zones qui doivent être protégées des impacts des éoliennes. Cette méthode facilite l'anticipation des impacts paysagers des projets dès les premières étapes de planification et élimine la nécessité de réaliser des analyses de visibilité individuelles pour chaque nouveau projet.

Palmer (2022) a étudié une approche permettant d'évaluer la prééminence visuelle des éoliennes individuelles. Il différencie la visibilité d'une éolienne de la pointe de l'hélice (visibilité de toute l'éolienne), de la nacelle, et de l'hélice entière (aussi quand elle se trouve dans la position inférieure).

Minelli et al. (2014) ont développé une méthode et un outil SIG Open Source '*r.wind.sun*' qui permet d'évaluer quantitativement l'impact visuel des installations en utilisant des techniques de '*line of sight*' (ligne de vue). L'outil permet une amélioration de la précision du calcul de l'impact visuel des installations en prenant en compte entre autres la distorsion de la forme.

De nombreuses méthodes supplémentaires existent pour déterminer l'impact visuel des éoliennes et de nombreuses autres méthodes sont en cours de développement. Si les éoliennes sont conçues et planifiées avec soin, les impacts négatifs peuvent être minimisés (Saidur et al., 2011).

Le développement d'énergie éolienne s'est accompagné d'un développement continu des lois concernant les énergies et des pratiques de planification (Möller, 2010).

1.3. Développement de l'éolien en Wallonie

Pour pouvoir atteindre les objectifs de l'accord de Paris il faut une volonté politique affirmée, des cadres juridiques complets et un investissement public et privé plus élevé (IRENA, 2022).

La politique éolienne wallonne repose à la fois sur l'utilisation des zones encore disponibles et sur le repowering.

Sauf mention contraire, les informations présentées dans ce point sont extraites du document DGO4, 2022.

La Belgique étant un pays relativement plat, densément peuplé, l'utilisation à grande échelle d'éoliennes onshore est difficile (CNC, 2019). Néanmoins, la Wallonie bénéficie d'un gisement de vent de qualité (la journée la plus productive pour la production d'énergie éolienne a été le 6 février 2022 avec 94,5 GWh).

L'installation d'éoliennes sur le continent est soutenue par le gouvernement wallon notamment en adoptant la Pax eolienica, qui comprend des mesures concrètes visant à favoriser le développement de la filière éolienne (CNC, 2019).

Potentiellement des surfaces pour l'éolien onshore pourront être dégagées par le Ministre de la Défense autour des zones militaires et des aéroports, ce dialogue est en cours (CNC, 2019).

Le PNEC de la Belgique (approuvé par le gouvernement wallon le 28 novembre 2019) prévoit que 37% de la consommation finale brute soit issue de sources renouvelables pour la Wallonie (CNC, 2019). L'énergie éolienne est prévue de représenter 46% de ces 37%, ce qui correspond à 4600 GWh/an pour 2030 (CNC, 2019).

Le mix électrique belge est constitué de trois volets :

1. Une part stable qui provient d'énergies conventionnelles qui peuvent être flexibles ou pas. (En 2021 la production de nucléaire a couvert 57% de la consommation totale belge)
2. Une part intermittente qui est constituée d'énergie éolienne et photovoltaïque, qui sont dépendantes des variations météorologiques. Les énergies renouvelables peuvent alors soulager la production d'énergie conventionnelle polluante.
3. Une part flexible pour répondre aux variations de la demande (centrales de gaz, achat et vente d'électricité à l'étranger)

Des chutes de production dans sa totalité au niveau national est invraisemblable, même si une variation peut exister entre mâts d'un même parc. Néanmoins, le risque peut être réduit en augmentant l'interconnexion avec d'autres pays (échange d'excédents d'énergie verte) et en combinant l'énergie éolienne avec le photovoltaïque par exemple, qui par sa faible simultanéité est une énergie complémentaire.

Sur demande, les développeurs éoliens doivent ouvrir les nouveaux projets aux citoyens à 24,99% et aux communes à 24,99% (GW, 2013).

Depuis 2012, la Wallonie soutient le projet POLLEC (Politique Locale Énergie Climat) qui aide les autorités locales wallonnes à mettre en place une Politique énergie climat, les communes et coordinateurs supra-locaux s'engagent à réduire 40% des GES sur leur territoire avant 2030. Ce programme aide à favoriser la mise en œuvre concrète de projets à court et moyen termes.

Pour l'instant, la Wallonie présente une dépendance énergétique très importante; en effet, 90% de l'énergie consommée ou transformée était importée en 2016. En 2021, la Wallonie a su exporter de l'électricité pour la troisième année consécutive grâce à une plus grande capacité de production nucléaire et à l'augmentation de la production d'énergie renouvelable.

D'un point de vue économique, la transition énergétique en Belgique créera de nombreux emplois (le nombre d'emplois dans la filière éolienne est passé de 3175 en 2011 à 7500 en 2019) et pourrait augmenter le PIB de plus de 2%.

La hausse du nombre d'énergies renouvelables a rendu les prix négatifs (quand l'offre est supérieure à la demande) pour l'électricité un phénomène assez courant et a rendu le prix de l'électricité plus volatile. En 2021, il y a eu 159 heures avec des prix négatifs en Belgique. Cependant, ce sont des phénomènes à très court terme et n'ont donc pas beaucoup d'impact. De plus, à long terme ces énergies vont permettre de stabiliser ou de réduire le prix du kilowattheure.

Comme mentionné auparavant, les éoliennes ont également des impacts négatifs pour lesquels la Wallonie a mis en place des lois et des recommandations.

Pour limiter les problèmes liés au bruit, l'arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 fixe une limite du bruit à 45 dB le jour, et 40 dB la nuit (GW, 2013). Si les seuils sont dépassés pour un parc en fonction, un bridage est imposé, ce qui permet une réduction de 2 à 5 dB(A) mais réduit la production électrique.

Les phénomènes d'ombre portée sont limités à 30 heures par an et 30 minutes par jour (GW, 2013). De plus, les éoliennes ont un système '*shadow-modules*' qui permet un arrêt automatique dans le cas où cette norme est dépassée.

Afin de protéger la qualité de vie des citoyens, il est interdit d'installer des éoliennes dans certaines zones d'affectation du PDS, ces zones sont détaillées dans le CoDT (2022) qui est la législation en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme. Un permis est nécessaire à l'installation d'une éolienne. La durée maximale d'un permis d'environnement pour une ou plusieurs éoliennes est de 30 ans.

Pour préserver les paysages, il est conseillé de privilégier les implantations à proximité d'infrastructures (autoroutes, axe fluvial, ...) et les parcs avec au moins 5 mâts (GW, 2013). De plus, la disposition et l'agencement des parcs éoliens doit être fait de façon à mettre en valeur les caractéristiques du paysage et souligner les lignes de force qui sont identifiées lors de l'EIE (GW, 2013).

Afin d'éviter une sensation d'encerclement et donc de saturation visuelle par les parcs éoliens, un angle horizontal (azimut) minimal sans éolienne de 130° est fixé (GW, 2013). De plus, une interdistance minimale entre parcs est fixée entre 4 et 6 km (sauf si implantés le long des autoroutes) en fonction de l'EIE (GW, 2013).

Pour protéger la biodiversité, durant l'EIE la fréquentation du site par les chauves-souris et oiseaux est étudiée en détail; en fonction des résultats de cette étude le projet peut être refusé ou modifié, alternativement il y aura un bridage des éoliennes voire un arrêt temporaire. Parfois, des mesures de compensations seront nécessaires. Un bridage ou arrêt automatique peut être réalisé grâce à des innovations technologiques qui permettent de détecter les conditions météorologiques optimales pour le vol des chauves-souris ou de détecter l'arrivée de flux migratoires, mais cela entraîne une perte de productivité.

Des normes internationales de sécurité existent pour assurer la sécurité de l'installation et fonctionnement des éoliennes. Les principales mesures de sécurité imposées sont l'arrêt automatique des pales en cas de tempête, l'équipement de paratonnerres, le chauffage ou arrêt des pales en cas de gel, la solidité des fondations.

La production éolienne sur le territoire wallon est caractérisée par une puissance totale de 1036 MW qui est pour la majorité directement injectée dans le réseau de distribution.

Le gabarit moyen des éoliennes a nettement augmenté ces dernières années; en effet, en 2021 43% de la puissance totale des éoliennes commandées en Europe en MW avait un diamètre de rotor entre 160 et 180 m pour une hauteur minimale entre 190 et 210 m (FEBEG, 2022). Cependant, la Wallonie n'a pas évolué aussi rapidement; en effet, 93% de la puissance totale des éoliennes commandées en 2021 concerne des éoliennes de rotor entre 100 et 120 m et de hauteur minimale de 130 et 150 m (FEBEG, 2022). Ceci signifie que la flotte actuelle en Wallonie est nettement sous-performante par rapport au reste de l'Europe (FEBEG, 2022), surtout si l'on considère qu'une augmentation de 20% de la longueur d'une pale permet une augmentation de la puissance de 44%. Augmenter la hauteur permet d'avoir un vent plus rapide et si la vitesse double la puissance augmente d'un facteur 8 (FEBEG, 2022).

Il est donc impératif pour la région d'installer des éoliennes plus performantes et hautes afin d'atteindre le but de production (FEBEG, 2022).

Il faut encourager le public à accepter les énergies renouvelables; une prise de conscience est nécessaire afin d'éviter le mécontentement de la population et donc pouvoir installer plus d'éoliennes (Lee et al., 2020).

1.4. Objectifs de l'étude

Le cabinet du Ministre de l'Energie wallon travaille actuellement à une révision de son Plan Air Climat Énergie en vue d'atteindre une réduction de gaz à effet de serre de 55% par rapport à 1990 d'ici 2030.

En 2013, la Wallonie a financé la réalisation d'une cartographie des zones favorables à l'installation du grand éolien pour vérifier si leur plan de l'époque (3800 GWh/an pour l'horizon 2020) était réalisable. Cette carte reprenait toutes les contraintes à considérer lors de l'installation d'éoliennes en région wallonne. Ce type de carte est également réalisé dans d'autres pays (Allemagne (RROP, 2016) et Turquie (Tercan, 2021) par exemple).

Elle était complétée d'une estimation de productible électrique associé.

Cette carte datant de près d'une décennie, il est apparu nécessaire de réaliser sa mise à jour, sachant que les spécifications techniques des éoliennes (hauteur, diamètre du rotor, puissance) ont beaucoup évolué en 10 ans. Une telle mise à jour doit permettre au Gouvernement wallon d'évaluer la pertinence des objectifs de production d'énergie éolienne qu'il a fixés à l'horizon 2030 (CNC, 2019).

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est la création d'un outil permettant la mise à jour de la cartographie des zones favorables à l'installation du grand éolien et l'estimation du productible associé. Cet outil sera utilisé afin de tester différents scénarios de base correspondant à différents modèles d'éoliennes, mais également afin d'analyser l'influence des contraintes de distance à l'habitat sur le productible.

Un dernier objectif concerne la mise au point d'une méthode pour évaluer l'impact visuel des éoliennes, ce qui permettrait dans le futur de mieux objectiver cet impact qui reste une des entraves les plus fortes au développement de cette source d'énergie.

2. Matériel et méthode

2.1. Introduction

La zone d'étude du travail est la région Wallonne.

Les outils informatiques utilisés pour réaliser ce travail sont R (4.1.3) et QGIS (3.33.1 - Białowieża) tous les deux étant des logiciels Open Source. R est utilisé au départ de l'interface RStudio (2022.02.0). Les cartes et leur mise en page ont été réalisées sur QGIS.

Les couleurs utilisées ont été choisies grâce au site web : colorbrewer2 (<https://colorbrewer2.org/>) qui permet d'avoir une échelle de couleurs séquentielle adaptée aux daltoniens. Afin que le document soit accessible à toute personne présentant une forme quelconque de daltonisme tous les graphiques, tableaux et cartes, ont été vérifiés sur le site web : colblindor (<https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>).

Les schémas ont été réalisés à travers le site web canva (<https://www.canva.com/>). Les tableaux et graphiques ont été réalisés sur Microsoft Excel.

La plupart des fonctions de géotraitement utilisées dans les scripts R ont été développées par Philippe Lejeune et Nicolas Latte (Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège). Le code est commenté et modifié de façon qu'il soit compréhensible et utilisable par n'importe quelle personne ayant des connaissances basiques de codage. Aussi, le code permet de mettre à jour facilement les données entrantes. Tous les packages utilisés dans R sont listés dans l'annexe 1.

Les trois sous-points suivants ont été définis afin de répondre à l'objectif principal :

1. Création d'une carte actualisée (2022) des zones favorables à l'installation du grand éolien.

Cette étape consiste à actualiser les couches cartographiques décrivant les contraintes strictes et partielles à l'implantation des éoliennes, et à agréger celles-ci. Les zones favorables sont ensuite traduites en sites potentiels. Les zones favorables étant liées au dimensionnement des éoliennes à installer dans le futur, trois scénarios de base correspondant à trois modèles d'éolienne (« 210m », « 180m » et « 150m ») ont été considérés.

2. Estimation du productible.

Des implantations d'éoliennes sont ensuite simulées sur les sites potentiels. Une procédure de sélection des éoliennes respectant les critères paysagers d'interdistance et d'encerclement est ensuite appliquée. Le productible électrique potentiel est finalement estimé sur les éoliennes potentielles retenues.

3. Influence de la distance à l'habitat.

Une analyse est faite pour vérifier l'influence de la distance à l'habitat en zone du PDS et à l'habitat dispersé sur le productible électrique potentiel.

Enfin, une dernière partie du travail consiste en la proposition d'une méthode pour évaluer l'impact visuel afin de répondre à l'objectif supplémentaire. Pour cela, une méthode d'analyse de l'impact de visibilité est étudiée sur une zone réduite afin de vérifier sa véracité.

2.2. Cartographie des zones favorables

2.2.1. Introduction

La première étape de ce travail a été la création de la carte des zones favorables, qui présente toutes les zones permettant l'installation du grand éolien en Wallonie.

Pour créer cette carte, il a fallu traduire les contraintes limitant l'installation définies dans le CoDT (2022), le CDR (2013), et dans certains arrêtés sous forme cartographique. Les contraintes supplémentaires relatives à l'incompatibilité technique, à la sécurité dans les zones à risque, etc. ajoutées dans la cartographie de 2013 ont également été considérées ici.

Ces contraintes sont divisées en deux grands types : les contraintes intégrales et les contraintes partielles.

Les premières représentent des zones d'exclusion totale, où l'implantation d'éoliennes est impossible.

Les deuxièmes sont les contraintes partielles, qui définissent des zones où l'installation d'éoliennes serait possible d'un point de vue légal et technique mais pour lesquelles d'autres facteurs peuvent potentiellement rendre leur installation impossible.

Différentes catégories existent pour les contraintes d'exclusion intégrales et partielles qui sont reprises aux annexes 2 et 3. Certaines contraintes ont été modifiées par rapport à 2013, car les mesures en vigueur ont changé, ces modifications sont reprises aux annexes 2 et 3.

Pour certaines contraintes, un tracé de zones tampon (buffer) autour des éléments de référence est nécessaire. Un tableau reprenant toutes les contraintes, leur buffer et couches d'origine se trouve en annexe 4 et 5.

Le buffer de certaines contraintes est directement dépendant du dimensionnement (hauteur et diamètre du rotor) des éoliennes que l'on souhaite installer. De ce fait, la cartographie des zones favorables est liée aux modèles d'éoliennes qui seront installées dans le futur. Pour évaluer l'impact de ce choix technique, 3 scénarios de base correspondant à 3 modèles d'éoliennes ont été considérés (tableau 1). Ces modèles ont été sélectionnés en concertation avec 3E qui réalise une étude complémentaire à celle-ci sur le repowering.

Tableau 1: Informations relatives aux trois modèles d'éoliennes considérés pour les scénarios de base.

Hauteur totale (en m)	Éolienne simulée	Diamètre rotor (en m)	Densité de puissance (en W/m ²)	Puissance nominale (en MW)
210	SG5.6-155	155	297	5,6
180	V136 4.5	136	310	4,5
150	GE103-2.5	103	330	2,5

Dans la suite du document, ces trois scénarios de base seront référencés par la hauteur des éoliennes : « 210 m », « 180 m » et « 150 m ».

2.2.2. Création des cartes de contraintes

La figure 2 schématise la démarche suivie pour produire les cartes de contraintes.

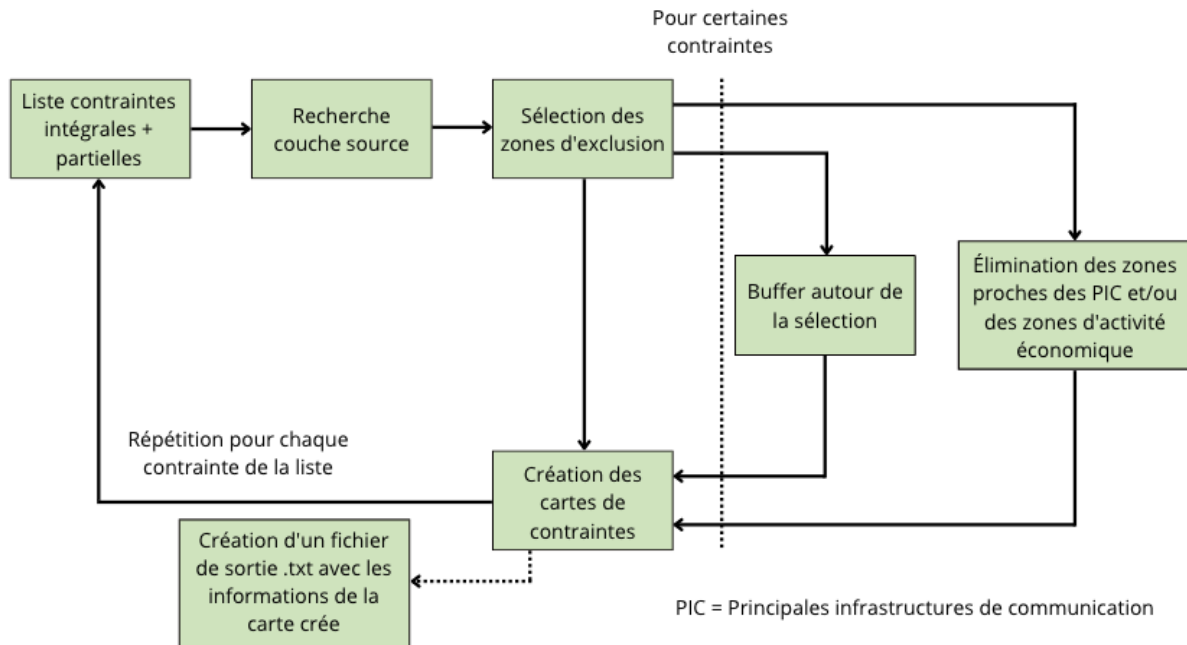


Figure 2: Représentation schématique de la réalisation des cartes de contraintes.

Toutes les étapes (sauf la recherche des données 'sources') ont été effectuées à l'aide d'un script R. La majorité des couches sources ont été obtenues via le Géoportail de la Wallonie³, pour lequel une licence a été acquise dans le cadre du travail. La liste complète des données source utilisées se trouve en annexe 4 et 5.

Pour certaines contraintes, les données sources n'ont pas été modifiées entre 2013 et 2022, car elles n'ont pas subi de modifications, ou bien des cartes plus récentes n'étaient pas disponibles.

L'information utile de la couche source a alors été extraite et pour certaines contraintes modifiées (création d'un buffer autour de la zone, suppression des zones trop éloignées par rapport aux PIC et/ou des zones d'activité économique).

Finalement, une carte de contraintes est créée et en parallèle un fichier de sortie en format txt qui contient les informations relatives à la création de la carte (métadonnées).

Les cartes de contraintes ont été sauvegardées en format raster, afin de faciliter leur agrégation par la suite (voir point 2.2.3). Ce format permet de garder uniquement l'information binaire de présence/absence de la contrainte.

³ <https://geoportail.wallonie.be/home.html>

2.2.2.1. Carte des principales infrastructures de communication

Comme montré à la figure 2 certaines contraintes nécessitent la carte des PIC afin de correctement délimiter les périmètres utilisables.

D'après le CoDT (10 mai 2022) les PIC sont définies comme suit :

“ Art. R.II.21-1. Principales infrastructures de communication
(...) le réseau des principales infrastructures de communication (...) comporte :
1° les autoroutes et les routes de liaisons régionales (...);
2° les lignes de chemin de fer, (...);
3° les voies navigables, en ce compris les plans d'eau qu'elles forment.”

2.2.2.2. Catégorie Biodiversité

Les cartes relatives aux contraintes liées à la faune sont liées au CDR (2013). Les données relatives aux plaines agricoles, aux plans d'eau, aux zones d'intérêt pour les chauves-souris n'ont pas évolué significativement (Jérémy Simar, comm. pers). Des données plus récentes pour les milans existent mais ce ne sont pas celles liées au CDR (2013) actuel (Jérémy Simar, comm. pers).

2.2.2.3. Catégorie Sécurité des infrastructures

Une distance de sécurité entre les éoliennes et certaines infrastructures doit être respectée pour assurer la protection des usagers des infrastructures. Le CDR (2013) prévoit qu'un contour de sécurité peut être nécessaire autour des voies navigables. Cependant, n'ayant pas de précisions quant à ce contour, ceci n'a pas été considéré comme une contrainte.

Les buffers autour des routes ont été pris en compte ici alors qu'en 2013 ce n'était pas le cas.

2.2.2.4. Zone forêt résineuse

Pour créer cette nouvelle contrainte, la couche du PDS a été croisée avec celle de la carte de proportion des essences forestières produite pour l'année 2021 dans le cadre du projet CARTOFOR (Lejeune et al., 2022)⁴ afin de connaître le type de peuplement forestier présent.

Les mises à blanc sont considérées comme étant des forêts résineuses. Enfin, les zones à moins de 750 m des PIC ont été éliminées.

2.2.2.5. Habitation hors zone d'habitation du plan de secteur

Contrairement à ce qui a été fait en 2013, pour définir les habitations se trouvant en dehors de la zone habitat du PDS, la couche contenant les informations relatives aux points adresse a été utilisée. Ceci permet donc de prendre en considération toutes les habitations, mais prend également en compte des bâtiments qui ne sont pas des habitations comme des écoles ou des églises, qui ne devraient idéalement pas être pris en compte.

Les PADR en zone d'affectation 'activité économique' et zone d'affectation 'aménagement communal concerté à caractère économiques' n'ont pas été pris en compte.

⁴ Lejeune P., Claessens H., Ligot G., 2022. Plan Quinquennal de Recherches Forestières 2019-2024 - Rapport annuel de Juin 2022. Université de Liège - Gembloux AGRO-BIO TECH, 140 p.

2.2.2.6. Catégorie Spéciale

Les contraintes spéciales ont été vues comme des contraintes à part en 2013, mais ici elles sont directement intégrées de la même façon que les autres contraintes.

a) Contrainte liée aux éoliennes existantes

Les zones où des éoliennes sont déjà présentes ne peuvent plus être considérées comme favorables à l'installation de nouvelles éoliennes.

La couche source contenant les éoliennes installées et en projet (dénommées éoliennes existantes dans la suite du document) en Wallonie et leurs informations relatives proviennent d'un shapefile de 3E. Les informations relatives au modèle et la hauteur des éoliennes manque pour celles en projet (qui ont eu l'autorisation d'être installées mais qui ne sont pas libres de recours (avant février 2021)), un diamètre de rotor de 117 m et une hauteur de mât de 110 m ont été choisis pour celles-ci, car le modèle N117/3000 est le plus représentatif de la flotte qui sera installée ces prochaines années (Nicolas Meerts, comm. pers)

Des ellipses définissant l'emprise technique pour chaque mât ont été créées selon le modèle montré à la figure 3. Le grand axe de l'ellipse est orienté dans la direction des vents dominants (azimut = 235°).

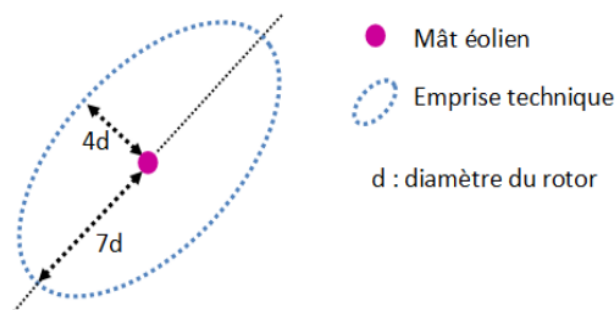


Figure 3 : Représentation schématique des ellipses définissant l'emprise technique autour des mâts (Source : Lejeune et al., 2013).

Enfin une enveloppe a été créée autour de ces ellipses, ce qui permet de regrouper les mâts individuels en champs éoliens en créant des polygones convexes. Ces enveloppes ont, si nécessaire, été modifiées manuellement dans QGIS pour qu'elles suivent mieux les ellipses (Lejeune et al., 2013).

b) Contrainte potentiel vent

La carte utilisée est celle créée en 2013 par ATM-Pro pour l'éolienne E82 2 MW, qui était l'éolienne de référence à l'époque.

Cette carte est néanmoins utilisée afin d'éviter la simulation d'éoliennes dans des zones à potentiel venteux trop faible pour permettre une rentabilité économique et d'éviter par conséquent une surestimation du productible électrique potentiel.

Une mise à jour de la carte du potentiel venteux pour les nouveaux modèles d'éoliennes est en cours, mais elle ne sera disponible qu'en novembre et ne pourra donc pas être prise en compte dans le cadre de ce travail (Nicolas Meerts 3E).

2.2.3. Carte des zones favorables

La figure 4 synthétise le processus de création des cartes de zones favorables.

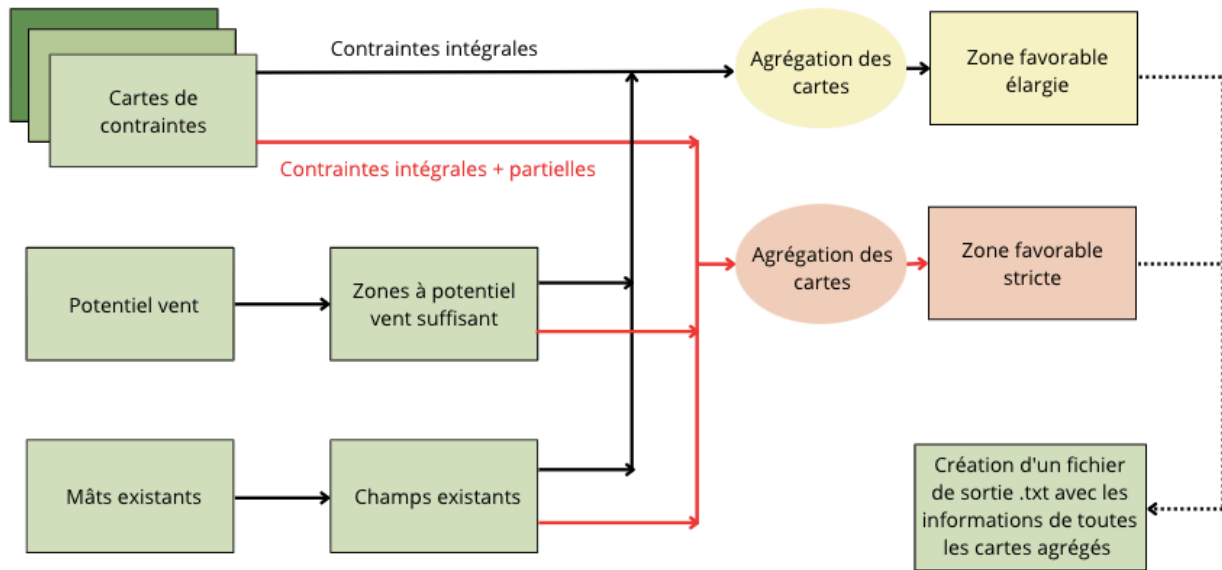


Figure 4: Représentation schématique de la création des cartes de zones favorables strictes et élargies.

Une fois toutes les couches de contraintes créées, elles sont agrégées grâce à la fonction 'otbcli_BandMathX' de OTB (Orfeo ToolBox). Le résultat est une couche raster binaire qui différencie les zones avec contraintes (valeur 1) des zones sans contrainte (valeur 0). La couche des zones favorables est finalement produite par inversion ($0 \rightarrow 1$, $1 \rightarrow 0$) (figure 5) et par masquage avec les limites de la Région wallonne.



Figure 5 : Inversion de la couche des contraintes (à gauche) pour produire la couche des zones favorables (à droite).

La prise en compte des seules contraintes intégrales conduit à la carte des **zones favorables élargies**. Si les contraintes intégrales et partielles sont considérées, le résultat correspond à la carte des **zones favorables strictes**.

Les cartes de zones favorables sont accompagnées d'un fichier texte qui reprend toutes les informations relatives aux cartes de contraintes utilisées pour leur création. Ces fichiers constituent les métadonnées qui documentent le processus de production des cartes de zones favorables.

2.2.4. Délimitation des sites potentiels et agglomération en clusters

Les étapes pour la délimitation des sites potentiels sont illustrées à la figure 6, la démarche considérée est identique à celle utilisée pour la carte de 2013.

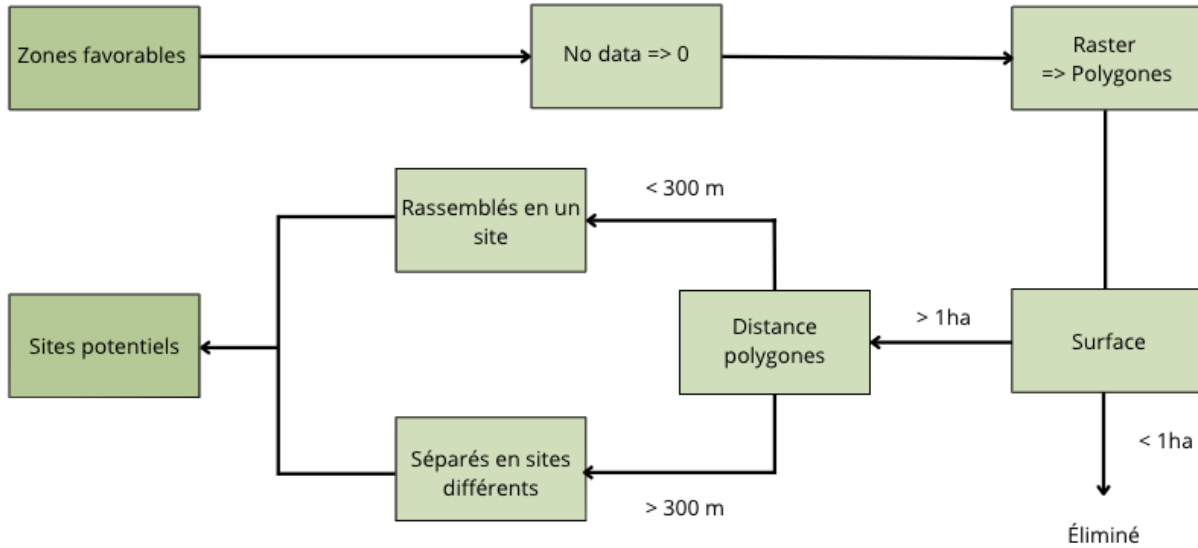


Figure 6 : Représentation schématique du processus de délimitation des sites potentiels.

Les cartes des zones favorables strictes ou élargies ont été utilisées pour la création respectivement des sites potentiels stricts ou élargis. La carte contient des 'no data' qui sont transformés en 0. Le résultat de cette transformation va alors être polygonisé.

La surface minimale que peut avoir un parc éolien a été fixée à 1 ha, tous les polygones inférieurs à cette surface ne vont donc pas être pris en compte comme sites potentiels.

Enfin, les polygones ont été agrégés en fonction de leur proximité. Ceux se trouvant à moins de 600 m de distance (distance fixée de façon arbitraire en 2013) ont été regroupés en un site potentiel (comparable aux parcs éoliens).

2.3. Estimation du productible

2.3.1. Simulation de l'implantation de mâts

Pour simuler l'implantation de mâts, des grilles ont été créées en fonction du diamètre du rotor. La figure 7 représente de façon schématique ces grilles.

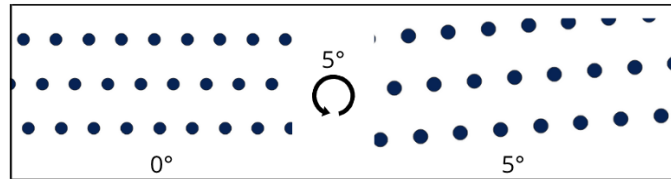


Figure 7 : Représentation schématique des grilles utilisées pour la simulation.

Leur orientation est changée entre 0° et 85° par pas de 5° afin de trouver la meilleure orientation et obtenir le nombre maximal d'éoliennes simulable pour chaque polygone/site potentiel.

Les éoliennes potentielles sont alors croisées avec la couche des zones favorables strictes pour donner l'information aux mâts simulés s'ils se trouvent en zone stricte ou élargie.

a. Vérification du code de simulation de mâts

Pour vérifier la pertinence du code utilisé pour simuler l'implantation de mâts, celui-ci a été testé sur les parcs existants (Lejeune et al., 2013). Les enveloppes convexes créées pour la contrainte des éoliennes existantes (point 2.2.2.6.a.) sont considérées comme sites favorables pour ce test. Le fait que les éoliennes se trouvent au centre de ces ellipses a dû être pris en compte. La distance interne considérée ici est par conséquent égale à quatre fois le diamètre du rotor, qui correspond à la longueur minimale de l'ellipse (voir figure 3). La distance du bord à considérer étant impactée par la taille des rotors, uniquement les éoliennes d'un diamètre d'environ 110 m à 10 m près ont été considérées pour ce test.

La figure 8 représente la différence entre le nombre de mâts simulés et le nombre de mâts véritablement présents dans les parcs.

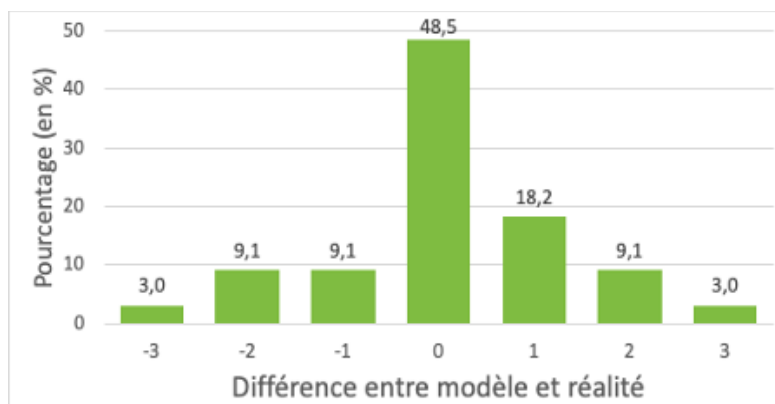


Figure 8 : Différence entre le nombre de mâts simulés et effectivement installés pour les sites existants.

Pour 76% des parcs, la différence entre le nombre de mâts simulés et observés est inférieure ou égale à 1 (en valeur absolue). Ce résultat est meilleur que celui obtenu en 2013 (66%). Le script utilisé produit des résultats concluants et peut donc être utilisé par la suite.

2.3.2. Respect des critères paysagers pour les mâts simulés

Pour être acceptées, les éoliennes simulées doivent vérifier les critères d'encerclement et d'interdistance, qui vont être dénommés dans la suite du travail comme critères paysagers, avant d'être acceptées.

Ces critères doivent être vérifiés par rapport aux habitations. La méthode utilisée est analogue à celle de 2013, avec pour seule différence la source de données représentant les habitations qui est ici les PADR. De plus, au lieu de considérer tous les PADR singulièrement, un buffer de 30 m (distance fixée de façon arbitraire) a été créé. Sur le bord de ce buffer, des POV ont été placés de façon régulière pour qu'ils couvrent de manière suffisante l'ensemble des PADR.

Les points considérés pour la perception de l'encerclement sont donc ces POV qui ont été définis à partir des PADR.

Aucune limite n'a été fixée quant au nombre minimal de mâts par site et par extension.

La figure 9 représente de façon schématique les étapes à suivre pour vérifier si les éoliennes simulées vérifient les critères paysagers.

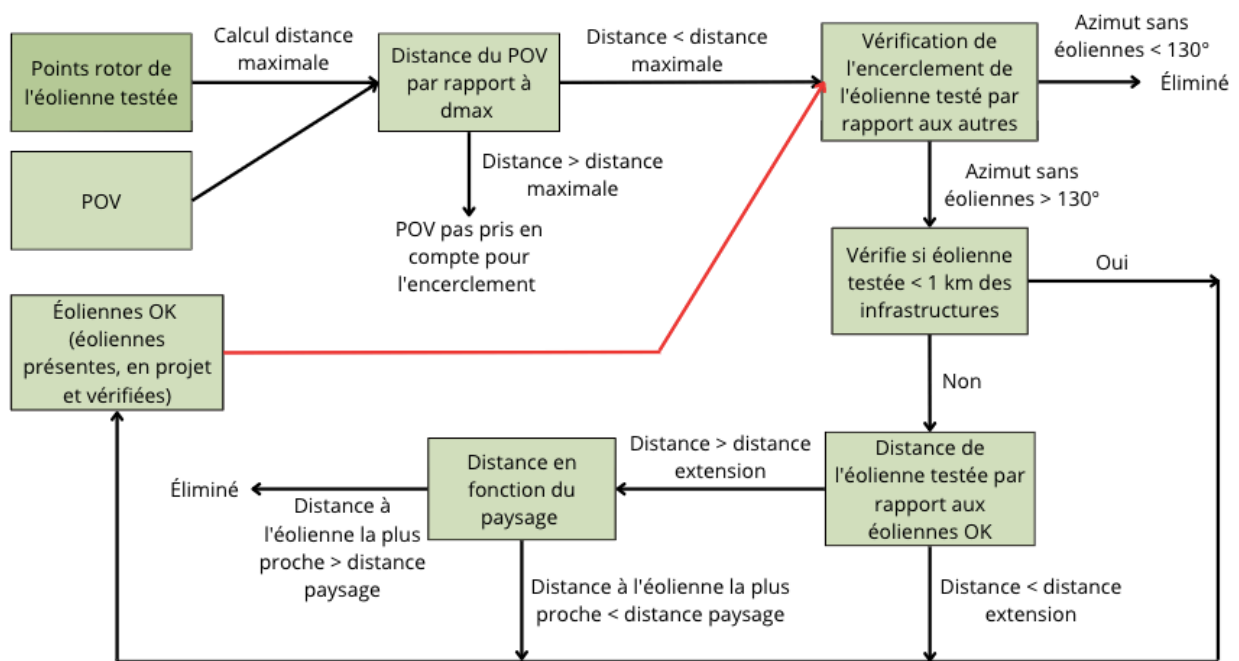


Figure 9 : Représentation schématique des étapes de vérification des critères d'encerclement et d'interdistance.

b. Critère d'encerclement

D'après le CDR un azimut minimum de 130° doit rester libre pour chaque zone d'habitation afin d'éviter un effet d'encerclement. Dans le but de vérifier la visibilité pour toutes les orientations possibles du rotor, des points rotor ont été créés autour des éoliennes, le nombre de points varie entre 6 et 9 et change en fonction de la taille de la pale.

La longueur de vue a été fixée en 2013 pour des éoliennes de 150 m de façon à avoir un impact visuel peu prégnant (occupation visuelle inférieure à 15%) (Lejeune et al., 2013), celle-ci ne va donc pas avoir la même valeur pour des éoliennes de plus grande hauteur. La longueur de vue a donc été calculée pour chaque scénario de base et est représentée par la distance maximale, qui est calculée avec l'équation 1.

$$distance\ maximale = \frac{H_{tot}}{\tan(14^\circ) \times \text{occupation visuelle}}$$

[Équation 1.]

Où :

- La H_{tot} considérée est exprimée en mètres.
- Le facteur de 14° correspond à la perception maximale verticale au-dessus de la ligne d'horizon (Lejeune et al., 2013).
- L'occupation visuelle considérée est celle qui permet un impact visuel peu prégnant (15%), elle vaut donc 0,15 (Lejeune et al., 2013, voir point 2.3.2.e.).

La visibilité est alors testée entre les points rotor et les POV se trouvant dans le rayon de la distance maximale des éoliennes, car susceptibles de subir un potentiel impact visuel trop important (figure 9).

L'encerclement va être testé pour les éoliennes simulées en fonction des éoliennes existantes et des éoliennes simulées déjà acceptées. Cela signifie que le résultat de la vérification est dépendant de l'ordre dans lequel les mâts simulés sont soumis au test. Plusieurs essais nous ont conduit à trier les éoliennes suivant les trois critères suivants, chacun étant considéré selon des valeurs décroissantes : le nombre d'éoliennes en zone favorable stricte, le nombre total d'éoliennes, la distance entre les éoliennes et le POV le plus proche.

Comme le montre la figure 9, si l'angle de vue libre est supérieur à 130° alors le mât est vérifié, sinon il est écarté.

c. Critère d'interdistance

Le critère d'interdistance repose sur plusieurs éléments.

Premièrement, si l'éolienne se trouve à proximité d'une autoroute, les distances énoncées ci-dessous ne sont pas à prendre en compte (GW, 2013). La distance considérée comme étant à proximité n'étant pas précisé dans le CDR (2013), la distance choisie est de 1 km (Spyridonidou et al., 2020).

Deuxièmement, les mâts peuvent être ajoutés à des parcs existants en tant qu'extension, pour autant qu'ils se trouvent à moins de 14 fois le diamètre du rotor (arrêté du Gouvernement wallon du 13 février 2014 sur les conditions sectorielles⁵). Dans ce cas, le critère d'interdistance n'est pas considéré.

Troisièmement, l'interdistance acceptable entre deux éoliennes de parcs différents dépend de leur localisation et peut valoir 4 ou 6 km selon que l'on se trouve dans un paysage à courte ou longue vue. Ces différents types de paysages sont décrits dans la carte des territoires paysagers (Lejeune et al., 2013).

Après avoir déterminé dans quel cas se trouve l'éolienne, sa distance par rapport aux autres éoliennes déjà vérifiées va être calculée. Si l'éolienne vérifie ce critère elle est acceptée sinon elle est écartée.

d. Vérification du code des critères paysagers

L'algorithme de prise en compte des critères paysagers a été testé sur les 603 éoliennes installées en 2022, dont uniquement 23 ne respectent pas ces critères.

Une analyse rapide de ces éoliennes sur QGIS montre que des écrans visuels (arbres ou immeubles) rendent ces éoliennes non visibles depuis les POV ce qui leur permet en réalité de vérifier les critères paysagers. Cette constatation met en évidence le caractère très théorique des critères paysagers tels qu'ils sont considérés ici.

e. Analyse de la localisation des mâts potentiels

Les mâts potentiels sont ceux qui respectent les critères paysagers considérés à l'étape précédente. Une analyse de leur distribution sur le territoire en regard à la fois de l'affectation du sol et de la distance à l'habitat (PADR) le plus proche ainsi que de l'occupation visuelle (voir point suivant) est réalisée pour le scénario « 210 m ». Ce scénario est choisi, car son impact visuel pourrait être le plus important au vu de son hauteur.

f. Analyse de l'impact visuel des mâts potentiels

L'équation 2 est utilisée pour déterminer l'impact visuel de façon objective, il est représenté par l'occupation visuelle de l'éolienne au-dessus de la ligne d'horizon (figure 10).

$$\text{Occupation visuelle} = \frac{H_{tot}}{Hauteur\ visible} \times 100$$

[Équation 2]

L'occupation visuelle est exprimée en pourcentage. La *H_{tot}* et la *Hauteur visible* de l'équation 2 sont exprimées en m. La *Hauteur visible* est calculée par la formule suivante : $distance \times \tan(65^\circ)$. L'angle de 65° correspond à l'angle visuel maximal (Minelli et al., 2014).

⁵ https://etaamb.openjustice.be/fr/arrete-du-gouvernement-wallon-du-13-fevrier-2014_n2014201510.html

La figure 10 représente de façon schématique la hauteur visible et la Htot utilisées pour la création de l'équation 2 et représente schématiquement l'occupation visuelle d'une éolienne.

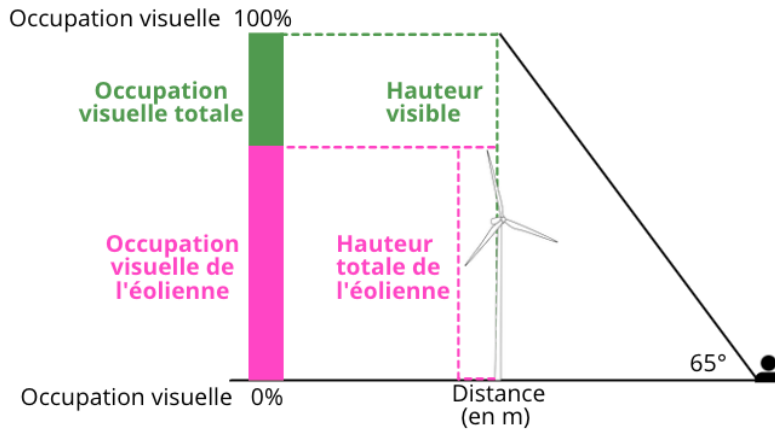


Figure 10 : Représentation schématique de l'occupation visuelle.

D'après Guan (2020), l'impact visuel peut être classé en différentes catégories:

1. À une distance inférieure à la Htot de l'éolienne, l'impact visuel est trop important pour des zones habitables.
2. À une distance entre la Htot et trois fois la Htot, les fonctions d'agriculture, de forêt et d'élevage sont acceptables, car l'impact visuel diminue. Néanmoins cette distance reste trop faible pour les zones habitables, car les éoliennes peuvent provoquer des gênes physiques (bruit, lumière, ombre)
3. À une distance entre trois fois la Htot et dix fois la Htot, les zones habitables sont acceptables, car l'impact visuel est faible.

La figure 11 représente l'occupation visuelle correspondant aux distances listées ci-dessus et à la distance de quatre fois la Htot.

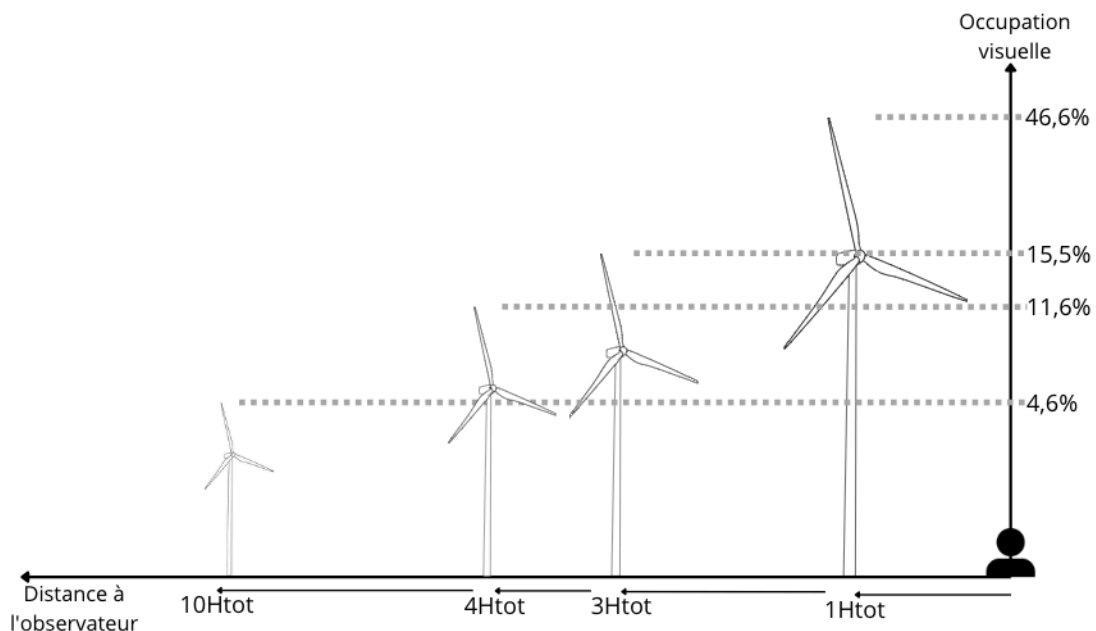


Figure 11: Représentation schématique de l'occupation visuelle pour certaines distances.

Dans l'idéal, les éoliennes devraient être à une distance supérieure à trois fois la Htot, ce qui correspond à une occupation visuelle de 15,54% (arrondie à 15%) comme montré à la figure 11. Tout pourcentage inférieur pourra être considéré comme peu prégnant (Lejeune et al., 2013).

Une distance de quatre fois la Htot conduit à un angle de visibilité de 14°, ce qui est négligeable, car “le cône de reconnaissance de l'œil humain présente un angle vertical de 14° au-dessus de la ligne d'horizon” (Lejeune et al., 2013). Cet angle correspond à une occupation visuelle de 11,66% (arrondie à 12%) (figure 11), tout pourcentage inférieur sera considéré comme négligeable.

2.3.3. Calcul du productible potentiel

En absence d'une carte de potentiel venteux à jour, le productible électrique potentiel est calculé grâce aux équations 3 et 4 (méthodo 2013) pour les éoliennes potentielles.

$$prod_i = \frac{P \times 365 \times 24}{1000} \times \eta$$

[Équation 3.]

Où :

- $prod_i$ est le productible d'un mât exprimé en GWh/an ;
- P est la puissance unitaire du mât exprimée en MW ;
- 365 représente le nombre de jour en une année ;
- 24 représente le nombre d'heures en un jour ;
- η correspond au taux de charge qui vaut 30% (Nicolas Meerts comm. pers.).

$$Productible\ global = \sum_{i=1}^{n0} prod_i + tr_j \times \sum_{i=1}^{nj} prod_i$$

[Équation 4.]

Où :

- $productible\ global$ représente le productible électrique potentiel exprimé en GWh/an ;
- $n0$ correspond au nombre de mâts validés se trouvant en zone stricte ;
- $prod_i$ est le productible d'un mât exprimée en GWh/an ;
- tr_j correspond au taux de réussite qui vaut 25% ;
- nj est le nombre de mâts validés étant concernés par au moins une contrainte d'exclusion partielle.

Comme montré à l'équation 4, une distinction est faite entre les éoliennes se trouvant en zone favorable stricte et celles se trouvant en zone favorable élargie. Les éoliennes se trouvant en zone élargie sont concernées par des contraintes d'exclusion partielles, un taux de réussite de 25% leur est appliqué, car l'éolienne ne va potentiellement pas pouvoir être installée ou alors un bridage sera nécessaire, ce qui réduit considérablement le productible.

2.4. Influence de la distance à l'habitat et à l'habitat dispersé

Cette analyse sera réalisée pour le scénario de base « 180m » qui sera comparé aux scénarios créés ci-dessous. Pour analyser ces scénarios, des comparaisons quant au productible et la distance aux PADR sont effectuées.

2.4.1. Influence de la distance à l'habitat

La distance à l'habitat se trouvant en zone habitation du PDS est actuellement de quatre fois la Htot. Ici l'influence de cette distance va être analysée en considérant deux scénarios de distances égales à 400 m et 600 m; ceux-ci seront comparés au scénario de base. Ces scénarios seront dénommés « dZhab400m » et « dZhab600m » respectivement dans la suite du travail.

2.4.2. Influence de la distance à l'habitat dispersé

La distance à l'habitat dispersé est actuellement une valeur fixe égale à 400 m. L'influence de cette distance va être analysée en prenant des distances variant avec la Htot des éoliennes. Pour le premier scénario la distance va être de quatre fois la Htot de l'éolienne qui correspond à la distance fixée par la loi pour les habitations du PDS. Ce scénario sera dénommé « dhabiD 4htot » dans la suite du travail.

Le tableau 2 représente les distances nécessaires pour que les différents modèles de base aient la même occupation visuelle que les éoliennes de 140 m à 400 m (celles considérées en 2013). Les valeurs présentes dans ce tableau ont été calculées avec l'équation 2.

Tableau 2 : Distances nécessaires pour les modèles de base afin d'avoir la même occupation visuelle qu'une éolienne de 140 m de haut à 400 m.

	Modèle 210 m	Modèle 180 m	Modèle 150 m	Éolienne de 140 m
Impact visuel à 400 m de distance (en %)	24,48	20,98	17,49	16,30
Distance pour avoir le même pourcentage (en m)	600	514	428	400

Pour le deuxième scénario, la distance choisie est celle nécessaire pour avoir le même impact visuel que le modèle d'éoliennes en vigueur avant 2013 (modèle 140 m) à 400 m. Cette distance est de 514 m pour le modèle « 180 m » (tableau 2). Dans la suite du travail ce scénario sera dénommé « dhabiD 514m ».

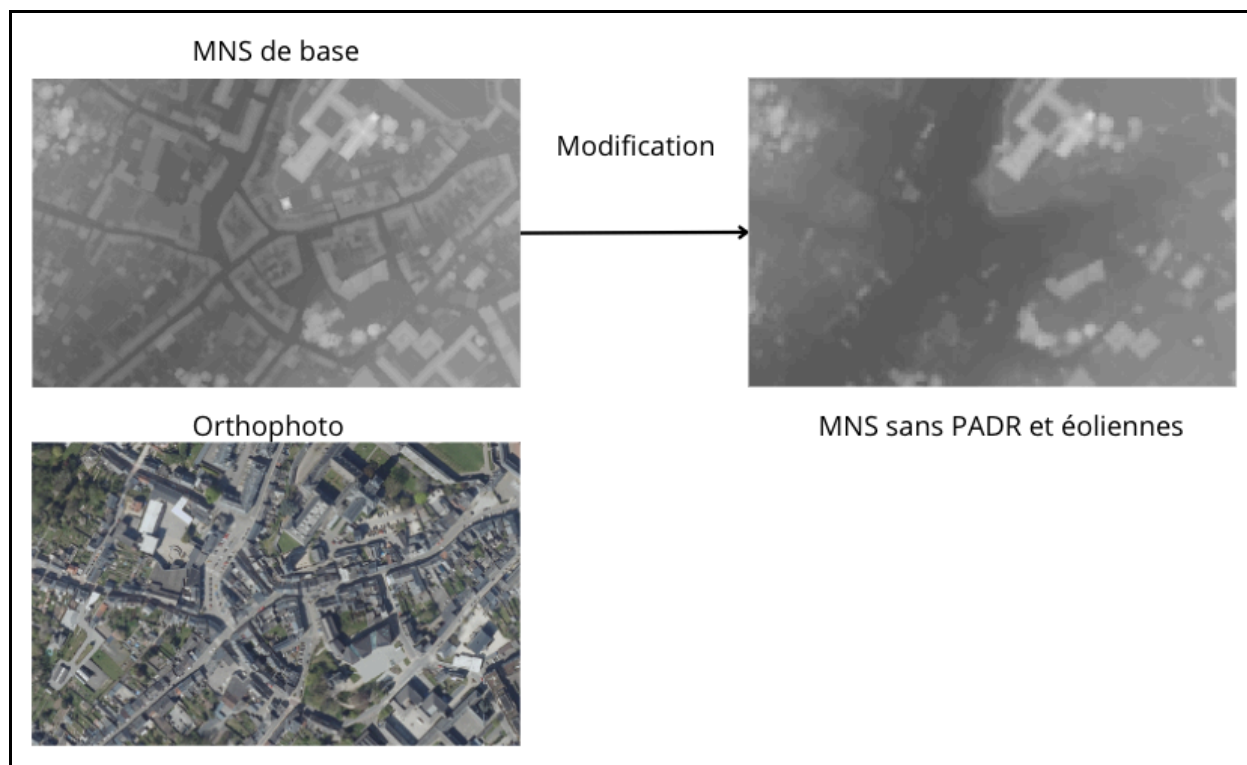
2.5. Proposition d'une méthode pour évaluer l'impact visuel des parcs éoliens

La vérification du code des critères paysagers (point 2.3.2.d) a mis en évidence le caractère très théorique de la visibilité considéré jusqu'à présent. En effet, les obstacles visuels n'étant pas pris en compte, la vérification du critère d'encerclement au point 2.3.2.b ne correspond pas à la réalité du terrain.

Une méthode d'évaluation de l'impact visuel qui prend en considération les obstacles visuels présents dans le paysage, est proposée ici.

Les MNS et MNT utilisés résultent de données LiDAR aérien de 2022. Ils ont été modifiés afin de ne pas contenir les bâtiments qui ont un PADR et les éoliennes existantes (figure 12), pour que ces éléments n'interfèrent pas avec l'analyse de visibilité. Les MNS et MNT d'origine ont une résolution de 1 m mais ils ont été rééchantillonnés à 4 m afin d'alléger le temps de calcul. Le calcul est fait grâce au plugin 'Visibility Analysis', celui-ci est mis en œuvre dans R à l'aide du package 'QGISprocess'.

La figure 12 représente le MNS de base, ainsi qu'une orthophoto et le MNS résultant des modifications. Les couleurs des images ont été modifiées lors de la création de cette figure, afin de permettre une meilleure visualisation, elles ne représentent pas la réalité.



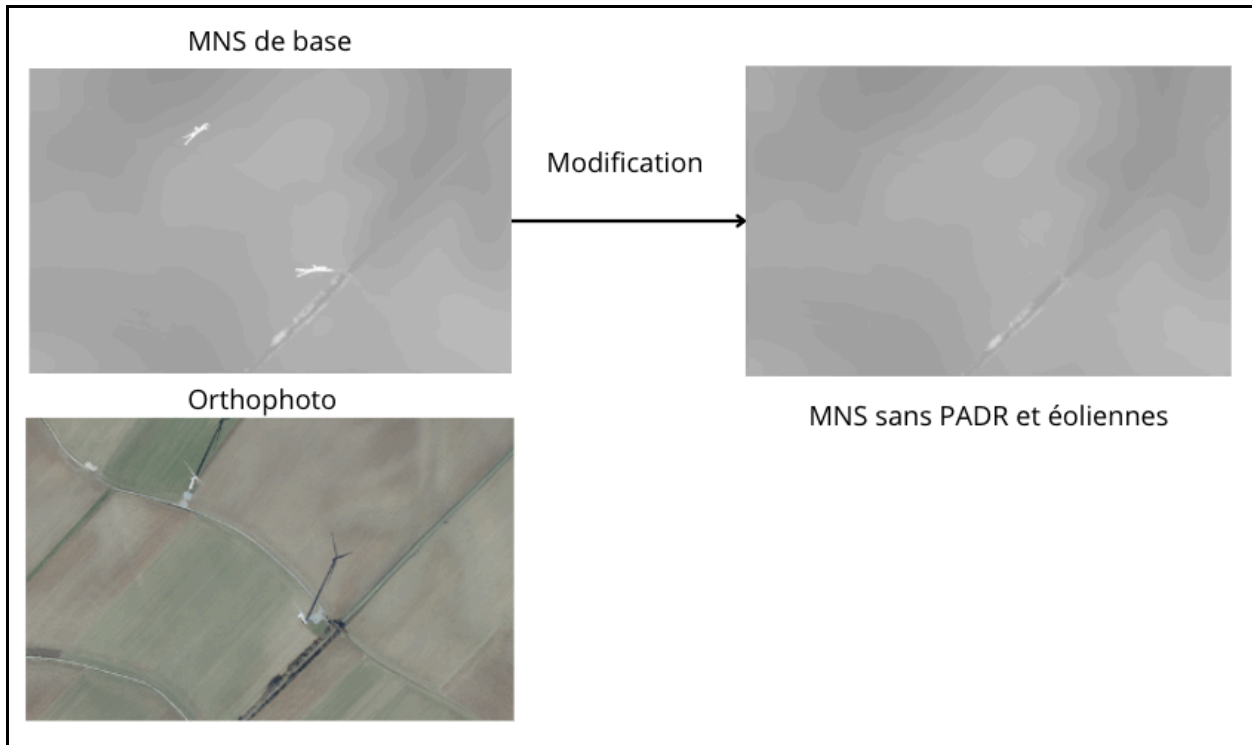


Figure 12 : Représentation du MNS de base, d'une orthophoto et du MNS modifié (les couleurs des images sont modifiées).

La figure 13 représente les différents niveaux de visibilité qui vont être vérifiés, ceci s'inspire du travail de Palmer (2022), qui a vérifié la visibilité de la pointe supérieure de l'hélice, du rotor (nacelle), de la pointe inférieure de l'hélice et de la base.

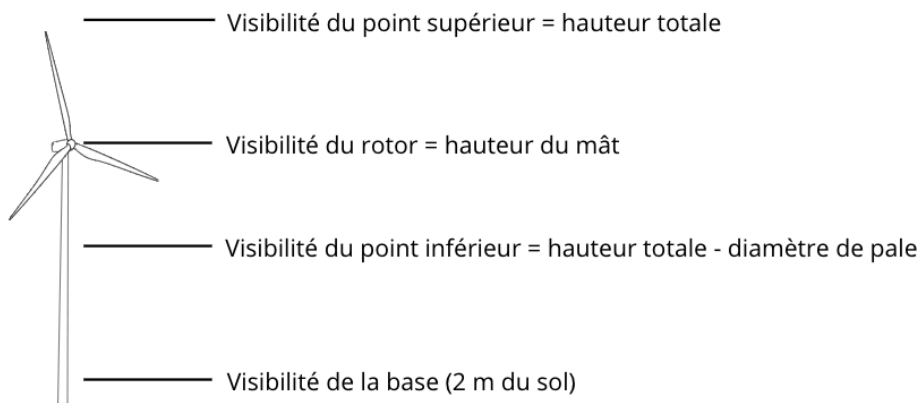


Figure 13 : Représentation des niveaux de visibilité testés.

Le principe de cette méthode est qu'un calcul de '*line of sight*' (LOS, ligne de vue) est réalisé entre le point d'observation et le point cible. Si aucun obstacle ne se trouve entre le point observateur et le point cible alors la ligne peut partir de l'observateur et atteindre la cible, comme le montre la figure 14.

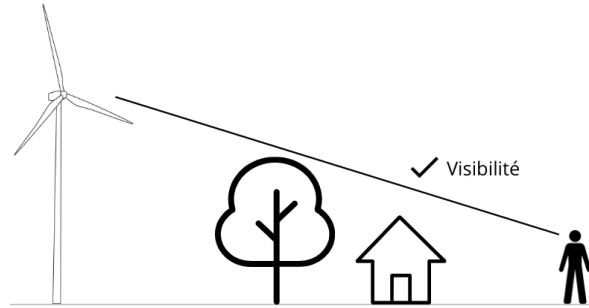


Figure 14 : Représentation schématique de la LOS partant d'un observateur et arrivant à une éolienne sans être interceptée par un obstacle.

Si à l'inverse un obstacle est présent, alors la ligne ne va pas pouvoir atteindre la cible, comme le montre la figure 15.



Figure 15 : Représentation schématique de la LOS étant interceptée par un objet entre un observateur et une éolienne.

Les conditions climatiques ont un fort impact sur la visibilité à longue distance (Guan, 2020), les résultats ont été vérifiés sur le terrain un jour où les conditions de visibilité étaient de 11 km (le 06/08/2022).

La figure 16 représente les points d'observation déterminés autour de Gembloux de façon à avoir 8 points qui ont une visibilité ou pas sur deux parcs éoliens. Uniquement deux parcs (un parc proche et un éloigné) ont été suivis, afin de pouvoir vérifier la visibilité de chaque mât pour ces deux parcs. Une hauteur de 1,6 m a été choisie pour les points (Guan, 2020, Kupiec, 2021). Les éoliennes ont été prises comme points cibles, les hauteurs considérées sont relatives à la hauteur réelle des éoliennes en place.

Carte des points d'observation

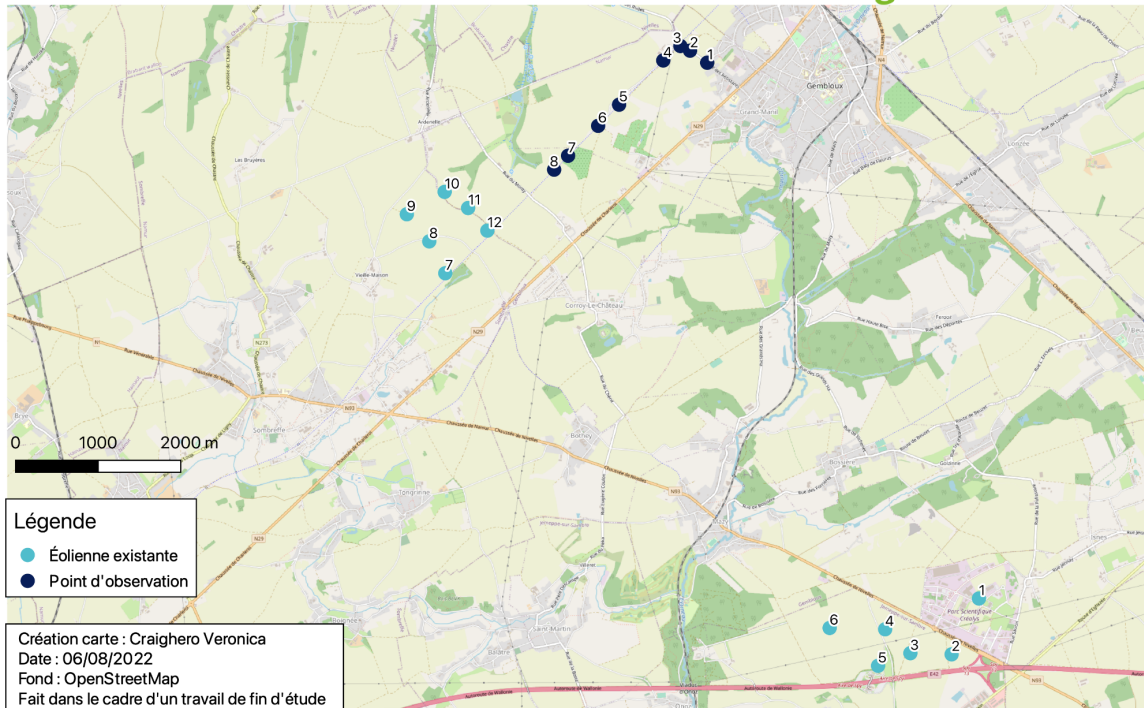


Figure 16 : Points d'observation.

La figure 17 reprend les étapes relatives à la création des tableaux de données par le modèle proposé.

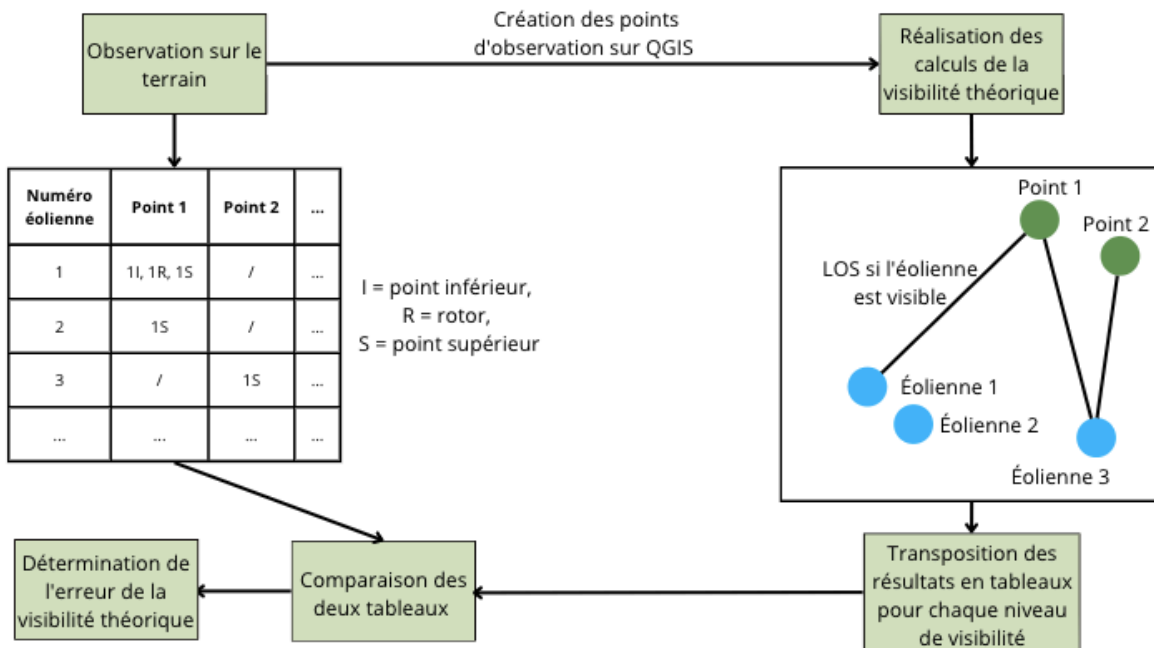


Figure 17 : Représentation schématique de la création des tableaux de données par le modèle.

Les informations relatives à la visibilité sont des informations binaires (visible (1) ou non visible (0)). Pour chaque point d'observation la visibilité des 12 éoliennes a été vérifiée pour chaque niveau de visibilité (décrits à la figure 13) et répertoriée dans un tableau, comme expliqué à la figure 17.

Les points d'observation déterminés sur le terrain sont ensuite créés sur QGIS (carte 1), pour pouvoir les utiliser dans les calculs de visibilité. Les calculs vont fournir des cartes de visibilité théorique. Une visibilité est prédite lorsqu'une LOS n'est présente entre un point observation et une éolienne (figure 17). Si aucune LOS est présente, alors aucune visibilité n'est prédite (figure 17). La visibilité d'une éolienne à un point d'observation correspond à 1, à l'inverse la non-visibilité vaut 0. Ces résultats sont traduits en tableaux pour pouvoir être comparés au tableau des informations de terrain. Ceci va être fait pour chaque niveau de visibilité.

La figure 18, représente schématiquement les étapes nécessaires pour déterminer l'erreur de la visibilité théorique.

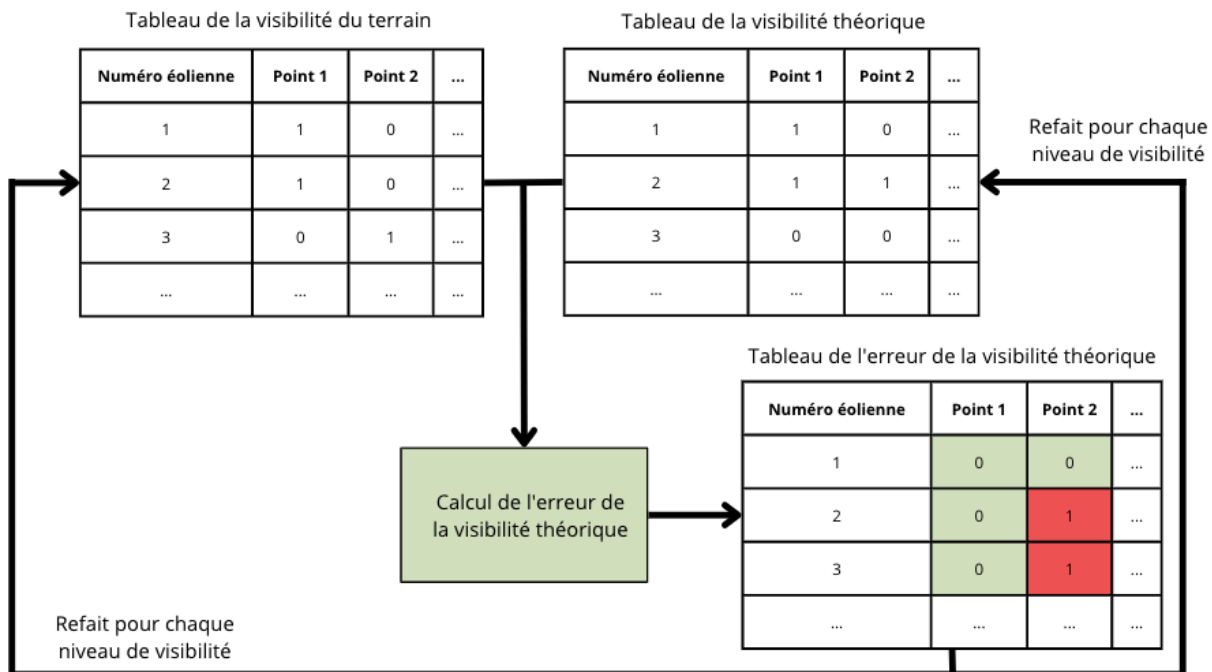


Figure 18: Représentation schématique de la détermination de l'erreur de la visibilité théorique.

L'équation 5 est utilisée pour calculer l'erreur de la visibilité théorique présentée à la figure 18.

$$\text{Erreur de la visibilité théorique} = |\text{Visibilité terrain} - \text{Visibilité théorique prédite}|$$

[Équation 5.]

Où la différence entre la *Visibilité terrain* et la *Visibilité théorique prédite* est prise en valeur absolue.

3. Résultats

3.1. Cartographie des zones favorables en 2022

3.1.1. Mise à jour de la cartographie

3.1.1.1. Cartes des zones favorables

Les figures 19, 20 et 21 représentent les zones favorables pour les trois scénarios de base.

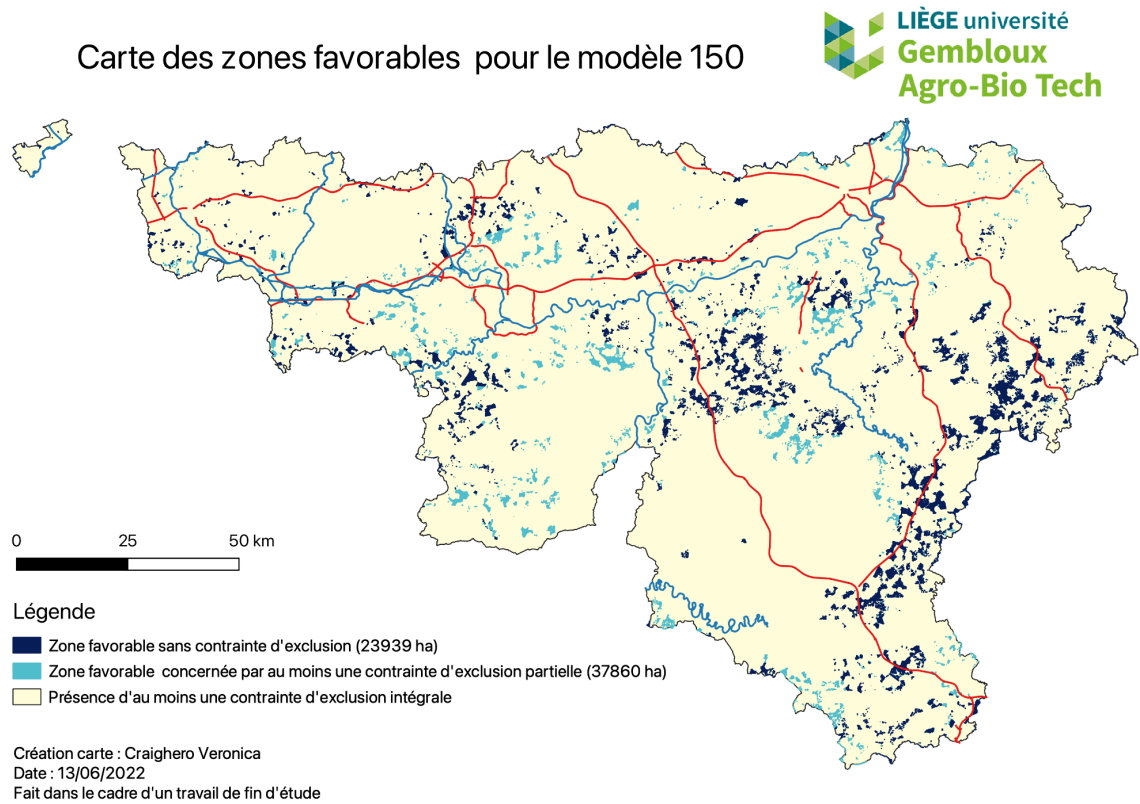


Figure 19 : Zones favorables pour le scénario « 150m ».

Carte des zones favorables pour le modèle 180

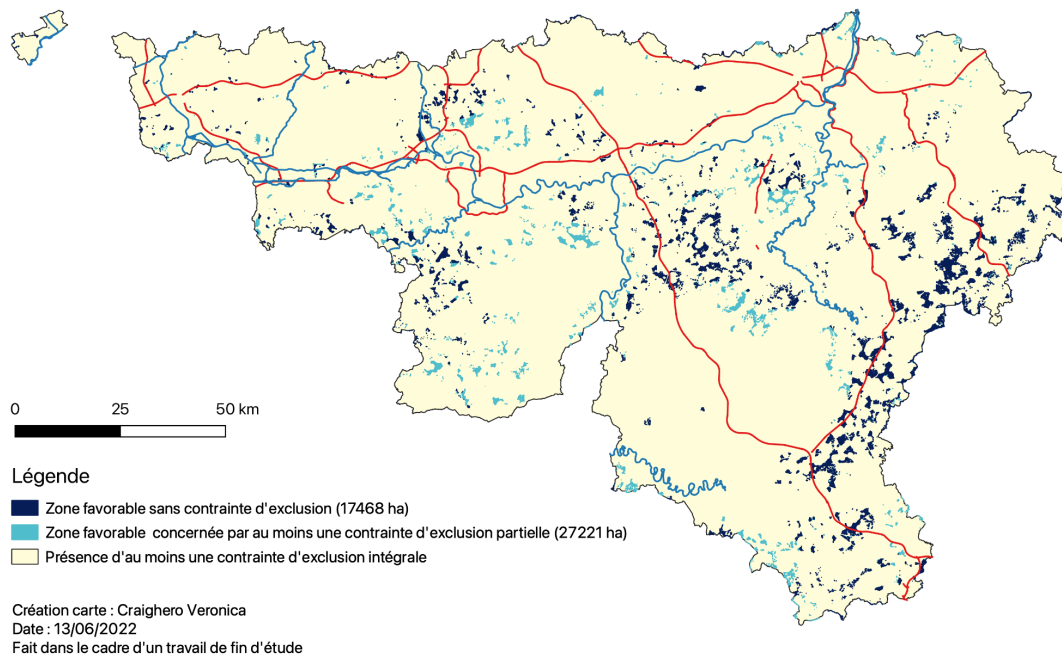


Figure 20 : Zones favorables pour le scénario « 180m ».

Carte des zones favorables pour le modèle 210

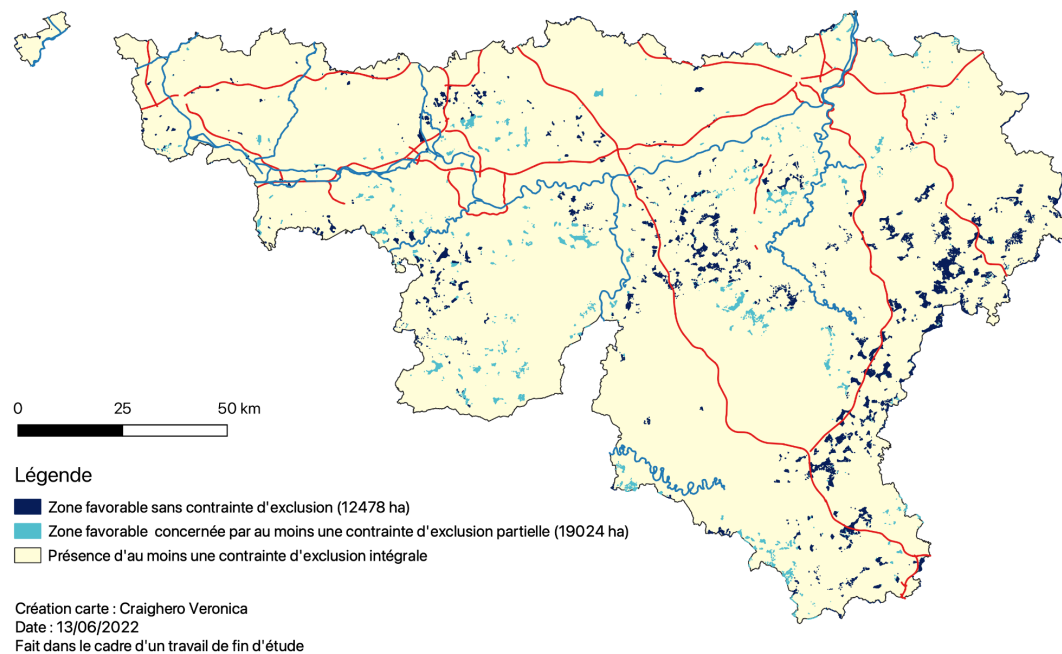


Figure 21 : Zones favorables pour le scénario « 210m ».

En comparant les figures 19, 20 et 21 la majorité des surfaces favorables strictes se trouvent en Ardenne.

Le tableau 3 reprend les surfaces des zones favorables pour les scénarios de base.

Tableau 3: Surface des zones favorables (ha) : comparaison des trois scénarios de base avec la carte de 2013.

Surfaces (en ha)	2013	Scénarios de base		
		Modèle 210 m	Modèle 180 m	Modèle 150 m
Zones favorables strictes	27340	12478	17468	23939
Zones favorables élargies	37940	19024	27221	37860

Le tableau 3 montre que les surfaces des zones favorables sont, en ordre décroissant, la valeur de 2013, le scénario « 150m », « 180m » et enfin « 210m ».

3.1.1.2. Simulation des éoliennes

Les cartes montrant les implantations des éoliennes simulées n'ont pas été intégrées dans ce document pour des raisons de confidentialité. Le tableau 4 reprend le nombre d'éoliennes simulées pour les scénarios de base.

Tableau 4 : Nombre d'éoliennes simulées des trois scénarios de base pour les zones favorables strictes et élargies.

	Modèle 210 m	Modèle 180 m	Modèle 150 m
Zone stricte	561	829	1433
Zone élargie	321	494	863
Total	873	1323	2296

Plus d'éoliennes peuvent être simulées si le scénario « 150m » est considéré alors que le scénario « 210m » a le nombre le plus faible (tableau 4).

3.1.1.3. Éoliennes potentielles

Le tableau 5 présente la répartition des parcs pour les trois scénarios de base en fonction de leur taille exprimée en nombre de mâts.

Tableau 5 : Nombre de parcs classés par nombre d'éoliennes le composant pour les trois scénarios de base.

Classes de taille de parc	Scénario 150 m	Scénario 180 m	Scénario 210 m
[1-4]	126	100	101
[5-8]	39	36	30
[9-12]	19	23	13
[12-15]	14	18	13
> 15	28	13	11

La majorité des parcs ont 4 mâts ou moins et le scénario « 150m » possède légèrement plus de parcs de petite taille que les deux autres.

3.1.1.4. Localisation des éoliennes dans les zones d'affectation du sol du PDS

Le tableau 6 présente la distribution des éoliennes existantes et potentielles en fonction de l'affectation du sol.

Tableau 6 : Répartition des éoliennes existantes ainsi que les éoliennes potentielles selon l'affectation du sol du PDS.

Affectation du sol	Éoliennes existantes	Éoliennes potentielles		
		Scénario 150	Scénario 180	Scénario 210
Activité économique mixte	11	3	4	1
Activité économique industrielle	25	18	8	5
Aménagement communal concerté à caractère économique	5	1	0	0
Loisirs	0	3	0	2
Services publics et équipements communautaires	0	5	2	1
Centre d'enfouissement technique	0	0	0	1
Agricole	522	525	307	182
Forestière	11	261	131	91
Espaces verts	5	0	0	0
Dépendance d'extraction	1	0	0	0
Total	580	816	452	283

La majorité des éoliennes existantes et potentielles se trouvent en zone agricole (près de 66%). Le deuxième type d'affectation du sol le plus représenté pour les éoliennes potentielles (environ 29,5%) est la zone forestière.

Le tableau 7 représente la répartition des PADR en fonction de leur affectation du sol et en fonction de classes d'occupation visuelle.

Tableau 7 : Répartition des PADR en fonction de l'affectation au plan de secteur et des classes d'occupation visuelle pour le scénario « 210m ».

Affectation du sol	Classes d'occupation visuelles			Total
	[0%-15%[	[15%-30%[	>30%	
Habitat à caractère rural	452971	494	0	453465
Habitat	1160393	80	0	1160473
Agricole	50925	399	6	51330
Autre	71726	51	0	71777
Total	1736015	1024	6	1737045

Le tableau 7 permet de voir que la majorité des PADR ont une occupation visuelle inférieure à 15%. Uniquement 0,06% des PADR ont une occupation visuelle supérieure à 15%, dont la majorité étant en zone d'affectation agricole et habitat à caractère rural.

3.1.1.5. Comparaison de la localisation des éoliennes potentielles et existantes

Le tableau 8 représente la distribution des éoliennes existantes et potentielles en fonction de la classe de distance par rapport au PADR le plus proche. Uniquement les PADR avec une distance inférieure à 1,5 km sont considérés au tableau 8, ce qui correspond à 3,4% des PADR totaux pour les éoliennes potentielles et à 1,7% pour les éoliennes existantes.

Tableau 8 : Scénario de base « 210m » : répartition des PADR par rapport aux classes de distance à l'éolienne (existante ou potentielle) la plus proche.

Affectation du sol	Classes de distance											
	< 400[	[400-500[	[500-600[	[600-700[	[700-800[	[800-900[	[900-1000[	[1000-1100[	[1100-1200[	[1200-1300[	[1300-1400[	[1400-1500[
Éoliennes potentielles												
Habitat	0	0	0	0	0	5	143	385	758	1216	1554	1767
Habitat à caractère rural	0	0	0	0	0	11	483	1756	2892	3774	4566	5192
Agricole	0	90	129	148	216	276	295	381	373	351	411	422
Autre	0	9	39	21	75	62	106	126	185	207	280	402
Éoliennes existantes												
Habitat	0	8	119	249	621	1020	1586	2380	3009	3390	3797	4364
Habitat à caractère rural	10	150	509	1285	1882	2613	3382	4025	4333	4627	5197	5349
Agricole	21	174	288	330	323	380	385	362	348	404	399	396
Autre	3	26	40	73	123	135	219	327	197	241	317	350

Les mâts existants sont à une distance inférieure des PADR, certains se trouvent à moins de 400 m. La majorité de ceux-ci se trouvent en zone d'affectation agricole et habitat à caractère rural.

Des PADR considérés pour faire le tableau 8, 50% sont à une distance supérieure à 900 m pour les éoliennes existantes et 1,3 km pour les éoliennes potentielles.

3.1.1.6. Calcul de productible

Le tableau 9 reprend le nombre d'éoliennes simulées ainsi que le nombre d'éoliennes potentielles et le productible nouveau pour les scénarios de base.

Tableau 9 : Résultats du calcul du productible pour les modèles de base. * Les valeurs entre parenthèses dans les colonnes correspondent aux éoliennes qui constituent des extensions de parcs existants.

Scénario de base	Nombre d'éoliennes simulées	Nombre d'éoliennes potentielles		Productible nouveau (GWh/an)
		Zone stricte*	Zone élargie*	
Scénario 210 m	873	192 (83)	94 (41)	3171
Scénario 180 m	1323	294 (153)	163 (66)	3959
Scénario 150 m	2296	484 (227)	266 (113)	3617

Le productible nouveau dans le tableau 9 est le productible électrique potentiel en fonction des éoliennes potentielles. Le scénario « 180m » a le plus haut productible nouveau, alors que le scénario « 210m » a le plus faible.

3.2. Analyse de l'influence de la distance à l'habitat et à l'habitat dispersé

3.2.1. Analyse de la distance à l'habitat

La figure 22 représente la distance des éoliennes potentielles au PADR le plus proche pour le scénario « 180m » et les scénarios « dZhab400m » et « dZhab600m ».

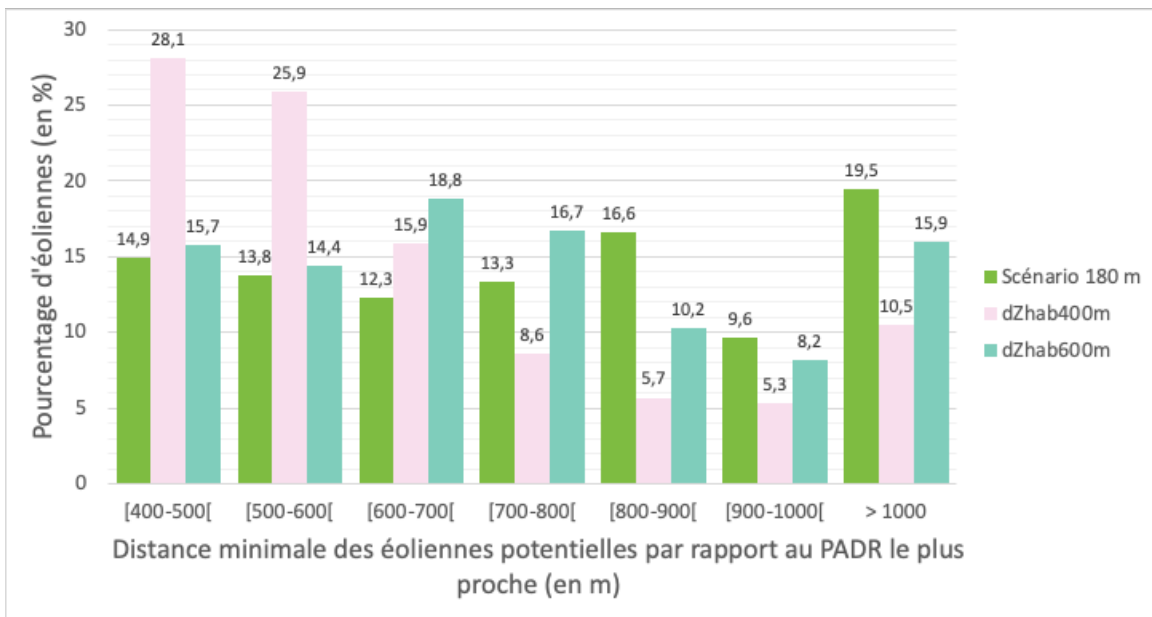


Figure 22 : Distribution des éoliennes potentielles en fonction de leur distance au PADR le plus proche : comparaison du scénario «180m » avec les scénarios « dZhab400m » et « dZhab600m » .

D'après la figure 22, les éoliennes potentielles pour le scénario « dZhab400m » sont plus proches des habitations que les deux autres. Pour les classes de distances inférieures à 600 m les différences entre le scénario « dZhab600m » et le modèle de base sont moins marquées. Cette différence s'accroît par la suite (sauf pour la classe [900-1000[où la différence est plus faible).

Le tableau 10 reprend les résultats quant au nombre d'éoliennes simulées, au nombre d'éoliennes potentielles et au productible nouveau.

Tableau 10 : Résultats du calcul de productible pour le scénario « 180m » en comparaison avec les scénarios « dZhab400m » et « dZhab600m ». * Les valeurs entre parenthèses correspondent aux mâts potentiels qui sont des extensions.

Scénario	Nombre d'éoliennes simulées	Nombre d'éoliennes potentielles		Productible nouveau (GWh/an)
		Zone stricte*	Zone élargie*	
Scénario 180 m	1323	294 (153)	163 (66)	3959
dZhab400m	2373	370 (195)	210 (105)	4996
dZhab600m	1682	344 (155)	183 (96)	4609

Comparant tous les scénarios au tableau 10, le scénario « dZhab400m » est celui avec le productible nouveau le plus élevé.

3.2.2. Analyse de la distance à l'habitat dispersé

La figure 23 représente la distance des éoliennes potentielles au PADR le plus proche pour le scénario « 180m » et les scénarios « dhabiD 514m » et « dhabiD 4htot ».

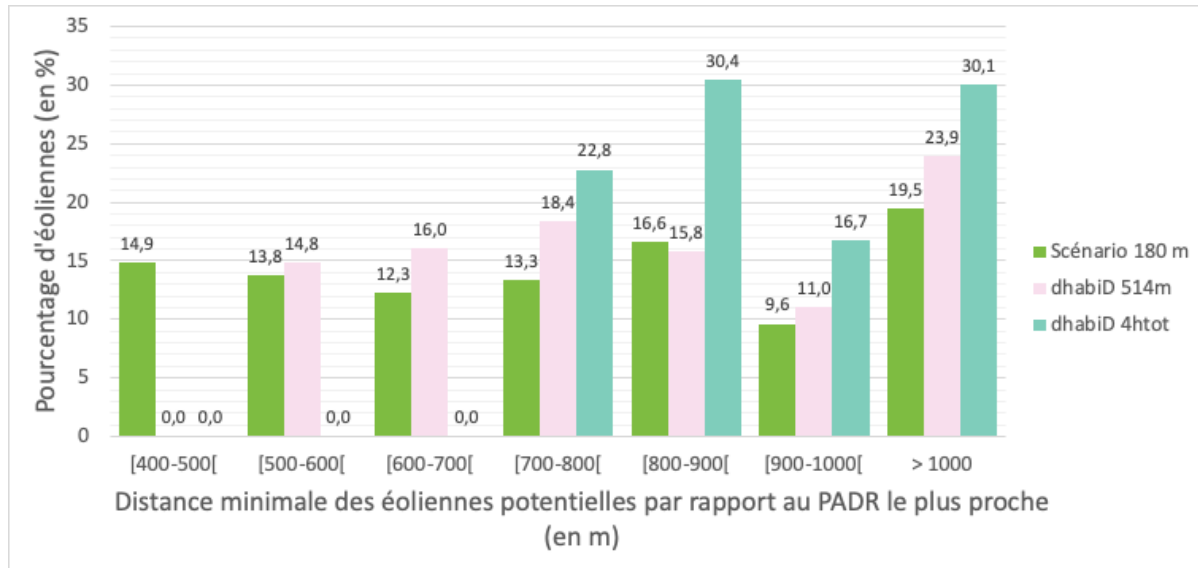


Figure 23 : Distribution des éoliennes potentielles en fonction de leur distance au PADR le plus proche : comparaison du scénario «180m » avec les scénarios « dhabiD 514m » et « dhabiD 4htot ».

La différence entre le scénario de base et le scénario « dhabiD 514m » n'est pas très marquée, selon la figure 23, alors que la différence avec le scénario « dhabiD 4htot » est nettement plus marquée. Environ la moitié des éoliennes potentielles se trouvent à moins de 800 m du PADR le plus proche pour le modèle de base, 800 m pour le scénario « dhabiD 514m » et à plus de 900 m pour le scénario « dhabiD 4htot ».

Le tableau 11 résume les résultats quant au nombre d'éoliennes simulées, au nombre d'éoliennes potentielles et le productible nouveau.

Tableau 11: Résultats du calcul de productible pour le scénario « 180m » en comparaison avec les scénarios « dhabiD 514m » et « dhabiD 4htot ». * Les valeurs entre parenthèses correspondent aux mâts potentiels qui sont des extensions.

Scénario	Nombre d'éoliennes simulées	Nombre d'éoliennes potentielles		Productible nouveau (GWh/an)
		Zone stricte*	Zone élargie*	
Scénario 180 m	1323	294 (153)	163 (66)	3959
dhabiD 514m	1144	285 (140)	133 (54)	3764
dhabiD 4htot	781	209 (113)	120 (47)	2826

Le tableau 11 montre que le modèle de base permet d'avoir un productible nouveau plus élevé. Uniquement 39 éoliennes potentielles sont 'perdues' entre le scénario de base et le scénario « dhabiD 514m », ce qui correspond à une diminution du productible de 194 GWh/an. Le productible le plus faible est obtenu pour le scénario « dhabiD 4htot ».

3.3. Évaluation de l'impact visuel des parcs éoliens

Les cartes des lignes de visibilité pour chaque niveau de visibilité sont présentées en annexe (annexes 6, 7 et 8).

La figure 24 représente l'erreur entre la visibilité théorique prédite par le calcul et la visibilité vérifiée sur le terrain pour les 12 éoliennes observées. L'ordonnée représente la somme des cas où la prédiction ne coïncide pas avec les résultats du terrain qui est calculé avec l'équation 5.

La visibilité de la base n'est pas présente sur la figure 24 car elle est nulle pour les 8 points d'observation. Les éoliennes 1 à 6 font partie du parc éloigné et les éoliennes 7 à 12 du parc proche.

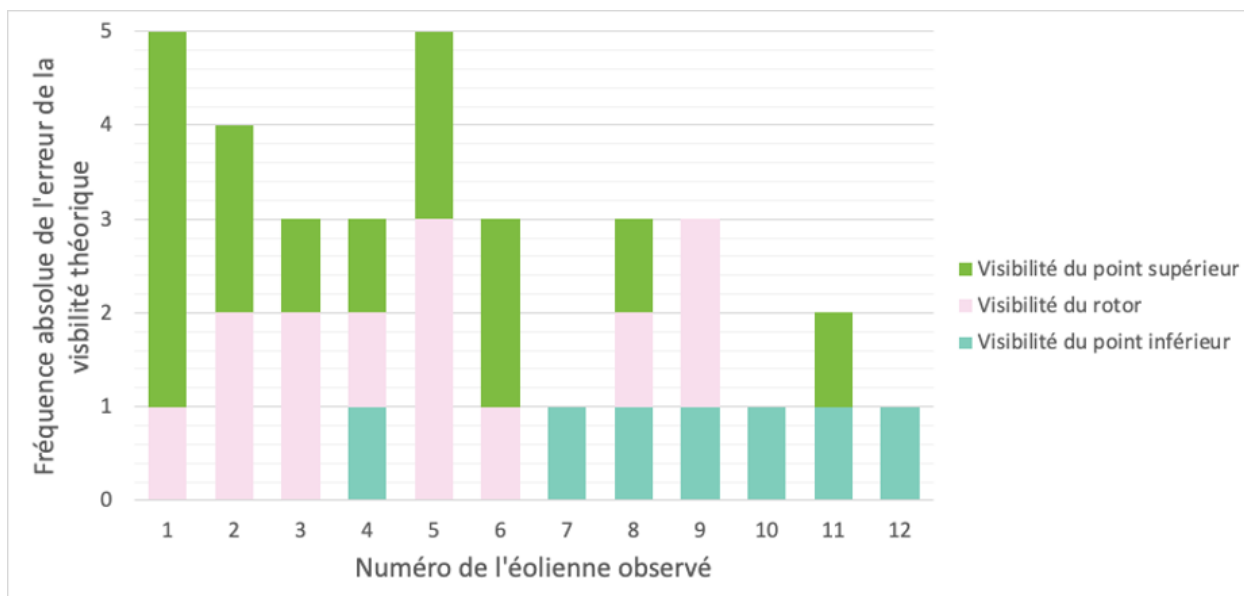


Figure 24 : Différence entre le calcul et le terrain pour les éoliennes d'un parc proche (6 éoliennes) et éloigné (6 éoliennes) en fonction du niveau de visibilité.

L'erreur pour les éoliennes du parc éloigné est supérieure à l'erreur pour le parc proche.

Pour les éoliennes proches l'erreur est surtout présente pour la visibilité du point inférieur. Le taux de prédictions correctes pour le parc proche est de 87,5% pour le niveau inférieur, 93,75% pour le rotor et 95,8% pour le point supérieur.

Pour le parc éloigné le taux de prédictions correctes correspond à 97,9% pour le point inférieur, 79,2% pour le rotor et 75% pour le point supérieur.

Les taux de prédictions corrects pour tout parc confondu est de 92,7% pour le point inférieur, 86,5% pour le rotor et 85,4% pour le point supérieur.

4. Discussion

4.1. Carte des zones favorables

Les résultats indiquent que plus la hauteur de l'éolienne considérée est élevée, plus la surface favorable disponible et le nombre d'éoliennes potentielles installables diminue (tableaux 3 et 4). Ceci s'explique par l'existence de contraintes qui dépendent de la hauteur et du diamètre du rotor des éoliennes, comme la distance aux habitations du PDS, qui est de quatre fois la Htot des éoliennes considérées.

Le scénario « 180m » est celui qui conduit à l'estimation de productible la plus élevée (3958 GWh/an). Sa puissance inférieure au scénario « 210m » (5,6 MW et 6 MW respectivement) est plus que compensée par augmentation des surfaces favorables et du nombre de mâts installables.

Le fait d'avoir des éoliennes de taille plus élevée permet d'avoir accès à un vent plus rapide (FEBEG, 2022), de réduire l'impact sonore, car la source du bruit se trouve plus loin (FEBEG, 2022) et d'avoir un diamètre de rotor plus grand et donc par conséquence une puissance plus importante (FEBEG, 2022).

L'installation d'éoliennes plus grandes permet donc une production supérieure pour moins de mâts installés, ceci permet de réduire de façon globale l'impact visuel, la pression sur l'avifaune et de limiter la dégradation de l'habitat (FEBEG, 2022), mais l'impact visuel local peut rester le même ou être plus important en fonction des distances fixées.

Il est important de noter que le productible électrique potentiel réel est certainement plus élevé, car la carte vent utilisé pour définir les zones favorables est obsolète et qu'une équation a été utilisée pour calculer le productible. Le productible électrique potentiel étant de 3958 GWh/an et le productible déjà en place étant d'environ 2700 GWh/an, l'objectif de la Wallonie d'atteindre 4600 GWh/an de productible éolien avant 2030 est atteignable, et pourrait même être dépassé. En effet, un repowering des anciennes éoliennes est en cours, ce qui pourrait potentiellement augmenter le productible. Aussi, il a été estimé par FEBEG (2022) que pour atteindre l'objectif il faudrait 300 éoliennes de 150m ou 233 de 180 m ce qui est largement faisable, car les résultats obtenus ici prévoient 750 éoliennes potentielles pour le modèle de 150 m et 457 pour le modèle de 180 m. Cependant, il ne faut pas oublier que l'obtention du permis d'installation, la réalisation de l'EIE et l'installation d'éoliennes en elle-même prennent du temps, ce qui ralentit la réalisation de l'objectif.

Lors de la simulation d'éoliennes et leur vérification, aucune limite inférieure ou supérieure quant au nombre de mâts à installer par parc n'a été fixé, ce qui conduit à avoir la majorité des parcs avec moins de 5 éoliennes. Ce choix a été fait afin de connaître le potentiel total d'éoliennes installables en Wallonie, mais en réalité les parcs avec au moins cinq éoliennes sont prioritaires (GW, 2013).

Le type d'affectation du sol qui rassemble le plus d'éoliennes potentielles (près de 66%) est la zone agricole. Celle-ci est souvent représentée par des zones ouvertes, sans obstacles visuels ou auditifs, qui permet une longue vision et une bonne portance de bruit, ce qui conduit à une augmentation de l'impact visuel et acoustique (Katinas et al., 2016). Pour remédier à cela, il est possible d'installer une barrière végétale par exemple (Katinas et al., 2016) qui pourrait, si installée d'une certaine manière, favoriser la biodiversité en servant de maillage écologique.

Il est important de préciser que, grâce aux avancées technologiques, l'impact sonore à la base des éoliennes reste autour des 100 dB(A), peu importe la puissance de l'éolienne^{6,7,8,9}.

Le deuxième type d'affectation du sol qui rassemble le plus d'éoliennes potentielles (environ 29,5%) est la zone forestière. Ce nombre est bien plus élevé que pour les éoliennes déjà installées (1,9%) ce qui montre qu'autoriser l'installation de mâts en forêts résineuses permet de débloquent du potentiel éolien. Toutefois, étant plus proche de la faune, cela pourrait conduire à plus de réticences pour faire accepter le projet. Aussi, si une certaine espèce d'oiseaux est trouvée à proximité, le projet devra être supprimé, modifié ou il devra y avoir un bridage (DGO4, 2022). Au mieux cela conduira à une perte de productible.

La grande majorité des PADR ont une occupation visuelle inférieure à 15%, ce qui est une valeur acceptable. Pour éliminer complètement l'impact visuel il faudrait avoir une occupation visuelle de 12%, ce qui correspond environ à quatre fois la Htot de l'éolienne.

Les surfaces favorables disponibles en 2022 pour le scénario « 150m » sont proches aux surfaces disponibles en 2013 même si entre-temps des éoliennes ont été installées. Ceci peut s'expliquer par le changement de certaines mesures comme l'autorisation d'installer des éoliennes en forêts résineuses.

Le code appliqué sur les éoliennes déjà en place prévoit que 23 éoliennes ne respectent pas les contraintes d'encerclement; ceci montre que le code utilisé est plus pessimiste que la réalité car, il ne prend pas en compte les obstacles visuels, ce qui élimine des éoliennes simulées qui auraient pu être acceptées. Aussi les éoliennes existantes se trouvent à une distance inférieure des PADR que les éoliennes potentielles (surtout pour les PADR en zone 'Agricole' et 'Habitat à caractère rural'), car elles n'ont pas forcément eu les mêmes contraintes à l'installation.

Il est important de préciser que les zones favorables décrites ici ne représentent pas à 100 % la réalité du terrain. Effectivement, les couches sources ne sont pas toutes à jour (certaines sont celles utilisées en 2013) et leur degré de précision n'est pas très fin. De plus, dans la réalité, les éoliennes ne peuvent pas être installées de la façon la plus efficace pour économiser de l'espace, car elles doivent suivre les lignes de force du paysage qui sont déterminées lors de l'EIE, pour réduire leur pression visuelle (GW, 2013). Une première approximation a été faite au niveau des éoliennes en projet pour lesquelles leur hauteur et leur diamètre de rotor n'étaient pas disponibles au commencement du travail. Une autre approximation a été faite avec les PADR; en effet, ces points ne correspondent pas nécessairement à des habitations. La marge de sécurité qui doit être maintenue entre les pales et la canopée n'a pas été prise en compte, donc en réalité pour certaines éoliennes un rotor plus petit devra être pris en compte. Aussi, il a fallu faire des choix arbitraires pour des cas de figure qui ne sont pas réglementés par la loi. Par exemple, pour la distance considérée comme proche des infrastructures, une distance de 1 km a été considérée, ce qui correspond à la distance plus souvent citée dans la littérature (Spyridonidou, 2020). Un autre choix arbitraire a été d'ajouter la pente comme critère, car ce n'est pas une contrainte fixée par la loi. La pente choisie (7%) est la plus représentative des choix du terrain en Wallonie (Lejeune et al., 2013); cependant la valeur la plus souvent choisie pour ce critère est de 10% (Spyridonidou, 2020). Ceci peut avoir un impact assez important sur les résultats.

⁶ <https://www.energy-xprt.com/products/nordex-model-n117-3000-30-megawatts-wind-turbine-420014> (15/06/2022)

⁷ <https://www.enercon.de/technologie/anlagenfeatures/> (11/07/2022)

⁸ http://ventderaison.eu/grandrieu/eie_2012_SGS/annexes/ENERCON.pdf (15/06/2022)

⁹ <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v136-4-5-mw> (15/06/2022)

D'après Spyridonidou (2020) les critères les plus importants dans ce type d'études sont la vitesse du vent, et la proximité au réseau électrique à haute tension (Sánchez-Lozano et al., 2014). Pour le premier critère, la donnée n'est pas à jour. La valeur moyenne du deuxième critère est de 1,5 km (Spyridonidou, 2020), mais il n'est pas fixé comme contrainte en Wallonie. En mettant à jour la carte vent et en prenant en compte la distance au réseau électrique les résultats pourraient être plus proches de la réalité.

De plus, maintes recherches sont encore nécessaires au niveau mondial pour connaître les bonnes contraintes à appliquer et leurs limites et ou buffer respectifs (Spyridonidou, 2020).

Néanmoins, la méthode et le code utilisé dans ce travail sont corrects, il suffit de changer les données d'entrée avec des données mises à jour (qui pourraient éventuellement être complétées par des analyses sur le terrain afin de donner plus de précision), et pouvoir intégrer certains éléments qui n'ont pas été pris en compte ici. Le travail a pour but de fournir une idée de la surface disponible pour l'éolien, mais n'est en aucun cas assez précis pour être considéré comme représentatif à 100% de la réalité.

Influence de la distance à l'habitat du PDS et à l'habitat dispersé

La diminution de la distance à l'habitat implique une augmentation de l'occupation visuelle et donc une diminution de la qualité de vie.

Si la distance à l'habitat du PDS est diminuée à 400 m (scénario « dZhab400m »), cela devient problématique pour des éoliennes de Htot supérieure à 133 m. En effet, la distance correspond alors à moins de trois fois la Htot, qui n'est pas une distance acceptable pour les habitations.

Si la distance est diminuée à 600 m (scénario « dZhab600m »), en suivant la même logique que pour l'autre scénario, elle est acceptable pour des éoliennes de Htot inférieure à 200 m.

D'un point de vue productible, le scénario « dZhab400m » est le plus élevé, cependant c'est également le scénario qui a le plus grand impact visuel. La distance actuellement en place, semble permettre un bon équilibre entre le productible et le bien être des habitants, une diminution de la hauteur jusqu'à trois fois la Htot serait acceptable.

Les résultats pour l'analyse de la distance à l'habitat dispersé indiquent qu'augmenter la distance pour avoir le même impact visuel que les éoliennes de référence en 2013 (scénario « dhabiD 514m »), provoque une diminution du productible de 194 GWh/an. Cette diminution n'est pas très importante, mais la qualité de vie des habitants est potentiellement nettement augmentée, car proche de trois fois la Htot. Cette différence serait plus grande si des éoliennes de 210 m de haut auraient été considérées, car la distance à considérer est plus importante (tableau 2).

L'augmentation de cette distance à quatre fois la Htot (scénario « dhabiD 4htot ») conduit à une perte de potentiel plus importante (de 1132 GWh/an) et semble être une distance excessive, surtout en considérant que les pays avoisinants (si des distances limites sont fixées) ont des distances ne dépassant pas les 500 m (FEBEG, 2022).

La distance actuelle de 400 m est trop faible pour les éoliennes futures qui pourraient être significativement plus grandes. En effet, il faudrait une distance variant avec la Htot comme c'est le cas pour la distance à l'habitat du PDS. L'idéal serait donc d'augmenter cette distance à trois fois la Htot. Ceci permettrait d'augmenter la qualité de vie en réduisant l'impact sonore et visuel des éoliennes.

4.2. Impact visuel

Le modèle étudié ici a donné des résultats assez satisfaisants.

Le parc proche a un taux de prédictions correctes plus élevé que le parc éloigné (entre 87,5% et 95,8% contre 75% et 97,9%). L'erreur est plus élevée pour le parc éloigné, qui s'explique par la plus grande difficulté à le voir, ce qui traduit un plus faible impact visuel. Il serait donc utile dans le futur d'inclure la distance au parc dans les paramètres, car elle a un effet important sur l'impact visuel; en effet, la différence entre voir une éolienne dans son entièreté à quelques mètres et voir une éolienne à plusieurs km est importante (voir images en annexes 9 à 11).

Les erreurs de la visibilité théorique peuvent être expliquées par la croissance de la végétation. En effet, même si les données LiDAR utilisées sont récentes, la végétation peut changer rapidement et avoir un impact important. L'erreur peut également être expliquée par un arrêt potentiel de l'éolienne dans une configuration qui ne permet pas sa visibilité.

Aussi, plus une éolienne est distante, plus il sera difficile d'en voir la partie supérieure, car d'une part cette partie sera de plus en plus petite, et d'autre part, parce-que la visibilité théorique considère que la partie supérieure est visible même si uniquement une extrémité infiniment petite de l'hélice est visible, ce qui est difficile voire impossible à déterminer sur le terrain.

Dans un deuxième temps, il serait intéressant d'appliquer cette méthode à toute la région, car même si elle n'est pas parfaite, elle permettrait d'avoir une vérification du critère d'encerclement plus correct, et donc de garder plus d'éoliennes. Cependant, pour avoir une précision maximale il faudrait prendre les données LiDAR avec une résolution de 1m x 1m et non rééchantillonné comme ici, ce qui augmenterait de façon considérable le temps de calcul, surtout si étendu à toute la région.

Pour aller plus loin, il serait possible de prendre en compte la distorsion des éoliennes vus par l'œil humain, ce qui éviterait une surestimation de la visibilité (Minelli et al., 2014).

Il serait également possible de déterminer des zones où les éoliennes ne sont pas visibles à partir de zones naturelles, habitables et autres, afin de les définir comme zones prioritaires (Alphan, 2021). Ceci permettrait de protéger la 'naturalité' de certains espaces protégés ou touristiques et de réduire l'impact visuel global. Il serait également intéressant dans le futur de prendre en compte l'occupation visuelle, ou alors de considérer des seuils de distance à partir desquels même si une éolienne est visible elle peut être négligée (ex à partir de 3 km la visibilité du rotor pourra être négligée).

Une étude visant à déterminer l'acceptation des éoliennes par la population est nécessaire pour connaître les limites des habitants et leur contrariété face au sujet.

5. Conclusion et perspectives

Les résultats ont donc montré que les surfaces favorables diminuent en fonction de la hauteur des éoliennes.

L'électricité produite par unité de surface pour les éoliennes étant plus faible que pour certaines autres sources (Masurowski et al., 2016). Il est préférable d'installer en plus petit nombre des éoliennes plus grandes et plus puissantes, plutôt que plusieurs petites et moins performantes (FEBEG, 2022). Ceci est d'autant plus important dans une région petite, densément peuplée avec de nombreux sites naturels à protéger comme la Wallonie.

Quant aux distances en place, celle pour les habitations du PDS est acceptable mais la distance à l'habitat dispersé est devenue obsolète et devrait être remplacée par une distance dépendant de la Htot. Une distance de trois fois la Htot semble être un bon compromis entre le productible électrique potentiel et la qualité de vie des habitants.

Les mesures en place permettent de débloquer du potentiel éolien, notamment en autorisant l'installation en forêt résineuse; et permettent également d'avoir une occupation visuelle assez faible pour la grande majorité des PADR.

Pour éliminer complètement l'impact visuel, l'occupation visuelle devrait être inférieure à 12% ce qui correspond à une distance d'environ quatre fois la Htot.

Aussi, la majorité des éoliennes potentielles se trouvent en zone agricole, ce qui augmente l'impact visuel et sonore potentiel, cependant l'impact sonore n'augmente pas en parallèle avec la puissance (FEBEG, 2022).

L'analyse de la visibilité sur le terrain n'est pas infaillible: une éolienne peut par exemple être en arrêt de façon à ce qu'elle ne puisse pas être perçue. Aussi, même si les données LiDAR utilisées proviennent de cette année, la végétation change et peut obscurcir une partie de l'horizon ou, à l'inverse, rendre visible une partie. Néanmoins, la méthode proposée pour évaluer l'impact visuel est utilisable.

L'outil mis en place ici est pessimiste, car il ne prend pas en compte les obstacles visuels, mais fonctionne et permet d'avoir des résultats cohérents.

Afin de pouvoir produire des résultats plus proches de la réalité il faudrait obtenir des couches d'entrée plus précises et mises à jour, des informations plus complètes pour les éoliennes planifiées, des points habitations qui représentent uniquement les habitations, une carte vent mise à jour pour les nouveaux modèles et potentiellement une analyse sur le terrain pour certaines contraintes, afin d'avoir des données très précises. Il faudrait également prendre en considération la marge de sécurité entre la canopée et les pales du rotor; et qu'en réalité les éoliennes doivent suivre les lignes de force présentes dans le paysage et ne peuvent donc pas toujours être disposées de façon à occuper la surface de la manière la plus efficace possible. De plus, il faudrait avoir des valeurs fixes quant à ce que vaut la distance considérée comme proche des infrastructures. Aussi il faudrait, peut-être à l'image d'autres pays, considérer la distance aux réseaux électriques à haute tension comme critère (Sánchez-Lozano et al., 2014; Spyridonidou, 2020).

Il serait utile d'intégrer une méthode d'analyse de visibilité pour tout le territoire. Pour aller plus loin, il serait possible de prendre en compte la déformation des éoliennes vues par l'œil humain (Minelli et al., 2014) et/ou déterminer les zones où les éoliennes n'auraient pas un impact visuel et de les définir comme prioritaires (Alphan, 2021).

En conclusion, de nombreux aspects devront être améliorés. Néanmoins, le scénarios de base prévoit un potentiel productible de 3958 GWh/an, cette valeur étant fixée par un code pessimiste, la Wallonie est largement capable d'atteindre son but de 4600 GWh/an en termes d'éolien avant 2030, il ne reste plus qu'à les installer.

6. Bibliographie

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France) & Département Énergies renouvelables (ADEME), 2001. *Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens*, Valbonne: ADEME.
- Alphan H., 2021. Modelling potential visibility of wind turbines: A geospatial approach for planning and impact mitigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **152**, 111675, DOI:10.1016/j.rser.2021.111675.
- Bunzel K., Bovet J., Thrän D. & Eichhorn M., 2019. Hidden outlaws in the forest? A legal and spatial analysis of onshore wind energy in Germany. *Energy Research & Social Science* **55**, 14–25, DOI:10.1016/j.erss.2019.04.009.
- Danese M., Nolè G. & Murgante B., 2011. Identifying Viewshed: New Approaches to Visual Impact Assessment. In: Murgante, B., Borruso, G., Lapucci, A. eds. *Geocomputation, Sustainability and Environmental Planning, Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 73–89.
- Ejdemo T. & Söderholm P., 2015. Wind power, regional development and benefit-sharing: The case of Northern Sweden. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **47**, 476–485, DOI:10.1016/j.rser.2015.03.082.
- Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières (FEBEG), 28 Mars 2022. De la distance des éoliennes aux habitations Enjeux et perspectives.
- Gibbons S., 2015. Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices. *Journal of Environmental Economics and Management* **72**, 177–196, DOI:10.1016/j.jeem.2015.04.006.
- Gouvernement wallon (GW), 2013. Cadre de référence pour l'implantation d'éoliennes en région wallonne version du 11 juillet 2013, 46. <https://energie.wallonie.be/fr/cadre-de-referance-pour-l-implantation-d-eoliennes-en-region-wallonne.html?IDD=11176&IDC=6170>
- Commission nationale climat (CNC) et CONCERNE, 2019. Plan National intégré Energie Climat Belge 2021-2030 (approuvé par le comité de concertation du 18/12/19), 629. <https://www.plannationalenergieclimat.be/fr>
- Guan J, 2020. Optimizing the visual impact of onshore wind farms upon the landscapes – Comparing planning approaches in China and Germany. Thèse de doctorat : Ruhr-Universität Bochum Faculty of Geosciences (Germany).
- Harding G., Harding P. & Wilkins A., 2008a. Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy: Characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them. *Epilepsia* **49**(6), 1095–1098, DOI:10.1111/j.1528-1167.2008.01563.x.
- Hevia-Koch P. & Ladenburg J., 2019. Where should wind energy be located? A review of preferences and visualisation approaches for wind turbine locations. *Energy Research & Social Science* **53**, 23–33, DOI:10.1016/j.erss.2019.02.010.

- Ioannidis R., Mamassis N., Efstratiadis A. & Koutsoyiannis D., 2022. Reversing visibility analysis: Towards an accelerated a priori assessment of landscape impacts of renewable energy projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **161**, 112389, DOI:10.1016/j.rser.2022.112389.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2022. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. 352. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency www.irena.org/publications
- Jensen C.U., Panduro T.E. & Lundhede T.H., 2014. The Vindication of Don Quixote: The Impact of Noise and Visual Pollution from Wind Turbines. *Land Economics* **90**(4), 668–682, DOI:10.3368/le.90.4.668.
- Katinas V., Marčiukaitis M. & Tamašauskienė M., 2016. Analysis of the wind turbine noise emissions and impact on the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **58**, 825–831, DOI:10.1016/j.rser.2015.12.140.
- Kupiec M. & Dusza-Zwolinska E., 2021. Visibility Analysis as A Tool in Visual Impact Analysis Procedures for Environmental Impact Assessment in Agricultural Landscapes. 14, Cordoba : 37th International Business Information Management Association Conference.
- Lee H.-J., Yoo S.-H. & Huh S.-Y., 2020. Public perspectives on reducing the environmental impact of onshore wind farms: a discrete choice experiment in South Korea. *Environ Sci Pollut Res* **27**(20), 25582–25599, DOI:10.1007/s11356-020-08949-0.
- Lejeune P., Feltz C. & Fourneau F., 2013. ELABORATION D'UNE CARTE POSITIVE DE REFERENCE TRADUISANT LE CADRE ACTUALISE, ASSOCIEE A UN PRODUCTIBLE MINIMAL PAR LOT PERMETTANT DE DEVELOPPER LE GRAND EOLIEN EN WALLONIE A CONCURRENCE DE 3.800 GWH A L'HORIZON 2020 - DOSSIER METHODOLOGIQUE (11 juillet 2013). 66, Gembloux : Agro-Bio tech Gembloux.
- Masurowski F., Drechsler M. & Frank K., 2016. A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany. *Energy Policy* **97**, 343–350, DOI:10.1016/j.enpol.2016.07.021.
- Minelli A., Marchesini I., Taylor F.E., De Rosa P., Casagrande L. & Cenci M., 2014. An open source GIS tool to quantify the visual impact of wind turbines and photovoltaic panels. *Environmental Impact Assessment Review* **49**, 70–78, DOI:10.1016/j.eiar.2014.07.002.
- Möller B., 2006. Changing wind-power landscapes: regional assessment of visual impact on land use and population in Northern Jutland, Denmark. *Applied Energy* **83**(5), 477–494, DOI:10.1016/j.apenergy.2005.04.004.
- Möller B., 2010. Spatial analyses of emerging and fading wind energy landscapes in Denmark. *Land Use Policy* **27**(2), 233–241, DOI:10.1016/j.landusepol.2009.06.001.

- Palmer J.F., 2019. The contribution of key observation point evaluation to a scientifically rigorous approach to visual impact assessment. *Landscape and Urban Planning* **183**, 100–110, DOI:10.1016/j.landurbplan.2018.11.001.
- Palmer J.F., 2022. Deconstructing viewshed analysis makes it possible to construct a useful visual impact map for wind projects. *Landscape and Urban Planning* **225**, 104423, DOI:10.1016/j.landurbplan.2022.104423.
- Raman G., Ramachandran R.C. & Aldeman M.R., 2016. A review of wind turbine noise measurements and regulations. *Wind Engineering* **40**(4), 319–342, DOI:10.1177/0309524X16649080.
- Regionales Raumordnungsprogramm (RROP) 2016, 2021. Windenergiekonzept Kurzfassung. *Änderung (Windenergie une Natur + Landschaft) Anlage 04 (03.09.2022)* **33**.
- Rideout K., Copes R., & Bos C., 2010. Wind turbines and health. *National Collaborating Centre for Environmental Health*. https://www.nccch.ca/sites/default/files/Wind_Turbines_January_2010.pdf
- Saidur R., Rahim N.A., Islam M.R. & Solangi K.H., 2011. Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**(5), 2423–2430, DOI:10.1016/j.rser.2011.02.024.
- Sánchez-Lozano J.M., García-Cascales M.S. & Lamata M.T., 2014. Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region of Murcia, Spain. *Energy* **73**, 311–324, DOI:10.1016/j.energy.2014.06.024.
- SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Énergie (DGO4), 2022. Code du Développement territorial (version du 10 mai 2022) 377. http://lampspw.wallonie.be/dgo4/site_aménagement/index.php/juridique/codt
- SPW Territoire, Logement, Patrimoine (DGO4) Département de l'Énergie et du Bâtiment durable Énergie, 2022. Le développement éolien en Wallonie, 58. Belgique: SPW / EDIWALL, ISBN : 978-2-8056-0393-8
- Sklenicka P. & Zouhar J., 2018. Predicting the visual impact of onshore wind farms via landscape indices: A method for objectivizing planning and decision processes. *Applied Energy* **209**, 445–454, DOI:10.1016/j.apenergy.2017.11.027.
- Smedley A.R.D., Webb A.R. & Wilkins A.J., 2009. Potential of wind turbines to elicit seizures under various meteorological conditions: Wind Turbines and Epilepsy. *Epilepsia* **51**(7), 1146–1151, DOI:10.1111/j.1528-1167.2009.02402.x.
- Spyridonidou S. & Vagiona D.G., 2020. Systematic Review of Site-Selection Processes in Onshore and Offshore Wind Energy Research. *Energies* **13**(22), 5906, DOI:10.3390/en13225906.
- Tercan E., 2021. Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **47**, 101491, DOI:10.1016/j.seta.2021.101491.

7. Annexe

Tableau reprenant les packages utilisés

Annexe 1 : Tableau reprenant les packages et certaines fonctions utilisées dans le cadre du travail (source : <https://cran.r-project.org/web/packages>)

Package	Version	Utilité
DescTools	0.99.44	Une collection de diverses fonctions statistiques de base et de ' <i>convenience wrappers</i> ' pour décrire efficacement les données. Le but est de faciliter les premières tâches descriptives de l'analyse des données, à savoir le calcul des statistiques descriptives, l'élaboration de résumés graphiques et la communication des résultats.
dplyr	1.0.8	dplyr est une grammaire de la manipulation des données, fournissant un ensemble cohérent de verbes qui vous aident à résoudre les problèmes de manipulation de données les plus courants (<i>mutate()</i> , <i>select()</i> , <i>filter()</i> , <i>summarise()</i> , <i>arrange()</i>)
fasterize	1.0.3	La fonction principale, <i>fasterize()</i> , prend les mêmes entrées que <i>raster::rasterize()</i> mais a actuellement moins d'options et est limitée à la rasterisation des polygones.
furrr	0.3.0	Permet d'utiliser des fonctions de cartographie en parallèle en utilisant des futurs
future	1.26.1	Traitement parallèle et distribué unifié dans R pour tous
gdalUtils	2.0.3.2	Le paquet 'sf' de R est livré avec des exécutables 'GDAL' autonomes, y compris une interface de base pour plusieurs programmes utilitaires liés à 'GDAL', connus collectivement sous le nom de 'GDAL utilities'. Pour chacun de ces utilitaires, ce package fournit une enveloppe R dont les arguments formels reflètent étroitement ceux de l'interface de ligne de commande 'GDAL'.
glue	1.6.2	Glue offre des littéraux de chaînes interprétés qui sont petits, rapides et sans dépendance. Glue le fait en incorporant des expressions R dans des accolades qui sont ensuite évaluées et insérées dans la chaîne d'arguments.
ngeo	0.4.5	Recherche du K-plus proche voisin pour les couches spatiales 'sf' projetées et non projetées. Le package comprend également plusieurs autres fonctions utilitaires pour l'analyse spatiale.
qgisprocess	0.0.0.9000	L'objectif de qgisprocess est de fournir une interface R au programme populaire et open source de système d'information géographique (SIG) de bureau QGIS.
raster	3.5-15	Écriture, lecture, manipulation, analyse et modélisation de données spatiales. Le package met en œuvre des fonctions de base et de haut niveau pour des données raster et pour des opérations sur données vectorielles telles que les intersections.
rgdal	1.5-28	Fournit des liens vers la bibliothèque d'abstraction de données "géospatiales" ("GDAL") (>= 1.11.4) et un accès aux opérations de projection/transformation de la bibliothèque "PROJ". Les classes définies dans le paquet 'sp' sont utilisées. Les données cartographiques raster et vectorielles peuvent être importées dans R, et les objets raster et vectoriels 'sp' exportés.
rmapshaper	0.4.6	Donne accès à l'outil mapshaper, qui dispose à la fois d'un outil en ligne de commande Node.js et d'un outil web interactif.
sf	1.0-7	Prise en charge des 'simple feature', une manière standardisée d'encoder les données spatiales vectorielles. Se lie à 'GDAL' pour la lecture et l'écriture de données, à 'GEOS' pour les opérations géométriques, et à 'PROJ' pour les conversions de projection et les transformations de datum. Utilise par défaut le paquet 's2' pour les opérations de géométrie sphérique sur des coordonnées ellipsoïdales (long/lat).
spatialEco	1.3-7	Utilitaires permettant la manipulation, l'interrogation, l'échantillonnage et la modélisation de données spatiales. Les fonctions comprennent des modèles pour la densité de population des espèces, des utilitaires de téléchargement pour les produits spatiaux relatifs au climat et à la déforestation mondiale, le lissage spatial, la séparabilité multivariable, un modèle de processus ponctuel pour la création de pseudo-absences et le sous-échantillonnage, des mesures de paysage par polygone et par distance ponctuelle, un modèle auto-logistique, des modèles d'échantillonnage, l'optimisation des grappes, des outils d'exploration statistique et des mesures basées sur des raster.
terra	1.5-2.1	Le package ' <i>terra</i> ' est similaire au package ' <i>raster</i> ' mais est plus rapide, facile et contient plus de fonctionnalités. Il y a des méthodes d'analyse de données spatiales avec des données raster et vectorielles. Les méthodes raster permettent une manipulation des données à bas niveau ainsi que le calcul global, local, zonal et focal à haut niveau. Les méthodes ' <i>predict</i> ' et ' <i>interpolate</i> ' facilitent l'utilisation de modèles de type régression (interpolation, apprentissage automatique) pour la prédiction spatiale, y compris avec des données de télédétection par satellite. Le traitement de très gros fichiers est pris en charge.
tidyverse	1.3.1	Ce package est un ensemble de paquets qui fonctionnent en harmonie parce qu'ils partagent des représentations de données et une conception "API" communes. Ce paquet est conçu pour faciliter l'installation et le chargement de plusieurs paquets "tidyverse" en une seule étape.

Tableaux reprenant les contraintes et leur modification par rapport à 2013

Annexe 2 : Tableau qui décrit les contraintes intégrales de base pour l'étude avec en gris les modifications majeurs par rapport à 2013.

Catégorie	Définition 2013	Modifications
Incompatibilité technique	Plans d'eau	
	Zones d'extraction	
	Zones de pente	
Zonage du plan de secteur	Zones forestières du plan de secteur	Création : Forêts feuillues Création : Forêts résineuses sauf 750 m des PIC
	/	Création : Zones agricoles sauf 1,5 km des PIC et des zones d'activité économiques
	Zones d'espaces verts du plan de secteur	
	Zones naturelles du plan de secteur	
	Zones de parc du plan de secteur	
Sécurité des infrastructures	Réseau ferroviaire et réseau ferroviaire à grande vitesse	Séparé en : Réseau ferroviaire Séparé en : Réseau ferroviaire à grande vitesse
	Réseau électrique à haute tension	Buffer modifié à 1.5*diamètre rotor
	/	Création : Routes avec un buffer de 1.5*la longueur de la pale
	/	Création : Autoroutes avec un buffer de la longueur de la pale
Sécurité dans les zones à risque	Zones inondables	
	Zones à risque de glissement de terrain	
	Zones à risque karstique	
	Zones de prévention rapprochée des captages	
Aéronautique	Zones de contrôle des aéroports civils	Fusion : Aéronautique civile
	Zones à risque d'interférence avec les radars et balises de l'espace aérien civil	
Défense nationale	Zonage de l'espace aérien selon ses usages militaires	Fusion : Défense nationale
	Distance aux radars de la Défense nationale	
	Zones de contrôle des aéroports militaires	
Patrimoine immobilier	Sites classés	
Patrimoine naturel	Réserves naturelles et réserves forestières	
	Zones Humides d'Intérêt Biologique	
	Cavités Souterraines d'Intérêt Scientifique	
	Sites NATURA2000	
Biodiversité	Zones d'intérêt ornithologique à niveau de priorité élevé	
Paysage	Préservation des paysages	
Cadre de vie	Zone d'habitat du plan de secteur	Buffer modifié à 4*hauteur totale
	Habitat hors de la zone d'habitat du plan de secteur	
Scientifique	Station de radioastronomie de Humain et Radar de l'IRM	

Annexe 3 : Tableau qui décrit les contraintes partielles de base pour l'étude avec en gris les modifications majeurs par rapport à 2013.

Catégorie	Définition 2013	Modifications
Biodiversité	Zones d'intérêt ornithologique à niveau de priorité moyen	
	Zones d'intérêt pour les chauves-souris	
	Zones de concentration des migrations d'oiseaux et de chauves-souris	
	Structure écologique principe	
Aéronautique	Zones à risque d'interférence avec les radars et balises de l'espace aérien civil (distance 8 km – 16 km)	
Défense nationale	Zones à risque d'interférence avec les radars et balises de l'espace aérien militaire (distance 8 km – 16 km)	
Cadre de vie	Habitat hors de la zone d'habitat du plan de secteur	(distance 400-600 m)

Tableaux reprenant les information relatives aux données utilisées

Annexe 4 : Tableau reprenant toutes les informations relatives à la création des couches.

Liste contraintes	Fichier d'origine	Buffer	Description	Date téléchargement	Date mise à jour
Zones de pente	2013	0	Pente supérieure à 7%	/	/
Forêts résineuses	Lejeune et al., 2022	OK : zones à moins de 750 m des PIC	Carte de proportion des essences forestières produite pour l'année 2021 dans le cadre du projet CARTOFOR	juin-22	/
Forêts feuillues	SPW	0	/	11-mars-22	07-mars-22
Zones agricoles du plan de secteur	SPW	OK: zones à moins de 1,5km des PIC & zones d'activité économique	/	11-mars-22	07-mars-22
Plans d'eau	SPW	0	/	11-mars-22	07-mars-22
Zones d'extraction	SPW	0	/	11-mars-22	07-mars-22
Zones d'espaces verts du plan de secteur	SPW	0	/	11-mars-22	07-mars-22
Zones naturelles du plan de secteur	SPW	0	/	11-mars-22	07-mars-22
Zones de parc du plan de secteur	SPW	INTERDIT : 1,5*longueur pale	/	11-mars-22	07-mars-22
Routes	SPW	INTERDIT : longueur pale	/	11-mars-22	07-mars-22
Autoroutes	SPW	50m	/	11-mars-22	07-mars-22
Réseau ferroviaire	SPW	190m	/	11-mars-22	07-mars-22
Réseau ferroviaire à grande vitesse	SPW	140 m	/	11-mars-22	07-mars-22
Réseau électrique à haute tension	SPW	0	/	11-mars-22	18-févr-21
Zones inondables (risque fort)	2013	0	/	/	/
Risque de glissement de terrain	2013	0	/	/	/
Zones à risque karstique	SPW	0	/	11-mars-22	10-mai-20
Zones de prévention rapprochée des captages	2013	Idem 2013	Modification apportée le 19 mai 2022	/	/
Aéronautique civile	2013	Idem 2013	Modification apportée le 19 mai 2022	/	/
Défense nationale	SPW	0	/	11-mars-22	10-févr-22
Sites classés	SPW	0	/	11-mars-22	07-déc-20
Réserves naturelles et réserves forestières	SPW	0	/	11-mars-22	07-déc-20
Zones humides d'intérêt biologique	SPW	0	/	11-mars-22	07-déc-20
Cavités Souterraines d'intérêt scientifique	SPW	0	/	11-mars-22	01-janv-17
Sites Natura 2000	DEGARNE	0	Même que 2013, car lié au CDR	/	/
Zones d'intérêt ornithologique à niveau de priorité élevé	2013	0	/	/	/
Préservation des paysages	2013	0	/	/	/
Zone d'habitat du plan de secteur	2013	INTERDIT : 4*hauteur totale	/	11-mars-22	07-mars-22
Station de radioastronomie à Humain et Radar de l'IRM à Wideumont	SPW	Idem 2013	/	/	/
Habitat hors de la zone d'habitat du plan de secteur	3E	INTERDIT : 400m	/	11-mars-22	07-mars-22
Champs éoliens existants (en fonctionnement ou en projet)	2013	0	/	04-avr	04-avr
Potentiel vent	2013	0	/	/	/

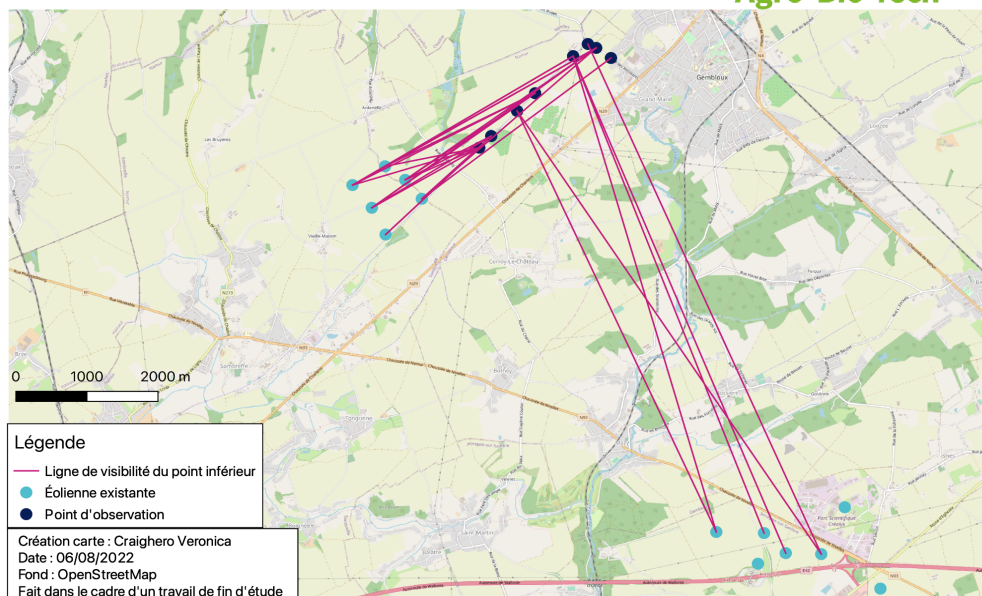
Le fichier d'origine 2013 veut dire que les mêmes cartes qu'en 2013 ont été utilisées.

Annexe 5 : Tableau reprenant toutes les informations relatives à la création des couches

Liste contraintes	Fichier d'origine	Buffer	Description	Date téléchargement	Date mise à jour
Zone d'intérêt ornithologique à niveau de priorité moyen	DEGARNE	0	/	/	/
Zones d'intérêt pour les chauves-souris	DEGARNE	0	/	/	/
Zones de concentration des migrations d'oiseaux et de chauves-souris	DEGARNE	0	/	/	/
Zone à risque d'interférence avec les radars et balises de l'espace aérien civil	2013	0	Modification apportée le 19 mai 2022	/	/
Zone à risque d'interférence avec les radars militaires	2013	0	Modification apportée le 19 mai 2022	/	/
Structure du paysage	2013	0	/	/	/

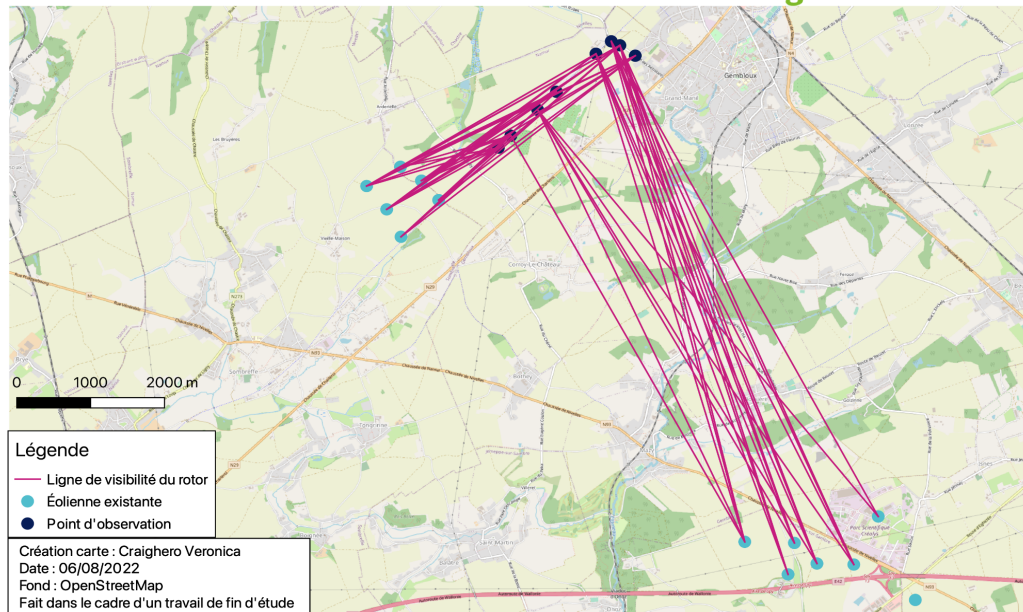
Analyse des carte des lignes de visibilité

Carte des lignes de visibilité du point inférieur



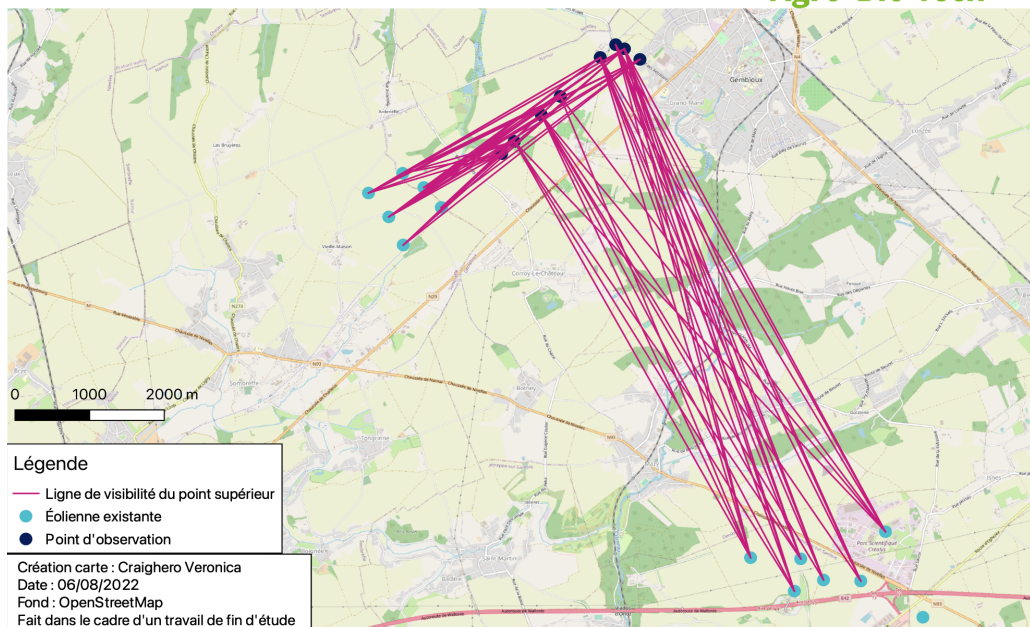
Annexe 6 : Carte reprenant le résultat du calcul de l'impact visuel pour la visibilité du point inférieur.

Carte des lignes de visibilité du rotor



Annexe 7 : Carte reprenant le résultat du calcul de l'impact visuel pour la visibilité du rotor.

Carte des lignes de visibilité du point supérieur



Annexe 8 : Carte reprenant le résultat du calcul de l'impact visuel pour la visibilité du point supérieur.

En comparant les annexes 6, 7 et 8 il est évident que plus un point considéré est en hauteur (point supérieur) plus il y a des lignes de visibilité et donc de visibilité possible.

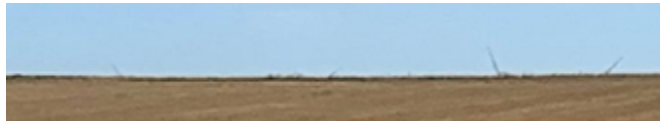
Comparaison de la visibilité

Les annexes 9 à 11 montrent l'influence de la distance sur l'impact visuel.



Annexe 9 : Image montrant l'impact de la distance sur l'impact visuel (caméra : ISO 25 130 mm f1.8 1/3521s).

L'annexe 9 montre que même si le point inférieur est visible la distance fait que les éoliennes sont à peine visibles.



Annexe 10 : Image montrant l'impact de la distance sur l'impact visuel (caméra : ISO 25 130 mm f1.8 1/3521s).

L'annexe 10 montre que même si le point supérieur est visible la distance fait que les éoliennes sont à peine visibles.



Annexe 11 : Image montrant l'impact de la distance sur la visibilité (caméra : ISO 25 98 mm f1.8 1/2994s)

L'annexe 11 montre que même si environ la même 'quantité' d'éolienne est vue les éoliennes qui sont très distantes sont difficilement visibles par rapport aux deux qui sont dans l'avant plan.